

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO ESCOLA DE QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

GUSTAVO CEZAR PEREIRA

O CONCEITO DE *DIGITAL TWIN* APLICADO À AVALIAÇÃO DINÂMICA DO SISTEMA DE DESPRESSURIZAÇÃO DE EMERGÊNCIA DE UMA UNIDADE DE HIDROTRATAMENTO DE DIESEL

Rio de Janeiro 2020

GUSTAVO CEZAR PEREIRA

O CONCEITO DE *DIGITAL TWIN* APLICADO À AVALIAÇÃO DINÂMICA DO SISTEMA DE DESPRESSURIZAÇÃO DE EMERGÊNCIA DE UMA UNIDADE DE HIDROTRATAMENTO DE DIESEL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.).

Orientadores: Maurício Bezerra de Souza Jr., D.Sc. Argimiro Resende Secchi, D.Sc.

Rio de Janeiro 2020 P436c

Pereira, Gustavo Cezar

O conceito de digital twin aplicado à avaliação dinâmica do sistema de despressurização de emergência de uma unidade de hidrotratamento de diesel. / Gustavo Cezar Pereira. -- Rio de Janeiro, 2020. 127 f.

Orientador: Maurício Bezerra de Souza Jr.. Coorientador: Argimiro Resende Secchi. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2020.

 digital twin. 2. simulação dinâmica. 3.
 hidrotratamento. 4. despressurização de emergência.
 camada de proteção. I. Souza Jr., Maurício Bezerra de, orient. II. Secchi, Argimiro Resende, coorient.
 III. Título.

O CONCEITO DE *DIGITAL TWIN* APLICADO À AVALIAÇÃO DINÂMICA DO SISTEMA DE DESPRESSURIZAÇÃO DE EMERGÊNCIA DE UMA UNIDADE DE HIDROTRATAMENTO DE DIESEL

GUSTAVO CEZAR PEREIRA

Dissertação submetida ao corpo docente do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

Aprovada por:

Prof. Maurício Bezerra de Souza Jr., D.Sc.

Prof. Maurício Bezerra de Souza Jr., D.Sc. (Orientador)

Prof. Argimiro Resende Secchi, D.Sc. (Coorientador)

Prof^a. Tânia Suaiden Klein, Ph.D.

Giane Ribeiro Stuart, D.Sc.

Rio de Janeiro 2020

Dedico esta importante conquista aos meus queridos pais, Jorge (em memória) e Vera, e as mulheres da minha vida, Artiane e Giovana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre iluminar e guiar meu caminho e ter me dado a capacidade de concluir essa importante etapa da minha formação, superando todos os obstáculos enfrentados.

Agradeço aos meus pais Jorge (em memória) e Vera, que me ensinaram os valores que balizaram meu caráter e minhas escolhas ao longo do caminho.

Agradeço a minha esposa Artiane e minha filha Giovana por toda a paciência e dedicação com que me apoiaram durante os últimos meses em tantas noites e finais de semana de muito trabalho.

Agradeço aos orientadores Maurício e Argimiro por terem arrumado um pouco mais de tempo em suas disputadas agendas como professores e pesquisadores para avaliar tantas ideias e versões deste trabalho, contribuindo de forma decisiva para seu sucesso, especialmente nas últimas semanas.

Agradeço aos demais professores do EPQB, que propiciaram a mim a formação complementar à engenharia química que buscava ao ingressar no programa.

Agradeço a Petrobras e ao gerente Fernando Oliveira por proporcionarem a minha participação no programa de pós-graduação.

Por fim, agradeço aos amigos, colegas de trabalho, em especial a Jorge Roberto Duncan Lima e Luciano Villanova de Oliveira, e a todos aqueles que contribuíram de alguma maneira para a realização desta dissertação.

RESUMO

PEREIRA, Gustavo Cezar. O Conceito de *Digital Twin* Aplicado à Avaliação Dinâmica do Sistema de Despressurização de Emergência de uma Unidade de Hidrotratamento de Diesel. Orientadores: Maurício Bezerra de Souza Jr. e Argimiro Resende Secchi. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

O conceito de Digital Twin compreende a reprodução digital de um componente, produto ou sistema real ao qual se deseja fazer intervenções e observações que podem ou não afetar a planta real, podendo ser aplicado somente à sua "gêmea" digital. Neste trabalho, o objetivo foi aplicar o conceito de Digital Twin na avaliação dinâmica do sistema de despressurização de emergência em uma unidade real de hidrotratamento de diesel - HDT, utilizando para isso o software Aspen HYSYS V10. Eventos como fogo ou descontrole de temperatura (runaway) podem elevar a temperatura rapidamente acima das condições de projeto dos equipamentos, linhas e instrumentos, e, nesse caso, há a necessidade de reduzir rapidamente a pressão da unidade, seja para reduzir a alimentação do vazamento, no caso de fogo, ou para reduzir a cinética das reações de HDT, que são bastante favorecidas pelo aumento da pressão parcial de hidrogênio. No desenvolvimento do Digital Twin, o modelo fenomenológico da planta foi implementado no HYSYS, considerando rigorosamente as dimensões reais dos equipamentos e as condições operacionais observadas na prática. Dados do processo foram usados para validar o modelo. Comparando a resposta do Digital Twin com o comportamento previsto pelos modelos simplificados, o Digital Twin apresenta uma despressurização mais rápida do que a prevista por esses modelos, sendo mais aderente aos eventos reais. Assim, na prática, o projeto do sistema de despressurização baseado nesses procedimentos simplificados acaba levando a planta para uma condição de segurança com taxas de despressurização maiores do que a desejada, expondo a planta a possíveis perdas de desempenho na continuidade operacional, caso ocorram danos em internos de equipamentos. Os resultados mostraram que o conceito de Digital Twin aplicado à simulação dinâmica da seção de alta pressão do HDT permite uma previsão mais aderente à realidade, permitindo realizar ajustes na metodologia de cálculo do procedimento de despressurização, de modo a produzir estratégias mais robustas.

Palavras-chave: *digital twin*, simulação dinâmica, hidrotratamento, despressurização de emergência, camada de proteção.

ABSTRACT

PEREIRA, Gustavo Cezar. The Digital Twin Concept Applied to the Dynamic Evaluation of a Diesel Hydrotreating Unit Emergency Depressurization System. Supervisors: Maurício Bezerra de Souza Júnior and Argimiro Resende Secchi. Rio de Janeiro, UFRJ/EQ, 2020. Dissertation (Graduate Program on Engineering of Chemical and Biochemical Process).

The Digital Twin concept comprises the digital reproduction of a real component, product or system. In this dissertation, the Digital Twin concept is applied in the evaluation of the emergency depressurization system of a real diesel hydrotreating unit (HDT). Events such as fire or temperature runaway can raise the temperature above equipment, lines and instruments design conditions, in which cases the unit pressure must be quickly reduced. Digital Twin has been implemented using HYSYS *software* and real process data has been used to validate the model. The Digital Twin model has been shown to be more adherent to real events data, with a depressurization rate higher than estimated by simplified models. Thus, the design of the depressurization system based on these simplified procedures leads to higher depressurization rates than those allowed to avoid equipment internals damage, exposing the plant to possible performance losses. Results here shown that the concept of Digital Twin applied to the dynamic simulation of the high pressure section of a HDT unit allows a more accurate prediction, making possible to carry out adjustments in the depressurization rate calculation methodology, generating more robust strategies.

Keywords: Digital Twin, Dynamic Simulation, Diesel Hydrotreating Unit, Emergency Depressurization, Protection Layer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2 - Esquemático simplificado do processo de HDT. 33 Figura 3 - Façuema simplificado de uma seção de carga de uma HDT. 35 Figura 4 - Exemplo de internos e carregamento do leito catalítico em reatores de HDT. 37 Figura 5 - Esquemático simplificado da seções de aquecimento, reação e resfriamento do uma IDT. 37 Figura 6 - Esquemático simplificado de HDT com separação a quente. 39 Figura 7 - Esquemático simplificado de HDT com separação a quente. 44 Figura 9 - Mudança de regime de resistência à tensão em função da temperatura. 45 Figura 10 - Configurações tipicas do sistema de despressurização de emergência em unidades de hidrotratamento 61 de disesl. 47 Figura 11 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade tipica de hidrotratamento de disesl. 47 Figura 12 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade tipica de hidrotratamento de disesl com a perosentação do sistema de despressurização a e ainstrumentação de segurança associada. 51 Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e suída do ain-cooler P03A. 64 Figura 16 - Esquemático do método iterativo para determinação do costumo de H2. 70 Figura 16 - Esquemático do astédo de altaretors and ecerção. 73 Figura 16 - Esquemático do método iterativo para determinação do costumo de H2. 72 Figura 21 -	Figura 1 - Venda de óleo diesel por Tipo	32
Figura 3 - Esquema simplificado de uma seção de carga de uma HDT. 35 Figura 4 - Exemplo de internos e carregamento do leito catalítico em reatores de HDT. 37 Figura 5 - Esquemático simplificado das seções de aquecimento, reação e resfriamento de uma HDT. 39 Figura 6 - Esquemático simplificado de HDT com separação a frio. 39 Figura 7 - Esquemático simplificado de HDT com separação a quente. 39 Figura 8 - Elevação de temperatura de placas de aço submetidas à poça aberta de fogo. 44 Figura 10 - Configurações típicas do sistema de despressurização de emergência em unidades de hidrotratamento de diesel. 47 Figura 11 - Esquemático da uma antriz causa e efeito de intertravamento. 51 Figura 12 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade típica de hidrotratamento de diesel com a representação do sistema de despressurização a a instrumentação de seguraça associada. 51 Figura 13 - Exemplo de Matriz causa e efeito para o cenário hipotético. 52 Figura 14 - Diagrama de processo simplificado a unidade real de HDT de diesel (trem A). 61 Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e saída do air-cooler P03A. 64 Figura 14 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H2. 70 Figura 21 - Reprodução o diluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à quente) e injeção de sigua da lavagem. 72	Figura 2 - Esquemático simplificado do processo de HDT	33
Figura 4 - Exemplo de internos e carregamento do leito catalítico em reatores de HDT. 37 Figura 5 - Esquemático simplificado das seções de aquecimento, reação e resfriamento de uma HDT. 37 Figura 6 - Esquemático simplificado de HDT com separação a quente. 39 Figura 7 - Esquemático simplificado de HDT com separação a quente. 39 Figura 8 - Elevação de temperatura de placas de aço submetidas à poça aberta de fogo. 44 Figura 9 - Mudança de regime de resistência à tensão em função da temperatura. 45 Figura 10 - Configurações típicas do sistema de despressurização de emergência em unidades de hidrotratamento de diesel. 47 Figura 11 - Esquemático de uma matriz causa e efeito de intertravamento. 51 Figura 12 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade típica de hidrotratamento de diesel com a representação do sistema de despressurização e a instrumentação de segurança associada. 51 Figura 13 - Exemplo de Matriz causa e efeito para o cenário hipotético. 52 Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e saída do air-cooler P03A. 64 Figura 16 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H2. 70 Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS, destacando as distintas seções simuladas. 72 Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à quente) e injeção de água de lavagem.	Figura 3 - Esquema simplificado de uma seção de carga de uma HDT	35
Figura 5 - Esquemático simplificado das seções de aquecimento, reação e resfriamento de uma HDT. 37 Figura 6 - Esquemático simplificado de HDT com separação a quente. 39 Figura 7 - Esquemático simplificado de HDT com separação a quente. 39 Figura 8 - Elevação de temperatura de placas de aço submetidas à poça aberta de fogo. 44 Figura 9 - Mudança de regime de resistência à tensão em função da temperatura. 45 Figura 10 - Configurações típicas do sistema de despressurização de emergência em unidades de hidrotratamento de diesel. 47 Figura 11 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade típica de hidrotratamento de diesel com a representação do sistema de despressurização e a instrumentação de seguraça associada. 51 Figura 12 - Esquemático da seção de alta pressão de una unidade típica de hidrotratamento de diesel com a representação do sistema de despressurização e a instrumentação de segurança associada. 51 Figura 13 - Exemplo de Matriz causa e efeito para o cenário hipotético. 52 Figura 14 - Diagrama de processo simplificado da unidade real de HDT de diesel (trem A). 61 Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e saida do air-cooler P03A. 64 Figura 17 - Esquemático do Balanço de Massa no HDT de diesel. 69 Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS destacando as distintas seções simuladas. 72 Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYS	Figura 4 - Exemplo de internos e carregamento do leito catalítico em reatores de HDT	37
Figura 6 - Esquemático simplificado de HDT com separação a frio. 39 Figura 7 - Esquemático simplificado de HDT com separação a quente. 39 Figura 8 - Elevação de temperatura de placas de aço submetidas à poça aberta de fogo. 44 Figura 9 - Mudança de regime de resistência à tensão em função da temperatura. 45 Figura 10 - Configurações típicas do sistema de despressurização de emergência em unidades de hidrotratamento de diesel. 47 Figura 11 - Esquemático de uma matriz causa e efeito de intertravamento. 51 Figura 12 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade típica de hidrotratamento de diesel com a representação do sistema de despressurização e a instrumentação de segurança associada. 51 Figura 13 - Exemplo de Matriz causa e efeito para o cenário hipotético 52 Figura 14 - Diagrama de processo simplificado da unidade real de HDT de diesel (trem A). 61 Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e saida do air-cooler P03A. 64 Figura 16 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H ₂ . 70 Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS, destacando as distintas seções simuladas. 72 Figura 20 - Simulação estática da seção de reação. 73 Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à quente) e injeção de água de lavagem. 74	Figura 5 - Esquemático simplificado das seções de aquecimento, reação e resfriamento de uma HDT	37
Figura 7 - Esquemático simplificado de HDT com separação a quente. 39 Figura 8 - Elevação de temperatura de placas de aço submetidas à poça aberta de fogo. 44 Figura 9 - Mudança de regime de resistência à tensão em função da temperatura. 45 Figura 10 - Configurações típicas do sistema de despressurização de emergência em unidades de hidrotratamento de diesel. 47 Figura 11 - Esquemático de uma matriz causa e efeito de intertravamento. 51 Figura 12 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade típica de hidrotratamento de diesel com a representação do sistema de despressurização e a instrumentação de segurança associada. 51 Figura 13 - Exequendático do Batriz causa e efeito para o cenário hipotético. 52 Figura 14 - Diagrama de processo simplificado da unidade real de HDT de diesel (trem A). 61 Figura 15 - Eviçaão da slinhas na entrada e saída do air-cooler P03A. 64 Figura 16 - Esquemático do Balanço de Massa no HDT de diesel. 69 Figura 17 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H2. 70 Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS, destacando as distintas seções simuladas. 72 Figura 20 - Simulação estática da seção de reação. 73 Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação á quente) e injeção de água de lavagem. 74 <t< td=""><td>Figura 6 - Esquemático simplificado de HDT com separação a frio</td><td> 39</td></t<>	Figura 6 - Esquemático simplificado de HDT com separação a frio	39
Figura 8 - Elevação de temperatura de placas de aço submetidas à poça aberta de fogo. 44 Figura 9 - Mudança de regime de resistência à tensão em função da temperatura. 45 Figura 10 - Configurações típicas do sistema de despressurização de emergência em unidades de hidrotratamento de diesel. 47 Figura 11 - Esquemático de uma matriz causa e efeito de intertravamento. 51 Figura 12 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade típica de hidrotratamento de diesel com a representação do sistema de despressurização e a instrumentação de segurança associada. 51 Figura 13 - Exemplo de Matriz causa e efeito para o cenário hipotético. 52 Figura 14 - Diagrama de processo simplificado da unidade real de HDT de diesel (trem A). 61 Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e saída do air-cooler P03A. 64 Figura 16 - Esquemático do Balanço de Massa no HDT de diesel. 69 Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS, destacando as distintas seções simuladas. 72 Figura 20 - Simulação estática da seção de reação. 73 Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à quente) e injeção de água de lavagem. 74 Figura 22 - Fluxograma da simulação estática destacando o compressor C01 e as válvulas de intertravamento, XV40 e XV42. 76 Figura 23 - Curvas de desempenho do compressor C01 inseridas no HYSYS. <	Figura 7 - Esquemático simplificado de HDT com separação a quente	39
Figura 9 - Mudança de regime de resistência à tensão em função da temperatura. 45 Figura 10 - Configurações típicas do sistema de despressurização de emergência em unidades de hidrotratamento de diesel. 47 Figura 11 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade típica de hidrotratamento de diesel com a representação do sistema de despressurização e a instrumentação de segurança associada. 51 Figura 13 - Exemplo de Matriz causa e efeito para o cenário hipotético. 52 Figura 14 - Diagrama de processo simplificado da unidade real de HDT de diesel (trem A). 61 Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e saída do air-cooler P03A. 64 Figura 16 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H2. 70 Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS, destacando as distintas seções simuladas. 72 Figura 19 - Bateria de pré-aquecimento e forno aquecedor. 73 Figura 20 - Simulação estática da seção de reação. 73 Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à quente) e injeção de água de lavagem. 74 Figura 22 - Fluxograma da simulação estática destacando o compressor C01 e as válvulas de intertravamento, XV40 e XV42. 75 Figura 23 - Curvas de desempenho do compressor C01 inseridas no HYSYS. 76 Figura 24 - Estratégia de controle do Gás de Reciclo. 76	Figura 8 - Elevação de temperatura de placas de aço submetidas à poça aberta de fogo	44
Figura 10 - Configurações típicas do sistema de despressurização de emergência em unidades de hidrotratamento 47 Figura 11 - Esquemático de uma matriz causa e efeito de intertravamento. 51 Figura 12 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade típica de hidrotratamento de diesel com a 51 Figura 13 - Exemplo de Matriz causa e efeito para o cenário hipotético. 52 Figura 13 - Exemplo de Matriz causa e efeito para o cenário hipotético. 52 Figura 14 - Diagrama de processo simplificado da unidade real de HDT de diesel (trem A). 61 Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e saída do air-cooler P03A. 64 Figura 16 - Esquemático do Balanço de Massa no HDT de diesel. 69 Figura 17 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H2. 70 Figura 19 - Bateria de pré-aquecimento e forno aquecedor. 73 Figura 20 - Simulação estática da seção de reação. 73 Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à quente) e injeção de água de lavagem. 74 Figura 23 - Curvas de desempenho do compressor C01 inseridas no HYSYS. 75 Figura 24 - Estratégia de controle do Gás de Reciclo. 76 Figura 25 - Configuração para reproduzir a interligação do Gás de Reciclo entre os trens de reações distintos. 77 Figura 26 - Simul	Figura 9 - Mudança de regime de resistência à tensão em função da temperatura	45
de diesel	Figura 10 - Configurações típicas do sistema de despressurização de emergência em unidades de hidrotrata	mento
Figura 11 - Esquemático de uma matriz causa e efeito de intertravamento	de diesel	47
Figura 12 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade típica de hidrotratamento de diesel com a representação do sistema de despressurização e a instrumentação de segurança associada. 51 Figura 13 - Exemplo de Matriz causa e efeito para o cenário hipotético. 52 Figura 14 - Diagrama de processo simplificado da unidade real de HDT de diesel (trem A). 61 Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e saída do air-cooler P03A. 64 Figura 16 - Esquemático do Balanço de Massa no HDT de diesel 69 Figura 17 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H2. 70 Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS, destacando as distintas seções simuladas. 72 Figura 20 - Simulação estática da seção de reação. 73 Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à 74 Figura 22 - Fluxograma da simulação estática destacando o compressor C01 e as válvulas de intertravamento, 74 XV40 e XV42. 75 Figura 25 - Configuração para reproduzir a interligação do Gás de Reciclo entre os trens de reações distintos	Figura 11 - Esquemático de uma matriz causa e efeito de intertravamento	51
representação do sistema de despressurização e a instrumentação de segurança associada	Figura 12 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade típica de hidrotratamento de diesel o	com a
Figura 13 - Exemplo de Matriz causa e efeito para o cenário hipotético	representação do sistema de despressurização e a instrumentação de segurança associada	51
Figura 14 - Diagrama de processo simplificado da unidade real de HDT de diesel (trem A). 61 Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e saída do air-cooler P03A. 64 Figura 16 - Esquemático do Balanço de Massa no HDT de diesel. 69 Figura 17 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H2. 70 Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS, destacando as distintas seções simuladas. 72 Figura 19 - Bateria de pré-aquecimento e forno aquecedor. 73 Figura 20 - Simulação estática da seção de reação. 73 Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à quente) e injeção de água de lavagem. 74 Figura 22 - Fluxograma da simulação estática destacando o compressor C01 e as válvulas de intertravamento, XV40 e XV42. 75 Figura 23 - Curvas de desempenho do compressor C01 inseridas no HYSYS. 76 Figura 24 - Estratégia de controle do Gás de Reciclo. 76 Figura 25 - Configuração para reproduzir a interligação do Gás de Reciclo entre os trens de reações distintos. 77 Figura 27 - Lista de eventos programados no Event Scheduler, reproduzindo o evento de Despressurização de Emergência. 81 Figura 28 - Funcionalidade do módulo Mixer no modo dinâmico. 82 Figura 29 - Perfil de pressão na despressurização de Emergência em função das aberturas das válvulas XV	Figura 13 - Exemplo de Matriz causa e efeito para o cenário hipotético	52
Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e saída do air-cooler P03A. 64 Figura 16 - Esquemático do Balanço de Massa no HDT de diesel. 69 Figura 17 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H2. 70 Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS, destacando as distintas seções simuladas. 72 Figura 19 - Bateria de pré-aquecimento e forno aquecedor. 73 Figura 20 - Simulação estática da seção de reação. 73 Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à quente) e injeção de água de lavagem. 74 Figura 22 - Fluxograma da simulação estática destacando o compressor C01 e as válvulas de intertravamento, XV40 e XV42. 75 Figura 23 - Curvas de desempenho do compressor C01 inseridas no HYSYS. 76 Figura 24 - Estratégia de controle do Gás de Reciclo. 76 Figura 25 - Configuração para reproduzir a interligação do Gás de Reciclo entre os trens de reações distintos	Figura 14 - Diagrama de processo simplificado da unidade real de HDT de diesel (trem A)	61
Figura 16 - Esquemático do Balanço de Massa no HDT de diesel. 69 Figura 17 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H2. 70 Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS, destacando as distintas seções simuladas. 72 Figura 19 - Bateria de pré-aquecimento e forno aquecedor. 73 Figura 20 - Simulação estática da seção de reação. 73 Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à quente) e injeção de água de lavagem. 74 Figura 22 - Fluxograma da simulação estática destacando o compressor C01 e as válvulas de intertravamento, XV40 e XV42. 75 Figura 23 - Curvas de desempenho do compressor C01 inseridas no HYSYS. 76 Figura 24 - Estratégia de controle do Gás de Reciclo. 76 Figura 25 - Configuração para reproduzir a interligação do Gás de Reciclo entre os trens de reações distintos 77 Figura 26 - Simulação do sistema de despressurização de emergência e de despressurização controlada. 80 Figura 28 - Funcionalidade do módulo Mixer no modo dinâmico. 82 Figura 29 - Perfil de pressão na despressurização de Emergência em função das aberturas das válvulas XV-220 e 83 Figura 30 - Níveis dos vasos separadores ao longo do evento de despressurização de emergência. 83	Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e saída do air-cooler P03A	64
Figura 17 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H2	Figura 16 - Esquemático do Balanço de Massa no HDT de diesel	69
Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS, destacando as distintas seções simuladas. 72 Figura 19 - Bateria de pré-aquecimento e forno aquecedor. 73 Figura 20 - Simulação estática da seção de reação. 73 Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à quente) e injeção de água de lavagem. 74 Figura 22 - Fluxograma da simulação estática destacando o compressor C01 e as válvulas de intertravamento, XV40 e XV42. 75 Figura 23 - Curvas de desempenho do compressor C01 inseridas no HYSYS. 76 Figura 24 - Estratégia de controle do Gás de Reciclo. 76 Figura 25 - Configuração para reproduzir a interligação do Gás de Reciclo entre os trens de reações distintos 77 77 Figura 26 - Simulação do sistema de despressurização de emergência e de despressurização controlada. 80 Figura 27 - Lista de eventos programados no Event Scheduler, reproduzindo o evento de Despressurização de Emergência. 81 Figura 28 - Funcionalidade do módulo Mixer no modo dinâmico. 82 Figura 29 - Perfil de pressão na despressurização de Emergência em função das aberturas das válvulas XV-220 e 83 Figura 30 - Níveis dos vasos separadores ao longo do evento de despressurização de emergência. 84	Figura 17 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H2	70
Figura 19 - Bateria de pré-aquecimento e forno aquecedor	Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS, destacando as distintas seções simuladas	72
Figura 20 - Simulação estática da seção de reação	Figura 19 - Bateria de pré-aquecimento e forno aquecedor	73
Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à quente) e injeção de água de lavagem. 74 Figura 22 - Fluxograma da simulação estática destacando o compressor C01 e as válvulas de intertravamento, XV40 e XV42. 75 Figura 23 - Curvas de desempenho do compressor C01 inseridas no HYSYS. 76 Figura 24 - Estratégia de controle do Gás de Reciclo. 76 Figura 25 - Configuração para reproduzir a interligação do Gás de Reciclo entre os trens de reações distintos 77 Figura 26 - Simulação do sistema de despressurização de emergência e de despressurização controlada. 80 Figura 27 - Lista de eventos programados no Event Scheduler, reproduzindo o evento de Despressurização de Emergência. 81 Figura 28 - Funcionalidade do módulo Mixer no modo dinâmico. 82 Figura 29 - Perfil de pressão na despressurização de Emergência em função das aberturas das válvulas XV-220 e 83 Figura 30 - Níveis dos vasos separadores ao longo do evento de despressurização de emergência. 84	Figura 20 - Simulação estática da seção de reação	73
quente) e injeção de água de lavagem.74Figura 22 - Fluxograma da simulação estática destacando o compressor C01 e as válvulas de intertravamento,XV40 e XV42.75Figura 23 - Curvas de desempenho do compressor C01 inseridas no HYSYS.76Figura 24 - Estratégia de controle do Gás de Reciclo.76Figura 25 - Configuração para reproduzir a interligação do Gás de Reciclo entre os trens de reações distintos 77Figura 26 - Simulação do sistema de despressurização de emergência e de despressurização controlada.80Figura 27 - Lista de eventos programados no Event Scheduler, reproduzindo o evento de Despressurização de81Figura 28 - Funcionalidade do módulo Mixer no modo dinâmico.82Figura 29 - Perfil de pressão na despressurização de Emergência em função das aberturas das válvulas XV-220 e83Figura 30 - Níveis dos vasos separadores ao longo do evento de despressurização de emergência.84	Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separa	ıção à
Figura 22 - Fluxograma da simulação estática destacando o compressor C01 e as válvulas de intertravamento, XV40 e XV42	quente) e injeção de água de lavagem	74
XV40 e XV42	Figura 22 - Fluxograma da simulação estática destacando o compressor C01 e as válvulas de intertravar	nento,
Figura 23 - Curvas de desempenho do compressor C01 inseridas no HYSYS. 76 Figura 24 - Estratégia de controle do Gás de Reciclo. 76 Figura 25 - Configuração para reproduzir a interligação do Gás de Reciclo entre os trens de reações distintos 77 77 Figura 26 - Simulação do sistema de despressurização de emergência e de despressurização controlada. 80 Figura 27 - Lista de eventos programados no Event Scheduler, reproduzindo o evento de Despressurização de Emergência. 81 Figura 28 - Funcionalidade do módulo Mixer no modo dinâmico. 82 Figura 29 - Perfil de pressão na despressurização de Emergência em função das aberturas das válvulas XV-220 e 83 Figura 30 - Níveis dos vasos separadores ao longo do evento de despressurização de emergência. 84	XV40 e XV42	75
Figura 24 - Estratégia de controle do Gás de Reciclo	Figura 23 - Curvas de desempenho do compressor C01 inseridas no HYSYS	76
 Figura 25 - Configuração para reproduzir a interligação do Gás de Reciclo entre os trens de reações distintos 77 Figura 26 - Simulação do sistema de despressurização de emergência e de despressurização controlada	Figura 24 - Estratégia de controle do Gás de Reciclo	76
 Figura 26 - Simulação do sistema de despressurização de emergência e de despressurização controlada	Figura 25 - Configuração para reproduzir a interligação do Gás de Reciclo entre os trens de reações distinto	s77
 Figura 27 - Lista de eventos programados no Event Scheduler, reproduzindo o evento de Despressurização de Emergência. 81 Figura 28 - Funcionalidade do módulo Mixer no modo dinâmico. 82 Figura 29 - Perfil de pressão na despressurização de Emergência em função das aberturas das válvulas XV-220 e PV-081B. 83 Figura 30 - Níveis dos vasos separadores ao longo do evento de despressurização de emergência. 	Figura 26 - Simulação do sistema de despressurização de emergência e de despressurização controlada	80
Emergência	Figura 27 - Lista de eventos programados no Event Scheduler, reproduzindo o evento de Despressurizaç	ão de
 Figura 28 - Funcionalidade do módulo Mixer no modo dinâmico. 82 Figura 29 - Perfil de pressão na despressurização de Emergência em função das aberturas das válvulas XV-220 e PV-081B. 83 Figura 30 - Níveis dos vasos separadores ao longo do evento de despressurização de emergência. 84 	Emergência	81
Figura 29 - Perfil de pressão na despressurização de Emergência em função das aberturas das válvulas XV-220 e PV-081B	Figura 28 - Funcionalidade do módulo Mixer no modo dinâmico	82
PV-081B	Figura 29 - Perfil de pressão na despressurização de Emergência em função das aberturas das válvulas XV-	-220 e
Figura 30 - Níveis dos vasos separadores ao longo do evento de despressurização de emergência	PV-081B	83
	Figura 30 - Níveis dos vasos separadores ao longo do evento de despressurização de emergência	84

