



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# Modelagem, simulação e análise qualitativa da dinâmica do *hot-bypass*

*Autor: Yana Jeanine Monge Pigatto*

*Orientador: Pedro Rafael Bolognese Fernandes*

Porto Alegre, julho de 13

## Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Símbolos	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	x
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	2
2.1 Funcionamento de uma coluna de destilação e importância do controle de pressão	2
2.2 Métodos de controle de pressão de uma coluna de destilação	3
2.2.1 Principais métodos e suas classificações	3
2.3 Funcionamento do sistema <i>hot-bypass</i>	5
2.4 Modelos propostos para descrever o sistema <i>hot-bypass</i>	8
2.4.1 Modelo dinâmico adotado pela Petrobrás	9
2.4.2 Modelo dinâmico proposto por Fydryzewski (2011)	12
2.4.3 Modelo dinâmico proposto por Pessoa (2013)	14
3 Modelagem dinâmica proposta para o sistema de <i>hot-bypass</i>	16
3.1 Balanço de forças no líquido do sistema	16
3.2 Força de atrito	17
3.3 Balanços do vapor de topo	18
3.3.1 Balanço de massa	18
3.3.2 Balanço de energia	19
3.4 Equação da válvula	20
3.5 Graus de liberdade	20
4 Simulação do modelo proposto e avaliação dos resultados	22
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	29
6 Referências	30
7 ANEXO A – Implementação do modelo em EMSO	31

## **Agradecimentos**

À família, especialmente à minha mãe, pai e irmãos, que me apoiaram e me ajudaram a crescer ao longo desta jornada. Todos me ensinaram valores importantes.

Àqueles professores que se tornaram amigos, e que com paciência e bom humor, tiveram verdadeiro interesse em transmitir seu conhecimento, em elevar a qualidade profissional dos alunos, e ainda muitas vezes em formar bons cidadãos.

Aos amigos, que compreenderam (ou não) todas as ausências e tempos de mau humor. Àqueles que através de brincadeiras e leveza ajudaram a lembrar o que realmente importa. Àqueles que através de sua nobreza e sabedoria compartilharam o ideal de um mundo e pessoas melhores. A todos que, de uma forma ou outra, me transmitiram a paz e amizade que por vezes precisei.

Especialmente à Raça, que até hoje me dá exemplo profissional e pessoal.

Aos amigos feitos em cada semestre, em cada viagem, em cada estágio, em todas as etapas percorridas até este ponto.

A todos cidadãos, que formam e mantêm esta instituição através do trabalho e contribuição de cada um. Espero que todos que usufruímos deste ensino possamos dar um retorno à sociedade, ajudando-a a crescer e se desenvolver, possibilitando que cada vez mais pessoas possam ter uma vida de qualidade.

## Resumo

Este trabalho aborda o funcionamento de um dos principais equipamentos existentes atualmente na indústria química e petroquímica, a coluna de destilação. É feita uma breve descrição de seu funcionamento e dos sistemas mais comuns de controle de uma de suas principais variáveis de operação, a pressão, dando enfoque ao método de controle denominado genericamente de *hot-bypass*.

O objetivo é gerar um modelo matemático que descreva o funcionamento desse sistema de controle, contribuindo para o desenvolvimento de controladores de unidades existentes de colunas de destilação, visando a melhoria de sua operação.

Foi feita uma avaliação do modelo obtido através de uma simulação dinâmica com o uso do software EMSO, encontrando-se valores coerentes e uma análise qualitativa esperada, comparando-se ao comportamento real observado em uma coluna debutanizadora. Assim, o resultado deste trabalho foi satisfatório, podendo ser utilizado nas aplicações de interesse.

## Lista de Figuras

Figura 2-1 Controle de vazão de <i>by-pass</i> ao vaso de condensado – “ <i>hot vapor by-pass</i> ” (Fonte: Sloley, 2000).....	5
Figura 2-2 Disposição dos equipamentos num sistema de <i>hot-bypass</i> (Fonte: adaptado de Fydryzewski, 2011) .....	6
Figura 2-3 <i>Hot-bypass</i> com entrada de condensado pela parte inferior do vaso de topo (Fonte: adaptado de Fydryzewski, 2011) .....	7
Figura 2-4 <i>Hot-bypass</i> com entrada de condensado pela parte superior do vaso de topo (Fonte: adaptado de Fydryzewski, 2011) .....	7
Figura 2-5 Simulação da inundação do condensador e do diferencial de pressão na válvula de <i>hot-bypass</i> (Fonte: Campos e Teixeira, 2010) .....	11
Figura 2-6 Variações de pressão de uma coluna debutanizadora real e de nível do seu vaso de topo (Fonte: Campos e Teixeira, 2010) .....	12
Figura 2-7 Variáveis e representação esquemática no modelo de Fydryzewski (2011) .....	13
Figura 2-8 Variáveis e representação esquemática no modelo de Pessoa (2013) .....	14
Figura 3-1 Esquema simplificado do sistema <i>hot-bypass</i> .....	16
Figura 4-1 Estabilização da pressão de topo da coluna para o estado estacionário.....	23
Figura 4-2 Estabilização do nível de líquido no condensador para o estado estacionário .	23
Figura 4-3 Estabilização das vazões mássicas para o estado estacionário, com detalhe em escala para o comportamento subamortecido .....	23
Figura 4-4 Variação da vazão mássica de vapor que sai do topo da coluna e resposta da pressão de topo.....	24
Figura 4-5 Variação da vazão mássica de vapor que sai do topo da coluna e resposta do nível de líquido no condensador .....	24
Figura 4-6 Variação da pressão no vaso de topo e resposta do nível de líquido no condensador .....	25
Figura 4-7 Variação da pressão no vaso de topo e resposta da pressão de topo da coluna .....	25
Figura 4-8 Variações da abertura da válvula de controle e resposta do nível de líquido no condensador .....	26
Figura 4-9 Variações da abertura da válvula de controle e resposta da pressão de topo da coluna .....	26
Figura 4-10 Variações de abertura da válvula de controle e resposta da pressão de topo da coluna, com teste de efeito da abertura da válvula para um distúrbio na pressão .....	27
Figura 4-11 Variação da pressão de topo em função de distúrbio na vazão mássica de vapor que deixa a coluna.....	27
Figura 4-12 Variação do nível de líquido no condensador em função de distúrbio na vazão mássica de vapor que deixa a coluna .....	27

**Lista de Tabelas**

Tabela 2-1 Comparação entre valores reais e simulados e demais valores encontrados pelo modelo. (Fonte: Fydryzewski, 2011) .....	13
Tabela 2-2 Comparação entre valores reais e simulados e demais valores encontrados pelo modelo de Pessoa, 2013.....	15
Tabela 3-1 Contabilidade de variáveis e equações .....	21
Tabela 4-1 Valores utilizados no modelo proposto.....	22

## Lista de Símbolos

Revisão bibliográfica:

$A_{COND}$  = área transversal do condensador [m<sup>2</sup>];

$A_{TUB}$  = área transversal da tubulação [m<sup>2</sup>];

$D_{TUB}$  = diâmetro da tubulação entre o condensador e o vaso de topo [m];

$F_{ATRITO}$  = força de atrito do líquido com paredes da tubulação e do condensador [N];

$f_l$  = fator de atrito para o escoamento do líquido [adimensional];

$f_t$  = fator de atrito [kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>];

$g$  = aceleração da gravidade [m.s<sup>-2</sup>];

$h_1$  = nível no condensador [ft];

$h_2$  = nível no vaso de topo [ft];

$H_{cond}$  = altura total do condensador [m];

$L_{TUB}$  = comprimento da tubulação entre o condensador e o vaso de topo [m];

$\dot{m}_0$  = vazão mássica de gás que sai do último prato da coluna [lb.h<sup>-1</sup>];

$\dot{m}_1$  = vazão mássica que vai para o condensador [lb.h<sup>-1</sup>];

$\dot{m}_{1,cond}$  = vazão mássica que condensa no condensador [lb.h<sup>-1</sup>];

$\dot{m}_2$  = vazão mássica de condensado que sai do condensador [lb.h<sup>-1</sup>];

$\dot{m}_3$  = vazão mássica que sai da válvula e vai para o vaso de topo [lb.h<sup>-1</sup>];

$\dot{m}_{3v}$  = vazão mássica que passa pela válvula [lb.h<sup>-1</sup>];

$M_{TOT}$  = massa total do líquido em movimento [kg];

$\mu_L$  = viscosidade do líquido [kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>];

$\Delta P$  = diferença entre pressão no topo da coluna de destilação e no vaso de topo [Pa];

$P_0$  = pressão no último prato da coluna [kgf.cm<sup>-2</sup>];

$P_1$  = pressão no condensador [kgf.cm<sup>-2</sup>];

$P_2$  = pressão no vaso de topo [kgf.cm<sup>-2</sup>];

$P_A$  = pressão no ponto de derivação do desvio de tubulação [kgf.cm<sup>-2</sup>];

$P_B$  = pressão à montante da válvula [kgf.cm<sup>-2</sup>];

$P_C$  = pressão à jusante da válvula [kgf.cm<sup>-2</sup>];

$P_{COL}$  = pressão da coluna de destilação [Pa];

$P_{DRUM}$  = pressão no vaso de topo [Pa];

$\rho_L$  = massa específica do líquido [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ];

$\tau_0$  = coeficiente de atrito [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ ];

$r$  = raio da tubulação entre o condensador e o vaso de topo [m];

$V_{COND}$  = volume de líquido no condensador [ $\text{m}^3$ ];

$\omega_n$  = a frequência natural de oscilação [ $\text{s}^{-1}$ ];

$x$  = nível de líquido no condensador [m];

$\dot{x}$  = velocidade com que o nível de líquido no condensador se desloca [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

$\bar{x}$  = velocidade média com que o nível de líquido no condensador se desloca [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

$\ddot{x}$  = aceleração com a qual o nível de líquido no condensador se desloca [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ];

$\zeta$  = fator de amortecimento do sistema [adimensional];

$z$  = diferença de altura entre o condensador e o vaso de topo [m];

Modelo proposto:

$A_{COND}$  = área transversal do condensador [ $\text{m}^2$ ];

$A_{tt}$  = área de troca térmica total do condensador [ $\text{m}^2$ ];

$A_{ttv}$  = área de troca térmica em contato com o vapor [ $\text{m}^2$ ];

$A_{TUB}$  = área transversal da tubulação [ $\text{m}^2$ ];

$C_v$  = coeficiente de descarga da válvula [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1/2}$ ];

$D_{TUB}$  = diâmetro da tubulação entre o condensador e o vaso de topo [m];

$F_A$  = força de atrito do líquido com paredes da tubulação e do condensador [N];

$g$  = aceleração da gravidade [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ];

$H_{cond}$  = altura total do condensador [m];

$\lambda$  = calor latente de condensação do vapor [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ];

$L_{TUB}$  = comprimento da tubulação entre o condensador e o vaso de topo [m];

$L_v$  = função para o obturador da válvula [adimensional];

$\bar{M}$  = massa molar do componente [ $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ ];



$\dot{m}_0$  = vazão mássica que sai do último prato da coluna [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

$\dot{m}_1$  = vazão mássica que vai para o condensador [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

$\dot{m}_2$  = vazão mássica que passa pela a válvula de controle [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

$\dot{m}_{1\text{cond}}$  = vazão mássica de vapor que condensa no condensador [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

$M_{TOT}$  = massa total do líquido em movimento [kg];

$\mu_L$  = viscosidade do líquido [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

$P_1$  = pressão no topo da coluna de destilação [Pa];

$P_2$  = pressão no vaso de topo [Pa];

$\rho_L$  = massa específica do líquido [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ];

$\rho_v$  = massa específica do vapor [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ];

$R$  = constante dos gases ideais [ $\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ];

$r_{TUB}$  = raio da tubulação entre o condensador e o vaso de topo [m];

$\tau_0$  = coeficiente de atrito [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ ];

$T_{SAT}$  = temperatura de saturação do vapor [K];

$\Delta T_{ML}$  = média logarítmica da diferença de temperatura entre o lado quente (vapor) e o lado frio (fluido de refrigeração) [K];

$U_v$  = coeficiente global de troca térmica para a fase vapor [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ];

$v$  = velocidade com que o nível de líquido no condensador se desloca [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

$\bar{v}$  = velocidade média com que o nível de líquido no condensador se desloca [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