Figura 31 - Resposta das variáveis operacionais ao acionamento da despressurização de emergência da unic	lade
industrial.	84
Figura 32 - Desempenho do controlador de temperatura de reação	86
Figura 33 - Resposta das variáveis operacionais ao acionamento da despressurização de emergência do Dig	gital
Twin	87
Figura 34 - Comparativo do perfil de pressão da planta real x Digital Twin com a abertura da XV-220 e da	PV-
081B	88
Figura 35 - Temperaturas intermediárias da bateria de pré-aquecimento	90
Figura 36 - Perfil de Pressão do Digital Twin sem ajuste de temperatura do vaso V02A	90
Figura 37 - Ajuste da temperatura do vaso V02A	91
Figura 38 - Comparativo dos níveis dos vasos de alta pressão da planta real x Digital Twin durante o evente	o de
despressurização.	92
Figura 39 - Comparativo da resposta do Digital Twin com e sem a abertura da PV-081B.	93
Figura 40 - Comparativo da massa molar com e sem a abertura da PV-081B	94
Figura 41 - Comparativo da vazão mássica com e sem a abertura da PV-081B	94
Figura 42 - Dados de entrada no módulo depressuring - HYSYS.	95
Figura 43 - Tela de entrada de dados do módulo depressuring, coeficiente Cd e área do orifício de restrição	96
Figura 44 - Dados da corrente de entrada no módulo depressuring	96
Figura 45 - Perfil de pressão dos métodos simplificados (PERRY, GREEN e MALONEY, 1997), Bird, Stewa	art e
Lightfoot (1960) Apud (BEYCHOK, 2005) e Rasouli e Williams (1995) Apud (BEYCHOK, 2005) e do Dig	gital
Twin ao longo do evento de despressurização de emergência	97
Figura 46 - Vazões Mássicas dos modelos simplificados e do Digital Twin ao longo da despressurização	98
Figura 47 - Cálculo do calor absorvido nos vasos V02A e V03	99
Figura 48 - Módulo Event Scheduler com as funcionalidades de fogo inseridas.	99
Figura 49 - Perfil de pressão no evento despressurização do Digital Twin com e sem fogo no vaso V02A	100
Figura 50 - Carga térmica absorvida e temperatura com o evento fogo no vaso V02A.	100
Figura 51 - Perfil de pressão com o evento fogo nos vasos V02A e V03	101
Figura 52 - Carga térmica absorvida e temperatura do gás de topo do vaso V03 durante o evento fogo nos va	asos
V02A e V03	102
Figura 53 - Perfil de pressão durante a despressurização de emergência utilizando o módulo depressuring	g do
HYSYS para evento fogo com áreas molhadas distintas	102
Figura 54 – Carga térmica e perfil de temperatura em função de perda de energia no air-cooler P03A	103
Figura 55 - Pressão do vaso separador V03 com a perda de energia no air-cooler P03A	104
Figura 56 - Variação da vazão mássica de água com a abertura indevida da FV-233A	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sumário de correntes referente ao diagrama de processo simplificado	
Tabela 2 - Determinação dos diâmetros e comprimentos equivalente dos capacitores	64
Tabela 3 - Dados de entrada dos permutadores de calor P01A e P02A	65
Tabela 4 - Cálculo do volume do Forno Aquecedor F01A	66
Tabela 5 - Cálculo do volume vazio dos catalisadores de um trem de reação	66
Tabela 6 - Volumes totais de cada vaso da seção de alta pressão	67
Tabela 7 - Volume do air-cooler P03A	67
Tabela 8 - Volume total e volume total de gás da seção de alta pressão	67
Tabela 9 - Balanço de massa da unidade	69
Tabela 10 - Balanço de contaminantes na unidade	70
Tabela 11 - Composição estimada para o gás de topo da retificadora	70
Tabela 12 - Parâmetros de sintonia dos controladores PID existentes da seção de alta pressão	78
Tabela 13 - Sintonia dos controladores PID da malha de controle de temperatura dos leitos catalític	os e sintonia
aplicada ao controlador simulado (FIC-25T e TIC-25T)	79
Tabela 14 - Sintonia dos controladores elaborados para o controle de pressão da simulação	79
Tabela 15 - Ações programadas no módulo Event Scheduler, simulando o intertravamento pelo aci	onamento da
despressurização de emergência	
Tabela 16 - Dados para os cálculos dos modelos simplificados	95

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CCL	Casa de Controle Local
CIC	Centro Integrado de Controle
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
Diesel-DD	Diesel de Destilação Direta
DNK	Corrente Carga de HDT de diesel proveniente da UCR
DOU	Diário Oficial da União
ESD	Emergency Shutdown Device
FCC	Unidade de Craqueamento Catalítico em Leito Fluidizado - Fluid Catalytic Cracking
HAZOP	Técnica de Análises de perigos e operabilidade - Hazard and Operability Study
НС	Hidroconversão
HCC	Hidrocraqueamento Severo
HDA	Reações de Hidrodesaromatização
HDIW	Reações de Hidroisodesparafinação
HDM	Reações de Hidrodesmetalização
HDN	Reações de Hidrodesnitrogenação
HDO	Reações de Hidrodesoxigenação
HDR	Hidrorrefino
HDS	Reações de Hidrodessulfurização
HDT	Hidrotratamento
НО	Reações de Saturações de Olefinas
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IIoT	Internet da Coisas na Indústria - Industrial Internet of Things
LCO	Oleo Leve de Reciclo - Light Cycle Oil
MHC	Hidrocraqueamento Moderado
LOPA	Análise por camada de proteção - Layer Of Protection Analysis
NASA	Agência Aeroespacial Americana
NOx	Oxidos de Nitrogênio
ODBTE	Oleo diesel de Baixo Teor de Enxofre
OTS	Simulador para Treinamento de Operadores - <i>Operating Training Simulators</i>
PI	Plant Information System
PIMS	Sistema de Gerenciamento de Informações da Planta - Plant Information Management
РМТА	system Pressão Máxima de Trabalho Admissível
nnm wt	Parte Por Milhão em Base Mássica
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PSV	Válvula de Segurança e Alívio
S-10	Óleo diesel com teor de 10 ppm em massa de enxofre
S-1800	Óleo diesel com teor de 1800 ppm em massa de enxofre.
S-50	Óleo diesel com teor de 50 ppm em massa de enxofre.
S-500	Óleo diesel com teor de 500 ppm em massa de enxofre.
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SIS	Safety Instrumented System
UCR	Unidade de Coqueamento Retardado
UDA	Unidade de Destilação Atmosférica
UGH	Unidades de Geração de Hidrogênio
UTAA	Unidade de Tratamento de Agua Ácidas
UTAMINA	Unidade de Tratamento com Aminas
XV	Válvula de Intertravamento

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_{ws} superfície molhada total de um vaso, m²;
- C_p calor específico do líquido, em kJ/(kg.K);
- *C* coeficiente de capacidade (adimensional);
- C_1 constante 1 criada para a Equação (7), PERRY et al. (1997).
- C_2 constante 2 criada para a Equação (7), PERRY et al. (1997).
- C_f constante para cálculo do calor absorvido em caso fogo em vaso molhado.
- ΔT diferença de temperatura;
- *F* fração residual de vapor no sistema;
- *Ff* fator ambiental para cálculo do calor absorvido em vaso molhado no caso fogo.
- g_c constante gravitacional;
- k razão entre os calores específicos c_p/c_v
- λ calor latente do líquido, em kJ/kg;
- *m* massa do líquido ou vapor, em kg;
- *M* massa molar do vapor;
- \dot{m} vazão mássica, em kg/h;
- *p* pressão absoluta, expressa em kPa;
- q_m vazão mássica de vapor em kg/h;
- Q calor absorvido pela superfície molhada do vaso, em kJ/h;
- *R* constante dos gases ideais;
- *t* tempo transcorrido na despressurização, em horas;
- *T* temperatura absoluta, em K;
- *V* volume ocupado pelo vapor, em m³;
- *w* fração mássica do líquido inicial do sistema vaporizado;
- *Z* fator de compressibilidade, adimensional;

Subscritos e sobrescritos

- *a* índice que denota o estado inicial da despressurização;
- *d* indicativo que denota a modificação de densidade do vapor devido à redução da pressão;
- *i* índice relativo a um vaso;
- *n* passo de tempo entre a condição inicial e final;
- *b* índice que denota o estado final da despressurização;
- f relativo a fogo;
- v relativo à vaporização;
- x número total de vasos no sistema de despressurização;
- *L* relativo a líquido;

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	23
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1.	Digital Twin	
2.2.	Unidades de Hidrotratamento de Diesel (HDT de diesel)	30
2.3.	Despressurização de Emergência em Unidades de HDT de diesel	42
2.3.1.	Formas simplificadas de abordagem do sistema de despressurização de emergência	54
3.	METODOLOGIA	59
3.1.	Levantamento de dados de projeto e operacionais da planta industrial	59
3.1.1.	Dados de Operação	60
3.1.2.	Dados de tubulação	63
3.1.3.	Equipamentos industriais	65
3.1.4.	Balanço de Massa para a simulação da unidade	68
3.2.	Simulação Estática	71
3.3.	Simulação Dinâmica	77
3.4.	Dados do evento real de despressurização de emergência	82
4.	RESULTADOS	86
4.1.	Digital Twin x Planta real: Comparação e Validação	86
4.2.	Comparativo cos modelos simplificados	
4.3.	Avaliação da consideração de fogo no cálculo da despressurização de emergência	
4.4.	Outras aplicações do <i>Digital Twin</i>	102
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	105

1. INTRODUÇÃO

O conceito de *Digital Twin* compreende a reprodução digital de um componente, produto ou sistema contendo dados de engenharia, operação e descrição do comportamento via modelagem e simulação. É um modelo digital que representa uma cópia fidedigna de um sistema real ao qual se deseja fazer intervenções e observações que podem ou não afetar o sistema real, podendo ser aplicado somente ao seu "gêmeo" digital. Trata-se de um recurso que pode ser aplicado, por exemplo, no treinamento de operadores, monitoramento e análises de engenharia e segurança de processos em plantas industriais.

Como recurso de engenharia, o *Digital Twin* pode ser aplicado para análises dinâmicas desde a fase de projeto de unidades industriais e aperfeiçoado ao longo da construção e montagem, prevendo o comportamento futuro da unidade em operação. Esse conceito pode ser aplicado a Unidades de hidrotratamento de diesel – HDT.

As unidades de HDT de diesel são plantas industriais, que possuem seções que operam em altas pressões e temperaturas, onde ocorrem reações químicas exotérmicas em presença de hidrogênio para remoção de contaminantes e compostos indesejáveis presentes na corrente da carga da unidade. As condições operacionais severas combinadas com a alta exotermicidade das reações de hidrogenação impõem a necessidade de um rigoroso sistema de controle regulatório e avançado nessas plantas, além de camadas adicionais de proteção contra falhas desse sistema, onde as principais são as válvulas de alívio e segurança – PSVs (*pressure relief valves*) – e o sistema de despressurização de emergência.

Eventos como fogo ou descontrole de temperatura (*runaway*) podem elevar a temperatura rapidamente acima das condições de projeto dos equipamentos, linhas e instrumentos, cuja pressão de projeto é determinada para uma temperatura máxima de operação e, nesse caso, há a necessidade de reduzir rapidamente a pressão da unidade, seja para reduzir a alimentação do vazamento, no caso de fogo, ou para reduzir a cinética das reações de HDT, que são bastante favorecidas pelo aumento da pressão parcial de hidrogênio.

Diferentemente das PSVs, que têm o objetivo de proteger um sistema contra uma sobrepressão, o sistema de despressurização de emergência, como última camada de proteção em emergências, reduz a pressão dessa seção, em um tempo relativamente curto, para valores considerados seguros, sem que sejam alcançadas taxas de despressurização tão elevadas que possam trazer danos aos internos dos equipamentos e ao sistema de tocha da refinaria.

Neste trabalho, o objetivo foi aplicar o conceito de *Digital Twin* na avaliação dinâmica de um sistema de despressurização de emergência utilizando uma unidade real de hidrotratamento de diesel, utilizando para isso o *software* comercial Aspen HYSYS V10 (ASPENTECH, 2017).

Para tanto, foi desenvolvido um modelo fenomenológico dinâmico da planta considerando rigorosamente as dimensões reais dos equipamentos, as variáveis e as condições operacionais observadas na prática para a validação do mesmo, obtendo assim um "*Digital Twin*" desta, em que, depois de validado, foi analisado o comportamento da planta digital na verificação detalhada do sistema dinâmico de despressurização, permitindo realizar ajustes na metodologia de cálculo do procedimento de despressurização, de modo a produzir estratégias mais robustas.

Este trabalho está estruturado em capítulos. No Capítulo 2 são apresentadas uma revisão bibliográfica sobre o conceito de *Digital Twin* e uma apresentação sobre as unidades de hidrotratamento de diesel. Finalizando o Capítulo 2, é abordado o sistema de despressurização de emergência dessas unidades. O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para o desenvolvimento do *Digital Twin*, passando primeiro pelo desenvolvimento de simulação estática, com calibração frente à unidade real, seguida pela implementação da simulação dinâmica com todo seu roteiro de preparação e a inserção dos controles regulatórios na unidade digital. O Capítulo 4 apresenta os resultados dos modelos simplificados e da modelagem dinâmica e no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões, além de propostas para atividades futuras. São apresentadas as referências bibliográficas utilizadas. Por fim, os Anexos apresentam detalhes sobre os dados operacionais, cálculos de linhas e equipamentos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Digital Twin

Com a profunda digitalização nas indústrias, o conceito de virtual, equivalente digital ao produto físico, tem recebido cada vez mais atenção. Rotulados no passado como planta virtual ou planta simulada em tempo real e, mais recentemente, como *Digital Twin* (gêmeo digital), *product avatar* (avatar), ou *cyber-physical equivalence* (equivalente digital), várias manifestações em diferentes contextos podem ser encontradas na literatura (HOLLER, UEBERNICKEL e BRENNER, 2018). Essas abordagens da aplicação do *digital twin* permeiam pelos contextos da manufatura, (Cimino et al. 2019), sistemas e controle, (LAMNABHI-LAGARRIGUE, ANNASWAMY, *et al.*, 2017), indústria de óleo e gás, (LU, GUO, *et al.*, 2019), petroquímica, (LIU, MIN, *et al.*, 2019) e segurança em geral, (LEE, CAMERON e HASSALL, 2019), por exemplo.

Cimino et al. (2019), fazem uma revisão na literatura sobre a aplicação de *Digital Twin* na indústria 4.0, classificando o *Digital Twin* como uma ferramenta de monitoramento, manutenção, gerenciamento, otimização e segurança. Descrevem que existe uma lacuna entre os artigos e a aplicação completa do potencial do *Digital Twin* na indústria, onde o mesmo estaria conectado à planta real, recebendo e enviando dados para a planta. Na prática, eles descrevem que essa dificuldade é em razão do sistema de controle já implementado na indústria, onde existem sistemas que controlam a produção de uma forma mais ampla como o PIMS (*Plant Information Management System*), e a inserção desta conectividade com o *Digital Twin* seria bastante complexa. No trabalho de Cimino et al. (2019), é criado um laboratório na *School of Management of the Politecnico di Milano*, onde é desenvolvido um *Digital Twin* para o controle do consumo energético na produção de um protótipo de telefone celular onde a conectividade é ampla nos dois sentidos, da planta para o *Digital Twin* e do *Digital Twin* para a planta.

Lu, Guo, et al. (2019), fazem uma revisão do que chamam da Era 4.0 da indústria, mais especificamente da Indústria do Petróleo e Gás, com uma forte integração entre industrialização e informática. Ele acredita que essa nova Era vai mudar o *status quo* do setor, trazendo enorme benefícios com a aceleração da digitalização e inteligência. Entretanto, por considerarem que a indústria 4.0 ainda está em sua infância, eles apontam as perspectivas para o setor. Abordando os conceitos da Era 4.0 como *big data* (processamento do alto número de informações obtidos

pela digitalização da indústria) e internet das coisas na Indústria (*industrial Internet of Things* – *IIoT*) onde várias plataformas digitais processam e conversam entre si para melhorar a produção industrial. Lu, Guo, et al. (2019) fazem análises de cenários de aplicação na cadeia da indústria de petróleo e gás (exploração, produção, transporte, refino e comercialização) abordando exemplos como campos de petróleo inteligentes, oleodutos inteligentes e refinarias inteligentes. Entendem que a aplicação dessas possibilidades no segmento irá trazer benefícios para o que chamam de engenharia do futuro, onde existiria a Produção Inteligente (*Smart Production*), onde a inteligência artificial estaria combinada com imagem, produção, e dados de equipamentos. E neste contexto que classificam o *Digital Twin* como um dos pilares da produção Inteligente, na qual se pode melhorar a qualidade dos produtos e diminuir o custo de produção com otimização, inclusive em tempo real.

Liu, Min, et al. (2019) descrevem que o *Digital Twin* juntamente com a internet das coisas, big data e tecnologia de aprendizado das máquinas (*machine learning*), oferecem um grande potencial na transformação do paradigma de fabricação atual em direção à fabricação inteligente. Eles propõem a aplicação desses conceitos para a elaboração de um *Digital Twin* para a otimização do controle na indústria petroquímica. Com o *big data* em tempo real, seria possível treinar e otimizar o modelo do *Digital Twin*, fornecendo uma capacidade a indústria petroquímica de se adaptar a mudanças de ambiente de mercado aumentando a rentabilidade da produção. Liu, Min, et al. (2019), aplicam o conceito de aprendizado de máquina com a implementação do *Digital Twin* alinhado ao tratamento de *big data* em uma unidade de craqueamento catalítico na indústria petroquímica. Apesar de um bom desempenho em relação ao controle energético, Liu, Min, et al. (2019) descrevem que a aplicação de um modelo de aprendizado da máquina para a otimização do processo ainda requer muitas pesquisas teóricas e testes práticos para a otimização do processo ainda requer muitas pesquisas teóricas e

Sistemas e controle estão no coração das tecnologias de informação e comunicação para a maioria das aplicações. Como tal, os sistemas e controle devem ser reconhecidos como prioritários pelas agências de financiamento e apoiados nos níveis necessários para permitir que as tecnologias lidem com os desafios sociais críticos (LAMNABHI-LAGARRIGUE, ANNASWAMY, *et al.*, 2017).

Para Lamnabhi-Lagarrigue, Annaswamy, *et al.* (2017), o desafio das próximas gerações é a aplicação desses conceitos nas áreas de transporte, energia, água, saúde e na produção industrial. Lee, Cameron e Hassall, (2019), destacam que os sistemas digitais já vêm sendo aplicados nas últimas décadas para auxiliar no gerenciamento da segurança do processo e gerenciamento de riscos durante todo o ciclo de vida de uma planta de processo, principalmente após as investigações do acidente com a plataforma *Deepwater Horizon* operada pela empresa britânica BP (*British Petroleum*), ocorrido em 2010. Entretanto, a Indústria 4.0, a digitalização e, principalmente o *Digital Twin*, apresentam um potencial de transformação para melhorar o desempenho operacional e reduzir os acidentes de segurança de processo. Assim, Lee, Cameron e Hassall (2019), destacam a importância da padronização na interconexão de modelos e sistemas. Nesse trabalho é abordado as causas dos acidentes o que já foi implementado em termos de segurança nas últimas décadas.

Lee, Cameron e Hassall (2019), também abordam a transformação do conceito de segurança na indústria 4.0, cuja principal modificação é a integração da automação avançada, robótica, big data, inteligência artificial, sistemas virtuais e tecnologia de sensores. Nesse contexto, eles destacam a importância do *Digital Twin* como modelo utilizado para investigação do comportamento de sistemas objetivando propiciar melhores tomadas de decisões pelos usuários e administradores.

Segundo Lee, Cameron e Hassall (2019), os drásticos avanços na tecnologia na última década fornecem um significante potencial para a implementação da tecnologia do *Digital Twin* em diversos tipos de indústrias. Destacam a diferença entre *Product Digital Twin* (produto em si ou parte deste produto) e *Process Digital Twin* (Processo de fabricação do produto), classificando ambos como muito importantes.

Segundo Lee, Cameron e Hassall (2019), o *Digital Twin* não necessita estar conectado a planta em tempo real. Entretanto, o *Digital Twin* deve ter informações suficientes e confiáveis para auxiliar ou aprimorar a operação da planta real.

Lee, Cameron e Hassall (2019) destacam que o *Digital Twin* pode ser aplicado na fase do projeto conceitual em análises de impactos sociais e ambientais, na fase da engenharia de detalhamento auxiliando nas análises de risco ao quantificar a quantidade e severidade das consequências e a frequência dos riscos avaliados, na fase de comissionamento com treinamento de operadores (*Operating Training Simulators* – OTS), principalmente na partida e parada de plantas, onde ocorrem o maior número de acidentes e incidentes.

Para a utilização do *Digital Twin* em estudos de segurança. Lee, Cameron e Hassall (2019) apontam que o modelo deve ter foco especial nos seguintes pontos: fronteiras do sistema; entrada e saída de dados e características físicas dos equipamentos e operacionais; destacando

que a qualidade do modelo pode ser limitada pelo nível necessário de informações para a avaliação do caso em estudo.

Nos últimos anos tem crescido referências sobre empresas com simuladores de processo capazes de desenvolver um Digital Twin, como a Honeywell, Aveva, Aspentech, SchneiderElectric e KBC (LEE, CAMERON e HASSALL, 2019).

Umas das maiores restrições ao uso dos Digitais Twins são o custo e tempo de desenvolvimento, a falta de profissionais com experiência e a falta de capacidade de identificação de oportunidades de implementação dessa tecnologia, como, por exemplo, a utilização em técnicas de análises de perigos e operabilidade (Hazard and Operability Study -HazOp) (LEE, CAMERON e HASSALL, 2019).

Além do uso em treinamento de operadores e em HazOp, Lee, Cameron e Hassall (2019) destacam que o Digital Twin pode ser aplicado à:

- Desenvolvimento de procedimento de emergência para eventos raros;

- Exames mais aprofundados de cenários de operações anormais;
- Melhoria no sistema de controle:
- Análise de impactos com modificações na planta;
- Redução do tempo de partida e parada da planta;
- Investigação de incidentes e acidentes;

- Avaliação de operação em condições diversas com retirada de equipamentos para manutenção;

- Melhoria de projeto e procedimentos de testes.

Segundo Holler, Uebernickel e Brenner (2018) a primeira utilização do termo Digital Twin remete aos anos 2000, quando em uma apresentação em 2002 para industriários na Universidade de Michigan, Michael Grieves^{1 2} caracterizou um Digital Twin baseado em três principais componentes: produto físico em um espaço real; produto virtual em um espaço virtual; e a conexão de dados e informações que ligam o produto real ao produto virtual. Posteriormente, Glaessgen e outros¹ (2012) destacaram que o conceito Digital Twin surgiu no contexto aeroespacial no programa Apollo da Agência Aeroespacial Americana - NASA, onde dois ônibus espaciais iguais (um no espaço e um na Terra) foram produzidos para espelhar as condições durante o voo.

¹ (apud HOLLER, UEBERNICKEL e BRENNER, 2018) ² (apud BOSCHERT, HEINRICH e ROSEN, 2018)

Boschert e Rosen¹ (2016) conceituaram um *Digital Twin* como um aperfeiçoamento de abordagem existentes de modelagem de sistemas e simulações com dados e informações de uso de um produto real.

Classificado como um ponto central na fábrica do futuro na chamada indústria 4.0, o *Digital Twin* é visto como um atalho competitivo para garantir eficiência em custo, tempo e energia (MATSU, 2017).

Segundo Matsu (2017), a consultoria Gartner indica que dentro de poucos anos bilhões de coisas serão representadas por *Digital Twins*.

Um dos maiores beneficios do *Digital Twin* é prover informações de operação de um sistema durante o seu projeto e engenharia. Essas informações sendo compartilhada para todas as fases subsequentes de um projeto é classificada como *Digital Twin* da próxima geração (*Next Generation Digital Twin*), uma vez que o *Digital Twin* não é usado somente para descrever o comportamento de um sistema, mas sim para obter soluções relevantes para este sistema real (BOSCHERT, HEINRICH e ROSEN, 2018).

Grieves e Vickers (2016) destacam que o ciclo de vida do *Digital Twin* inicia com um protótipo na fase de criação. Nessa etapa o *Digital Twin* permite determinar conflitos e interferências, identificando dificuldades e impossibilidades da realização física do protótipo, testando o *Digital Twin* em uma ampla variedade de condições. Após o *Digital Twin* estar completo e validado, a informação é utilizada no espaço real para criar o gêmeo físico com menor custo e riscos, devido à eliminação de imprevistos indesejáveis. Nessa fase, o *Digital Twin* também pode ser utilizado para treinamento de operadores, de forma a reduzir o tempo de partida da planta real. A fase seguinte do ciclo de vida é a fase de produção, na qual o *Digital Twin* é carregado com informações mais específicas do modelo real e apurando o comportamento e as possibilidades exploradas inicialmente pelo modelo virtual. Ou seja, ocorrem informações em ambos os sentidos na fase de produção e operação. A última fase é o descomissionamento (*decommissioning*), que geralmente é negligenciada como uma fase real, na qual o *Digital Twin* impede que se perca o conhecimento do comportamento precedente em novos projetos.

Boschert, Heinrich e Rosen (2018) também abordam a possibilidade de utilização de um *Digital Twin* interligado a um sistema de informação do sistema real em tempo real (sistema híbrido), o que possibilitaria uma larga possibilidade de novos serviços como auxiliar em detecção de falhas e diagnósticos propiciando uma manutenção preditiva. Assim, como análise de engenharia, o *Digital Twin* pode ser aplicado para análises dinâmicas desde o projeto de unidades industriais, como em unidades de hidrotratamento de diesel - HDT, prevendo o comportamento futuro da unidade em operação.

2.2. Unidades de Hidrotratamento de Diesel (HDT de diesel)

Os problemas ocasionados pelas emissões atmosféricas provenientes dos veículos automotores, sobretudo nas grandes cidades, têm demandado a contínua melhoria da qualidade dos combustíveis e da tecnologia dos veículos (BRASIL, MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013).

A presença de enxofre no combustível reduz a vida útil do motor e aumenta as emissões de SO₂ ou SO₃ (óxidos de enxofre). Esses gases podem promover a formação das "chuvas ácidas", quando combinados com a água da atmosfera. Além disso, o enxofre pode contribuir para elevar as emissões de material particulado, devido à presença de sulfatos (ANP, 2019).

Em termos mundiais, o movimento de melhoria da qualidade do diesel teve início na década de 1990, aprofundando na década seguinte. A União Europeia estabeleceu a primeira especificação comum de diesel em 1994 (EN 590), que limitava o teor de enxofre no óleo diesel em no máximo 2.000 ppm. Em 1996 esse teor foi reduzido para 500 ppm e em 2000 para 350 ppm. A partir de 2005 a especificação restringiu ainda mais o teor de enxofre no diesel passando o limite para 50 ppm e já iniciando a produção do diesel com 10 ppm de enxofre. Em 2009 todo o óleo diesel vendido na Europa já tinha o teor de enxofre limitado a 10 ppm. No mercado americano a especificação do teor de enxofre foi introduzida em 1993 pelo padrão ASTM D975, limitando a concentração em 500 ppm já em 1994. Em 2006 a especificação do teor de enxofre no diesel já era de 15 ppm (BONFÁ, 2011).