$\Delta T_{ML}$  = média logarítmica da diferença de temperatura entre o lado quente (vapor) e o lado frio (fluido de refrigeração) [K];

$U_v$  = coeficiente global de troca térmica para a fase vapor [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ];

$V_{1TOT}$  = volume total no condensador [ $\text{m}^3$ ];

$V_{1vap}$  = volume ocupado pelo vapor no condensador [ $\text{m}^3$ ];

$V_{COND}$  = volume de líquido no condensador [ $\text{m}^3$ ];

$x$  = nível de líquido no condensador [m];

$x_a$  = abertura da válvula [adimensional];

$z$  = diferença de altura entre o condensador e o vaso de topo [m];

**Lista de Abreviaturas e Siglas**

atm – unidade de pressão em atmosfera;

dP – queda de pressão;

J – unidade de energia em Joules;

K – unidade de temperatura em Kelvin;

kg – unidade de massa em quilogramas;

m<sup>3</sup> – unidade de volume em metros cúbicos;

m<sup>2</sup> – unidade de área em metros quadrados;

m – unidade de comprimento em metros;

N – unidade de força em Newton;

Pa – unidade de pressão em Pascal;

s – unidade de tempo em segundos;

## 1 Introdução

Entre os processos existentes nas indústrias químicas e petroquímicas, um dos mais necessários é a separação de líquidos miscíveis, feito na sua grande maioria através do uso de colunas de destilação. Trata-se de equipamentos com grande custo operacional associado, sendo importante a melhoria contínua do seu processo de operação. Mais detalhes sobre o funcionamento de colunas de destilação e de como está associada a importância de manter uma pressão estável, será abordado no Capítulo 2.1.

Enquanto sistemas de controle de pressão em colunas de destilação são importantes, poucas fontes os examinaram minuciosamente. Alguns dos métodos existentes são citados no Capítulo 2.2. Neste trabalho abordaremos um dos métodos de controle de pressão mais utilizados em colunas de destilação com condensação total, o sistema *hot-bypass*, que consiste num desvio do vapor de topo da coluna diretamente ao vaso de condensado, passando por uma válvula de controle. Mais detalhes sobre seu funcionamento serão vistos no Capítulo 2.3.

A partir da revisão de propostas de modelagem existentes, pretende-se chegar neste trabalho, a um modelo que as complemente, de modo a reproduzir qualitativamente o comportamento observado na operação de colunas que utilizam este sistema de controle. Assim, o modelo será baseado no balanço de forças que agem sobre o líquido do sistema considerando-o como um corpo livre, fazendo uso também de variáveis que serão descritas por balanços de massa e energia, e outras equações fenomenológicas.

O modelo descreverá o sistema em malha aberta, a fim de simular a resposta das variáveis de interesse (área de troca térmica de condensação, em função do nível no condensador, e pressão no topo da coluna) em função de variações na abertura da válvula e distúrbios na carga ou outras variáveis que afetem a vazão mássica de vapor que deixa a coluna. Assim, serão fornecidas bases para projeto e ajustes de controladores do sistema *hot-bypass* de colunas de destilação.

O desenvolvimento do modelo está descrito no Capítulo 3, enquanto a avaliação através de simulação dinâmica está relatada no Capítulo 4.

Resultados e comparação com o comportamento de uma planta real estão apresentados no Capítulo 5, encerrando este trabalho com as conclusões e propostas para trabalhos futuros no Capítulo 6.

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, será estudado o funcionamento e as características de operação do sistema *hot-bypass* para o controle de pressão de colunas de destilação, e os modelos existentes para descrever esse sistema.

### 2.1 Funcionamento de uma coluna de destilação e importância do controle de pressão

O princípio básico de funcionamento das colunas de destilação é a separação pela volatilidade relativa dos componentes da mistura. Ao ceder-se calor ao líquido, os componentes volatilizam, preferencialmente os mais leves. Esses vapores sobem ao longo da coluna, sendo então condensados no topo (parcial ou totalmente). Ao longo da torre há estágios nos quais ocorre o equilíbrio líquido-vapor, havendo uma composição diferente para a temperatura e pressão em cada um destes. Variações de pressão alteram as vazões de vapor e também os perfis de temperatura da coluna, pois alteram a volatilidade relativa dos componentes, afetando o desempenho do fracionamento. Além disso, uma vez que a temperatura tem dinâmica mais lenta em relação à pressão (PESSOA, 2013), numa queda de pressão abrupta, por exemplo, os componentes pesados serão vaporizados, tirando de especificação as correntes de topo. Analogamente, um aumento brusco de pressão faz com que os componentes leves condensem e sejam perdidos pelas correntes de fundo. Portanto, compensações na pressão são essenciais para manter composições desejadas (LINSLEY, 1997, apud SLOLEY, 2000) – colunas à vácuo são especialmente suscetíveis a esse problema (SLOLEY, 2000).

Existem equipamentos secundários associados à coluna de destilação, que são o condensador do vapor que deixa a torre pelo topo e o vaso em que é acumulado condensado, chamado de “vaso de topo”. Nas colunas de destilação fracionada, emprega-se o refluxo de parte do condensado de volta para a coluna, o que tem grande influência na operação da coluna e na composição dos produtos. Quanto maior o refluxo, maior é a quantidade de fluido sub-resfriado, reduzindo a temperatura do vapor e consequentemente a pressão. Por sua vez, é necessário controlar-se o nível do vaso de topo, manipulando-se, por exemplo, a vazão de destilado, com isto alterando a razão entre as taxas de refluxo e destilado (razão de refluxo). Assim, através das oscilações na pressão do topo, há variações no nível do vaso acumulador, levando a perturbações na operação da coluna. Portanto, a estabilidade da pressão no topo garante as composições desejadas não apenas por influenciar as constantes de equilíbrio, mas principalmente por influenciar a razão de refluxo.

Outro aspecto relacionado à importância da pressão de operação da coluna é o consumo energético da unidade. Quanto menor a pressão, menor temperatura de operação e menor o gasto energético para aquecimento do sistema. Além disso, a volatilidade relativa dos componentes tende a aumentar para pressões menores, facilitando a separação. Porém, uma temperatura muito baixa na condensação do vapor de topo impõe limitações na temperatura operacional do fluido de refrigeração no condensador. Assim, a capacidade das utilidades de resfriamento é o que normalmente define a pressão de operação da coluna (PESSOA, 2013).

Por fim, os sistemas de controle das demais variáveis de operação de colunas de destilação são geralmente baseados na premissa de que a torre opera a pressão constante. Flutuações de pressão tornam o controle mais difícil, reduzindo o desempenho

da unidade. O controle efetivo de pressão reduz a necessidade de compensações no controle de temperatura, e evita tanto a inundação da coluna quanto o arraste de líquido pelo excesso de vapor (SLOLEY, 2000), assim como a vaporização de uma alimentação que seria normalmente líquida, o que pode ocasionar inundação da coluna (FLEMING, 1995, apud SLOLEY, 2000).

## 2.2 Métodos de controle de pressão de uma coluna de destilação

O controle de pressão envolve ajustes nos balanços de massa ou de energia da coluna, manipulando as taxas de massa ou de calor que entram ou saem da mesma. Métodos que envolvem vazão mássica tipicamente controlam o inventário de vapor da coluna – tanto diretamente, atuando na vazão de vapor para fora do sistema, quanto indiretamente, manipulando equipamentos a jusante que evacuam o vapor da coluna. Métodos que envolvem o balanço de energia controlam o fluxo de calor no condensador variando a temperatura (em ambos lados do condensador) ou a área de troca térmica.

Em geral, é melhor se usar um método que manipule a variável que esteja fisicamente mais próxima possível da variável a ser controlada (SLOLEY, 2010). Portanto, para o controle da pressão do topo da coluna ou da pressão do vaso de condensado do topo, as diferentes configurações de controle irão propor diferentes formas de controlar a pressão através da variação da carga do condensador e das vazões do produto de topo. Existem também sistemas que controlam a pressão de topo através da carga do refeedor, porém estes são mais incomuns.

Há uma variedade de métodos de controle de pressão, sendo a escolha dependente das condições de processo e de utilidades de resfriamento, da configuração dos equipamentos e dos objetivos de operação. Considerações adicionais de processo que podem afetar a seleção de método de controle incluem a largura da faixa de ebulição da mistura, assim como a quantidade de incondensáveis presentes. A seguir, serão abordadas algumas das configurações mais comuns para o controle de pressão de colunas de destilação, especialmente em refinarias e plantas petroquímicas.

### 2.2.1 Principais métodos e suas classificações

Os métodos de controle de pressão podem ser classificados de acordo com diferentes critérios. Boyd (1947) separou tais métodos em classes com base na pressão de destilação, na presença de gás inerte e no estado do produto (gás ou vapor). Chin (1979) classificou os métodos pelo tipo de produto e pela natureza geral do método (controle de vazão de massa ou energia) (SLOLEY, 2000).

Como base no trabalho de Chin (1979), podemos separar os métodos de controle conforme a operação da coluna em:

1. Colunas com vazão de vapor sempre presente;
2. Colunas com vazão de vapor maior ou igual a zero em estado estacionário;

3. Colunas com vazão de vapor igual a zero em estado estacionário (condensação total).

Dentre esses, o terceiro grupo é o que inclui este estudo.

A classificação usada por Sloley (2000) é:

- A. Controle de vazão mássica (controle de vazão de vapor, tanto para o condensador quanto para fora do sistema);
- B. Controle da carga térmica: área de troca térmica variável, do lado do fluido de processo;
- C. Controle da carga térmica: fluxo de calor variável, do lado do fluido de processo;
- D. Controle da carga térmica: área de troca térmica variável, do lado do fluido de utilidades; e
- E. Controle da carga térmica: fluxo de calor variável, do lado do fluido de utilidades.

Esta classificação, portanto, é baseada no princípio de atuação (área de troca térmica ou fluxo de calor) e na variável manipulada (fluido de processo ou de utilidades).

Dentro do grupo 3, estão listados os 10 principais métodos. Isto não abrange todas as opções – na verdade, há muitos outros métodos de controle de pressão disponíveis (SLOLEY, 2000) – mas cobre as mais comuns:

1. Controle da vazão ao condensador – grupo B
2. Controle de vazão de *by-pass* ao vaso de condensado – “*hot vapor by-pass*” – grupo B
3. Controle direto de vazão de destilado líquido – grupo B
4. Controle duplo de pressão de *by-pass* e de condensado – grupo B
5. Controle de nível de vaporização do refrigerante – grupo D
6. Controle de pressão de vaporização do refrigerante – grupo D
7. Controle de temperatura de entrada de refrigerante no condensador – “água temperada” – grupo E
8. Controle de vazão de refrigerante – grupo E
9. Controle de vazão refrigerante de ar de refrigeração – grupo E
10. Controle de temperatura ou pressão de condensação – grupo C

### 2.3 Funcionamento do sistema *hot-bypass*

Sendo um dos métodos mais utilizados no controle de pressão de uma coluna com condensação total de vapor, o sistema *hot-bypass* surgiu em torno da década de 1950. Campos e Teixeira (2010) mencionam que o sistema tem sido projetado há mais de quarenta anos, e que Whistler (1954) o descreveu como uma prática de projeto recente.

O método emprega o arranjo dos equipamentos secundários do topo da coluna de forma que haja um sistema de vasos comunicantes que influenciam na área de troca térmica de condensação. Disposto o condensador ao nível do chão, abaixo do vaso de topo, esse opera “inundado” – com parte dos tubos submersos no condensado acumulado no casco, fazendo o líquido ficar subresfriado e escoar para o vaso de topo devido à diferença de pressão entre os dois equipamentos. Para controlar essa diferença de pressão, é usada uma válvula de controle num desvio (“*by-pass*”) do vapor de topo (que é quente, “*hot*”) diretamente para o vaso, conforme ilustrado na Figura 2-4. Manipulando a queda de pressão na válvula, desvia-se mais ou menos líquido para o vaso, alterando o nível de líquido no condensador, variando a área de troca térmica disponível para condensação do vapor, que acaba por variar a pressão no topo da coluna.