Atualmente, a ASTM D975 em sua revisão 19b, ainda mantem a especificação de 15 ppm de enxofre no diesel combustível, conforme *Grade* No. 1-D S15-A (ASTM, 2020).

No Brasil, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, através do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, desenvolveu um Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE, no qual a regulamentação do óleo diesel está enquadrada na fase P-7 desse programa, regulamentada pela resolução CONAMA N°403, de 11 de novembro de 2008, retificada no Diário Oficial da união – DOU em 28 de abril de 2009 (BRASIL, 2008) Essa resolução inicia o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes para os motores do ciclo diesel destinado a veículos automotores pesados novos e estabelece que as características do óleo diesel serão estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, o que foi feito pela resolução ANP N°50, de 23 de dezembro de 2013, conforme publicação do DOU em 24 de dezembro de 2013 (BRASIL, ANP, 2013).

Para o atendimento das emissões máximas de poluentes, a ANP definiu especificações mais restritivas em termos de contaminantes no óleo diesel, determinando a substituição progressiva do óleo diesel interior (diesel S-1800) pelo óleo Diesel S-500, e a substituição do óleo diesel Metropolitano (diesel S-500) para Óleo Diesel de Baixo teor de Enxofre – ODBTE, inicialmente óleo diesel S-50 e posteriormente óleo diesel S-10.

A Figura 1 mostra a evolução da qualidade do óleo diesel vendido no Brasil no período de 2008 e 2019 (ANP, 2009) (ANP, 2010) (ANP, 2011) (ANP, 2012) (ANP, 2013) (ANP, 2014) (ANP, 2014) (ANP, 2015) (ANP, 2016) (ANP, 2017) (ANP, 2018) (ANP, 2019), em que é convencionado pela indústria a denominação S-X, onde o X representa o valor numérico da especificação de teor de enxofre na unidade mg/kg ou ppm (ANDRADE, 2019). Pode-se verificar que a maior parte de óleo diesel vendido no Brasil em 2008 era o óleo diesel Interior (diesel S-1800) e nesse mesmo ano o ODBTE não era comercializado.

Percebe-se também na Figura 1, a substituição do óleo diesel S-1800 pelo óleo diesel S-500, e a entrada e rápida expansão do mercado de óleo diesel de baixo teor de enxofre nos anos 2010. Inicialmente produzindo o óleo diesel S-50, que a partir de 2013 é substituído pelo óleo diesel S-10 o qual, atualmente, já representa quase a metade do óleo diesel vendido no Brasil.

Segundo a ANP (ANP, 2017) o aumento das vendas do óleo diesel de baixo teor de enxofre - ODBTE, foi acompanhado pela ampliação da malha de municípios que possuem postos que vendem óleo diesel S-10. Enquanto em 2012 apenas 43,1% dos municípios eram cobertos, em 2016 o percentual passou a 85,1%, indicando que a comercialização desse combustível se encontra disseminada.

Para atendimento dessa qualidade do óleo Diesel, as refinarias brasileiras tiveram que passar por muitas atualizações tecnológicas, com construção de novas unidades de hidrorrefino e atualização e ampliação (*Revamp*) de unidades existentes, especificamente as unidades de hidrotratamento de diesel – HDT de diesel.

Portanto, devido a essas modificações de especificações cada vez mais rigorosas de qualidade do óleo diesel, com as reduções sucessivas do teor de enxofre e aumento dos

requisitos de estabilidade química e térmica, o processo de Hidrotratamento-HDT ocupa posição de destaque no parque de refino (FARAH, 2012).



Figura 1 - Venda de óleo diesel por Tipo Fonte: ANP (2009-2019)

- 1- Diesel Não Rodoviário é o diesel utilizado em transporte ferroviário, extração mineral e na geração de energia elétrica com teor de enxofre máximo de 1800 ppm em massa, conforme Resolução ANP n°45, de 20/12/2012.
- 2- Vendas no período de janeiro a junho de 2019.
- 3- Diesel Marítimo é o diesel utilizado em transporte aquaviário com teor de enxofre máximo de 5000 ppm em massa, conforme Resolução ANP Nº 52 DE 29/12/2010.

O processo de hidrorrefino – HDR – consiste no tratamento de frações de petróleo com hidrogênio, na presença de um catalisador, sob condições operacionais definidas em função do objetivo dessa etapa de refino (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2011).

BRASIL et al. (2011) classificam as unidades de hidrorrefino em:

- Unidades de Hidrotratamento (HDT): possuem o objetivo de melhorar as propriedades de um produto sem alterar fortemente a sua faixa de destilação original;
- Unidades de Hidroconversão (HC): possuem o objetivo de produzir frações mais leves e de melhor qualidade do que a carga e podem ser subdivididas em hidrocraqueamento moderado (MHC) ou hidrocraqueamento severo (HCC).

Os processos de HDT são empregados no tratamento de naftas, querosene, solventes, óleo diesel, gasóleos, óleos básicos lubrificantes e parafinas, com o objetivo de melhorar suas características (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2011).

As principais reações que ocorrem no processo de hidrotratamento de diesel são as saturações de olefinas (HO), hidrodesaromatização (HDA), hidrodessulfurização (HDS), hidrodesnitrogenação (HDN), hidrodesoxigenação (HDO) e hidrodesmetalização (HDM) e têm o objetivo de estabilizar, reduzir a emissão de poluentes e a corrosividade e melhorar a qualidade de combustão do produto (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2011).

Quando ocorrem múltiplos tipos de reação, o que é o caso mais frequente, a denominação do processo é simplesmente classificada como hidrotratamento - HDT (FARAH, 2012).

BRASIL et al. (2011) destacam que a hidrodessulfurização (HDS) tem papel muito importante, uma vez que o heteroátomo mais abundante no petróleo é o enxofre, que precisa ser reduzidos em quase todas as frações de Petróleo, principalmente pela questão ambiental da redução de emissões de SOx.

As reações de hidrogenação são sempre exotérmicas. Por isso, é importante o controle de temperatura ao longo do leito do reator de HDT (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2011).

Tipicamente, uma unidade de HDT de diesel é composta pelos elementos apresentados no diagrama de blocos da Figura 2.



Figura 2 - Esquemático simplificado do processo de HDT.

Seção de carga

Na seção de carga ocorre o recebimento das correntes, sob vazões controladas, que irão compor a carga da unidade. Quanto mais complexa a unidade, maior é o número de correntes possíveis para a composição dessa carga, que podem vir direto das unidades produtoras ou de tancagem, quente ou fria.

Nessa seção também é realizado uma filtração da carga, para remoção de particulados das correntes de origem. Geralmente essa filtração é realizada em separado para cargas instáveis, oriundas de processos de recuperação de frações mais pesadas como a unidade de craqueamento catalítico em leito fluidizado (UFCC) e a unidade de coqueamento retardado (UCR), e para cargas estáveis, provenientes de correntes oriundas da unidade de destilação atmosférica (UDA).

Os filtros de carga são muito importantes para a retenção de partículas (produtos de corrosão de linhas e tanques), finos de catalisador (UFCC) e finos de coque (UCR) que obstruiriam o leito catalítico, causando maior queda de pressão (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2011).

Com a evolução das tecnologias de processamento de fundo de barril (UFCC e UCR), maiores são as composições de instáveis nas cargas das unidades de HDT, aumentando o rendimento de produção de óleo diesel para um mesmo petróleo.

É comum se encontrar nessa seção uma torre desaeradora para remoção de oxigênio de correntes provenientes de tancagem, uma vez que a combinação das correntes instáveis, que contêm muitas olefinas, com correntes de tancagem, que possuem oxigênio dissolvido, geram polímeros (gomas) ao longo da seção subsequente de aquecimento e irão causar depósitos nos permutadores de calor.

Outra alternativa é a tancagem de carga oriunda da UDA com gás inerte. Nesse caso, ou quando não ocorrer processamento de cargas instáveis, é dispensável a instalação da torre desaeradora, e apenas um vaso acumulador para estabilização/homogeneização da carga é necessário, principalmente no caso do processamento de frações oriundas de unidades diferentes (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2011). Uma bomba de alta pressão é responsável para encaminhar a carga do vaso/torre para a seção de reação.

Cabe destacar que, dependendo da vazão de carga da unidade, as seções descritas a seguir podem ser divididas paralelamente, como trens de reação independentes. Um esquemático simplificado de uma das possíveis configurações da seção de carga é apresentado na Figura 3.


Figura 3 - Esquema simplificado de uma seção de carga de uma HDT.

Seção de aquecimento

A seção de aquecimento é subdividida em pré-aquecimento e aquecimento. No préaquecimento, a carga da reação recebe uma corrente de gás de reciclo rica em hidrogênio, gerando a carga combinada, e troca calor com o efluente do reator por meio da bateria de trocadores de calor carga x efluente, recuperando parte da energia liberada pelas reações exotérmicas de hidrotratamento e aumentando a eficiência térmica da unidade. Após esta recuperação de energia, a carga é encaminhada para o forno aquecedor onde a energia complementar necessária para a carga atingir a temperatura de reação é fornecida.

O forno aquecedor além de um importante papel durante a partida da unidade, quando ainda não há a energia proveniente das reações de hidrotratamento para ser recuperada, também tem um papel muito importante na segurança da unidade, uma vez que a bateria de préaquecimento geralmente é projetada para que a carga complementar seja fornecida pelo forno. Assim, em uma situação de emergência como um descontrole de temperatura no reator, o forno é capaz de cortar a energia rapidamente sendo um dos agentes de segurança nessa situação.

A injeção do gás de reciclo a montante da bateria de trocadores de calor tem o objetivo de minimizar a formação de depósitos nos trocadores de calor e, portanto, aumentar a eficiência de troca térmica. Entretanto, existem configurações em que essa adição pode também ser feita após a bateria de pré-aquecimento.

Em qualquer que seja a configuração adotada, é importante que a quantidade de hidrogênio na carga combinada seja suficiente para fornecer a pressão parcial mínima requerida

para os primeiros leitos catalíticos do reator, de forma a propiciar taxas de reações desejadas e proteger o leito catalítico contra a formação de coque.

Seção de reação

Na seção de reação ocorrem as reações de hidrotratamento já mencionadas anteriormente, destacando as reações de hidrodessulfurização e hidrodesnitrogenação nas quais os contaminantes enxofre e nitrogênio presentes na carga são removidos e transformados em sulfeto de hidrogênio (H₂S) e amônia (NH₃), respectivamente.

Em geral, quanto maiores a temperatura de reação e a pressão parcial de hidrogênio e quanto menor a velocidade espacial (maior o tempo de contado entre a carga e o inventário catalítico) mais severas são as condições de operação e maiores são as taxas das reações de hidrotratamento.³

A carga de reação é alimentada pelo topo do reator e, à medida que flui através de um leito catalítico fixo como o apresentado simplificadamente na Figura 4, a temperatura vai aumentando.

Devido às reações exotérmicas, dependendo da configuração dos leitos catalíticos, da qualidade da carga e da severidade necessária para o atendimento da especificação do produto, faz-se necessária a divisão dos leitos catalíticos para propiciar a refrigeração entre os mesmos, de forma a manter uma temperatura média desejada para as reações. Esse resfriamento (*quench*) geralmente é realizado com a injeção de gás de reciclo entre os leitos catalíticos. Entretanto, outros fluidos refrigerantes podem ser utilizados, como a injeção de produto hidrotratado ou gás de reposição de hidrogênio (gás de *make-up*).

Após a seção de reação, o efluente do reator é encaminhado para a bateria de préaquecimento onde, como já mencionado, parte da energia do efluente de reação é fornecida à própria carga de reação de forma a aumentar a eficiência energética da unidade.

Em seguida, o efluente, ainda com temperatura acima de 393K (120°C), recebe uma corrente de água de lavagem de forma a evitar a obstrução dos resfriadores subsequentes devido ao depósito de sais como o de bissulfeto de amônia (NH4HS), formado pela combinação do H₂S e do NH₃ gerados na reação de HDS e HDN (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2011). A água promove a dissolução do sal formado (SALIM, 2014).

³ Algumas reações como HDA (hidrodesaromatização) são reversíveis a partir de uma determinada temperatura.



Figura 4 - Exemplo de internos e carregamento do leito catalítico em reatores de HDT.

As seções de aquecimento, reação e resfriamento estão apresentadas esquematicamente na Figura 5.



Figura 5 - Esquemático simplificado das seções de aquecimento, reação e resfriamento de uma HDT.

Seção de separação

A seção de separação é a responsável pela separação entre o produto hidrogenado, o gás de reciclo, rico em hidrogênio, que em geral é recirculado para o processo na seção de compressão, e a água de lavagem com os sais solubilizados.

Esta seção pode ter duas configurações distintas:

- Separação a quente: nesta configuração o efluente do reator, após resfriado nos primeiros trocadores da bateria de pré-aquecimento da carga, é separado ainda em uma temperatura elevada (acima da temperatura de retificação), sendo o efluente líquido encaminhado diretamente para a seção de retificação, e a fase gasosa encaminhada para completar o resfriamento no restante da bateria de pré-aquecimento da carga e resfriadores finais do efluente de reação, e em seguida, após receber uma corrente de água de lavagem, é encaminhada para um outro separador a frio, onde é recuperado o gás de reciclo rico em hidrogênio e o restante do produto hidrogenado que é encaminhado para a seção de retificação. Neste vaso separador também é removido água com sais dissolvidos, que é encaminhada para a unidade de tratamento de águas ácidas UTAA.
- Separação a frio: nesta configuração todo o efluente da reação é resfriado na bateria de pré-aquecimento da carga e resfriadores finais do efluente de reação, indo, após receber uma injeção de água de lavagem, para um único vaso separador em alta pressão, mas já com temperatura reduzida, abaixo da temperatura de retificação, onde é recuperado o gás de reciclo rico em hidrogênio, o produto hidrogenado, que é encaminhado para a seção de retificação, e a água com sais dissolvidos, que é enviado para a UTAA.

Na Figura 6 e na Figura 7 são apresentados os esquemáticos das duas configurações de separação: separação a frio e separação a quente.



Figura 6 - Esquemático simplificado de HDT com separação a frio.



Figura 7 - Esquemático simplificado de HDT com separação a quente.

Conforme destaca Lima (2006), dentre as vantagens da separação a quente, destacamse:

 Maior eficiência energética, pois não é necessário aquecimento de todas as correntes que irão para a seção de retificação, já que a energia da corrente proveniente do separador a alta temperatura é suficiente para fornecer energia para essa seção, além de necessitarem de resfriadores finais com dimensões bem menores, pois somente a parte vaporizada no vaso separador a quente é resfriada;

- Devido à não necessidade de aquecimento de todas as correntes (descrito no ponto anterior), não há a existência de trocadores de alta pressão x baixa pressão, que são mais complexos e estão mais sujeitos a vazamentos;
- Maior facilidade na separação óleo/água no vaso separador de baixa temperatura, pois é maior a diferença de densidade entre esse óleo (mais leve) e a água.

Dentre as desvantagens da separação a quente, destacam-se:

- Menor recuperação de hidrogênio, uma vez que o gás do efluente de reação é separado em uma maior temperatura, na qual a solubilidade do hidrogênio, diferente da maioria dos gases, é maior;
- Necessidade de mais de um vaso separador de alta pressão.

Seção de retificação

Após a seção de separação, o produto hidrogenado é encaminhado para a seção de retificação, a baixa pressão, com ajuste de temperatura da carga da torre retificadora.

No caso de separação a frio, a carga da retificadora, em baixa pressão, pode ser encaminhada para um vaso separador a baixa pressão, de onde o gás é enviado para a torre retificadora e o líquido é pré-aquecido em trocadores de calor com efluente de reação em alta pressão, sendo um serviço mais complexo, devido à diferença de pressão e em seguida o líquido tem um ajuste fino da temperatura de carga da retificadora realizado por outros trocadores de calor da carga x efluente da torre retificadora.

No caso da separação a quente, parte da carga da torre retificadora já está aquecida. O produto hidrotratado proveniente do vaso separador de alta pressão e alta temperatura é encaminhado para um vaso de baixa pressão e alta temperatura, onde é separado e enviado em duas fases para a torre retificadora, sendo a fase líquida misturada com o líquido proveniente do vaso separador de alta pressão e baixa temperatura. O ajuste fino da temperatura é realizado por trocadores de calor de carga x efluente da torre retificadora.

Na torre retificadora, vapor de média pressão (vapor vivo) é inserido para baixar a pressão parcial dos componentes mais leves favorecendo a retificação do produto. No vaso de topo da torre retificadora são removidos os gases que são enviados para tratamento na unidade de tratamento com aminas (UTAMINA), contendo os contaminantes, entre eles o H₂S, ajustando o produto quanto a corrosividade e teor de enxofre, e também é removida a frente

leve (nafta selvagem) do produto hidrotratado de forma a enquadrar o ponto de fulgor do produto de fundo da torre retificadora. A água proveniente do vapor de retificação, agora rica em H₂S, também é separada no vaso de topo da torre retificadora e enviada para a unidade de tratamento de águas ácidas (UTAA).

Seção de compressão

O gás separado no separador a alta pressão e baixa temperatura, rico em hidrogênio, é denominado gás de reciclo e é encaminhado para a seção de compressão, sendo retornado à seção de reação. Este sistema pode ou não conter uma torre absorvedora de amina de alta pressão, onde a concentração de H₂S no gás de reciclo é controlada.

Nesta seção também é inserido o gás de reposição de hidrogênio que é consumido nas reações de HDT, e o hidrogênio que é perdido por dissolução e perdas mecânicas. Geralmente, essa reposição de hidrogênio é realizada por compressores alternativos, devido ao elevado diferencial de pressão e à baixa vazão, que elevam a pressão do hidrogênio proveniente das unidades geradoras de hidrogênio (UGH) para a pressão de sucção ou descarga do compressor de reciclo, que geralmente é um compressor centrífugo, devido à maior vazão e menor diferencial de pressão.

Seção de secagem

Por fim, na seção de secagem, a água proveniente do vapor de retificação que ficou dissolvido no produto hidrotratado é removida em uma torre secadora que opera sob vácuo gerado por um sistema geralmente composto por ejetores, pré-condensadores, condensadores, vasos e bombas, de forma a enquadrar o produto final às especificações de aparência (límpido e transparente) sem apresentar turbidez decorrente da presença de água (SALIM, 2014).

Os esquemáticos gerais apresentados representam uma unidade típica de hidrotratamento de diesel. Outras configurações podem ser encontradas, principalmente para unidades de HDT de nafta craqueada e unidades de HDT de nafta de coqueamento retardado, nas quais podem ser encontrados reatores de pré-tratamento e reatores de acabamento, por exemplo.

2.3. Despressurização de Emergência em Unidades de HDT de diesel

Conforme apresentado na Seção 2.2, as unidades de hidrotratamento de diesel operam com uma seção em alta pressão. Dependendo do objetivo/qualidade do produto e qualidade da carga, as pressões de operação normal nessas seções podem ultrapassar 10 MPa.

De forma geral, quanto maior a rigidez na especificação do produto e maior o teor de instáveis na carga da unidade, maior a severidade exigida da unidade. Assim, para o acompanhamento da evolução das especificações determinadas pela ANP, vêm sendo instaladas unidades com maiores volumes catalíticos e maiores pressões.

As pressões de projeto dos equipamentos e linhas de sistemas pressurizados são definidas em função das pressões normais de operação para uma faixa de temperatura de operação, considerando alguns possíveis eventos como, por exemplo, perda de energia elétrica (API, 2014).

As condições de projetos devem ser iguais ou menores do que a Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA, ou *maximum allowable working pressure, MAWP*), que é o maior valor de pressão compatível com o código de projeto, a resistência dos materiais utilizados, as dimensões do equipamento e seus parâmetros operacionais (Norma Regulamentadora N°13 -Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulação, 2015).

Entretanto, existem cenários onde a pressão de projeto pode ser excedida, como em cenários de fechamento indevido de válvulas nas saídas de vasos de pressão, abertura inadvertidas de válvulas, falhas em válvulas de retenção e falha em trocadores de calor (API, 2014), por exemplo.

Válvulas de alívio e/ou segurança, ou mais comumente chamadas de PSV (*Pressure Safety Valve*), são dispositivos projetados para abrir quando a pressão do processo a ser protegido excede a pressão de projeto. São de extrema importância para a indústria, uma vez que representam a última camada de proteção do processo quando todas as demais são insuficientes. A utilização desse tipo de válvula deve-se ao fato de se conseguir reduzir automaticamente os riscos causados pelo excesso de pressão decorrente de situações de emergência, desde que essa tenha sido especificada, dimensionada, e instalada de forma correta (SALIM, 2014).

Todavia, alguns cenários devem ser avaliados por uma ótica ainda mais ampla, como os cenários de fogo e disparos de temperatura (*runaway*). Nesses casos, apesar das PSVs evitarem uma sobrepressão, a temperatura dos vasos e tubulações irão aumentar e a pressão irá se manter

na pressão de projeto do equipamento (*set* da PSV) no caso de fogo, e poderia até ir além no caso de disparo de temperatura.

A perda de controle em algumas reações e processos pode resultar em uma mudança significativa na temperatura e/ou pressão, cujo resultado pode exceder os limites dos materiais selecionados. Para reações exotérmicas, excessos de temperatura e pressão associados ao disparo de temperatura podem reduzir a tensão admissível a níveis abaixo das condições de projeto (API, 2014).

Da mesma forma, a exposição de equipamentos ao fogo pode resultar em sobrepressão devido à geração de vapor e expansão de fluidos. A exposição ao fogo também pode causar um sobreaquecimento das paredes dos vasos resultando na redução da resistência do material (API, 2014).

O padrão 521 da API (2014) caracteriza a fonte do fogo em três tipos: fogo em poças abertas, fogo em poças confinadas e jatos de fogo. Uma poça de fogo geralmente resulta de ignição de líquidos que vazaram, enquanto jatos de fogo resultam da ignição de vazamento de fluidos pressurizados. O fluxo de calor de jatos de fogo é muito alto e localizado, enquanto os fluxos de calor de poças de fogo são menores e não localizados. Fogo em poças confinadas são aquelas que geram o maior fluxo em relação às poças abertas, não obstante o fogo em poça aberta poder afetar vários equipamentos ao mesmo tempo. A intensidade do calor do fogo pode variar dramaticamente dependendo do combustível, ventilação, taxa de vazamento e outros fatores. O padrão API 521 (2014) apresenta as seguintes faixas típicas de intensidade de calor:

- Fogo em poça aberta: 50 kW/m² a 150 kW/m²;
- Fogo em poça confinada: 100 kW/m² a 250 kW/m²;
- Jato de fogo: 100 kW/m² a 400 kW/m².

Os vasos secos (sem líquido) apresentam uma condição ainda mais severa quando expostos ao fogo, uma vez que a transferência de calor da parede do vaso para o gás é maior que para vasos com líquido. A temperatura nesses casos pode chegar rapidamente à condição de ruptura desses vasos (API, 2014).

A Figura 8, adaptada do API 521 (2014), mostra a elevação de temperatura de placas de aço de 2,3 m² expostas à poça de fogo aberta, gerada pela queima de gasolina (taxa calculada de 100 kW/m²). Verifica-se que quanto menor a espessura do material, mais rápida é a elevação de temperatura.



Figura 8 - Elevação de temperatura de placas de aço submetidas à poça aberta de fogo.

FONTE: Adaptação do API Standard 521 (API, 2014)

A Figura 9 apresenta um exemplo de mudança de regime que governa a resistência à tensão em função da temperatura para o aço AS-240 gr321. A partir de uma determinada temperatura (1000°F) o material se torna muito menos resistente à tensão, sendo governado pelo regime de fluência.

Portanto, para eventos nos quais a temperatura dos vasos e equipamentos irá aumentar, a PSV não será totalmente eficaz na proteção dos mesmos, uma vez que o sistema ainda ficará pressurizado.

A não ser que tenha algum dispositivo especial, as PSVs não podem promover uma despressurização, apenas impedem que a pressão suba a valores maiores que as condições máximas de projeto (API, 2014).

Assim, para esses cenários é necessário um sistema complementar de segurança, a despressurização rápida de emergência.



Figura 9 - Mudança de regime de resistência à tensão em função da temperatura.

FONTE: Adaptado de (MEDEIROS, JÚNIOR e TINOCO, 2017).

Sistemas de despressurização rápida de emergência podem ser usados para limitar as consequências de um vazamento em um vaso de pressão, reduzindo a taxa de vazamento ou inventário do vaso. Na maioria das vezes, sistemas de despressurização são usados para reduzir o potencial de falha em cenários de sobreaquecimento. Quando a temperatura do metal é aumentada devido ao fogo ou por descontrole em processos com reações exotérmicas, a temperatura do metal pode alcançar um nível em que pode ocorrer uma ruptura por tensão (API, 2014).

Segundo o API 521 (2014), uma despressurização de emergência rápida e efetiva pode reduzir as taxas de vazamento, duração e severidade de um incêndio e prevenir a ruptura de vasos e tubulações, reduzindo assim o risco às pessoas, bem como danos aos materiais e ao meio ambiente. A despressurização de emergência, geralmente, é acionada manualmente por um comando do operador, mas pode ser comandada automaticamente pelo sistema de controle (*Emergency Shutdown Device*, ESD, *Safety Instrumented System*, SIS) ou por um sistema de detecção de fogo e gás (Fire and Gas detection system, F&G).

Em unidades de hidrotratamento de diesel, o acionamento é feito pelo SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído). Para garantir que o sistema possa ser acionado em qualquer situação, são instaladas botoeiras físicas (sistema eletromecânico), sendo uma localizada no Centro Integrado de Controle (CIC) e outra localizada na Casa de Controle Local (CCL), próximo à unidade.

No caso de proteção de vasos de pressão expostos ao fogo, o sistema de despressurização deverá ter capacidade adequada para permitir a redução da tensão do vaso para níveis seguros. Para o caso de poça de fogo, geralmente se considera a redução da pressão da condição operacional para um nível equivalente à metade da pressão de projeto do vaso em 15 minutos. Esse critério é baseado na temperatura de parede do vaso versus a tensão de ruptura e é geralmente aplicado a vasos de aço carbono com espessura de 25,4 mm ou maior. Em vasos com menores espessuras deverá ser considerada uma taxa de despressurização maior (API, 2014).

A despressurização para a pressão manométrica de 7 kgf/cm² (690kPa | 100 psi) em 15 minutos normalmente é considerada quando o sistema é projetado para reduzir as consequências de vazamentos ou falhas no vaso. Esse critério é geralmente adotado tanto para cenários de falhas e vazamentos quanto para cenário de incêndio. A despressurização também auxilia na redução da alimentação do fogo em caso de vazamentos (API, 2014).

De acordo com as unidades existentes de hidrorrefino no parque de refino brasileiro, os sistemas de despressurização de emergência em unidades de hidrorrefino podem ser projetados para atendimento da taxa de despressurização por meios de válvulas de controle com *Cv* (capacidade da válvula) calculados, por orifício de restrição ou por ambos. Na Figura 10 são apresentadas algumas configurações típicas do sistema de despressurização de emergência em unidades de hidrotratamento de diesel.

O API 521 (2014) destaca os seguintes pontos que devem ser considerados para determinar o critério da taxa de despressurização:

- Tempo tolerável para ruptura (suficiente para pessoas evacuarem a área e/ou preparar ações de resgate);
- Ruptura de vasos (fragmentação e agravamento);
- Ruptura de tubos (agravamento);
- Quantidade de substâncias inflamáveis ou tóxicas que podem ser liberadas após a ruptura;
- Aumento instantâneo na taxa de vazamento após a ruptura;
- Perda de produção, reputação e custos de reconstrução;
- Danos a internos de equipamentos.

A taxa de despressurização deverá levar em conta restrições nos seguintes sistemas:

- Capacidade total do sistema de *flare*;
- Interno de vasos (bandejas, suportes, recheios, catalisadores, etc.);
- Tensão térmica devido à mudança de temperatura.

Outros pontos a serem considerados:

- O sistema de controle perto do vaso poderá estar inacessível durante o incêndio;
- A posição de falha da válvula de despressurização é selecionada para maximizar a disponibilidade como falha aberta ou última posição, equipada com suprimento reserva de ar e à prova de fogo.