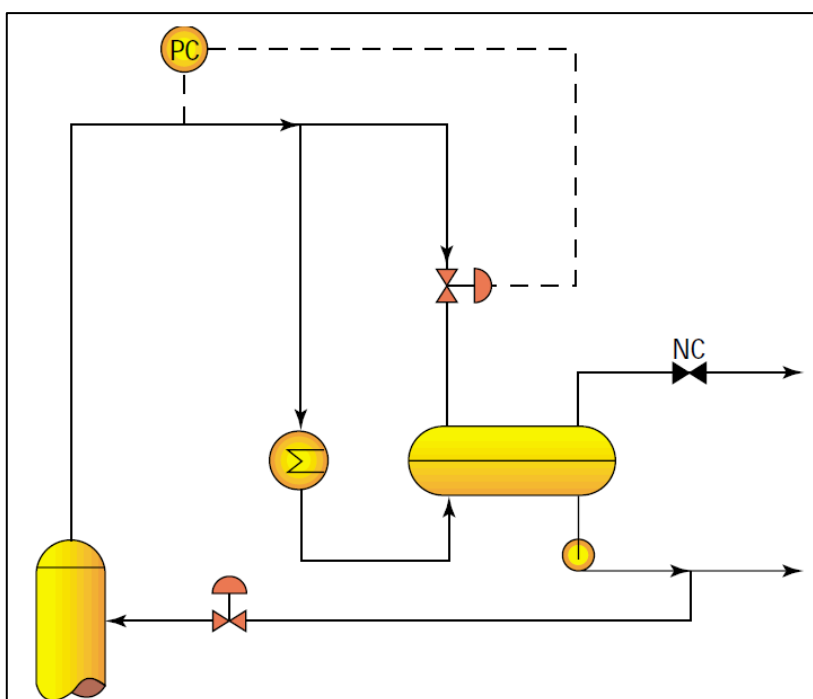


Figura 2-1 Controle de vazão de *by-pass* ao vaso de condensado – “*hot vapor by-pass*” (Fonte: Soley, 2000)

A configuração apresentada requer outras malhas de controle para o nível de condensado, tubulação para purga de não condensáveis, bota no vaso de condensado, e outros equipamentos. Para manter o diagrama limpo e conciso, ele inclui apenas a informação necessária para a discussão do problema de controle de pressão.

A disposição descrita dos equipamentos, que pode ser vista na Figura 2-2, oferece ainda vantagens relativas à montagem, manutenção, inspeção e limpeza do condensador, pois o acesso deste está facilitado por estar no nível do chão. Também, quanto ao vaso de

topo, muitas vezes é necessário elevá-lo por questão de segurança, caso contenha líquidos inflamáveis e/ou opere a valores de temperatura e pressão elevados, para evitar explosões em caso de vazamento. A elevação do vaso também permite que o NPSH requerido da bomba que envia o destilado seja satisfeito. A disposição necessária para o *hot-bypass* já atende essas condições (PESSOA, 2013).



Figura 2-2 Disposição dos equipamentos num sistema de *hot-bypass* (Fonte: adaptado de Fydryzewski, 2011)

Assim, quando a pressão da coluna aumenta, a válvula de controle do *hot-bypass* deve restringir a passagem de vapor, diminuindo a pressão no vaso de topo, diminuindo o nível de líquido no condensador, por meio da ação de vasos comunicantes. Com mais tubos expostos, há mais condensação do vapor que provém da coluna, diminuindo a pressão nesta como consequência. Na direção contrária, quando a pressão da coluna está baixa, a válvula deve abrir, aumentando a pressão no vaso de topo, o que ocasiona o aumento do nível de líquido no condensador. Menos tubos expostos realizam a condensação de menos vapor do topo da coluna, aumentando a pressão nesta. Desta forma, percebe-se que este método de controle de pressão da coluna apresenta ação inversa (PESSOA, 2013).

Um detalhe interessante é que o líquido e o vapor contidos no condensador não estão em equilíbrio, havendo uma fina camada de líquido quente (à temperatura de saturação, em equilíbrio com o vapor) entre as fases, funcionando como um isolamento. Isto essencialmente permite que seja mantida a pressão no vaso de topo com o uso do vapor proveniente da coluna como *blanketing*, sem ser necessário suprimento de vapor externo para isso (SLOLEY, 2010).



Outra característica de construção típica do sistema *hot-bypass* abrange duas opções que diferem na configuração e projeto do sistema. São elas a entrada do líquido proveniente do condensador pelo fundo do vaso de topo, ou a entrada pelo topo do vaso, representadas nas Figuras 2-3 e 2-4, sendo que neste trabalho será abordado o segundo caso. É preciso um cuidado especial com o encaminhamento da tubulação, pois o líquido deve entrar no vaso de topo sem se misturar ao espaço de vapor contido neste (SLOLEY, 1998). Isto requer a entrada de líquido pelo fundo do vaso ou uma tubulação interna ao vaso que faça com que o líquido que entra por cima vá direto para o fundo. A entrada pelo fundo pode ser preferida por criar menos turbulência no líquido, porém esta configuração faz com que o nível no vaso de topo afete o nível no condensador, causando uma interação indesejada entre as malhas de controle de pressão da coluna e de nível do vaso. Assim sendo, essa configuração vem sendo menos utilizada, mas ainda é encontrada em plantas mais antigas, dando-se preferência atualmente à entrada do líquido pelo topo do vaso (FYDRYZEWSKI, 2011).

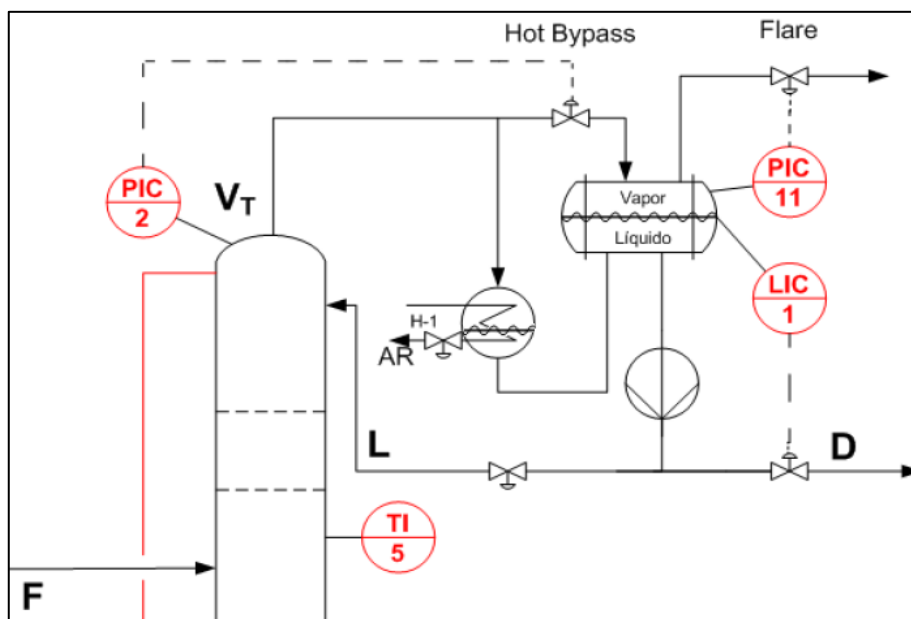


Figura 2-3 *Hot-bypass* com entrada de condensado pela parte inferior do vaso de topo (Fonte: adaptado de Fydryzewski, 2011)

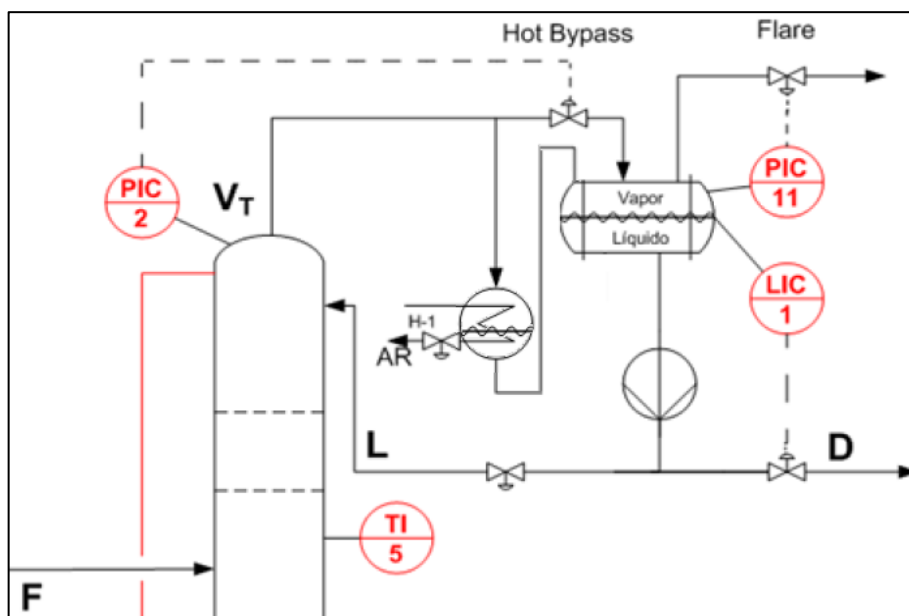


Figura 2-4 *Hot-bypass* com entrada de condensado pela parte superior do vaso de topo (Fonte: adaptado de Fydryzewski, 2011)

O projeto deste método, como as seleções de vazão pelo *by-pass* e área do trocador requerida, é na sua maioria empírico (CAMPOS E TEIXEIRA, 2010). A válvula de controle e a linha de *by-pass* devem ser projetadas de modo que as variações de vazão pelo *by-pass* ocasionem uma variação de dP que corresponda à variação de nível disponível no condensador.

Uma variação da aplicação deste método é o controle da pressão do vaso de topo, em vez da pressão de topo da coluna. Também funciona para unidades com produção contínua de vapor. Neste caso, a composição do produto já é a composição do topo da coluna, e o condensador não conta como um estágio de separação.

É visto como vantagem da aplicação deste método o condensador ser instalado em nível abaixo do vaso de topo, como já descrito. E como desvantagens, o fato do controle ser de atuação inversa, dificultando a compreensão do funcionamento do sistema pelos engenheiros e operadores, ser um projeto empírico, o que pode levar a erros (CAMPOS E TEIXEIRA, 2010) e o condensador exigir uma área de troca térmica extra, para o subresfriamento. Portanto, o método é comumente usado com trocadores grandes e pesados, que requerem limpeza e manutenção recorrentes (SLOLEY, 2000).

Algumas unidades têm trabalhado muito bem com esse método, mas outras têm falhado. Algumas características que podem ocasionar falhas na operação do *hot-bypass* são (SLOLEY, 2000):

- Produtos de alta pureza – Para faixas estreitas de temperaturas de vaporização, nos quais a camada de líquido quente no condensador não garante o isolamento do líquido subresfriado, o controle se torna difícil;

- Condensadores com “auto-refluxo” – Uma vez que componentes pesados no vapor do topo condensam primeiro, estes componentes podem se concentrar no fundo do condensador e daí atingirem a saída do equipamento. Isto pode mudar a composição do vapor ao ponto de, na saída do condensador, o vapor já não ser completamente condensável;

- Corrosão da tubulação interna – Se é usada a entrada de líquido pelo topo do vaso, a tubulação interna do vaso não pode estar corroída. No caso de ser formado algum orifício de corrosão na tubulação interna acima do nível de líquido, pode haver mistura da camada do líquido quente e, portanto, operação instável.

## 2.4 Modelos propostos para descrever o sistema *hot-bypass*

A seguir serão descritos brevemente os modelos dinâmicos propostos anteriormente na literatura para o sistema de *hot-bypass*, assim como possíveis pontos de melhoria na modelagem.

Muitas das equações incorporadas ao modelo proposto neste trabalho provêm dos modelos a seguir e, portanto, serão apresentadas mais detalhadamente no Capítulo 3. O objetivo nesta seção é fornecer uma visão geral dos equacionamentos utilizados pelos autores, bem como apresentar os resultados obtidos.

### 2.4.1 Modelo dinâmico adotado pela Petrobrás

Conforme Campos e Teixeira (2010), o modelo atualmente utilizado pela Petrobrás descreve a variação da vazão de líquido na tubulação e no condensador causada pela ação de várias forças, sendo o líquido considerado como um corpo livre. As forças consideradas são:

1. As exercidas pelas pressões nos dois extremos da coluna de líquido, no condensador e no vaso;
2. A gravidade (peso) distribuída uniformemente sobre a coluna de líquido;
3. O atrito do líquido com as paredes da tubulação e do condensador;
4. A massa efetiva do líquido em movimento.