Geralmente em unidades de hidrotratamento, adota-se o critério da falha aberta, mas com recursos para tentar minimizar a falha espúria que levaria à despressurização desnecessária da planta.



Figura 10 - Configurações típicas do sistema de despressurização de emergência em unidades de hidrotratamento de diesel.

O sistema de despressurização deve estar disposto em um local seguro, à prova de fogo e, preferencialmente, com sistemas de ar de instrumentos cativos e sistemas robustos de acionamento.

No cálculo da taxa de despressurização, o API 521 (API, 2014) estabelece que, para a redução da pressão interna de equipamentos envolvidos em fogo, o vapor deve ser removido em uma taxa que compense as seguintes ocorrências:

- Vaporização de líquidos pelo calor do fogo;
- Expansão do vapor devido à redução de pressão;
- *Flash* do líquido devido à redução de pressão.

Segundo o API 521 (API, 2014), a carga de vapor total a ser considerada na despressurização pode ser expressa como a soma das ocorrências individuais para todos os equipamentos envolvidos. De forma geral pode ser apresentada como:

$$\dot{m}.t = \sum_{i=1}^{x} (q_{m,f}.t)_{i} + \sum_{i=1}^{x} (q_{m,d}.t)_{i} + \sum_{i=1}^{x} (q_{m,v}.t)_{i}$$
(1)

em que:

d é um indicativo que denota a modificação de densidade do vapor devido à redução da pressão;

- *f* relativo a vaporização pelo fogo;
- *i* índice relativo a um vaso individualmente;
- *m* massa do líquido ou vapor, em kg;
- \dot{m} vazão mássica, em kg/h;
- q_m vazão mássica de vapor, em kg/h;
- *t* intervalo de tempo da despressurização, em horas;
- *v* relativo à vaporização gerada pela redução da pressão;
- *x* número total de vasos no sistema de despressurização.

A quantidade do vapor devido ao fogo é expressa como:

$$\left(q_{m,f}.t\right)_{i} = t\left(\frac{Q}{\lambda}\right)_{i} \tag{2}$$

em que:

Q calor absorvido pela superfície molhada do vaso, em kJ/h;

 λ calor latente do líquido, em kJ/kg.

O cálculo deve ser repetido para cada vaso se as propriedades do vapor forem diferentes.

A quantidade do vapor decorrente da mudança de densidade, em função da redução de pressão, pode ser calculada pela Equação (3).

$$\left(q_{m,d} \cdot t\right)_{i} = 0,1205. V_{i} \left[\left(\frac{p.M}{Z.T}\right)_{a} - \left(\frac{p.M}{Z.T}\right)_{b} \right]_{i}$$
(3)

em que:

a índice que denota o estado inicial da despressurização;

b índice que denota o estado final da despressurização;

T temperatura absoluta, em K;

p pressão absoluta, em kPa;

M massa molar do vapor;

Z fator de compressibilidade, adimensional.

A quantidade de vapor decorrente da vaporização de uma mistura de hidrocarboneto líquido saturado pode ser calculada por procedimento a partir de uma série de *flashes* adiabáticos desde a pressão inicial até a pressão final, removendo todo o vapor gerado em etapas intermediárias. O API 521 sugere que esse cálculo seja realizado utilizando a Equação (4):

$$\left[\left(q_{m,\nu} t \right)_{n} \right]_{i} = \left[\frac{\left(C_{p} \right)_{n} \left(q_{m,L} t \right)_{n-1}}{\left(C_{p} \right)_{n} + \frac{\lambda_{n}}{(\Delta T_{n})}} \right]_{i}$$
(4)

em que:

Cp calor específico do líquido, em kJ/(kg.K);

n passo de tempo entre a condição inicial e final;

 ΔT diferença de temperatura;

L relativo a líquido;

v relativo a vapor.

Caso seja calculado para um cenário de fogo, a equação (4) deverá ser corrigida pelo volume atualizado de líquido remanescente pela Equação (5):

$$\left(q_{m,v},t\right)_{i} \approx \left[\left(q_{m,a},t\right)_{i} - \frac{Q_{i},t}{2\lambda_{i}}\right] w_{i}$$

$$\tag{5}$$

em que w é a fração mássica do líquido inicial do sistema vaporizado.

A carga térmica (calor absorvido) por um vaso contendo líquido pode ser obtido pela Equação (6).

50

$$Q = C_f \cdot F \cdot A_{ws}^{0,82}$$
(6)

em que:

 C_f Constante para cálculo do calor absorvido em caso fogo em vaso molhado. A_{ws} superfície molhada total de um vaso, m²;Ffração residual de vapor no sistema.

O procedimento de cálculo proposto pelo API é complexo e demanda a assistência computacional para os cálculos dos *flashes*.

Apesar de bastante completa, a abordagem apresentada pelas Equações (1) a (5) considera um sistema onde a entrada e a saída de cada vaso é bloqueada no evento de despressurização, e ocorre a variação de volume em cada parte separadamente, sem considerar que existe o fluxo entre os mesmos. Durante um evento de despressurização em unidades de HDT, o sistema de controle regulatório da unidade, como, por exemplo, os controles de níveis, permanecem ativos atuando no sistema.

Nas unidades de hidrotratamento, quando o sistema de despressurização de emergência é acionado, uma sequência de eventos é desencadeada, seguindo uma lógica previamente determinada no sistema de controle da unidade, e documentada em um documento específico, denominado matriz de causa e efeito.

Neste caso, na matriz de causa e efeito as linhas apresentam as causas de um intertravamento e nas colunas as possíveis ações de intertravamento (CHUNG, MCDONALD, *et al.*, 2009). Assim, para uma determinada causa, marcam-se as colunas correspondentes aos intertravamento associado, conforme esquema apresentado na Figura 11, na qual, a título de exemplo, é destacado que uma vazão baixa identificada em um determinado instrumento, FSLL-00i no exemplo, desencadeia uma ação de segurança que é cortar a carga, ação que será executada através do acionamento (fechando) do elemento final XV-00i, uma válvula de intertravamento.

De forma a facilitar o entendimento da apresentação do evento de despressurização na matriz causa e efeito de uma unidade de hidrotratamento de diesel, é apresentado na Figura 12 um exemplo esquemático da seção de alta pressão de uma unidade típica de hidrotratamento de diesel (separação a frio) com a representação do sistema de despressurização e a instrumentação de segurança associada.

Na Figura 12 é apresentada a XV de despressurização em verde (XV-d1 e sua XV redundante, XV-d2). Ao se acionar o sistema de despressurização por meio do acionamento da despressurização de emergência, a XV-d1 recebe o comando de abertura e ao mesmo tempo as

XVs das fontes de alta pressão (VX-01, XV-02, XV-03, XV-04 e XV-05) e de gás combustível para o forno (XV-06) são acionadas para fecharem (válvulas destacadas em vermelho), as bombas de carga (B01) e de água de lavagem (B02) são desligadas e os compressores de reposição de hidrogênio (C02) e compressor de reciclo (C01) são desligados, cessando assim as fontes de pressão e energia externa da seção de alta pressão.

MATRIZ DE CAUS	EFEITO	Identificação	XV-00i	ident_2	ident_3	ident_4	ident_5	ident_6	ident_7	ident_n	
CAUSA		Evento	Cortar Carga	Evento_2	Evento_3	Evento_4	Evento_5	Evento_6	Evento_7	Evento_n	
Descrição do evento	Equipamento	Instrumento	/	1	2	3	4	5	6	7	n
Vazão baixa na seção X	Equipamento Y	FSLL-00i	1	Χ							
Evento 2	Equipamento 2		2			Х					
Evento 3	Equipamento 3		3		Χ		Χ	Х			
Evento 4	Equipamento 4		4								
Evento 5	Equipamento 5		5			Х					Х
Evento 6	Equipamento 6		6						Х	Х	
Evento n	Equipamento n		n	X							Х

Figura 11 - Esquemático de uma matriz causa e efeito de intertravamento.



Figura 12 - Esquemático da seção de alta pressão de uma unidade típica de hidrotratamento de diesel com a representação do sistema de despressurização e a instrumentação de segurança associada.

Assim, uma representação para o evento de despressurização do esquemático da Figura 12 em uma matriz de causa e efeito seria como a matriz apresentada na Figura 13.

Na matriz causa x efeito apresentada na Figura 13, quando o comando HS-01 (acionamento do botão de despressurização de emergência) é acionado, os eventos de 1 a 8 e de 10 a 12 são desencadeados. Os eventos que se referem a um trem específico, como o corte da carga de gás combustível do forno (item 7), ocorrem simultaneamente nos dois trens de reação.

Cabe destacar que a matriz causa x efeito da Figura 13 não engloba todos os efeitos da planta de processo, pois estão restritos aos efeitos que estão dentro do domínio abrangido neste estudo (parte simulada da seção de alta pressão).

MATRIZ DE CAUSA	A E EFEITO	EFEITO	Identificação	XV-02	B-01	XV-03	B-02	C-02	XV-01	XV-06	XV-d1	XV-d2	C-01	XV-04	XV-05
CAUSA			Evento	Cortar Carga	Parar bomba de carga, B-01	Cortar Água de Lavagem	Parar Bomba de Água de Lavagem, B-02	Parar compressr de make-up de H2	Cortar make-up de hidrogênio	Cortar carga do forno	Abrir XV de despressurização	Abrir XV de despressurização	Parar Compressor de reciclo	Fechar XV a montante do compressor de reciclo	Fechar XV a jusante do compressor de reciclo
Descrição do evento	Equinamento	Instrumento		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Despressurização de Emergência	Seção de Alta Pressão	HS-01	1	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Despressurização de Emergência	Seção de Alta Pressão	HS-02	1	X	X	X	X	X	X	X		x	X	X	X

Figura 13 - Exemplo de Matriz causa e efeito para o cenário hipotético.

Nessa matriz é fácil verificar que a XV-d2 (ação 9) não é acionada, sendo, portanto, uma válvula reserva da XV-d1. Cabe, no entanto, ressaltar que, mesmo que a HS-02 seja acionada juntamente com a HS-02, a taxa de despressurização não será modificada, uma vez que a vazão de despressurização é limitada (controlada) pela existência de um orifício de restrição a jusante das válvulas de despressurização, pois o escoamento se dá em regime crítico, ou seja, escoamento sônico, que é a maior velocidade que um efeito de pressão pode ser propagado em um gás. Conforme Perry et al. (1997), o escoamento crítico ocorre quando o número de Mach se iguala à 1. Nessas condições tem-se que:

$$\frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}$$
(7)

em que:

 p^* pressão em um tempo t;

 p_0 pressão inicial.

k razão entre os calores específicos c_p/c_v

Para valores de *k* próximos a 1,4, a razão de p^*/p_0 é de 0,528, o que significa que para pressões a jusante do orifício de restrição com valores inferiores a 0,528 vezes a pressão a montante, o escoamento será crítico e o escoamento será limitado pela velocidade sônica.

Em relação à Figura 12, outras observações podem ser feitas, como:

- O controle regulatório de temperatura, vazão e nível estarão atuando e tentando controlar essas respectivas variáveis de processo mesmo durante o evento de despressurização;
- Toda a seção de alta pressão está interconectada, exceto pelo compressor de reciclo, que é isolado do sistema pelas XV-04 e VX-05;
- Ao acionar a despressurização de emergência, à medida que a pressão é reduzida no vaso separador, devido ao gradiente de pressão, todo o inventário da unidade tende a se deslocar em direção ao vaso, que é o ponto de menor pressão;
- O deslocamento de todo o inventário da unidade em direção ao vaso separador não é imediato, pois todos os equipamentos e tubulações oferecem uma capacitância (*hold-up*) ao sistema. Portanto, existe uma dinâmica complexa que ocorre nesse evento.

Uma importante observação em relação aos principais equipamentos da seção de alta pressão é a proteção existente na maioria dos equipamentos, como o isolamento térmico à prova de fogo e outros dispositivos de proteção ao fogo, como, por exemplo, *sprinklers*. Portanto, na eventualidade de ocorrência de fogo na unidade, existiria uma defasagem inicial até que o fogo realmente incidisse diretamente no metal dos equipamentos e linhas.

Além desse fato, por mais que as unidades com maiores severidades operem com carga mais reativas (maior percentagem de correntes instáveis na carga), a possibilidade de disparo de temperatura é relativamente baixa, se comparadas com unidades de hidrocraqueamento ou unidades de hidrotratamento de nafta craqueada, que, apesar de operarem em pressões bem mais baixas que as unidades de hidrotratamento de diesel, apresentam maiores possibilidades desse evento por tratarem somente carga instável, com muitas olefinas e poliolefinas.

Assim, os cálculos do projeto do sistema de despressurização de emergência para a determinação das capacidades das válvulas de despressurização ou do diâmetro de abertura do orifício de restrição, podem ter os eventos de fogo e disparo de temperatura (*runaway*) negligenciados.

Algumas metodologias simplificam ainda mais o cálculo da vazão de despressurização, abordando o sistema somente com a variação da pressão em função da retirada de vapor, sem considerar o efeito da vaporização, mantendo as propriedades do gás constantes ao longo da despressurização.

A abordagem do sistema de despressurização de uma unidade de HDT de diesel baseada nesse tipo de metodologia é classificada como uma forma simplificada do fenômeno, uma vez que não se contabiliza a vaporização do líquido existente durante o evento de despressurização de emergência.

A seguir são apresentadas três equações que podem ser utilizadas baseadas nesse princípio.

2.3.1. Formas simplificadas de abordagem do sistema de despressurização de emergência

Uma forma do cálculo baseado nessa premissa é baseada na Equação 10-27 de escoamento compreensível em escoamento crítico, de Perry et al. (1997), adaptada com a inserção do fator de compressibilidade para corrigir algum desvio da idealidade.

$$w_{max} = C.A_2.p_0.\sqrt{g_c.k\left(\frac{M}{Z.R.T}\right).\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\left(\frac{k+1}{k-1}\right)}}$$
(8)

em que C é o coeficiente de capacidade (adimensional).

Definindo:

$$C_1 = \frac{C.\pi}{4} \tag{9}$$

$$C_2 = \sqrt{g_c \cdot k \left(\frac{M}{Z.R.T}\right) \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\left(\frac{k+1}{k-1}\right)}}$$
(10)

em que $g_c = 1 \frac{kg.m}{N.s^2}$, tem-se para escoamento sônico que o coeficiente de capacidade *C* se aproxima de 0,84 PERRY et al. (1997).

Então:

$$C_1 = \frac{C.\pi}{4} = 0,65973 \tag{11}$$

Reescrevendo a Equação (8) em termos das definições acima, tem-se que:

$$w_{max} = C_1 \cdot C_2 \cdot d_{orif}^2 \cdot p_0 \tag{12}$$

Derivando a vazão em relação ao tempo, Equação (13), é possível calcular a pressão em qualquer instante pela Equação (14).

$$w = -\frac{dm}{dt} = -\frac{V.M}{Z.R.T}\frac{dp}{dt} = C_1.C_2.d_{orif}^2.p$$
(13)

$$-\frac{dp}{p} = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot Z \cdot R \cdot T}{V \cdot M} \cdot d_{orif}^2 \cdot dt$$
(14)

Integrando a partir da condição inicial: $t = 0 \rightarrow p = p_0$;

$$\int -\frac{dp}{p} = \int \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot Z \cdot R \cdot T}{V \cdot M} \cdot d_{orif}^2 \cdot dt$$
(15)

$$ln\left(\frac{p_0}{p_t}\right) = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot Z \cdot R \cdot T}{V \cdot PM} \cdot d_{orif}^2 \cdot t$$
(16)

em que:

- *p* pressão absoluta, expressa em kPa;
- *T* temperatura absoluta, em K;
- *V* volume ocupado pelo vapor, em m³;
- *t* tempo transcorrido da despressurização, em segundos;

Então, a pressão a qualquer tempo $t(p_t)$, pode ser expressa como:

$$p_t = \frac{p_0}{exp\left(\frac{C_1.C_2.Z.R.T}{V.PM}.d_{orif}^2.t\right)}$$
(17)

Outras duas equações que apresentam a pressão de despressurização de um sistema em função do tempo são apresentadas por Beychock (2005) em sua publicação "*Calculating Accidental Release Flow Rates From Pressurized Gas Systems*".

A primeira equação é adaptada da equação original de Rasouli e Williams (1995)⁴ e se apresenta da seguinte forma:

$$p_t^{(1-k)/2k} = p_0^{(1-k)/2k} + t \frac{C.A}{V} \frac{(k-1)}{2k} \sqrt{\frac{g_c Rk^3}{M} \left(\frac{T}{p_0^{(k-1)/k}}\right) \left[\frac{2}{k+1}\right]^{(k+1)/(k-1)}}$$
(18)

A segunda equação é adaptada de Bird, Stewart e Lightfoot (1960)⁵ cuja equação é apresentada a seguir:

$$t = \left[F^{(1-k)/2} - 1\right] \left(\frac{2}{k-1}\right) \left(\frac{V}{C.A}\right) \left[\frac{g_C k p_0}{\rho} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}\right]^{-1/2}$$
(19)

Em que F é a fração mássica remanescente no sistema e a pressão pode ser obtida por:

$$p_t = p_0 F^k \tag{20}$$

Em ambas as equações, a variação da vazão mássica pode ser calculada a partir da expressão da lei universal dos gases, em que W é a massa contida no vaso em cada pressão:

$$W = PVM/RT \tag{21}$$

Conforme pode ser observado, essas equações aproximadas só levam em conta um gás contido em um sistema fechado. Ou seja, ao aplicar estas equações em um sistema bifásico, a fase líquida e o fenômeno de vaporização são ignorados.

Outra forma de cálculo simplificado, mas que considera o fenômeno de vaporização, do sistema de despressurização de emergência é a utilização do módulo *depressuring* do HYSYS, que é um modelo dinâmico em que o sistema a ser despressurizado consiste de apenas um vaso e com despressurização adiabática. Apesar de ser um modelo dinâmico, essa utilidade não

⁴ Rasouli, F. and Williams, T.A., J. Air & Waste Management Association, 1995 Apud (BEYCHOK, 2005).

⁵ Bird, R.B., Stewart, W.E., and Lightfoot, E.N., Transport Phenomena, John Wiley & Sons, New York, New York, USA, 1960 Apud (BEYCHOK, 2005).

necessita de licença específica do HYSYS dinâmico, bastando a licença do modo estático (ASPENTECH, 2017).

Devido à complexidade de cálculo mais realístico, a abordagem mais completa deste problema pode ser feita via simulação dinâmica com a modelagem da planta real (*Digital Twin*), na qual o fator tempo, as dimensões dos equipamentos e suas resistências ao escoamento interferem diretamente na dinâmica desse evento. Assim, a aplicação do *Digital Twin* se mostra uma potencial ferramenta para avaliação e projeto desses sistemas.

O Digital Twin tem sido implementado ultimamente em modelos globais nas refinarias brasileiras, auxiliando os analistas nas alocações de petróleo e os programadores de produção no planejamento diário de suas produções (POLITO e RAMALHO, 2019). Entretanto, o *Digital Twin* ainda não vem sendo aplicado em análises detalhadas de plantas industriais. Essa aplicação poderia auxiliar bastante as avaliações de HAZOP e LOPA (Layer Of Protection Analysis), onde cada evento poderia ser simulado e as salva-guardas testadas.

Aplicações específicas de simulação dinâmica em segurança de processos são relativamente comuns na indústria, como apresentado por Salim (2014), onde é verificado o sistema de segurança e dimensionamento de PSVs utilizando o *software* HYSYS. Entretanto, estas análises são específicas e a simulação é pontual.

Assim, a proposta desse trabalho é a avaliação de segurança de uma unidade industrial de hidrorrefino com a simulação de toda a seção de alta pressão, com dados reais de equipamentos, linhas e controle, de forma a reproduzir e comparar os resultados com os modelos simplificados apresentados.

3. METODOLOGIA

Como já apresentado, este trabalho tem como objetivo verificar o comportamento dinâmico do sistema de despressurização de emergência de uma unidade de hidrotratamento de diesel, cujo cálculo geralmente é realizado com simplificações, desconsiderando as dinâmicas do *hold-up* da unidade, da atuação do sistema de controle regulatório e das trocas térmicas, por exemplo.

Para a elaboração deste estudo, foi desenvolvida uma simulação dinâmica (*Digital Twin*) de uma planta real, com o modelo fenomenológico implementado no HYSYS, considerando rigorosamente as dimensões reais dos equipamentos e linhas, parâmetros de controle e as condições operacionais observadas na prática.

A escolha da unidade industrial objeto deste estudo foi motivada por um conjunto de fatores, tais como a pouca idade da planta (partida em 2013), tecnologia moderna (estado da arte), maior disponibilidade de documentação, robustez do sistema de despressurização instalado, confiabilidade da coleta de dados no sistema *Plant Information-PI* e, mais importante, que tenha experimentado o evento de despressurização de emergência.

Após a definição da unidade industrial, foram coletados os dados de projeto, construção e montagem da mesma, como as folhas de dados de projeto e dos fabricantes dos equipamentos e instrumentos, isométricos das linhas e fluxogramas atualizados conforme construído (fluxogramas *as-built*).

Em conjunto com esses dados, foram levantados os dados operacionais da unidade e desenvolvida a simulação estática da unidade a qual foi calibrada e validada por comparação com os demais dados operacionais.

Em seguida foram definidos e implementados os controladores e seus parâmetros de sintonia, os quais foram obtidos do SDCD da unidade real, e na sequência implementado na simulação dinâmica.

3.1. Levantamento de dados de projeto e operacionais da planta industrial

As informações dos equipamentos da seção de alta pressão, foco do estudo, foram obtidas de folhas de dados de projeto e de fabricantes da unidade real. Da mesma forma foram levantados todos os isométricos das tubulações do sistema. Os dados operacionais da unidade

foram obtidos por meio do *software Process Book* e do suplemento *Plant Information-PI* instalado no *software Microsoft Excel*.

3.1.1. Dados de Operação

A unidade escolhida tem, como já mencionado, a facilidade de obtenção de dados operacionais e outras qualidades por ser uma planta moderna e instalada recentemente. Entretanto, é uma planta de elevada capacidade, possuindo dois trens de reação. Ou seja, pré-aquecimento, reação e resfriamento são realizados em seções paralelas, onde a carga, após bombeada, é separada em dois trens paralelos, cada um recebendo o gás de reciclo e seguindo para a respectiva seção de reação, e voltando a se unir somente a montante do vaso separador de alta pressão e baixa temperatura, conforme apresentado na Figura 14. Como será visto, esta particularidade é um fator de complexidade na elaboração do *Digital Twin*.

A unidade industrial escolhida foi projetada para processar 10.000 m³/d de carga fresca e tem como objetivo produzir óleo diesel S-10 em campanhas de quatro anos, e também é projetada para operar continuamente com carga referente a 50% da de projeto (caso *turndown*).

O desenvolvimento do modelo estático foi baseado nos dados de operação do momento imediatamente anterior ao evento de despressurização de emergência real da unidade.

Uma visão geral do esquemático da unidade industrial, considerando somente o trem A, pode ser encontrado no diagrama de processo simplificado (*Process Flow Diagram*, PFD) disponível na Figura 14 e os dados operacionais obtidos no *software* PI do momento imediatamente anterior ao evento de despressurização de emergência estão disponíveis na Tabela 1. A Figura 14 apresenta a seção de carga, onde três correntes entram na unidade, corrente de destilação direta (D_DD), óleo leve de reciclo (LCO, *Light Cycle Oil*), que é proveniente de unidades de craqueamento catalítico (FCC), e Gasóleos e Naftas provenientes de unidades de coqueamento retardado (UCR), aqui denominadas DNK. Além destas correntes, existe um alinhamento para reciclo de produto hidrogenado, denominado Recirculação.

A carga é bombeada pela bomba B02 e em seguida é separada em duas partes, uma que seguirá para a bateria de pré-aquecimento e outra que irá para uma bateria similar em outro "trem" de reação, apresentado apenas como "trem B" na Figura 14.



Figura 14 - Diagrama de processo simplificado da unidade real de HDT de diesel (trem A).

rabela 1 - Sumario de correntes reference ao diagrama de processo simprimeado												
Unit	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
К	414	404	431	553	548	609	631	632	521	463	298	373
(°C)	140	131	157	320	275	336	358	359	248	190	25	99
MPa	13,52	12,08	11,78	11,78	11,71	11,45	11,23	10,88	10,71	10,63	12,81	10,61
(kgf/cm² m)	136,9	122,2	120,2	120,2	118,4	115,8	113,5	110	108,2	107,3	130,6	107
m³/d	5856	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500	-
Nm³/h	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Unit	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
К	305	305	305	305	320	320	320	320	357	305	305	305
(°C)	32	32	32	32	47	47	47	47	84	32	32	32
MPa	10,61	10,59	10,56	10,56	12,13	12,13	12,13	12,13	12,11	1,15	0,42	1,00
(kgf/cm² m)	107	107	106,7	106,7	122,7	122,7	122,7	122,7	122,5	10,7	3,3	9,2
m³/d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5890	990	1042
Nm³/h	-	-	-	-	510952	128390	33601	93485	93485	-	-	-
	Unit K (°C) MPa (kgf/cm ² m) m ³ /d Unit K (°C) MPa (kgf/cm ² m) m ³ /d Nm ³ /d Nm ³ /h	Unit 01 K 414 (°C) 140 MPa 13,52 (kgf/cm²m) 136,9 m³/d 5856 Nm³/h - Unit 13 K 305 (°C) 32 MPa 10,61 (kgf/cm²m) 107 m³/d - M³/d -	Unit O1 O2 K 414 404 (°C) 140 131 MPa 13,52 12,08 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 m³/d 5856 - Nm³/h - - Unit 13 14 K 305 305 (°C) 32 32 MPa 10,61 10,59 (kgf/cm²m) 107 107 m³/d - - MPa 10,61 10,59 (kgf/cm²m) 107 107 m³/d - - Nm³/h - -	Unit 01 02 03 K 414 404 431 (°C) 140 131 157 MPa 13,52 12,08 11,78 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 120,2 m³/d 5856 - - Nm³/h - - - Unit 13 14 15 K 305 305 305 (°C) 32 32 32 MPa 10,61 10,59 10,56 (kgf/cm²m) 107 106,7 106,7 m³/d - - - Nm³/h - - -	Unit 01 02 03 04 K 414 404 431 553 (°C) 140 131 157 320 MPa 13,52 12,08 11,78 11,78 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 120,2 120,2 m³/d 5856 - - - Nm³/h - - - - Unit 13 14 15 16 K 305 305 305 305 (°C) 32 32 32 32 MPa 10,61 10,59 10,56 10,56 (kgf/cm²m) 107 107 106,7 106,7 (kgf/cm²m) 107 107 106,7 10,7 m³/d - - - - Mm³/h - - - -	Unit 01 02 03 04 05 K 414 404 431 553 548 (°C) 140 131 157 320 275 MPa 13,52 12,08 11,78 11,78 11,71 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 120,2 120,2 118,4 m³/d 5856 - - - - Nm³/h - - - - - Unit 13 14 15 16 17 K 305 305 305 305 320 (°C) 32 32 32 47 MPa 10,61 10,59 10,56 10,56 12,13 (kgf/cm²m) 107 107 106,7 106,7 122,7 m³/d - - - - - M³/d - - - - - M³/d	Unit 01 02 03 04 05 06 K 414 404 431 553 548 609 (°C) 140 131 157 320 275 336 MPa 13,52 12,08 11,78 11,78 11,71 11,45 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 120,2 120,2 118,4 115,8 m³/d 5856 - - - - - - Nm³/h - - - - - - - Unit 13 14 15 16 17 18 K 305 305 305 305 320 320 320 (°C) 32 32 32 32 47 47 MPa 10,61 10,59 10,56 10,56 12,13 12,13 (kgf/cm²m) 107 107 106,7 106,7 122,7	Unit 01 02 03 04 05 06 07 K 414 404 431 553 548 609 631 (°C) 140 131 157 320 275 336 358 MPa 13,52 12,08 11,78 11,78 11,71 11,45 11,23 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 120,2 120,2 118,4 115,8 113,5 m³/d 5856 - - - - - - Nm³/h - - - - - - - Unit 13 14 15 16 17 18 19 K 305 305 305 320 320 320 320 (°C) 32 32 32 32 47 47 47 MPa 10,61 10,59 10,56 10,56 12,13 12,13 12	Unit 01 02 03 04 05 06 07 08 K 414 404 431 553 548 609 631 632 (°C) 140 131 157 320 275 336 358 359 MPa 13,52 12,08 11,78 11,78 11,71 11,45 11,23 10,88 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 120,2 120,2 118,4 115,8 113,5 110 m³/d 5856 - <t< td=""><td>Unit 01 02 03 04 05 06 07 08 09 K 414 404 431 553 548 609 631 632 521 (°C) 140 131 157 320 275 336 358 359 248 MPa 13,52 12,08 11,78 11,78 11,71 11,45 11,23 10,88 10,71 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 120,2 120,2 118,4 115,8 113,5 110 108,2 m³/d 5856 -</td></t<> <td>Unit 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 K 414 404 431 553 548 609 631 632 521 463 (°C) 140 131 157 320 275 336 358 359 248 190 MPa 13,52 12,08 11,78 11,78 11,71 11,45 11,23 10,88 10,71 10,63 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 120,2 120,2 118,4 115,8 113,5 110 108,2 107,3 m³/d 5856 -</td> <td>Unit 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 K 414 404 431 553 548 609 631 632 521 463 298 (°C) 140 131 157 320 275 336 358 359 248 190 25 MPa 13,52 12,08 11,78 11,71 11,45 11,23 10,88 10,71 10,63 12,81 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 120,2 118,4 115,8 113,5 110 108,2 107,3 130,6 m³/d 5856 -</td>	Unit 01 02 03 04 05 06 07 08 09 K 414 404 431 553 548 609 631 632 521 (°C) 140 131 157 320 275 336 358 359 248 MPa 13,52 12,08 11,78 11,78 11,71 11,45 11,23 10,88 10,71 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 120,2 120,2 118,4 115,8 113,5 110 108,2 m³/d 5856 -	Unit 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 K 414 404 431 553 548 609 631 632 521 463 (°C) 140 131 157 320 275 336 358 359 248 190 MPa 13,52 12,08 11,78 11,78 11,71 11,45 11,23 10,88 10,71 10,63 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 120,2 120,2 118,4 115,8 113,5 110 108,2 107,3 m³/d 5856 -	Unit 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 K 414 404 431 553 548 609 631 632 521 463 298 (°C) 140 131 157 320 275 336 358 359 248 190 25 MPa 13,52 12,08 11,78 11,71 11,45 11,23 10,88 10,71 10,63 12,81 (kgf/cm²m) 136,9 122,2 120,2 118,4 115,8 113,5 110 108,2 107,3 130,6 m³/d 5856 -

Tabela 1 - Sumário de correntes referente ao diagrama de processo simplificado

A carga é então pré-aquecida, após receber uma corrente de gás de reciclo, nos permutadores P01A e P02A, antes de ir para o forno aquecedor F01A. Existe um desvio (*by-pass*) onde parte da carga pode desviar o P01A e P02A, indo diretamente para o forno F01A. O sufixo A foi utilizado para diferenciar do segundo trem de reação, onde o sufixo adotado é o B.

Após ser aquecida até a temperatura de reação desejada de 609 K (336 °C) a carga combinada (carga mais gás de reciclo) é alimentada no reator R01A e R02A, que contêm três e dois leitos catalíticos, respectivamente. Devido à exotermicidade da reação de HDT, na saída de cada leito catalítico, o efluente recebe injeção de gás refrigerante (*quench*) de forma a resfriar a carga para entrar no leito seguinte. Por fim, o efluente de reação sai do sistema de reação a 632 K (359 °C).

Parte do efluente de reação é então resfriado no P02A cedendo calor para a carga de reação e em seguida é misturado com a parte que desvia o P02A, e enviado ao vaso V02A com temperatura de 521 K (248 °C) controlada pela fração que desvia o P02A. O gás separado no vaso V02A é resfriado no P01A, enquanto o líquido do vaso V02A vai para a seção de baixa pressão, compondo a carga de retificação. Portanto, configurando ser uma unidade de hidrotratamento com separação a quente.

O gás resfriado no P01A é misturado com uma corrente de gás de reciclo, como parte de uma estratégia do controle de gás de reciclo da unidade descrita mais adiante, e, em seguida, recebe injeção de água de lavagem, proveniente da bomba B06, antes do resfriamento final que é realizado no *air-cooler* P03A.

Após o P03A, o efluente da seção de reação do trem "B", é misturado com o efluente do trem "A" e seguem para o vaso separador de alta pressão (10,59 Mpa | 107 kgf/cm²m) e baixa temperatura (305 K | 32 °C), V03. Portanto, o vaso separador V03 é único para os dois trens de reação.

Após separado no vaso V03, o gás de reciclo rico em hidrogênio retorna ao sistema passando por uma torre absorvedora, T01, que estava alinhada, mas fora de operação no momento do evento, e em seguida passa pelo vaso de *knock-out* V07, onde eventuais líquidos formados são separados para proteção do compressor centrífugo C01, onde finalmente é comprimido retornando ao sistema com pressão de 12,13 Mpa (122,7 kgf/cm²m). Parte do gás de reciclo é recirculado para montante dos resfriadores finais P03A e P03B em ambos os trens de reação, contribuindo para o controle da relação hidrogênio x carga da unidade. O gás de reciclo que não é recirculado se divide em duas correntes, uma indo para as seções de aquecimento e outra, como gás de *quench*, para as seções de reação de cada trem da unidade, resfriando os efluentes de cada leito catalítico.

O hidrogênio consumido e o dissolvido nas correntes líquidas que saem do sistema são repostos pelo compressor de reposição de hidrogênio C02, que comprime o hidrogênio gerado na Unidade de Geração de Hidrogênio, UGH. O gás de reposição de hidrogênio tem pureza de 99,9% molar de hidrogênio.

O Anexo 1 apresenta a interface desenvolvida no *software* Excel para obtenção dos dados reais de processo por meio do *plug-in PI System*.

3.1.2. Dados de tubulação

Os dados das tubulações de processo foram obtidos pelo levantamento dos isométricos elaborados para a construção e montagem da unidade. No total foram contabilizados os dados de 287 linhas, correspondendo a 4.415 m de comprimento com volume de 269,3 m³. Esses dados estão apresentados no Anexo 3 - Levantamento de dados de tubulação por meio dos isométricos da unidade.

Devido à alta demanda computacional para rodar a simulação completa no modo dinâmico, as tubulações foram agrupadas de forma a minimizar a quantidade de módulos *Pipe Segment*. Esse agrupamento foi realizado por seções e mantendo o mesmo volume e resistência ao escoamento (mesmo diferencial de pressão) das linhas originais, sendo implementados em módulos *Pipe Segments* denominados capacitores (Cap1 ao Cap10).

As alocações dos capacitores estão apresentadas no Anexo 2 e cada seção de tubulação que foi agrupada para elaboração de um capacitor está mostrada no Anexo 3. Para cada seção foi calculado o diâmetro nominal médio (Dnm) como média dos diâmetros nominais reais em função do comprimento, que foi o diâmetro inicial de verificação da resistência, e em seguida determinado o diâmetro nominal do capacitor (Dn_c) que representava a mesma resistência ao escoamento para o novo comprimento equivalente (L) que forneceria o mesmo volume (V) daquela seção.

Assim, na Tabela 2, é apresentado, para cada capacitor, seu diâmetro nominal médio calculado (Dnm), o diâmetro nominal do capacitor (Dn_c), o Schedule típico (maior frequência) do trecho (SCH), o diâmetro interno (Di) e diâmetro externo (Do) do tubo equivalente, o comprimento equivalente (L) que forneceu o mesmo volume (V) da seção original.

				,		1		1		1		
Conneiten	Dr	ım	D	Dnc		D inte	rno, Di	D exte	rno, Do	1 (m)		
Capacitor	polegadas	mm	polegadas	mm	SCH	polegadas	mm	polegadas	mm	L (M)	v (m)	
Cap1	9,298	236,179	10,000	254,000	160	8,500	215,900	10,750	273,050	169,555	6,207	
Cap2	11,426	290,211	12,000	304,800	80S	11,750	298,450	12,750	323,850	248,577	17,390	
Cap3	12,455	316,369	12,000	304,800	80S	11,750	298,450	12,750	323,850	112,680	7,883	
Cap4	17,496	444,402	18,000	457,200	80S	16,124	409,550	18,000	457,200	254,615	33,542	
Cap5	10,948	278,078	12,000	304,800	80S	11,750	298,450	12,750	323,850	295,798	20,693	
Cap6	8,085	205,347	10,000	254,000	80S	9,750	247,650	10,750	273,050	240,640	11,591	
Cap7	11,076	281,338	12,000	304,800	120	10,750	273,050	12,750	323,850	116,938	6,847	
Cap8	17,384	441,551	18,000	457,200	120	15,250	387,350	18,000	457,200	307,521	36,239	
Cap9	6,768	171,900	8,000	203,200	120	7,187	182,550	8,625	219,075	185,883	4,865	
Cap10	6,871	174,535	6,000	152,400	120	5,501	139,725	6,625	168,275	234,126	3,590	

Tabela 2 - Determinação dos diâmetros e comprimentos equivalente dos capacitores

A maior diferença entre os Dnc determinados em relação ao Dnm nos capacitores 5 e 6 é devido às linhas do resfriador P03A. Por ser um air-cooler, o alinhamento é dividido para as baias, onde os diâmetros são bastante reduzidos, conforme pode ser visto na Figura 15.

Assim, o diâmetro médio levando-se em conta esses diâmetros, geraria diâmetros equivalentes menores que, por consequência, apresentariam altas perdas de carga.



Figura 15 - Divisão das linhas na entrada e saída do air-cooler P03A.

3.1.3. Equipamentos industriais

Os dados dos equipamentos industriais que foram utilizados para o desenvolvimento das simulações estática e dinâmica (dados da seção de alta pressão) foram obtidos das folhas de dados de projeto e desenhos dos fabricantes e são apresentados seguindo o fluxo do processo da planta industrial.

A bomba de carga da unidade, por estar antes da válvula de intertravamento da unidade, não precisou ser modelada, sendo a pressão ajustada como informação de entrada na simulação. O controle da vazão de carga do trem A é feito pela válvula FV014.

Os dados utilizados referentes aos primeiros trocadores carga x efluente, o P01A e P02A estão apresentados na Tabela 3.

Os volumes estimados dos trocadores de calor P01A e P02A, apresentados na Tabela 8, foram calculados com o auxílio do *software* HTRI *Xchanger Suite* 7.3.1 (*Heat Transfer Research, Inc*). Os relatórios resumidos estão apresentados no Anexo 4.

	Unidade	P-01	P-02
Passes nos Tubos		2	2
Passes no Casco		1	1
Cascos em série		1	5
Código TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association	on)**	DEU	DEU
Orientação		horizontal	horizontal
Queda de pressão nos tubos	kPa	11,8	145,1
Queda de pressão no casco	kPa	26,5	81,4
Volume dos Tubos* (total)	m ³	2,42	22,35
Volume dos casco* (total)	m ³	4,50	27,16
Diametro do casco	mm	1200	1425
N° de tubos por casco		742	634
Pitch	mm	25	32
Layout dos tubos		Square Rotated 45°	e Rotated 45°
Shell Fouling	m².hr.K/k	cJ 0,001	0,001
Tipo de Chicana		Dupla	Dupla
Orientação da Chicana		Vertical	Vertical
Corte da Chicana	%	17,6	18,2
Espaçamento das Chicanas	mm	295	400
Diâmetro interno do tubo	mm	19,05	25,40
Diâmetro interno do tubo	mm	14,83	21,18
Comprimento dos tubos	m	6,096	6,096
Tube Fouling	m².h.K/k	J 0,0006	0,0006
Condutividade Térmica	W/m.K	0,2266	0,2534

Tabela 3 - Dados de entrada dos permutadores de calor P01A e P02A

*Obtidos pelo software HTRI

** Códigos TEMA (D-Fecho especial de alta pressão, E-Casco de um passe, U-Feixe dos tubos em U)

O forno F01A foi simulado com o módulo heater, estando o mesmo com folga de carga térmica, operando com 24,91 MMkJ/h (5,95 MMkcal/h), enquanto seu projeto admite carga térmica de até 72,35 MMkJ/h (17,28 MMkcal/h). Entretanto, o volume do forno teve que ser calculado, conforme Tabela 4, para ser inserido no modo dinâmico.

Os vasos da seção de alta pressão tiveram seus volumes totais inseridos na simulação conforme Tabela 8. A torre T01 por estar alinhada, mas fora de operação, foi considerada como um vaso na simulação, uma vez que na realidade o comportamento desta torre seria similar ao vaso de knock-out, V07.

Tabela 4 - Cálculo do volume do Forno Aquecedor F01A									
	Radiação	Crossover	Convecção	Total					
Diâmetro nominal (polegada) e schedule dos tubos	6 sch 120	6 sch 120	5 sch 120						
Diâmetro interno dos tubos (pol.)	5501	5501	4563						
Diâmetro interno dos tubos (m)	0,1397	0,1397	0,1159						
Comprimento dos tubos, (m)	12500	10000	6400						
CC (m)	0,457		0,305						
Lcomb* (m)	13218	10000	6879						
Número de tubos	40	4	40						
Volume (m ³)	8,1	0,6	2,9	11.6					

. _...

CC: Distância centro-a-centro entre tubos.

*Lcomb: comprimento de um tubo mais curva retificada (Lcomb = Comprimento do tubo + pi*CC/2)

O volume dos reatores foi calculado como um espaço vazio, levando-se em conta o valor considerado no projeto, de 55,77% do volume total, devido ao inventário catalítico. Apesar do espaço ocupado pelo leito catalítico ser bem superior, esse valor será assumido em função da porosidade do mesmo.

A Tabela 5 apresenta o cálculo realizado para os reatores de um trem de reação, R-01A e R-02A.

Tubera 5 Caledio				
		R01	R02	Total
Comprimento entre linhas de tangência*	m	21,8	22,0	
Diâmetro interno	m	3,7	3,7	
Volume Total do Cilindro	m ³	238,4	240,0	
Volume das calotas	m ³	27,2	27,2	
Volume total do reator	m ³	265,6	267,1	532,7
% de Espaço Vazio	%	0,6	0,6	
Volume Vazio Total	m ³	148,1	149,0	297,1

ria dag antaliga dama da u 1 ~

*Linha de tangência é a cota onde termina a seção cilíndrica e inicia-se a calota (tampo) do vaso.

66

Ressalta-se que da mesma forma que os reatores, o vaso V02A tem seu similar no trem B de reação.

Tabela 6 - Volu	umes totais de cad	a vaso da seção de	alta pressão		
		V-02A	V-03	T-01	V-07
Orientação	-	vertical	horizontal	vertical	vertical
Comprimento entre linhas de tangência	m	3,81	7,78	12,415	4,03
Diâmetro interno	m	3,8	2,52	2,5	2,34
Volume do cilindro	m ³	43,2	38,8	60,9	17,3
Volume das calotas	m ³	28,7	8,4	8,2	6,7
Volume total	m ³	71,9	47,2	69,1	24,0

O volume do *air-cooler* P03A também foi calculado utilizando o *software* HTRI, no qual se pode calcular a diferença do peso total do equipamento e o peso total do equipamento cheio de água (Tabela 7). O relatório do *software* HTRI para o P03A pode ser encontrado no Anexo 5.

Tabela 7 - Volume do <i>air-cooler</i> P03A						
Item	Unidade	Valor				
Peso do air-cooler seco	kg	229488				
Peso do air-cooler com água	kg	242252				
Diferença	kg	12764				
Massa específica da água	kg/m ³	1000				
Volume total	m ³	12,764				

Tabela 8 - Volume total e volume total de gás da seção de alta pressão

Equipamento	unidades	Volume, m ³	Volume total, m ³	% nível de líquido	Volume de gás, m ³
P-01A casco	2	4,5	9,0	100%	9,0
P-01A tubos	2	2,4	4,8	100%	4,8
P-02AE casco	2	27,2	54,3	100%	54,3
P-02AE tubos	2	22,4	44,7	100%	44,7
F-01A	2	11,6	23,2	100%	23,2
R-01A/R-02A	2	297,1	594,2	100%	594,2
V-02A	2	71,9	143,9	33%	95,9
P-03A tubos	2	12,8	25,5	100%	25,5
V-03	1	47,2	47,2	35%	30,5
T-01	1	69,1	69,1	2%	67,7
V-07	1	24,0	24,0	100%	24,0
Linhas	-	269,3	269,3	-	269,3
	Total -	-	1309,3	-	1243,3

O volume total da seção de alta pressão é resumido na Tabela 8, onde é destacado quais equipamentos fazem parte dos trens de reação (2 unidades) e quais equipamentos são comuns (1 unidade). Nesta tabela, também é calculado o volume total disponível para o gás, que é o volume utilizado nos cálculos simplificados. Esse volume é baseado no volume de líquido nos vasos no momento imediatamente anterior ao evento de despressurização.

Ressalta-se que os volumes inseridos na simulação são os valores totais dos equipamentos e linhas, e não somente o volume de gás.

3.1.4. Balanço de Massa para a simulação da unidade

A unidade industrial escolhida para o trabalho contém uma ampla disponibilidade de correntes de carga como opção, sendo elas: diesel Leve e diesel Pesado das Unidades de Destilação Atmosférica e a Vácuo, Óleo Leve de reciclo (LCO) das Unidades de Craqueamento Catalítico e Nafta Pesada, Gasóleo Leve e Gasóleo Médio das Unidades de Coqueamento Retardado. Devido a estas últimas correntes provenientes das unidades de FCC e UCR, a unidade de hidrotratamento também pode ser classificada com Unidade de HDT de instáveis,

Pelos dados levantados no *software* PI é possível identificar as vazões de carga total da unidade, a vazão de gás de reposição de hidrogênio, a vazão de retirada de nafta selvagem⁶ $(182m^3/d = 5713,3 \text{ kg/h})$ e de gases do topo da retificadora⁶ (496,9 kg/h = 20% do valor total). Com estes dados, juntamente com as curvas de destilação da carga e produto (também obtidas do PI), densidade estimada para a carga e produto, curva de destilação e densidade estimadas para a nafta selvagem e composição estimada para o gás de topo da torre retificadora, torna-se possível a realização de um balanço de massa da unidade, propiciando também o cálculo das conversões na seção de reação da simulação.

O balanço de massa é realizado considerando como reagentes a carga mais o hidrogênio consumido nas reações de HDT, gerando o produto hidrotratado (diesel), a nafta (denominada nafta selvagem devido ao alto teor de H₂S), contaminantes (H₂S e NH₃) que serão removidos na retificação e na água de lavagem e gases removidos na torre retificadora. De forma simplificada pode-se esquematizar o balanço conforme a Figura 16.

A Tabela 9 apresenta o balanço de massa da unidade. Neste balanço, o excesso de hidrogênio e o próprio gás de reciclo se comportam como inertes.

O consumo de hidrogênio foi definido por método iterativo na simulação estática, onde para cada estimativa de consumo de hidrogênio, obtinha-se a vazão molar de hidrogênio de reposição (hidrogênio consumido mais hidrogênio dissolvido no líquido do vaso separador) e calculava-se um novo balanço de massa, até que o erro na vazão de hidrogênio de reposição ficasse inferior a 2%. O valor real considerado, por trem de reação, é igual ao valor do PI (1166

⁶ Os valores das vazões de nafta selvagem e gás de topo da torre retificadora foram explicitados uma vez que não são apresentados no Anexo 1 por não fazerem parte da seção de alta pressão. Os demais valores são apresentados na sequência do texto.

kgmol/h), que era a vazão imediatamente antes do evento de despressurização de emergência. Esse método iterativo é ilustrado no fluxograma na Figura 17. O valor do consumo de hidrogênio calculado pelo método iterativo foi de 1005 kgmol/h por trem de reação.



Figura 16 - Esquemático do Balanço de Massa no HDT de diesel.

Carga da Unidade		
Carga Total da Unidade	m ³ /d	11780
Massa específica da carga	kg/m³	895,9
Vazão Mássica de carga	kg/h	439745
Consumo de Hidrogênio		
Consumo nos reatores	kgmol/h	2010
	kg/h	4052
Carga + H ₂ consumido	kg/h	443797
Carga + H ₂ consumido por trem de reação	kg/h	221898
Efluentes da Unidade, por trem de reação		
Nafta	kg/h	2857
Gases	kg/h	248
Contaminantes	kg/h	1597
Hidrogenado	kg/h	217196
Total	kg/h	221898

Tabela 9 - Balanço de massa da unidade

Os valores dos contaminantes H₂S e NH₃ foram calculados considerando uma conversão de 99,7% e 100,0%, respectivamente, dos contaminantes S e N presentes na carga, a saber: 4901 ppm wt (parte por milhão em base mássica) de S e 1686 ppm wt de N. As bases do cálculo dos contaminantes estão representadas na Tabela 10.



Figura 17 - Esquemático do método iterativo para determinação do consumo de H2.

Tabela 10 - Balanço de contaminantes na unidade

Item	Unidade	Valor
Conversão de S	% peso	99,7
Conversão de N	% peso	100,0
S na carga	ppm wt	4901
S na carga	kg/h	2155,2
S removido no reator	kg/h	2148,7
H ₂ S no efluente de reação	kg/h	2292,8
N na carga	ppm wt	1686
N na carga	kg/h	741,4
N removido no reator	kg/h	741,4
NH ₃ no efluente de reação	kg/h	901,5
Total de contaminantes	kg/h	3194
Total de contaminantes por trem de reação	kg/h	1597

A composição do gás de topo da torre retificadora foi estimada com bases em dados de projeto, e sua composição é apresentada na Tabela 11.

labela 11 - Composição estimada para o gas de topo da retificadora				
	%wt no gás de topo	% wt da carga	kg/h	kmol/h
metano	20,354	0,023	101,1	6,3
etano	18,584	0,021	92,3	3,1
propano	23,894	0,027	118,7	2,7
iso-butano	8,850	0,010	44,0	0,8
n-butano	15,044	0,017	74,8	1,3
iso-pentano	8,850	0,010	44,0	0,6
n-pentano	4,425	0,005	22,0	0,3
Total	100	0,113	496,9	15,1

abela 11 - Composição estimada para o gás de topo da retificadora
A água não faz parte do balanço apresentado, uma vez que a água, que é inserida no sistema a montante do *air-cooler* P03A, é removida imediatamente no equipamento seguinte, o vaso separador V03.

3.2. Simulação Estática

A simulação estática foi desenvolvida com os dados das correntes, equipamentos e tubulação, apresentados na Seção 3.1.

Na simulação estática não há a preocupação de inserção de volumes, curvas de desempenho de equipamentos rotativos e controle regulatório, por exemplo. O objetivo é elaborar o balanço mássico e energético da unidade em um determinado momento que se queira reproduzir. A simulação deve estar aderente ao perfil de pressão e temperatura da unidade.

Como já descrito anteriormente, a simulação foi desenvolvida no *software* HYSYS V10 e a apresentação das seções e das descrições de suas particularidades são apresentadas nesta seção.

A Figura 18 representa uma visão geral do fluxograma da simulação, na qual são destacadas algumas seções com suas particularidades apresentadas adiante. Em vermelho é destacada a seção de aquecimento, seguida pela seção de reação, em cinza. A seção de reposição de hidrogênio é destacada em azul. Já a seção de separação é realçada em verde e, por fim, a seção de compressão é mostrada na cor amarela.

Cabe destacar que, apesar de a simulação estática já estar representando os controles regulatórios, os mesmos não têm função neste modo estático, apenas já foram configurados para facilitar a transição para o modelo dinâmico.

Na seção de aquecimento apresentada na Figura 19 são destacados os dois permutadores da bateria de pré-aquecimento, o P01A e o P02A, e seu *by-pass*. Nessa figura também é apresentado o forno F01A, que foi modelado de forma simplificada com o módulo *heater*.

A carga dessa seção já é a do trem de reação A, ou seja, é a metade da vazão total de carga. Essa estratégia de simulação não interfere no resultado da simulação, uma vez que os intertravamentos do evento da despressurização de emergência são feitos na carga de cada trem de reação, simultaneamente.



Figura 18 - Flowsheet Geral da unidade simulada no HYSYS, destacando as distintas seções simuladas.

72



Figura 19 - Bateria de pré-aquecimento e forno aquecedor.

A Figura 20 apresenta a seção de reação onde pode ser vista a estratégia adotada para simular as correntes de *quench*. No desenvolvimento dessa seção, a vazão de *quench* total é misturada com o efluente de reação em uma temperatura bem elevada. A carga térmica de reação é então ajustada para que o efluente de reação ao ser misturado com a vazão real de *quench* resulte na temperatura real de operação do efluente de reação, de aproximadamente 632K (359°C).



Figura 20 - Simulação estática da seção de reação.

Após a reação, o efluente da reação troca calor com a carga do reator, sendo que parte do efluente é desviada do permutador P02A, de forma que seja possível o controle de temperatura do vaso V02A em 252K (252°C). Esse desvio e o controle estão apresentados na Figura 21, onde também pode ser vista a injeção de água de lavagem, após a corrente de gás do vaso separador de alta pressão e alta temperatura ser resfriada no P01A e receber uma corrente de gás de reciclo que foi recirculada da seção de compressão.

Na Figura 21 também é vista a junção dos efluentes de reação dos dois trens de reação, que na simulação estática foi elaborada com dois módulos de *set*, um definindo a temperatura e outro a pressão da corrente que é proveniente do trem B. A composição é definida pelo módulo *Spreadsheet*, onde é copiada a composição da corrente do trem A para a corrente do trem B. O módulo *set* apresenta um bom desempenho no modelo estático e permite a migração do modelo estático para o modelo dinâmico. Entretanto, o desempenho no modelo dinâmico não é satisfatório, sendo outras estratégias elaboradas para contornar esse problema, como será apresentado na Seção 3.3.

É disponível no HYSYS um módulo que faz a cópia de corrente automaticamente, o módulo *Virtual Stream*, que copia a corrente de referência em cada iteração da simulação no módulo estático, diferente da opção de *"Define from Stream"*, onde a corrente não é atualizada a cada ciclo iterativo. Entretanto, essa funcionalidade não é compatível com o modelo dinâmico, e impossibilita a migração do modelo estático para o modelo dinâmico.

Outro ponto de destaque na Figura 21 é a mudança do modelo termodinâmico, que em toda a simulação é o Modelo *Soave-Redlich-Kwong* (SRK) e no vaso separador de alta pressão e baixa temperatura é utilizado o modelo *Sour* SRK, que tem uma melhor predição de solubilização de contaminantes. Essa transição de pacote termodinâmico é possível com a inserção de módulos *Stream Cutters*.



Figura 21 - Reprodução do fluxograma do HYSYS mostrando a seção de separação da unidade (separação à quente) e injeção de água de lavagem.

Parte fundamental para a convergência da simulação da seção de alta pressão, onde existem reciclos, é a inserção de módulos de reciclo (RCY) em que dois deles, do total de três, estão instalados a montante das correntes de entrada dos tubos (lado quente) dos trocadores P01A e P02A (RCY-1 e RCY-2). O terceiro módulo de reciclo (RCY-6) está apresentado na Figura 22, a montante do compressor de reciclo C01.

A determinação da localização e do tipo de reciclo é fundamental para a solução do modelo da seção de alta pressão da unidade de hidrotratamento, principalmente onde é simulada a recirculação do gás de reciclo (retorno do gás de reciclo para os resfriadores finais P03A).

A seção de compressão configurada no HYSYS também é apresentada na Figura 22. Quando é desencadeada uma ação de intertravamento, as válvulas de intertravamento, XVs, a montante e a jusante do compressor de reciclo são acionadas para a proteção do equipamento.

Na modelagem do compressor C01 foram inseridas as curvas características do mesmo (*Head* e Eficiência). A Figura 23 ilustra a entrada de dados das curvas de *Head* para várias rotações, disponíveis na Folha de Dados do equipamento, para uma determinada massa molar de 2,5, típica de início de campanha.



Figura 22 - Fluxograma da simulação estática destacando o compressor C01 e as válvulas de intertravamento, XV40 e XV42.

Para a simulação do compressor centrífugo no módulo dinâmico, a variável controlada é a rotação do compressor (*Compressor speed*), por isso a importância da entrada das curvas características do equipamento.



Figura 23 - Curvas de desempenho do compressor C01 inseridas no HYSYS.

A estratégia de controle do gás de reciclo apresentada na Figura 17, tem sua implementação no HYSYS mostrada na Figura 24, na qual as três correntes de gás de reciclo calibradas com as vazões reais da planta são apresentadas.

Na prática, a corrente de reposição de hidrogênio é a responsável pela manutenção da pressão da planta industrial, uma vez que o hidrogênio ao ser consumido iria reduzir a pressão da unidade.