A fim de facilitar a análise, Campos e Teixeira (2010) fazem algumas simplificações, como a área transversal do condensador ser aproximadamente igual à área transversal da tubulação, onde as respectivas pressões atuam. Essa consideração tem fundamento no fato de a área da superfície líquida onde é exercida a pressão no condensador não ser a área total da seção do casco, pois os tubos internos ocupam boa parte dessa área, porém caberia um melhor estudo para avaliar essa área efetiva. Outra consideração feita é de que a massa de líquido contida no condensador é desprezível frente à massa de líquido contida na tubulação.

É feita uma linearização da equação da força de atrito (que pode ser vista no Capítulo 3.2) em torno do ponto de equilíbrio, obtendo-se:

$$\Delta\tau_0 = \frac{0,091 \cdot \rho_L^{0,75} \cdot \mu_L^{0,25} \cdot \bar{x}^{0,75}}{D_{TUB}^{0,25}} \cdot \dot{x} = f_\tau \cdot \dot{x} \quad (2.1)$$

Onde:

$\tau_0$  = coeficiente de atrito [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ];

$\rho_L$  = massa específica do líquido [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];

$\mu_L$  = viscosidade do líquido [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$\bar{x}$  = velocidade média da coluna de líquido [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$\dot{x}$  = velocidade da coluna de líquido [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$D_{TUB}$  = diâmetro da tubulação entre o condensador e o vaso de topo [m];

$f_\tau$  = fator de atrito [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

A partir do balanço de forças (apresentado detalhadamente no Capítulo 3.1) e das considerações feitas, chega-se à equação:

$$\rho_L \cdot A_{TUB} \cdot L_{TUB} \cdot \ddot{x} + 2\pi \cdot r \cdot L_{TUB} \cdot f_\tau \cdot \dot{x} + \rho_L \cdot g \cdot A_{TUB} \cdot x = A_{TUB} \cdot \Delta P \quad (2.2)$$

Onde:

$A_{TUB}$  = área transversal da tubulação [ $m^2$ ];

$L_{TUB}$  = comprimento da tubulação entre o condensador e o vaso de topo [m];

$\ddot{x}$  = aceleração com a qual a coluna de líquido se desloca [ $m.s^{-2}$ ];

$r$  = raio da tubulação entre o condensador e o vaso de topo [m];

$g$  = aceleração da gravidade [ $m.s^{-2}$ ];

$x$  = nível de líquido no condensador [m];

$\Delta P$  = diferença entre pressão no topo da coluna de destilação e no vaso de topo [Pa];

Aplicando-se a transformada de Laplace:

$$\frac{X(s)}{\Delta P(s)} = \frac{\frac{1}{\rho} \cdot g}{\frac{L_{TUB} \cdot s^2}{g} + \left( \frac{2\pi \cdot r \cdot L_{TUB} \cdot f \cdot \tau}{\rho \cdot g \cdot A_{TUB}} \right) \cdot s + 1} \quad (2.3)$$

Assim, foi caracterizada a dinâmica do sistema de *hot-bypass* por uma função de transferência de segunda ordem relacionando a variação do nível no condensador para perturbações no diferencial de pressão entre a coluna e o vaso de topo.

$$\frac{X(s)}{\Delta P(s)} = \frac{K}{\left( \frac{1}{w_n^2} \right) \cdot s^2 + \left( \frac{2\zeta}{w_n} \right) \cdot s + 1} \quad (2.4)$$

Sendo:

$w_n$  = a frequência natural de oscilação [ $s^{-1}$ ];

$\zeta$  = fator de amortecimento do sistema [adimensional];

Igualando as equações (2.3) e (2.4), obtém-se:

$$w_n = \sqrt{\frac{g}{L_{TUB}}} \quad \text{e} \quad \zeta = \sqrt{\frac{g}{L_{TUB}}} \cdot \left( \frac{2\pi \cdot r \cdot L_{TUB} \cdot f \cdot \tau}{\rho \cdot g \cdot A_{TUB}} \right) \quad (2.5) \text{ e } (2.6)$$

Logo, o coeficiente de amortecimento é dado por:

$$\zeta = \sqrt{\frac{g}{L_{TUB}}} \cdot \left( \frac{2\pi \cdot r \cdot L_{TUB}}{\rho \cdot g \cdot A_{TUB}} \cdot \frac{0,091 \cdot \rho_L^{0,75} \cdot \mu_L^{0,25} \cdot \bar{x}^{0,75}}{D_{TUB}^{0,25}} \right) \quad (2.7)$$

Analisando-se a equação (2.7), percebe-se que o sistema de *hot-bypass* pode ser facilmente sub-amortecido ( $\zeta < 1$ ). Para evitar oscilações, pode-se mudar, na etapa de projeto, dois parâmetros da equação anterior que afetam diretamente a perda de carga: o comprimento da tubulação entre o condensador e o vaso de topo ( $L_{TUB}$ ) e a velocidade média do líquido que escoar entre os dois equipamentos ( $\bar{x}$ ).

Em outras palavras: se a perda de carga na tubulação e no casco do condensador aumenta, o coeficiente de amortecimento aumenta, levando o sistema a ter uma dinâmica menos oscilatória. Assim, essa perda de carga tem um papel importante no comportamento e no dimensionamento do sistema *hot-bypass*.

A condição de operação mais crítica para o controle de *hot-bypass* é a de baixa vazão (baixa carga da unidade), pois nessa condição a perda de carga na tubulação e no condensador diminui devido à menor vazão. Isso faz com que o sistema de *hot-bypass* seja mais sub-amortecido, e, portanto, oscilatório.