O controle real dessa seção é muito complexo e envolve a interligação com a Unidade de Geração de Hidrogênio (UGH), mas, para o presente estudo, uma malha de controle foi desenvolvida de forma a controlar a pressão da unidade no modelo dinâmico diretamente a partir da vazão de reposição de hidrogênio.



Figura 24 - Estratégia de controle do Gás de Reciclo.

Conforme já destacada, a particularidade da existência de dois trens de reação ocasionou a necessidade de elaboração de uma estratégia para a junção das correntes efluentes dos trens de reação. Da mesma forma, outra estratégia teve que ser elaborada para as divisões do gás de reciclo para os trens distintos.

Para o efluente, como já visto, foram inseridos os módulos do *Spreadsheet* e *set*. Para o gás de reciclo foram inseridos módulos *Tee*, que estão representados na Figura 25.



Figura 25 - Configuração para reproduzir a interligação do Gás de Reciclo entre os trens de reações distintos.

Esses módulos não têm o desempenho adequado na simulação dinâmica, pois os módulos *set* não apresentam desempenho adequado no modelo dinâmico, e os divisores (*tee*) obviamente não iriam funcionar corretamente sem os controles adequados nos alinhamentos para o trem B. Além do controle, a pressão dessas linhas teria que ter controles específicos ao longo do evento de despressurização. A solução para esse problema é apresentado na Seção 3.3.

3.3. Simulação Dinâmica

Diferentemente da simulação estática, na simulação dinâmica tem-se a preocupação com o controle regulatório da unidade, com os volumes dos equipamentos e linhas (*hold-up*) e as curvas características do compressor (*head* e eficiência).

No modelo dinâmico também é implementada a programação de eventos para avaliação da despressurização de emergência.

Quanto ao controle, é importante que todas as válvulas de controle estejam configuradas de forma a reproduzir os instrumentos da planta real. Assim, é necessário no mínimo as informações de capacidade da válvula (Cv) e características da válvula (tipo de abertura, constante de tempo, etc..).

Os controladores devem estar configurados conforme a planta real e, de preferência, com a mesma configuração de sintonia dos controladores reais. A Tabela 12 apresenta a configuração dos parâmetros de sintonia de todos os controladores regulatórios necessários para a simulação da seção de alta pressão, exatamente como na planta real.

								,		
Válvula	Cv	Característica	Controle	kp	Ti	Td	Range Min	Range Max	U.E.	Ação Direta/Reversa
FV-014	144	igual percentagem	FIC-014	0,33	34	-	0	8160	m³/d	R
TV-033A	1800	linear	TIC-033	0,50	100	-	0	300	°C	R
TV-033B	480	linear	TIC-033	0,50	100	-	0	300	°C	R
FV-031A	80	linear	LIC-013A	0,40	1700	-	0	100	%	D
-	-	-	FIC-031A	0,50	20	-	0	9840	m ³ /d	R
FV-232A	12	linear	LIC-218A	3,50	310	-	0	100	%	D
-	-	-	FIC-232A	1,25	10,8	-	0	2880	m³/d	R
FV-233A	15	linear	LIC-216A	0,90	1400	-	0	100	%	D
-	-	-	FIC-233A	0,25	18,3	-	0	2400	m³/d	R
FV-017	100	linear	FIC-017	0,30	5	-	0	290000	Nm³/h	R
FV-036	33	linear	FIC-036	0,18	14,3	-	0	960	m³/d	R

Tabela 12 - Parâmetros de sintonia dos controladores PID existentes da seção de alta pressão

Devido à dificuldade de simular os leitos catalíticos separadamente, é uma prática comum em estudos e projeto desse tipo de unidade a abordagem em simulações como se a reação ocorresse em apenas um leito reacional. Essa configuração é realizada adotando todo o calor de reação em um único leito e calculando a vazão total do gás de quench necessário para que a temperatura efluente do reator seja a desejada do projeto.

Uma vez adotada a estratégia de simular todos os leitos catalíticos como um único leito, e adotando o calor de reação como o calor necessário para a temperatura do efluente se igualar à temperatura do efluente real com a vazão de *quench* real, a estratégia de controle foi aplicar uma única válvula com Cv igual à soma dos Cvs das válvulas de cada *quench*, e aplicar um controlador único com parâmetro de sintonia equivalente para o TIC-25T e para o FIC-25T, sendo que o intervalo desse último é o somatório dos intervalos das vazões individuais de cada ramal de *quench* real. Os parâmetros de sintonia dos controladores reais e do controlador único desenvolvido para a simulação estão apresentados na Tabela 13.

O desempenho da malha de controle descrito acima é apresentado no capítulo RESULTADOS, na Figura 32.

Conforme já mencionado, o controle de pressão na unidade de HDT é bastante complexo, com interações com a malha de controle de carga da Unidade Geradora de hidrogênio (UGH). Desse modo, foi desenvolvido um controlador da pressão da unidade (PIC-100) atuando, em cascata, diretamente na vazão de reposição de hidrogênio (FIC-gmk). Os

parâmetros de sintonias desses controladores (*auto-tuning*⁷ do HYSYS) estão apresentados na Tabela 14.

		aplica	ida ao contro	plador si	nulado (FIC-25	I e HC-	231).		
Válvula	Cv	Característica	Controle	kp	Ti	Td	Range Min	Range Max	U.E.	Ação Direta/Reversa
FV-024	44	linear	TIC-052	0,80	500	20	0	430	°C	D
-	-	-	FIC-024	0,85	20	-	0	104270	Nm³/h	R
FV-025	67	linear	FIC-025	0,40	20	-	0	151140	Nm³/h	R
FV-026	67	linear	TIC-074	0,70	630	20	0	430	°C	D
-	-	-	FIC-026	0,40	20	-	0	151140	Nm³/h	R
FV-028	40	linear	TIC-096	0,80	630	20	0	430	°C	D
-	-	-	FIC-028	0,50	100	-	0	104270	Nm³/h	R
FV-029	37	linear	TIC-120	0,80	630	20	0	200	°C	D
-	-	-	FIC-029	0,50	100	-	0	104270	Nm³/h	R
	-	-	TIC-25T*	0,80	630,00	20	0	430	°C	D
FV25T	211	linear	FIC-25T*	0,45	40,00	-	0	510820	Nm³/h	R

Tabela 13 - Sintonia dos controladores PID da malha de controle de temperatura dos leitos catalíticos e sintonia aplicada ao controlador simulado (FIC-25T e TIC-25T).

* Controlador único simulando os quatro controles independentes de quench.

Tabela 14 - Sintonia dos controladores elaborados para o controle de pressão da simulação.

Válvula	Cv	Característica	Controle	kp	Ti	Td	Range Min	Range Max	U.E.	Ação Direta/Reversa
PV-081B	130	linear	PIC-081B	19,30	1320	-	0	130	kgf/cm ²	R
FIC-gmk XV51 gmk	45	-	FIC-gmk	3,06	4,40	-	0	1500	kgmol/h	R

As válvulas de despressurização de emergência e despressurização controlada foram inseridas na simulação dinâmica conforme a Figura 26. O sistema de despressurização de emergência é composto por duas XVs redundantes (XV-220 e XV-221) e com uma placa de orifício comum, o RO241.

A despressurização controlada, que não é projetada para despressurização de emergência e normalmente não é acionada nesses eventos, foi simulada com a inserção na simulação dinâmica da PV-081B, a jusante da Torre T01, que também é representada na Figura 26.

Tanto o sistema de despressurização de emergência quanto o sistema de despressurização controlada são descarregados para o sistema de tocha da refinaria.

Para a elaboração da Matriz Causa e Efeito, optou-se por usar o recurso do *Event Scheduler*, no qual os eventos (efeitos) são disparados conforme os eventos reais na despressurização de emergência ocorrido na unidade.

⁷Os parâmetros do controlador PID obtidos do *auto-tuning* do HYSYS são baseados em uma metodologia de projeto que utiliza uma margem de ganho em um ângulo de fase especificado. Esse projeto é bastante semelhante ao ganho regular e à metodologia de margem de fase, exceto que é mais preciso, pois o relé tem a capacidade de determinar pontos no domínio da frequência com precisão e rapidez. (ASPENTECH, 2017)

A Figura 27 apresenta a lista de eventos que são reproduzidos na simulação dinâmica. Nota-se que só há o comando para uma XV de despressurização ser aberta (XV-220). E em caso de falha o operador deverá dar o segundo comando para a abertura da XV redundante.

Cabe ressaltar que a abertura de uma ou das duas XVs simultaneamente não deve ocasionar sobrecarga no sistema de tocha da refinaria, uma vez que o limitante para a vazão de despressurização é o orifício RO241.

Os eventos programados no *Event Scheduler* são os eventos semelhantes ao apresentado da Matriz Causa e Efeito da Figura 13, implementado na planta real.



Figura 26 - Simulação do sistema de despressurização de emergência e de despressurização controlada.

As ações referentes à Matriz de causa e efeito programada no *Event Scheduler* são descritas na Tabela 15.

Como a PV-081B de despressurização controlada foi aberta em etapas ao longo do tempo, a mesma foi reproduzida com quatro eventos seguidos, cada um dando o acréscimo de abertura correspondente e função do tempo decorrido, reproduzindo a atuação realizada na planta durante o evento real da planta. Os dados da despressurização real são apresentados na Seção 3.4.

Com relação aos controles de junção e divisão dos trens de reação, a solução encontrada foi a utilização do módulo *Mixer*, que no HYSYS, no modelo dinâmico, apresenta a possibilidade de inserir um fator multiplicativo de vazão nesse módulo, o que dispensa um

rigoroso sistema de controle que seria necessário ser acrescido na simulação para o cenário de variação de pressão ao longo do evento de despressurização de emergência. A Figura 28 apresenta essa funcionalidade, que foi utilizada tanto na junção das correntes a montante do vaso separador (fator = 2,0), quanto nos três ramais de divisão do gás de reciclo entre os trens A e B (fator = 0,5).



Figura 27 - Lista de eventos programados no Event Scheduler, reproduzindo o evento de Despressurização de Emergência.

Tabela 15 - Ações programadas no módulo *Event Scheduler*, simulando o intertravamento pelo acionamento da despressurização de emergência

Nome da ação	Descrição da ação
Abrir XV220	Leva o atuador para a posição 100% aberto
Abrir XV221	Leva o atuador para a posição 100% aberto
Cortar Carga	Passa controlador para manual e leva o atuador para posição 0% aberto.
Cortar GMK	Passa controlador para manual e leva o atuador para posição 0% aberto.
Cortar Água	Passa controlador para manual e leva o atuador para posição 0% aberto.
Parar C01	Define o set da velocidade do compressor para 0 rpm.
Cortar Forno	Corta carga térmica do forno. T de saída fica igual ao da entrada.
Qreator	Corta carga térmica do reator (<i>Direct Q SP</i>)
Fechar XV40	Leva o atuador para a posição 0% aberto
Fechar XV42	Leva o atuador para a posição 0% aberto
TempR	Evita que a temperatura efluente do reator sem o quench seja superior a 360°C
TemperaturaV-02	Controla a temperatura de entrada do V-02, definindo o set docooler E-pseudo.

resign na	ting Worksheet Dynamics	
ynamics	Pressure Specification	
pecs Ioldup Stripchart	Equalize All Set Outlet to Lowest Inlet	
	Product Molar Flow Factor	
	Current Value 2,000	

Figura 28 - Funcionalidade do módulo Mixer no modo dinâmico.

3.4. Dados do evento real de despressurização de emergência

Com o objetivo de avaliar o desempenho e, consequentemente, validar o modelo implementado no *Digital Twin*, se faz necessário o levantamento de dados reais do evento de emergência em que o sistema tenha atuado.

Os dados do evento real de despressurização de emergência mais relevantes para a avaliação do modelo dinâmico implementado no *Digital Twin* são as ações de controle desencadeados pelo acionamento do sistema conforme matriz causa e efeito e o perfil de pressão e vazão mássica impostos pela atuação do sistema de segurança ao longo do evento.

A Figura 29 representa os dados reais da ação da válvula de despressurização de emergência, XV-220, com abertura rápida e total em um curto espaço de tempo, atuando conforme projetado. Na mesma figura é apresenta a abertura real do sistema de despressurização controlada (PV-081B) simultaneamente ao evento de despressurização de emergência. Normalmente esse sistema não é acionado de forma simultânea, mas como o *Digital Twin* deve ser calibrado, esse evento também deve ser reproduzido.

Nesse evento real, conforme esperado, somente uma das XVs foi acionada, a XV-220, estando a XV-221 (redundância do sistema) fechada durante o evento.

Pode ser visto na Figura 29 que a unidade estava em operação normal com o vaso separador operando a aproximadamente 10,59 MPa (107 kgf/cm²m), e, em um determinado momento, após uma situação de emergência, o sistema de despressurização rápida foi acionado pela HS-001 desencadeando o processo apresentado na Matriz Causa x Efeito, Figura 13, onde a despressurização é iniciada com a abertura da XV-220.

A Figura 29 mostra que a pressão atinge 50% da pressão de projeto, ou seja, 6,54 MPa (65, 7 kgf/cm²m) (pressão de projeto: = 13,1 MPa | 133,5 kgf/cm²a) em aproximadamente 1,8 minutos. Para atingir a pressão manométrica de 0,69 MPa (7 kgf/cm²) são decorridos 9,8 minutos.

Durante o evento de despressurização os níveis dos vasos V02A e V03 sofreram uma elevação. Enquanto o nível de água do vaso separador V03 inicialmente aumenta, seguindo de uma redução. Já os níveis de óleo aumentam continuamente. A Figura 30 apresenta os níveis dos vasos durante o evento de despressurização de emergência.



Figura 29 - Perfil de pressão na despressurização de Emergência em função das aberturas das válvulas XV-220 e PV-081B.

Apesar desse aumento dos níveis dos vasos, não se pode concluir que houve uma redução do espaço do gás ao longo do evento, pois o comportamento esperado para outros equipamentos, como os reatores e permutadores de calor da bateria de pré-aquecimento, seria uma redução do volume de líquido, seja pelo corte da carga da unidade, ou pela remoção do líquido impregnado no leito catalítico.

A Figura 31 apresenta as demais ações desencadeadas pelo acionamento da despressurização de emergência que constam na matriz causa e efeito. Nela pode-se verificar o comportamento da vazão de carga da unidade e da água de lavagem, das vazões de hidrogênio de reposição e de gás de reciclo, da rotação do compressor C01 e a vazão mássica de gás combustível que alimenta o forno F01A.



Figura 30 - Níveis dos vasos separadores ao longo do evento de despressurização de emergência.

Pode-se observar que o comportamento da vazão de água de lavagem não foi o esperado teoricamente pela implementação da lógica de intertravamento, mostrando que a ação de intertravamento do sistema de água de lavagem, por algum motivo, não estava ativa no momento do evento, sendo acionada manualmente aproximadamente 14 minutos após desencadeadas as ações da despressurização de emergência. Na prática, o não acionamento não altera o resultado esperado, não interferindo na segurança da planta industrial.



Figura 31 - Resposta das variáveis operacionais ao acionamento da despressurização de emergência da unidade industrial.

Os dados dos eventos real são comparados com os resultados do *Digital Twin*, com os dados dos métodos simplificados apresentados na seção 2.3.1 (métodos simplificados) e com o método do módulo *depressuring* implementado no *software* HYSYS os quais são apresentados no Capítulo 4.

4. RESULTADOS

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os resultados obtidos com o *Digital Twin* ao simular dinamicamente os eventos de despressurização de emergência apresentado no capítulo anterior. Também são apresentadas as respostas previstas pelos modelos simplificados e pelo método *depressuring* do *software* HYSYS apresentados na Seção 2.3.1, além de cenários adicionais que foram elaborados para uma avaliação mais ampla do *Digital Twin*.

4.1. Digital Twin x Planta real: Comparação e Validação

Inicialmente é apresentado o resultado relativo à implementação da simplificação do controle de temperatura de reação com o um único leito catalítico. Conforme pode ser visto na Figura 32, o controle de temperatura único TIC-25T em cascata com o controlador de vazão de quench FIC-025_T, apresentou um ótimo desempenho, mostrando que esta simplificação não altera as vazões e dinâmica da planta de processo.



Figura 32 - Desempenho do controlador de temperatura de reação.

Para a implementação do evento no *Digital Twin*, foi visto no capítulo anterior que foram programados os eventos no módulo *Event Scheduler* do HYSYS. A Figura 33 apresenta a resposta do acionamento do dispositivo de despressurização de emergência no *Digital Twin*.



Figura 33 - Resposta das variáveis operacionais ao acionamento da despressurização de emergência do *Digital Twin*.

Como na unidade industrial não ocorre medição direta de carga térmica no forno, a variável que foi apresentada como evidência do corte de carga térmica do forno na planta real mostrado na Figura 31 foi a vazão de gás combustível, que, de fato, é a variável manipulada. Entretanto, para a simulação do forno, de forma simplificada, foi manipulada diretamente a carga térmica, usada como evidência do corte de gás combustível do forno F01A (parada do forno) no *Digital Twin*, Figura 33.

Na Figura 33 também é mostrado o atraso no corte de água de lavagem, que só ocorre decorridos aproximadamente 14 minutos após o início da despressurização. Apesar de não ser o acionamento conforme projetado, esse *delay* não interfere na finalidade e qualidade do sistema de segurança.

O gás de reciclo, devido à parada do compressor C01 e do fechamento das XV40 e XV42, cai rapidamente para zero, conforme observado na planta industrial.

A atuação mais rápida do sistema de intertravamento no Digital Twin ocorre devido a utilização das válvulas de controle atuando como XVs (vazão de carga e H2 de reposição). Este mesmo efeito também foi notado na parada do compressor de reciclo C01, pois como não foi simulado o acionador (turbina), não foi possível dimensionar a inércia do equipamento, apesar das XVs à montante e a jusante estarem com a atuação sincronizada com o tempo real. Apesar desta diferença, a ação mais rápida não deve impactar de forma muito pronunciada a reprodução do evento devido ao *hold-up* da unidade, sendo a abertura da XV-220 e da PV081B as que tem a maior necessidade de estarem reproduzidas com maior similaridade.



Figura 34 - Comparativo do perfil de pressão da planta real x *Digital Twin* com a abertura da XV-220 e da PV-081B.

A Figura 34 apresenta um comparativo entre as ações da XV-220, da PV-081B e da resposta da pressão da unidade ao acionamento desses dispositivos, do *Digital Twin* e da planta real.

A reprodução das ações e do perfil de pressão mostrado na Figura 34 demonstra a aderência do modelo digital ao comportamento da planta real. Conforme ocorre com a planta real, o *Digital Twin* alcança a pressão manométrica de 690 kPa (7 kgf/cm²) em

aproximadamente 9 minutos. A leve descolagem inicial (entre 1 e 4 minutos) provavelmente decorre de algum fator de compressão de dados na obtenção pelo PI.

Em relação às temperaturas do modelo, o perfil da seção de alta pressão responde de forma similar à planta real. Entretanto, os perfis de temperaturas intermediárias da bateria de pré-aquecimento têm um comportamento mais distante da planta real, conforme apresentado na Figura 35.

Embora os trocadores de calor P01A e P02A na simulação estática tenham sido calculados no modo detalhado, usando as dimensões dos equipamentos conforme apresentado na Tabela 3, por motivo de convergência, o módulo dinâmico foi simulado no modo simplificado, em que os valores do coeficiente global de troca de calor são determinados pelo usuário e permanecem constantes na simulação. Entretanto, no evento de despressurização ocorre uma abrupta modificação nas condições de troca térmica nesses equipamentos, em que um dos lados com grande vazão de líquido (carga da unidade) é repentinamente operado com uma pequena vazão de gás e, do lado do efluente, por um determinado tempo, ainda ocorre a manutenção da vazão bifásica proveniente da reação, com uma massa muito maior do que o lado do pré-aquecimento, o que certamente modifica de forma abrupta os coeficientes de troca térmica e dificulta o cálculo deste transiente.

Outro fator que pode afetar a troca térmica e dificultar a simulação é o fenômeno de *slip* que, de forma simplificada, pode ser caracterizado quando as velocidades do gás e do líquido são diferentes (MADDOX e SAFTI, 1984). Este fenômeno é ainda mais pronunciado em eventos como partidas e paradas da planta, ou em eventos abruptos como a despressurização de emergência. Ao se considerar uma fase homogênea para os cálculos dos coeficientes de troca térmica, este fenômeno é ignorado e os cálculos simplificados podem ter um desvio grande da realidade.

Apesar das temperaturas intermediárias não afetarem demasiadamente o modelo no evento de despressurização, a temperatura do vaso separador V02A é muito importante para a reprodução desse evento, uma vez que, por ser uma unidade de separação a quente, a fração vaporizada nesse vaso representa diretamente a carga do vaso V03, compondo o *loop* do compressor e o inventário de gás na seção de alta pressão.

A temperatura do vaso separador ao longo do evento real sobe de 523 K (250 °C) para 545 K (272 °C), enquanto o modelo digital tem sua temperatura elevada para cerca de 598K (325 °C), temperatura que parece ser uma temperatura equalizada do sistema intermediário de pré-aquecimento. Ou seja, todas as temperaturas apresentadas na Figura 35 relacionadas ao





Figura 35 - Temperaturas intermediárias da bateria de pré-aquecimento.

A Figura 36 mostra o perfil de pressão do evento sem ajustar a temperatura do vaso V02A. Entretanto, para evitar uma eventual interferência em outros parâmetros com possível propagação desse desvio, foi adicionado um módulo *cooler* (E-pseudo) de forma a ajustar o acréscimo de temperatura de forma similar ao ocorrido no evento real, conforme apresentado na Figura 37.



Figura 36 - Perfil de Pressão do Digital Twin sem ajuste de temperatura do vaso V02A.



Figura 37 - Ajuste da temperatura do vaso V02A.

A correção da temperatura do vaso separador V02A possibilitou que as respostas dos controladores dos vasos V02A e vaso V03 ficassem com resultados com tendência similares aos da planta real, onde os níveis dos vasos V03 água e V03 óleo tiveram uma elevação, enquanto o nível do vaso separador V02A inicialmente aumenta, seguindo de uma redução. Esses resultados estão apresentados na Figura 38.

Uma possível explicação para essa diferença entre o *Digital Twin* e a planta real na dinâmica de resposta dos níveis dos vasos V02A pode estar no fato do modelo dinâmico do HYSYS não apresentar a possibilidade de dimensionamento de vasos verticais com tampos esféricos (ainda não suportado na versão V10). Portanto, o vaso V02 teve seu volume corrigido inserindo uma pequena fração em sua altura total para compensação do volume, e o nível inicial teve que ser igualmente corrigido, o que certamente afeta a resposta do controlador. Entretanto, os efeitos dessa limitação, juntamente com a incerteza sobre o algoritmo de controle que não foi possível identificar qual está implementado na unidade real, podem ter afetado a resposta dinâmica deste sistema. E como o vaso V03 depende diretamente do desempenho do vaso V02A, a interferência deste e, também, da incerteza sobre o algoritmo de controle no vaso V03 podem explicar esse desvio. Em ambos os controladores foram adotados o algoritmo da *Honeywell – Interacting Form A*, conforme apresentado na equação (22).

$$OP(S) = K \left(1 + \frac{1}{T_1 S} \right) \left(\frac{1 + T_2 S}{1 + \alpha T_2 S} \right) E(S)$$
(22)

Os vasos da planta real também têm seus níveis elevados para 100%, entretanto, esse valor é alcançado em torno de 16 a 17 minutos após a atuação do sistema de despressurização.



Figura 38 - Comparativo dos níveis dos vasos de alta pressão da planta real x *Digital Twin* durante o evento de despressurização.

Assim, principalmente baseado no desempenho apresentado pelo perfil de pressão na Figura 34, pode-se considerar que a reprodução do evento apresenta boa representatividade da planta real, não obstante a necessidade de ajuste pontual na temperatura do vaso separador.

Entretanto, apesar desta boa representatividade, para a avaliação e comparação das respostas dos modelos simplificados e do módulo *depressuring* do HYSYS, o modelo do *Digital Twin* deve ser ajustado para reproduzir o evento sem o acionamento da válvula de despressurização controlada, pois a mesma não pode ser modelada nos modelos simplificados apresentados na Seção 2.3.1. Assim, o modelo do *Digital Twin* foi reprogramado no Event scheduler para reproduzir o evento sem o acionamento da PV-081B, cujo perfil de pressão para essa nova condição é apresentado na Figura 39.

Na Figura 39 fica claro a interferência da abertura da PV-081B na taxa de despressurização, mostrando que, no momento de abertura da PV-081B, a pressão teve uma redução maior do que a esperada com atuação somente da XV-220.

A Figura 39 também mostra qual seria o comportamento caso as duas XVs fossem acionadas ao mesmo tempo e, conforme esperado, apresentam o perfil de pressão semelhante ao da abertura somente da XV-220, pois como já visto, a vazão pelo orifício de restrição é governado pelo escoamento crítico e, portanto, só depende das dimensões da própria placa cujo escoamento é crítico, da pressão a montante e das propriedades do fluido.



Figura 39 - Comparativo da resposta do Digital Twin com e sem a abertura da PV-081B.

Ao longo da despressurização, como já visto, ocorre a vaporização parcial do líquido com a redução da pressão da unidade. Assim, a massa molar do gás de despressurização é elevada durante o processo. A Figura 40 mostra essa elevação da massa molar ao longo da despressurização, bem como o efeito da abertura da PV-081B nesta variação, em que ocorre uma maior vaporização com consequente incremento de componentes pesados no gás aumentando sua massa molar.

Essa variação não ocorre nos modelos simplificados, uma vez que é considerado a massa molar do gás como constante ao longo da despressurização.

Da mesma forma, é feita uma comparação entre o perfil de vazão mássica de gás no orifício de restrição com e sem o acionamento da PV-081B, em que é demonstrada uma redução da vazão mássica com o acionamento do sistema de despressurização controlada juntamente com o sistema de despressurização de emergência. A Figura 41 mostra esses perfis de vazão mássica, ressaltando que o fator pressão é preponderante ao fator massa molar.



Figura 40 - Comparativo da massa molar com e sem a abertura da PV-081B.



Figura 41 - Comparativo da vazão mássica com e sem a abertura da PV-081B.

4.2. Comparativo cos modelos simplificados

Para os cálculos dos modelos simplificados, nos quais são implementadas somente as equações para gás, os dados utilizados foram do gás de topo do vaso separador V03 no instante

imediatamente anterior ao acionamento do sistema de despressurização, e estão mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 - Dados para os cálculos dos modelos simplificados						
Parâmetro	Valor	Unidade				
Diâmetro do orfício	81	mm				
Volume de Gás	1243,3	m ³				
Pressão Inicial	16,63	MPa				
Temperatura	305	K				
Cp/Cv	1,4070					
Z	1,0553					
PM	2,733	kg/kmol				
Densidade	92,89	kg/m³				



Figura 42 - Dados de entrada no módulo depressuring - HYSYS.

Já para o módulo *depressuring* do HYSYS os dados de entrada foram os dados da corrente de entrada no vaso separador V03 (corrente 514bj), o diâmetro do orificio e o volume de líquido e gás no sistema. A Figura 42 mostra a entrada de dados no módulo *depressuring* do HYSYS. Foi arbitrado um diâmetro de 6m e uma altura de 46,3 m para gerar um vaso com o volume total de 1309 m³ conforme a Tabela 8. O volume de líquido foi a diferença entre o volume total e o volume de gás que também foi apresentado na Tabela 8.

A área do orifício e o coeficiente de descarga (o mesmo utilizado nos cálculos simplificados) são apresentados na Figura 43.

Os dados da corrente de entrada são apresentados na Figura 44.



Figura 43 - Tela de entrada de dados do módulo depressuring, coeficiente Cd e área do orifício de restrição.

Worksheet	Stream Name	514bj-2	Vapour Phase	Liquid Phase	Aqueous Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,8942	0,8942	0,0071	0,0987
Properties	Temperature [C]	32,00	32,00	32,00	32,00
Composition	Pressure [kg/cm2]	108,2	108,2	108,2	108,2
Oil & Gas Feed Petroleum Assay K Value User Variables	Molar Flow [kgmole/h]	2,438e+004	2,180e+004	174,2	2407
	Mass Flow [kg/h]	1,293e+005	5,975e+004	2,551e+004	4,406e+004
	Std Ideal Lig Vol Flow [m3/h]	720,0	643,2	31,71	45,09
Notes	Molar Enthalpy [kcal/kgmole]	-7308	-285,4	-7,470e+004	-6,605e+004
Cost Parameters Normalized Yields	Molar Entropy [kcal/kgmol-C]	20,36	20,97	33,82	13,85
	Heat Flow [Mkcal/h]	-178,2	-6,222	-13,01	-159,0
	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	5,765e+005	5,158e+005	31,34	44,08
	Fluid Package	Basis-2			
	Utility Type				

Figura 44 - Dados da corrente de entrada no módulo depressuring.

A Figura 45 apresenta os resultados do perfil de pressão para o *Digital Twin*, modelos simplificados e do módulo *depressuring* do HYSYS, além de reproduzir as curvas do evento real e do Digital Twin com a abertura da PV-081B, a título de informação.

Observa-se que os modelos simplificados apresentam uma taxa de despressurização inferior às taxas apresentadas pelo modelo do *Digital Twin*, que já havia sido comparado e validado com o modelo real.

Enquanto o *Digital Twin* mostra que a pressão de operação do vaso separador V03 chegaria ao valor considerado seguro em torno de 11 minutos, em outro extremo, o modelo baseado na equação de gases proposta pelo Perry (PERRY, GREEN e MALONEY, 1997) demonstra que o tempo para se chegar a essa mesma condição fica em torno de 19 minutos.

Esse resultado demonstra que a não consideração de líquido e do evento de vaporização nesses modelos simplificados penaliza a predição do perfil de pressão, gerando uma expectativa de despressurização mais lenta do que a real. A consequência de utilização desses modelos é o dimensionamento da placa de orifício maior do que o necessário, que na prática irá acarretar em uma despressurização com taxas acima da desejada.



Figura 45 - Perfil de pressão dos métodos simplificados (*PERRY, GREEN e MALONEY, 1997*), Bird, Stewart e Lightfoot (1960) Apud (BEYCHOK, 2005) e Rasouli e Williams (1995) Apud (BEYCHOK, 2005) e do *Digital Twin* ao longo do evento de despressurização de emergência.

O resultado da implementação do módulo *depressuring* também mostra que a simplificação em considerar todo o sistema como um único vaso onera o cálculo do perfil de pressão. Entretanto, por este modelo considerar o efeito de vaporização do líquido com as propriedades da corrente de entrada, esse erro se mostra inferior àquelas dos modelos simplificados.

Outro importante parâmetro a ser verificado nos modelos de despressurização é a vazão de despressurização que é utilizada para o dimensionamento das linhas (diâmetro, traçado, ancoragem, etc.) que encaminham o gás despressurizado para o sistema de tocha da refinaria.

Os resultados apresentados na Figura 46 também mostram o distanciamento dos modelos simplificados entre si e em relação ao modelo calibrado do *Digital Twin*. Enquanto o modelo baseado na equação de Bird, Stewart e Lightfoot (1960) apontam uma vazão inicial acima de 200.000 kg/h, o modelo baseado na equação proposta pelo Perry (PERRY, GREEN e

MALONEY, 1997) apresenta uma vazão inicial em torno de 115.000 kg/h, uma diferença de 73,9% em relação ao primeiro modelo. Enquanto que o modelo calibrado apresenta um pico de vazão mássica em torno de 122.000 kg/h.

Os valores calculados pelas equações simplificadas são apresentados no Anexo 7 -Pressões calculadas pelos métodos simplificados. e no Anexo 8 - Vazões calculadas pelos métodos simplificados.



Figura 46 - Vazões Mássicas dos modelos simplificados e do Digital Twin ao longo da despressurização.

4.3. Avaliação da consideração de fogo no cálculo da despressurização de emergência

Como já abordado, o efeito fogo pode ser negligenciado no dimensionamento do sistema de despressurização de emergência. Entretanto, de forma a fazer uma análise mais ampla do modelo do *Digital Twin*, alguns estudos foram gerados.

Para o cálculo da carga térmica absorvida, a Equação 6 é utilizada, e é programada no módulo *Spreadsheet* (Figura 47), em que as células D6 e D11 indicam se o evento fogo está ocorrendo (valor 1) ou não (valor 0).

Utilizando o módulo *Event Scheduler*, é possível modular os valores das células D6 e D11 de forma a acionar o caso fogo nos vasos V02A e/ou V03. A implementação do acionamento de fogo no módulo é mostrado na

Figura 48. Nessa mesma Figura é observado que o evento não considera a abertura da PV-081B.

Conne	ctions Parameters	Formulas	Spreadsheet	Calculation Order	User Variables	Notes	
Curre	ent Cell				-	1	
	Variable Type:			•	Exportable 🗹		
	E6 Variable:				Angles in:	Rad *	Edit Rows/Column
@if((d6==0) then (0) els	e (b6)					
_							
	A		В	С		D	E
1	V-02	A					
2	Área Molhada, п	12	25,70 m2		276,6	ft²	
3	C1 V-02	A	2,100e+004			1,000	
4	F V-02	A	1,000				
5		Q	2,112e+006	B	TU/h		
6			0,5321	M	lkal/h	0,0000	0,000
7							
8	V-0	03					
9	Área Molhada, n	n²	42,19 m2	454	l,2 m2	ft²	
10		Q	3,171e+006	B	STU/h		
11			0,7990	м	lkal/h	0,0000	0,000

Figura 47 - Cálculo do calor absorvido nos vasos V02A e V03.

A Figura 49 mostra que o evento fogo no vaso V02A praticamente não interfere no perfil de pressão apresentado para a despressurização de emergência da unidade.



Figura 48 - Módulo Event Scheduler com as funcionalidades de fogo inseridas.

A Figura 50 mostra que, apesar da absorção da carga térmica pelo inventário do vaso, pouca alteração de temperatura é observada antes do sistema de despressurização ser acionado (tempo = 0 min.). Durante o evento, a temperatura do vaso é ligeiramente maior do que sem o evento fogo.

A mesma avaliação foi realizada com o evento fogo atingindo simultaneamente o vaso V02A e o vaso V03 e, novamente, o comportamento do *Digital Twin* mostra que o evento fogo nos dois vasos simultaneamente também não interfere de forma sensível no perfil de pressão

desenvolvido com o acionamento do sistema de emergência. Esse comportamento é mostrado na Figura 51.



Figura 49 - Perfil de pressão no evento despressurização do Digital Twin com e sem fogo no vaso V02A.



Figura 50 - Carga térmica absorvida e temperatura com o evento fogo no vaso V02A.

Já a Figura 52 apresenta a carga térmica absorvida no vaso V03 e o perfil de temperatura durante o evento de despressurização que é acionado após incêndio que atingiu os vasos V02A e V03, simultaneamente. A investigação de eventos em que mais de um equipamento é submetido ao fogo é uma prática comum na análise de segurança de unidades industriais, sendo abordada a área de interferência, onde um único equipamento ou um grupo de equipamentos podem estar submetido ao mesmo evento fogo, sendo conhecido como círculo do fogo.



Figura 51 - Perfil de pressão com o evento fogo nos vasos V02A e V03.

O estudo do caso fogo também foi avaliado no módulo *depressuring* do HYSYS, sendo consideradas três possibilidades de carga térmica absorvida pelo fogo. A primeira avaliação foi realizada considerando a mesma área molhada inicial do estudo anterior (Área molhada – DT inicial). Posteriormente, foi rodado o módulo com o cálculo automático em função da geometria inserida para o vaso fictício no modelo, com 6 m de diâmetro e 46,3 m de altura, estando com 66 m³ de líquido no momento inicial da avaliação. E, por fim, arbitrando uma área molhada fixa de 300 m².

Os resultados destas rodadas no módulo *depressuring* estão apresentados Figura 53. De forma semelhante ao comportamento do *Digital Twin*, o módulo *depressuring* mostrou que o perfil da despressurização de emergência não foi sensivelmente modificado pelo evento fogo com as cargas térmicas estudadas.

Cabe destacar que o módulo *depressuring* é insensível à distribuição de eventos ao longo da unidade, sendo avaliado o comportamento como se todo o sistema fosse um único vaso. Portanto, uma diferença imediata em relação ao *Digital Twin* é a sensibilidade deste último de experimentar ações pontuais em qualquer parte da planta simulada, respondendo de forma similar à planta real.



Figura 52 - Carga térmica absorvida e temperatura do gás de topo do vaso V03 durante o evento fogo nos vasos V02A e V03.



Figura 53 - Perfil de pressão durante a despressurização de emergência utilizando o módulo depressuring do HYSYS para evento fogo com áreas molhadas distintas.

4.4. Outras aplicações do Digital Twin

A vantagem do *Digital Twin* não se limita ao ponto específico da avaliação da despressurização de emergência. Uma vez que o *Digital Twin* foi modelado e calibrado, muitas outras funcionalidades o fazem uma poderosa ferramenta para análises de controle, segurança (PSV), análise de incidentes e acidentes, por exemplo.

Dois eventos que demandariam um grande esforço de cálculos para análise de PSVs, por exemplo, seriam os comportamentos da planta com a falta de energia no *air-cooler* P03A, onde é esperado uma elevação de pressão e temperatura no vaso V03 e na sucção do compressor. Com o *Digital Twin* modelado e calibrado, eventos como esses são facilmente analisados conforme os dados apresentados na Figura 54. Nesse cenário, a carga térmica do *air-cooler* foi reduzida para 20% da carga máxima de projeto (5,6 MMkcal/h) quando operava com o vaso V03 a 11,08 MPa (112 kgf/cm² m) e o vaso V02A em 543 K (270 °C). A reposta do *Digital Twin* mostra que as temperaturas tanto do vaso quanto da sucção do compressor ultrapassariam a temperatura de projeto de 361 K (88 °C). Já a pressão não sofre alteração significativa nesse evento reproduzido, conforme pode ser visto na Figura 55.



Figura 54 - Carga térmica e perfil de temperatura em função de perda de energia no air-cooler P03A.

Outra avaliação, por exemplo, seria a vazão de água do vaso V03 que passaria pela válvula FV-233A devido a uma falha do controlador LIC-216A ocasionando a abertura indevida desta. Esse evento também foi simulado com o vaso V03 a 11,08 MPa (112 kgf/cm² m) e o vaso V02A em 543 K (270 °C).



Figura 55 - Pressão do vaso separador V03 com a perda de energia no air-cooler P03A.

A Figura 56 mostra a variação da vazão com a abertura da FV-233A. que passa rapidamente de 4300 kg/h para 6000 kg/h.



Figura 56 - Variação da vazão mássica de água com a abertura indevida da FV-233A.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos resultados do Capítulo 4, pode-se concluir que o *Digital Twin* reproduz bem o comportamento real da planta industrial no evento de despressurização de emergência analisado.

Apesar do evento real de despressurização não ter sido atuado somente com o sistema projetado para a despressurização de emergência, ou seja, tendo somente o acionamento do sistema de despressurização pela XV-220 ou XV-221, a calibração e ajustes do modelo do *Digital Twin* permitiu comparações com modelos simplificados onde somente o sistema de despressurização de emergência é acionado.

Pela comparação com o módulo do *Digital Twin* calibrado, pode-se afirmar que os modelos simplificados não apresentam um comportamento realístico em comparação a este. Os resultados mostraram que a não consideração de vaporização nos modelos simplificados é o principal fator por este desempenho.

Pelas avaliações, os modelos simplificados apresentam uma menor taxa de despressurização do que o *Digital Twin*. Assim, na prática, a aplicação desses modelos simplificados pode ocasionar uma despressurização com taxas superiores às desejadas, uma vez que levariam a especificação de diâmetros maiores do que o necessário para o orifício de restrição.

Já o módulo *depressuring* do HYSYS não apresenta tanta dispersão comparado com o comportamento ajustado do *Digital Twin*, pois apesar de suas simplificações como, por exemplo, o sistema ser avaliado como um vaso único, o modelo considera o evento de vaporização do líquido durante o evento de despressurização de emergência.

Assim, conclui-se que o modelo do *Digital Twin* representa uma ótima ferramenta para a avaliação do sistema de despressurização de emergência.

A melhoria da simulação dinâmica com maior rigor na modelagem dos trocadores de calor da bateria de pré-aquecimento, com o modelo detalhado do HYSYS, é uma sugestão de trabalho futuro. A *Aspentech* possui o software EDR, *Aspen Exchanger Design and Rating*, que elabora a simulação rigorosa de trocadores de calor. Assim, fica também como sugestão para trabalhos futuros, principalmente com o intuito de utilizar o *Digital Twin* na fase de projeto em unidades de HDT, a avaliação do desempenho (computacional e dos resultados propriamente ditos) da integração do software EDR com o HYSYS (modelagem rigorosa), principalmente em eventos que demandam uma abordagem fenomenológica mais rigorosa como eventos de

partida e paradas da planta e de eventos de despressurização de emergência, em que esses modelos mais rigorosos possam apresentar melhores resultados do que os trocadores simulados apenas no modo simplificado do módulo dinâmico do HYSYS.

Um estudo mais aprofundado seria capaz de identificar o real impacto da variação dos coeficientes de transferência de calor ao longo do evento de despressurização de emergência, onde existe uma mudança de regime de escoamento bem pronunciado em ambos os lados do trocador de calor, inicialmente do lado frio, carga da unidade, e em seguida no lado quente, efluente do reator. Esta análise também poderia ser realizada utilizando o software EDR.

Outra sugestão seria a aplicação efetiva dos modelos de *Digital Twin* durante as reuniões de análise de segurança em unidades de HDT (HazOp e LOPA), onde o modelo facilitaria muito a compreensão dos eventos e verificaria as ações de controle e salva-guardas, além de auxiliar a quantificação dos eventos em decorrência das falhas analisadas.

De forma geral, a aplicação dos modelos de *Digital Twin* vem ficando muito popular, mas ainda há poucas aplicações efetivamente conhecidas e que para a área de segurança os *Digitais Twins* podem ter um importante papel.

Não obstante o tempo exigido para a elaboração do *Digital Twin* ser relativamente alto, viu-se que após o modelo desenvolvido e calibrado, várias funcionalidades que demandariam tempo sendo realizadas separadamente poderiam ser facilmente avaliadas no modelo implementado.

Em um contexto de engenharia básica, esse maior tempo demandado para a elaboração do *Digital Twin* comparado com uma simulação estática tradicional, poderia ser compensado com a redução de tempo em atividades futuras como cálculos de PSVs, elaboração e teste de estratégias de controle, cálculo de temperaturas eventuais, avaliação de interligações alta x baixa pressão, verificação de transientes em geral, aplicação em HAZOP e LOPA, etc.

Além da recuperação do tempo em atividades seguintes, a qualidade dos produtos decorrente da aplicação do *Digital Twin* poderia por si só, justificar a utilização desta ferramenta no decorrer do projeto básico de uma unidade de hidrorrefino, corroborando assim para classificar o *Digital Twin* como uma poderosa ferramenta de engenharia, inclusive para investigação de incidentes e acidentes em plantas industriais e, principalmente, para evitá-los.

Por fim, cabe sugerir o desenvolvimento de novas correlações para a despressurização de emergência para trabalhos futuros.

106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, C. P. Avaliação das emissões de SOx no bloco de enxofre de refinarias.. Dissertação de M.Sc. EPQB-UFRJ. Rio de Janeiro. 2019.
- ANP. Abastecimento em Números, ANO 4, N°21. Relatório Gerencial, Rio de Janeiro, Fevereiro 2009.
- ANP. Abastecimento em Números, ANO 5, N°25. Relatório Gerencial, Rio de Janeiro, Fevereiro 2010.
- ANP. Abastecimento em Números, ANO 6, N°29. Relatório Gerencial, Rio de Janeiro, Fevereiro 2011.
- 5. ANP. Abastecimento em Números, ANO 7, N°34. Relatório Gerencial, Março 2012.
- ANP. Abastecimento em Números, ANO 8, Nº40. Relatório Gerencial, Rio de Janeiro, Março 2013.
- ANP. Abastecimento em Números, ANO 9, Nº43. Relatório Gerencial, Rio de Janeiro, Abril 2014.
- ANP. Abastecimento em Números, ANO 9, Nº46. Relatório Gerencial, Rio de Janeiro, Dezembro 2014.
- ANP. Abastecimento em Números, ANO 10, Nº49. Relatório Gerencial, Rio de Janeiro, Dezembro 2015.
- ANP. Abastecimento em Números, ANO 11, N°53. Relatório Gerencial, Rio de Janeiro, Dezembro 2016.
- ANP. Abastecimento em Números, ANO 12, N°57. Relatório Gerencial, Rio de Janeiro, Dezembro 2017.
- 12. ANP. Panorama do Abastecimento de Combustíveis, Rio de Janeiro, 2017.
- ANP. Abastecimento em Números, ANO 13, Nº61. Relatório Gerencial, Rio de Janeiro, Dezembro 2018.
- ANP. Abastecimento em Números, ANO 14, N°63. Relatório Gerencial, Rio de Janeiro, Agosto 2019.
- 15. ANP. Óleo Diesel. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.,
 2019. Disponivel em: http://www.anp.gov.br/petroleo-derivados/155-combustiveis/1857-oleo-diesel. Acesso em: 20 Setembro 2019.
- 16. API, A. P. I. API Standard 521. 6th. ed. [S.l.]: IHS, 2014.

- 17. ASPENTECH, S. C. Aspen HYSYS Dynamics Autotuning Method. Aspentech Support Center, 2017. Disponivel em: https://esupport.aspentech.com/S_Article?id=000081888>. Acesso em: 13 dezembro 2019.
- 18. ASTM. Standard Specification for Diesel Fuel. ASTM International Standard Specification for Diesel Fuel, 2020. Disponivel em: https://www.astm.org/Standards/D975.htm>. Acesso em: 17 Janeiro 2020.
- BEYCHOK, M. R. Calculating Accidental Release Flow Rates From Pressurized Gas System. Consulting Engineer Newport Beach. California, USA. 2005.
- 20. BHATTACHARYA, D. et al. Dynamic simulation : a tool for engineering problems.Digital Refining, October 2012.
- BONFÁ, M. H. P. S10: IMPACTO SOBRE O RENDIMENTO DO PARQUE DE REFINO. COPPE-UFRJ - Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro. 2011.
- 22. BOSCHERT, S.; HEINRICH, ; ROSEN, R. Next Genetation Digital Twin. TMCE 2018. Las Palmas de Grand Canaria: Organizing Committee of TMCE 2018. 2018.
- 23. BRASIL. IBAMA Resolução CONAMA nº403 de 11 de novamebro de 2008., 2008.
 Disponivel em: http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-federal/resolucoes/resol-conama/2008&item=rconama-403--2008. Acesso em: 17
 Setembro 2019.
- 24. BRASIL, ANP. Resolução ANP N° 50 de 23.12.2013. ANP Agencia Nacional de Petróep, Gás Natural e Biocombustíveis, 2013. Disponivel em: elegislacao.anp.gov.br/./2013/dezembro&item=ranp-50--2013&export=pdf>. Acesso em: 19 Setembro 2019.
- BRASIL, M. D. E. S. D. T. Norma Regulamentadora N°13 Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulação. Ministério da Economia, Secretaria de Trabalho. [S.1.]. 2015.
- 26. BRASIL, MME MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. MME Ministério de Minas e Energia, 2013. Disponivel em: https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Arquivos/PROCONVE_atualizado %20em%2021nov13.pdf>. Acesso em: 19 Setembro 2019.
- 27. BRASIL, N. I. D.; ARAÚJO, M. A. S.; SOUSA, E. C. M. Processamento de Petróleo e Gás: petróleo e seus derivados, processamento primário, processos de refino, petroquímica, meio ambiente. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, 2011.

- CHUNG, P. W. H. et al. Automated Cause & Effect Analysis for Process Plants. Chemical Engineering Transactions, Loughborough, v. 17, Janeiro 2009. ISSN 10.3303/CET0917214.
- 29. CIMINO, C.; NEGRI, E.; FUMAGALLI, L. Review of digital twin applications in manufacturing. **Computers in Industry ELSEVIER**, Milano, Italy, October 2019.
- FARAH, M. A. Petróleo e seus derivados: definição, constituição, aplicação, especificações, características de qualidade. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, 2012.
- 31. GORJI, A. H.; JARI, H. R. K. Calculating settle-out pressure in compressor loops: Simple procedure can be used to help determine piping and equipment design pressures into process loops. Hydrocarbon Processing, Tehran, v. Plant Safety and Environment, n. Special Report, p. 63, 64 and 65, November 2006.
- 32. GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital Twin:Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems (Excerpt). Florida Institute of Technology, Florida, 2016.
- 33. HOLLER, M.; UEBERNICKEL, F.; BRENNER, W. Digital Twin Concepts in Manufacturing Industries - A Literature Review and Avenues for Further Research. Proceedings of the 18th International Conference on Industrial Engineering (IJIE). Seoul: Korean Institute of Industrial Engineers. 2018.
- 34. LAMNABHI-LAGARRIGUE, F. et al. Systems & Control for the future of humanity, research agenda: Current and future roles, impact and grand challenges. Annual Reviews in Control - ELSEVIER, Gif-sur-Yvette, Paris, April 2017.
- 35. LEE, J.; CAMERON, I.; HASSALL, M. Improving Process Safety: What roles for Digitalization and Industry 4.0? Process Safety and Environmental Protection -ELSEVIER, Queensland, Australia, October 2019.
- 36. LIMA, J. R. D. Estudo de Esquemas de Processo de HDT. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.
- 37. LIU, Z. et al. Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry. Information Management - ELSEVIER, PR China, May 2019.
- 38. LU, H. et al. Oil and Gas 4.0 era: A systematic review and outlook. Computer in Industry - ELSEVIER, LA, USA, July 2019.

- MADDOX, R. N.; SAFTI, M. V. Incorporating slip in two-phase flow pressure drop calculations. PSIG-Pipeline Simulation Interest Group, Chattanooga, Tennessee, USA, v. PSIG ANNUAL MEETING, October 1984.
- 40. MATSU, C. Como a Indústria pode extrair valor do Digital Twin. https: //computerworld.com.br, 2017. Disponivel em: https://computerworld.com.br/2017/05/31/como-industria-pode-extrair-valor-do-digital-twin-1/>. Acesso em: 07 nov. 2019.
- 41. MEDEIROS, J.; JÚNIOR, N. P.; TINOCO, E. B. Curso de análise de tensões em dutos, tubulações e vasos de pressão Módulo III. Petrobras. Rio de Janeiro. 2017.
- 42. PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. Perry's chemical engineers' handbook. 7. ed. [S.l.]: [s.n.], 1997.
- 43. POLITO, R.; RAMALHO, A. Petrobras quer implantar simulador digital em todas as refinarias até 2020. Valor, 2019. Disponivel em: https://valor.globo.com/empresas/noticia/2019/10/31/petrobras-quer-implantarsimulador-digital-em-todas-as-refinarias-at-2020.ghtml>. Acesso em: 20 Janeiro 2020.
- 44. SALIM, L. S. K. Z. Proposição de método dinâmico para dimensionamento de válvulas de segurança e alívio. Dissertação de M.Sc. TPQB-UFRJ. Rio de Janeiro. 2014.

ANEXOS



Anexo 1- Esquemático da unidade industrial com dados operacionais imediatamente anteriores ao evento de despressurização.



Anexo 2 - Alocação das tubulações (pipe-segment) dos capacitores.

						Seg	gment	to 1					Seg	men	to 2					Seg	me	nto 3	1		m	m ³	m	m ³
Linha	Сар	trens	s Isometrico	Dn S	СН Ц	L (m)	J	Г	Di "	V m3	Dn	SCH	L (m)	J	Т	Di "	V m3	Dn	SCH	L (m)	J	Т	Di "	V m3	L tot 1t	V tot 1t	L tot 2t	V tot 2t
0650	1	1	200-GCR-065	14 1	160	14,03	3	1	11,19	0,89															14,03	0,89	14,03	0,89
065F	1	2	200-GCR-065	10 1	160	23,1	0	1	8,5	0,846	10	160	12,54	2	1	8,5	0,459	10	120	3,862	0	1	9,062	0,161	39,49	1,47	78,99	2,93
074/	1	2	200-GCR-074	10 1	120	6.12	1	1	9.062	0.255															6.12	0.25	12.24	0.51
074	1	2	200-GCR-074	10 1	120	1 4 5 3	0	0	9.062	0.06	10	120	12 65	4	2	9.062	0 526	10	120	1 4 3	0	1	9.062	0.06	15 53	0.65	31.06	1 29
71	1	2	200-GCR-075	4 1	160	3 071	1	1	3 / 38	0.018	10	120	12,05	· ·	~	3,002	0,520	10	120	1,10	0	-	3,002	0,00	3.07	0.02	6 14	0.04
0761	1	2	200 CCR 075	4 1	160	0 725	-	1	2 420	0,010					_			-				-			0.74	0,02	1 47	0,04
0704		2	200-GCR-076	4	100	20,755	1	1	3,430	0,004					-				-			-			20,74	0,00	1,47	0,01
0768	1	2	200-GCR-076	4	160	20,49	1	0	3,438	0,123	_				-			-	-			-			20,49	0,12	40,98	0,25
<u> </u>	1	2	200-GCR-077	4	160	30,89	10	0	3,438	0,185					_							-			30,89	0,19	61,79	0,37
78	1	2	200-GCR-078	18 1	140	27,34	7	3	14,88	3,066					_							_			27,34	3,07	54,68	6,13
79	2	2	200-GCR-079	12 8	0S	21,89	6	3	11,75	1,531												_			21,89	1,53	43,77	3,06
80	2	2	200-GCR-080	12 1	120	19,95	3	2	10,75	1,168															19,95	1,17	39,91	2,34
082	2	2	200-GCR-082	12 8	0S	11,47	3	1	11,75	0,803															11,47	0,80	22,95	1,61
082F	2	2	200-GCR-082	12 8	0S	12,12	4	3	11,75	0,848															12,12	0,85	24,24	1,70
83	2	2	200-GCR-083	12 8	0S	24,14	6	2	11,75	1,689															24,14	1,69	48,28	3,38
8/	2	2	200-GCR-084	12 8	0S	34.28	7	1	11.75	2.398															34.28	2.40	68.57	4.80
81	2	2	200-GCR-085	12.8	05	21.89	6	3	11 75	1 531					_										21.89	1 53	43.77	3.06
0864	2	2	200-GCR-086	12 8	05	8 7/8	4	2	11 75	0.612	_				_										8 75	0.61	17.50	1 22
0861	2	2	200 CCR 086	12 0	05	71 05		1	11 75	5 026					_							-			71 05	5.02	142.60	10.05
0868	2	2	200-GCR-086	12 8	05	/1,85	2	1	11,75	5,026					-			-				-			/1,85	5,03	143,69	10,05
0860	. 2	2	200-GCR-086	10	0,8	14,35	3	1	8,376	0,51					_							-			14,35	0,51	28,71	1,02
086D	2	2	200-GCR-086	88	OS	5,081	3	3	7,625	0,15												-			5,08	0,15	10,16	0,30
87	2	2	200-GCR-087	88	0S	7,797	3	2	7,625	0,23					_							_			7,80	0,23	15,59	0,46
088A	2	2	200-GCR-088	10	0,8	14,22	3	1	8,376	0,506															14,22	0,51	28,45	1,01
088P	2	2	200-GCR-088	88	0S	5,414	3	2	7,625	0,159															5,41	0,16	10,83	0,32
89	2	2	200-GCR-089	88	0S	7,765	3	2	7,625	0,229															7,77	0,23	15,53	0,46
090A	3	2	200-GCR-090	88	0S	9,571	3	2	7,625	0,282															9,57	0,28	19,14	0,56
090F	3	2	200-GCR-090	12 8	0S	14,27	2	0	11,75	0,998															14.27	1.00	28.54	2.00
0900	2	2	200-GCR-090	16 1	120	51.37	6	6	13.56	4,788												-			51 37	4 79	102 75	9.58
0,00	2	2	200-GCR-091	20 2	05	9 675	2	2	7 625	0.28/					-										9.62	0.28	19.25	0.57
002/	3	2	200-608-003	00	05	9 102	2	2	7 625	0 271	12	805	0.254	0	0	11.75	0.019		-			-			9,05	0,20	10 00	0.57
0924		2	200-GCR-092	00	05	9,195	2	5	7,025	0,271	12	803	0,254	0	0	11,75	0,018					-			9,45	0,29	10,09	0,58
0928	3	2	200-GCR-092	12 8	US	13,/1	3	0	11,75	0,959	_				_				-		_	-			13,/1	0,96	27,41	1,92
93	3	2	200-GCR-093	88	OS	9,621	2	3	7,625	0,283												-			9,62	0,28	19,24	0,57
97	4	2	200-GCR-097	18 1	140	53,33	7	2	14,88	5,98												_			53,33	5,98	106,66	11,96
98	8 4	2	200-GCR-098	18 1	140	10,33	1	3	14,88	1,159												_			10,33	1,16	20,66	2,32
101A	4	2	200-GCR-101	18 1	140	48,39	6	5	14,88	5,426															48,39	5,43	96,77	10,85
101E	4	2	200-GCR-101	18 1	140	1,035	0	0	14,88	0,116															1,04	0,12	2,07	0,23
107	4	2	200-GCR-102	18 1	140	9,802	3	2	14,88	1,099															9,80	1,10	19,60	2,20
103	4	2	200-GCR-103	18 1	140	27.34	7	3	14.88	3.066															27.34	3.07	54.68	6.13
104	4	2	200-GCR-104	18 1	140	42.86	7	1	14.88	4.806															42.86	4.81	85.71	9.61
105		2	200-GCR-105	18 1	140	31 28	6	2	14.88	3 507	_				_										31.28	3 51	62.55	7.01
100	4	2	200-GCR-106	18 1	140	6 674	2	-	14,00	0 7/18	_				-			-	-						6.67	0.75	13 35	1 50
100		2	200 CCR 107	10 1	140	0,074		0	14.00	0,740	12	000	1 001	0	1	11.75	0.07	-				-			1.24	0,13	2.60	0.22
10/	4	2	200-GCR-107	12 0	00	0,545	7	0	14,00	0,056	12	803	1,001	0	- 1	11,75	0,07		-			-			25.00	1.01	2,09	0,22
108	4	2	200-GCR-108	12 8	US	25,89		0	11,75	1,811					-			-				-			25,89	1,81	51,77	3,62
109	4	2	200-GCR-109	18 1	140	50,98	5	3	14,88	5,716					_			-				-			50,98	5,72	101,96	11,43
110	0 5	2	200-GCR-110	12 8	OS	/2,1/	/	3	11,75	5,049					_			-				-			/2,1/	5,05	144,35	10,10
1124	5	2	200-GCR-112	14	80	4,08	12	4	12,5	0,323				_								-			4,08	0,32	8,16	0,65
1128	5	2	200-GCR-112	14	80	74,3	12	4	12,5	5,882	20	140	4,016	0	0	16,5	0,554					_			78,31	6,44	156,63	12,87
113A	5	2	200-GCR-113	20 1	140	14,61	1	0	16,5	2,015															14,61	2,02	29,22	4,03
113P	5	2	200-GCR-113	16 1	120	24,67	3	1	13,56	2,299															24,67	2,30	49,34	4,60
1130	5	2	200-GCR-113	10	0,8	6,836	1	2	8,376	0,243															6,84	0,24	13,67	0,49
1130	5	2	200-GCR-113	88	0S	6,204	2	1	7,625	0,183															6,20	0,18	12,41	0,37
113	5	2	200-GCR-113	6	0,5	5,783	2	0	5	0,073															5,78	0,07	11,57	0,15
2962	5	2	200-GCR-859	6	0,5	6,122	2	0	5	0,078															6,12	0,08	12,24	0,16
29634	5	2	200-GCR-860	8	0,5	6,205	2	1	7	0,154															6.21	0.15	12.41	0.31
2963	5	2	200-GCR-860	6	0.5	5.738	2	0	5	0.073															5.74	0.07	11.48	0.15
296/	1 5	2	200-GCR-861	6	0.5	5.749	2	-	5	0.073					_		-								5.75	0.07	11 50	0.15
2065	5	2	200-608-962	10	0.8	6 827	1	1	8 376	0 242					-										6.94	0.24	12.67	0.40
29054	5	2	200-00-002	10	0,0	6 202	1	1	0,370	0.154					_										6.30	0,24	13,07	0,49
29058	5	2	200-GCR-862	ð	0,5	0,203	2	1	/	0,154				\vdash	_							-			6,20	0,15	12,41	0,31
29650	5	2	200-GCR-862	6	0,5	3,745	2	0	5	0,073					_	_						-			5,75	0,07	11,49	0,15
2966	5	2	200-GCR-863	6	0,5	5,/41	2	0	5	0,073				\vdash	_	_	_					-			5,74	0,07	11,48	0,15
2967A	5	2	200-GCR-864	8	0,5	6,205	2	0	7	0,154					_							-			6,21	0,15	12,41	0,31
2967B	5	2	200-GCR-864	6	0,5	5,738	2	0	5	0,073												-			5,74	0,07	11,48	0,15
2968	5	2	200-GCR-865	6	0,5	5,749	2	0	5	0,073															5,75	0,07	11,50	0,15
2969A	5	2	200-GCR-866	16 1	120	10,79	2	1	13,56	1,006															10,79	1,01	21,58	2,01
2969F	5	2	200-GCR-866	10	0,8	6,837	2	1	8,376	0,243															6,84	0,24	13,67	0,49
29690	5	2	200-GCR-866	8	0,5	6,204	2	1	7	0,154															6,20	0,15	12,41	0,31
29690	5	2	200-GCR-866	6	0,5	5,744	2	0	5	0,073															5,74	0,07	11,49	0,15
2970	5	2	200-GCR-867	6	0,5	5,742	2	0	5	0,073															5.74	0.07	11.48	0.15
29714	5	2	200-GCR-868	8	0.5	6.205	2	1	7	0.154															6.21	0.15	12 41	0.31
20715	5	2	200-608-869	6	0.5	5 736	2	1	, 5	0.072	_				_										5 74	0.07	11 /7	0.15
207	5	2	200-609-960	6	05	5,750	2	0	5	0.072					_		-		<u> </u>			-			5,74	0.07	11 50	0.15
29/2	5	2	200-00-009	10	0,5	5,15	4	1	0 270	0,073				\vdash	_							-			5,75	0,07	12,50	0,15
2973A	5	2	200-GCR-8/0	10	0,8	0,83/	1	1	8,376 -	0,243				\vdash	_	_					-	-			6,84	0,24	13,6/	0,49
29/3B	5	2	200-GCR-870	8	0,5	o,205	2	1	/	0,154				\vdash	_	_	_					-			6,21	0,15	12,41	0,31
29730	. 5	2	200-GCR-870	6	0,5	5,745	2	0	5	0,073												-			5,75	0,07	11,49	0,15
2974	5	2	200-GCR-871	6	0,5	5,741	2	0	5	0,073							_					-			5,74	0,07	11,48	0,15
2975A	5	2	200-GCR-872	8	0,5	6,203	2	1	7	0,154												_			6,20	0,15	12,41	0,31
2975E	5	2	200-GCR-872	6	0,5	5,736	2	0	5	0,073															5,74	0,07	11,47	0,15
2976	5 5	2	200-GCR-873	6	0,5	5,75	2	0	5	0,073															5,75	0,07	11,50	0,15

Anexo 3 - Levantamento de dados de tubulação por meio dos isométricos da unidade.

Anexo 3 – Continuação.

				Seg	qmen	to 1					Seg	mer	nto 2	?				Seg	mento	3		m	m ³	m	m ³
Linha	Cap trens	Isometrico	Dn SCH	L (m)	J	Т	Di "	Vm3	Dn	SCH	L (m)	J	Т	Di "	V m3	Dn	SCH	L (m)	J T	Di "	V m3	L tot 1t	V tot 1t	L tot 2t	V tot 2t
114A	6 2	200-GCR-114	6 80S	5,469	2	0	5,761	0,092								-						5,47	0,09	10,94	0,18
114B	6 2	200-GCR-114	6 80S	4,664	2	0	5,761	0,078	10	80S	0,394	0	1	9,75	0,019	-					_	5,06	0,10	10,12	0,19
114C	6 2	200-GCR-114	10 805	4,21	1	0	9,75	0,203	12	0,63	0,457	0	1	10,75	0,027						_	4,67	0,23	9,33	0,46
114D	6 2	200-GCR-114	12 0,6	6,814	1	0	10,75	0,399	18	1,16	0,724	0	1	15,69	0,09	-						7,54	0,49	15,08	0,98
114E	6 2	200-GCR-114	18 1,2	4,081	1	0	15,69	0,509	18	1,16	42,59	3	0	15,69	5,311	-						46,67	5,82	93,33	11,64
2977	6 2	200-GCR-874	6 805	5,182	2	1	5,761	0,087	6	805	0,143	0	1	5,761	0,002	-						5,33	0,09	10,65	0,18
29764	6 2	200-0CR-875	6 905	3,400	2	1	5,761	0,091	10	80s	0.216	0	1	0.75	0.01	-						5,41	0,09	10,62	0,18
29766	6 2	200-GCR-875	6 905	5 1 9 2	2	0	5,761	0,081	10	805	0,210	0	1	5 761	0,01							5,00	0,09	10,12	0,18
29804	6 2	200-GCR-870	6 805	5 3 2 6	2	0	5 761	0,087	- 0	803	0,143	0	1	3,701	0,002							5 33	0,09	10,05	0,18
2980B	6 2	200 GCR-877	6 805	4 664	2	0	5 761	0.078					-									4 66	0.08	9 33	0,10
29800	6 2	200-GCR-877	10 805	0.394	0	1	9.75	0.019	12	0.63	0.254	0	1	10.75	0.015							0.65	0.03	1.30	0.07
2981	6 2	200-GCR-878	10 805	4.413	1	0	9.75	0.213	6	805	0.143	0	1	5.761	0.002							4.56	0.21	9,11	0.43
2982A	6 2	200-GCR-879	6 80S	5,326	2	0	5,761	0,09	-			-	_		,							5,33	0,09	10,65	0,18
2982B	6 2	200-GCR-879	6 80S	4,842	2	0	5,761	0,081	10	80S	0,216	0	1	9,75	0,01							5,06	0,09	10,12	0,18
2983	6 2	200-GCR-880	6 80S	5,182	2	0	5,761	0,087	6	80S	0,143	0	1	5,761	0,002							5,33	0,09	10,65	0,18
2984A	6 2	200-GCR-881	6 80S	5,326	2	1	5,761	0,09														5,33	0,09	10,65	0,18
2984B	6 2	200-GCR-881	6 80S	4,842	2	0	5,761	0,081	10	80S	0,216	0	1	9,75	0,01							5,06	0,09	10,12	0,18
2984C	6 2	200-GCR-881	10 80S	3,995	1	0	9,75	0,192	12	0,63	0,457	0	1	10,75	0,027							4,45	0,22	8,90	0,44
2984D	6 2	200-GCR-881	12 0,6	7,218	1	0	10,75	0,423	18	1,16	0,343	0	1	15,69	0,043							7,56	0,47	15,12	0,93
2985	62	200-GCR-882	6 80S	5,182	2	0	5,761	0,087	6	80S	0,143	0	1	5,761	0,002							5,33	0,09	10,65	0,18
2986A	6 2	200-GCR-883	6 80S	5,469	2	1	5,761	0,092								_						5,47	0,09	10,94	0,18
2986B	6 2	200-GCR-883	6 80S	4,842	2	0	5,761	0,081	10	80S	0,216	0	1	9,75	0,01	-					_	5,06	0,09	10,12	0,18
2987	6 2	200-GCR-884	6 80S	5,182	2	0	5,761	0,087	6	80S	0,143	0	1	5,761	0,002	-						5,33	0,09	10,65	0,18
2988A	6 2	200-GCR-885	6 80S	5,267	2	1	5,761	0,089								-						5,27	0,09	10,53	0,18
2988B	6 2	200-GCR-885	6 80S	4,666	2	0	5,761	0,078	10	80S	0,394	0	1	9,75	0,019	-						5,06	0,10	10,12	0,19
29880	6 2	200-GCR-885	10 805	4,413	1	0	9,75	0,213	12	0,63	0,254	0	1	10,75	0,015	-						4,67	0,23	9,33	0,45
2989	6 2	200-GCR-886	6 805	5,184	2	0	5,761	0,087	6	805	0,143	0	1	5,761	0,002	-						5,33	0,09	10,65	0,18
2990A	6 2	200-GCR-887	6 905	3,520	2	0	5,761	0,09	10	80s	0.216	0	1	0.75	0.01	-						5,55	0,09	10,05	0,18
29908	6 2	200-GCR-888	6 805	5 182	2	0	5 761	0,081	6	805	0,210	0	1	5 761	0,01	-						5 33	0,09	10,12	0,18
3835	5 2	00-GCR-1828	12 805	2 311	1	3	11 75	0 162		005	0,145	0	-	5,701	0,002							2 31	0.16	4 62	0,10
633	7 2	00-GCR-1953	8 120	20.76	6	0	7.187	0.543														20.76	0.54	41.52	1.09
632A	7 1	00-GCR-1960	10 120	3.814	0	1	9.062	0.159														3.81	0.16	3.81	0.16
632B	7 2	00-GCR-1960	10 120	71,12	3	1	9,062	2,959														71,12	2,96	142,24	5,92
215A	8 1	200-GCR-215	18 120	3,022	1	1	15,25	0,356														3,02	0,36	3,02	0,36
215B	8 1	200-GCR-215	18 120	28,68	7	0	15,25	3,38														28,68	3,38	28,68	3,38
217	8 1	200-GCR-217	16 160	104,2	11	1	12,81	8,664														104,17	8,66	104,17	8,66
219A	8 1	200-GCR-219	18 120	123,7	13	1	15,25	14,58														123,72	14,58	123,72	14,58
219B	8 1	200-GCR-219	18 120	25,33	1	1	15,25	2,985														25,33	2,99	25,33	2,99
225	8 1	200-GCR-225	18 120	53,24	10	0	15,25	6,274														53,24	6,27	53,24	6,27
226A	7 1	200-GCR-226	14 140	97,46	13	1	11,5	6,531								_						97,46	6,53	97,46	6,53
226B	9 1	200-GCR-226	14 140	22,87	0	1	11,5	1,532								-					_	22,87	1,53	22,87	1,53
227	9 1	200-GCR-227	10 120	3,899	2	1	9,062	0,162								-						3,90	0,16	3,90	0,16
228a	9 2	200-GCR-228	8 120	32,39	1	0	7,187	0,848	<u> </u>				-			-						32,39	0,85	64,78	1,70
228b	9 2	200-GCR-229	6 120	11,56	2	1	5,501	0,177	_				_			-						11,56	0,18	23,11	0,35
229	9 2	200-GCR-229	6 120	34,94	5	1	5,501	0,536	-				-			-						34,94	0,54	69,88	1,07
230	9 2	200-GCR-230	6 120	20.91	4	1	5,501	0,159	-				-			-						20.91	0,15	20,69	0,32
231	9 2	200-GCR-231	6 120	12 5	0	1	5,501	0,472					-			-						12 50	0,47	27.01	0,94
240	9 2	200-GCR-240	8 120	8 056	4	0	7 187	0,207	6	120	12 14		-	5 501	0 186							20.20	0,21	/0.39	0,41
242R	9 2	200-GCR-242	6 120	19 56	8	1	5 501	0,211		120	12,14			3,301	0,100							19 56	0,40	39 11	0,75
243	9 2	200-GCR-243	6 120	11.72	2	1	5,501	0.18														11.72	0.18	23.44	0.36
244	9 2	200-GCR-244	6 120	44,88	12	1	5,501	0,688														44,88	0,69	89,77	1,38
245	9 2	200-GCR-245	6 120	3,535	0	1	5,501	0,054														3,54	0,05	7,07	0,11
250	10 1	200-GCR-250	10 120	3,561	2	1	9,062	0,148														3,56	0,15	3,56	0,15
251A	10 2	200-GCR-251	8 120	65,65	6	0	7,187	1,718														65,65	1,72	131,30	3,44
251B	10 2	200-GCR-251	8 120	7,616	5	0	7,187	0,199														7,62	0,20	15,23	0,40
281	10 2	200-GCR-281	10 120	0,47	0	0	9,062	0,02														0,47	0,02	0,94	0,04
514B	1	200-GCR-514	26 1,3	12,94	2	1	23,5	3,622														12,94	3,62	12,94	3,62
282A	10 2	200-GCR-282	6 120	102,2	7	2	5,501	1,567														102,19	1,57	204,38	3,13
282B	10 2	200-GCR-282	6 120	0,768	0	1	5,501	0,012							_							0,77	0,01	1,54	0,02
548A	1	200-GCR-548	18 120	49,11	3	1	15,25	5,787							_							49,11	5,79	49,11	5,79
1023	1	00-GCR-1023	20 120	7,168	1	1	17	1,05														7,17	2,10	7,17	2,10
					-				_							_	1								
1558	1	UU-GCR-1558	24 0,4	14,67	5	0	23,25	4,017																	
	287																								

2483,8 163,3 **4414,6 269,3**

Anexo 4 - Volumes calculados dos trocadores P01A e P02A, pelo *software* HTRI P01A

See Runtime Message warnings.	es Repor	t for		t			
Exchanger F		IMES 4497 5	i Lu				
Approximate sheliside	(L)	4407,5	+				1
Approximate tubeside	(L)	2420,0					
		Shell Cons	struction	ntormat	lion		
TEMA shell type		DEU		Shell	ID	(mm)	1200,0
Shells Series	1	Parallel	1	Total	area	(m2)	288,98
Passes Shell	1	Tube	2	Eff. ar	rea	(m2/shell)	279,57
Shell orientation angle	(deg)	0,00					
Impingement present		Circular plate		Impin	gement dia	ameter/nozzle	1,1000
Pairs seal strips		2		Passl	ane seal re	ods (mm) 19,050	No. 2
Shell expansion joint		No		Full si	upport at L	J-Bend No	
Weight estimation Wet	/Dry/Bunc	lle	4026	1 /	33356	/ 10047 (kg/	/shell)
		Baff	le Inform	ation			
Type	Paralle	Double-Sea		Baffle	cut (% dia	176	
Crosspasses/shellpass	, areas	17		No. (F	Pct Area)	(mm) to C L	
Central spacing	(mm)	295.00		1	22 65	388.80	
Inlet spacing	(mm)	673 43		2	71 94	353 45	
Outlet spacing	(mm)	1459.9		Baffle	overlap	(mm)	35 350
Baffle thickness	(mm)	6.350		Damo	oronap	()	00,000
Use deresonating baffle	es	No					
		Tub	e Informa	ation			
Tube type		Plain		Tubeo	count per s	hell	744
Length to tangent	(m)	6,096		Pct tu	bes remov	ed (both)	15,46
Effective length	(m)	6,279		Outsid	de diamete	er (mm)	19,050
Total tubesheet	(mm)	211.14		Wallt	thickness	(mm)	2,108
Area ratio	(out/in)	1,2842		Pitch	(mm)	25,000 Ratio	1,3123
Tube metal	A CONTRACTOR OF A CONTRACT	Carbon steel		Tube	pattern (de	ea)	45

P02A (por casco)

See Runtime Message warnings.	es Report	for							
Exchanger F	luid Volu	mes							
Approximate shellside	(L)	5431,0	-						
Approximate tubeside	(L)	4470,9	*			8			
1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 -		Shell Cons	truction Ir	formation					
TEMA shell type	[DEU		Shell ID	(mm)	1425,0			
Shells Series	1 1	Parallel	1	Total area	(m2)	332,09			
Passes Shell	1 7	Tube	2	Eff. area	(m2/shell)	313,14			
Shell orientation angle	(deg) (0,00							
Impingement present	(Circular plate		Impingement of	1,1000				
Pairs seal strips	2	2		Passlane seal	rods (mm) 25,400	No. 2			
Shell expansion joint		No		Full support at	U-Bend No				
Weight estimation Wet	Dry/Bund	le	72685	62788	/ 15065 (kg/	shell)			
		Baff	le Informa	tion					
Type	Paralle	I Double-Seq.		Baffle cut (% c	lia) 18.2				
Crosspasses/shellpass		13		No. (Pct Area)	(mm) to C.L				
Central spacing	(mm)	400,00		1 24,04	453,15				
Inlet spacing	(mm)	807,42		2 70,13	407,90				
Outlet spacing	(mm)	1321,4		Baffle overlap	(mm)	45,248			
Baffle thickness	(mm)	9,525							
Use deresonating baffle	es	No							
		Tub	e Informat	ion					
Tube type		Plain		Tubecount per	shell	634			
Length to tangent	Length to tangent (m) 6.096			Pct tubes rem	oved (both)	13,09			
Effective length	Effective length (m) 6.190			Outside diame	ter (mm)	25,400			
Total tubesheet	(mm)	374,65		Wall thickness	2,108				
Area ratio	(out/in)	1,1990		Pitch (mm)	32,000 Ratio	1,2598			
Tube metal Carbon steel				Tube pattern (deg)					

		Unit and B	undle Con	struction Information			
Bays in parallel/unit	()		4	Bundles in parallel/bay			2
Extended area/unit	(m2)		61064	Bare area/unit	(m2)		2592,2
Extended area/bundle	(m2)		7633,0	Bare area/bundle	(m2)		324,03
Tubepasses/Tuberows	()	41	8	Number of tubes/bundle	()		344
Tubecount, Odd rows/Even rows	()	43/	43	Edge seals	()		Yes
Bundle width	(mm)		2775,	Fan guard	()		No
Clearance	(mm)		9,525	Louvers	()		No
Header depth	(mm)		101,60	Steam coil	()		No
Header Box				Hail screen	()		No
- Plate thickness	(mm)		104,78	Tube support information			
- Tubesheet thickness	(mm)		117,47	- Number	()		6
Plenum type			Box	- Width	(mm)		25,400
Bundle(s) weight	(kg)		23212	Orientation (from horiz.)	(deg)		0,00
Structure weight	(kg)		26226	Tubeside volume	(L)		1596,6
Total weight, Dry / Wet	(kg)		229488	/ 242252			
Ladder/walkway weight	(kg)		17569	Cost Factor	()	-	617,24
			Tube Inf	ormation			
Straight length	(mm)		12192,	Tube type		Hig	h-finned
Unfinned length	(mm)		0,000	Unheated length	(mm)		387,35
Layout	()	St	taggered	Area ratio (fin/bare)	()		23,557
Transverse pitch	(mm)		63,500	Fins per unit length	(fin/meter)		433,0
Longitudinal pitch	(mm)		54,991	Fin root diameter	(mm)		25,400
Tube form	()		Straight	Fin height	(mm)		15,875
Outside diameter	(mm)		25,400	Fin thickness at base	(mm)		0,400
Inside diameter	(mm)		20,580	Fin thickness at tip	(mm)		0,400
Area ratio (out/in)	()		29,074	Fin type	()		Circular
Over fin diameter	(mm)		57,150	Fin efficiency	(%)		83,7
Tube material	304 Stainle	ss steel (18	Cr, 8 Ni)	Internal tube type			None
Fin material	A	luminum 10	60 - H14				

Anexo 5 - Volume estimado para o *air-cooler* P03A.



Anexo 6 - Fluxograma da simulação no software Aspentech HYSYS V10.

	(1100		
tempo,minutos	Perry	Rasouli and Williams	Bird, Stewart and Lightfoot
0,00	10,63	10,63	10,63
0,50	9,90	9,51	9,49
1,00	9,22	8,53	8,48
1,50	8,59	7,66	7,60
2,00	8,00	6,89	6,82
2,50	7,46	6,21	6,13
3,00	6,95	5,61	5,52
3,50	6,47	5,07	4,97
4,00	6,03	4,59	4,49
4,50	5,61	4,16	4,06
5,00	5,23	3,77	3,68
5,50	4,87	3,43	3,34
6,00	4,54	3,12	3,03
6,50	4,23	2,84	2,76
7,00	3,94	2,59	2,51
7,50	3,67	2,37	2,29
8,00	3,42	2,17	2,09
8,50	3,18	1,98	1,91
9,00	2,96	1,82	1,75
9,50	2,76	1,67	1,60
10,00	2,57	1,53	1,47
10,50	2,40	1,41	1,35
11,00	2,23	1,30	1,24
11,50	2,08	1,20	1,14
12,00	1,94	1,10	1,05
12,50	1,80	1,02	0,97
13,00	1,68	0,94	0,89
13,50	1,57	0,87	0,82
14,00	1,46	0,80	0,76
14,50	1,36	0,75	0,70
15,00	1,27	0,69	0,65
15,50	1,18	0,64	0,60
16,00	1,10	0,60	0,56
16,50	1,02	0,55	0,52
17,00	0,95	0,51	0,48
17,50	0,89	0,48	0,45
18,00	0,83	0,45	0,42
18,50	0,77	0,42	0,39
19,00	0,72	0,39	0,36
19,50	0,67	0,36	0,34
20.00	0.62	0.34	0.32

Anexo 7 - Pressões calculadas pelos métodos simplificados. (Pressões em MPa)

Continuação (Pressões em kgf/cm² m)

tempo,minutos	Perry	Rasouli and Williams	Bird, Stewart and Lightfoot
0,00	107,4	107,4	107,4
0,50	100,0	96,0	95,7
1,00	93,1	86,0	85,5
1,50	86,6	77,1	76,5
2,00	80,6	69,3	68,5
2,50	75,0	62,3	61,5
3,00	69,8	56,2	55,3
3,50	65,0	50,7	49,7
4,00	60,5	45,8	44,8
4,50	56,2	41,4	40,4
5,00	52,3	37,5	36,5
5,50	48,7	34,0	33,0
6,00	45,3	30,8	29,9
6,50	42,1	28,0	27,1
7,00	39,2	25,5	24,6
7,50	36,4	23,2	22,3
8,00	33,8	21,1	20,3
8,50	31,5	19,2	18,5
9,00	29,2	17,5	16,8
9,50	27,2	16,0	15,3
10,00	25,2	14,6	14,0
10,50	23,4	13,4	12,7
11,00	21,8	12,2	11,6
11,50	20,2	11,2	10,6
12,00	18,8	10,2	9,7
12,50	17,4	9,4	8,8
13,00	16,1	8,6	8,1
13,50	15,0	7,9	7,4
14,00	13,9	7,2	6,8
14,50	12,9	6,6	6,2
15,00	11,9	6,0	5,6
15,50	11,0	5,5	5,2
16,00	10,2	5,1	4,7
16,50	9,4	4,6	4,3
17,00	8,7	4,2	3,9
17,50	8,1	3,9	3,6
18,00	7,4	3,5	3,3
18,50	6,9	3,2	3,0
19,00	6,3	3,0	2,7
19,50	5,8	2,7	2,4
20,00	5,3	2,4	2,2

Vazão, kg/h	Perry	Rasouli and Williams	Bird, Stewart and Lightfoot
0,00	114727,0	0,0	0,0
0,50	106870,3	156976,1	183501,8
1,00	99551,7	140668,0	161266,7
1,50	92734,3	126243,4	142020,1
2,00	86383,7	113463,4	125322,1
2,50	80468,0	102122,1	110802,8
3,00	74957,5	92041,7	98150,7
3,50	69824,3	83068,1	87102,6
4,00	65042,6	75067,9	77435,4
4,50	60588,4	67925,0	68959,9
5,00	56439,3	61538,6	61514,9
5,50	52574,2	55820, 5	54963,0
6,00	48973,9	50693,8	49186,6
6,50	45620,1	46091,4	44084,9
7,00	42496,0	41954, 3	39571,5
7,50	39585,8	38230,7	35571,9
8,00	36874,9	34875,2	32021,9
8,50	34349,7	31847,8	28865,9
9,00	31997,3	29113, 1	26055,9
9,50	29806,1	26640, 1	23550,3
10,00	27765,0	24401,2	21312,8
10,50	25863,6	22371,9	19311,8
11,00	24092,4	20530,8	17520,0
11,50	22442,5	18858,6	15913,2
12,00	20905,6	17338,2	14470,6
12,50	19474,0	15954,5	13173,5
13,00	18140,4	14693,9	12005,9
13,50	16898,1	13544,4	10953,6
14,00	15740,9	12495,1	10004,1
14,50	14662,9	11536,6	9146,2
15,00	13658,8	10660,0	8370,3
15,50	12723,4	9857,8	7667,8
16,00	11852,1	9122,9	7030,9
16,50	11040,5	8449,2	6453,1
17,00	10284,4	7830,9	5928,1
17,50	9580,1	7263,2	5450,8
18,00	8924,1	6741,4	5016,3
18,50	8312,9	6261,4	4620,5
19,00	7743,6	5819,6	4259,4
19,50	7213,4	5412,6	3929,9
20,00	6719,4	5037,4	3628,8

Anexo 8 - Vazões calculadas pelos métodos simplificados.