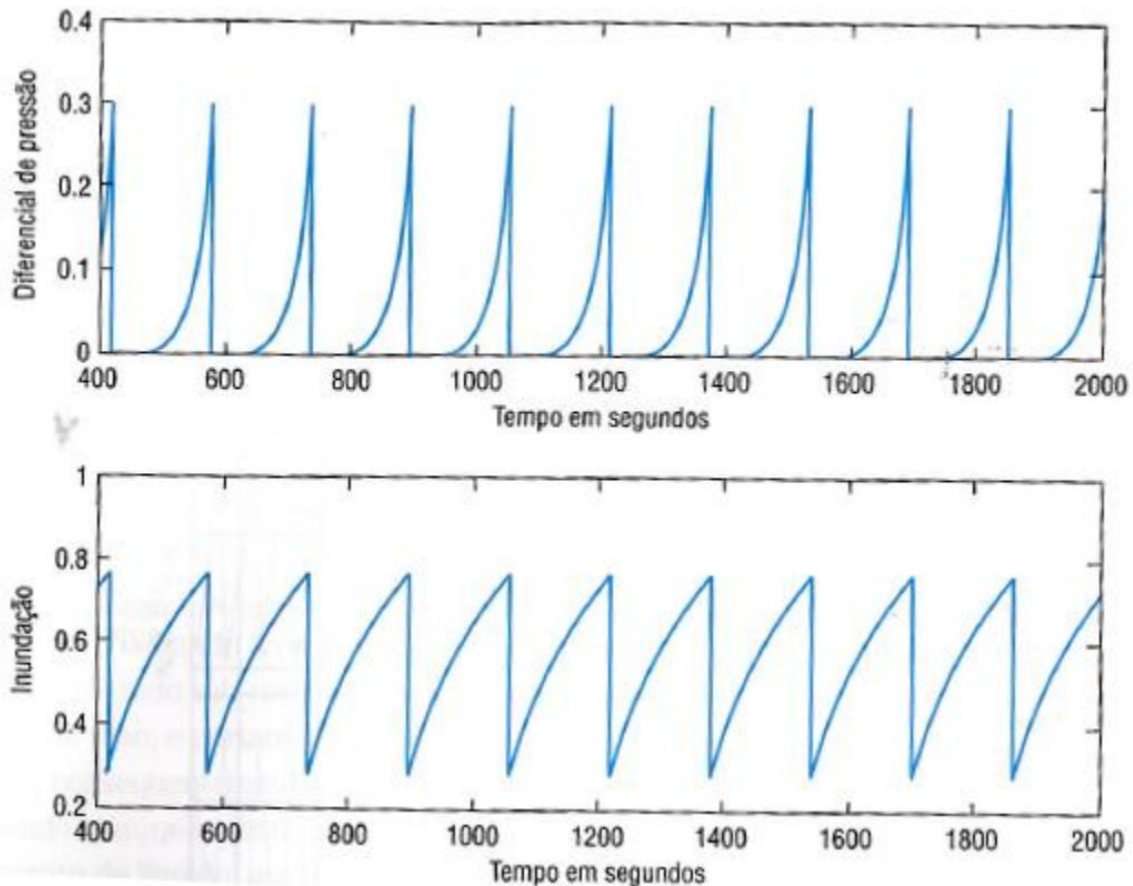


Figura 2-5 Simulação da inundação do condensador e do diferencial de pressão na válvula de *hot-bypass* (Fonte: Campos e Teixeira, 2010)

A simulação dinâmica do modelo é apresentada na Figura 2-5, onde se mostra que, enquanto o diferencial de pressão não atinge  $0,28 \text{ kgf/cm}^2$ , não ocorre escoamento, e o nível do condensador sobe, inundando o mesmo. Quando este diferencial de pressão é atingido, ocorre um escoamento rápido de líquido para o vaso, que gera uma vazão pelo *hot-bypass* (devido à condensação) e um diferencial de pressão maior, que por sua vez provoca um escoamento ainda maior, fazendo que todo o líquido no condensador vá para o vaso, reduzindo a inundação do mesmo e expondo mais área de troca térmica. Com isso, tem-se um comportamento cíclico com frequência equivalente ao tempo de residência no condensador.

A simulação feita é condizente com o comportamento observado numa planta debutanizadora existente, observado na Figura 2-6. Porém, o comportamento visto na Figura 2-5 não pode ser obtido com um modelo linear “simples”, tendo-se provavelmente forçado um dP cíclico para provocar esse comportamento no modelo.

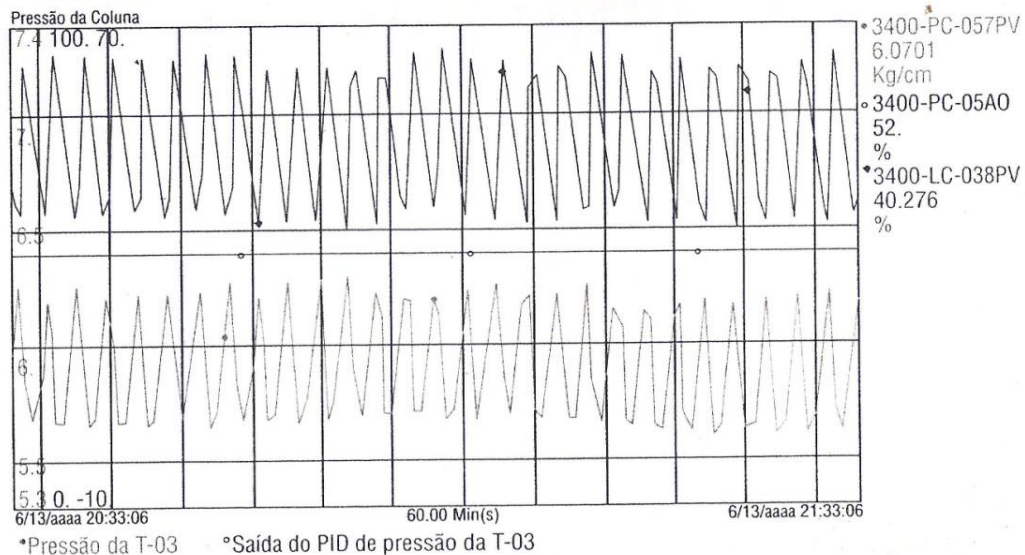


Figura 2-6 Variações de pressão de uma coluna debutanizadora real e de nível do seu vaso de topo (Fonte: Campos e Teixeira, 2010)

O modelo apresentado traz contribuições importantes para o entendimento do *hot-bypass*, principalmente a importância da perda de carga na operação do sistema e a necessidade de avaliação da condição mínima de vazão de operação. Além disso, ele consegue representar a possibilidade de ocorrência de comportamento cíclico do sistema quando a coluna opera a baixas vazões.

Porém, este modelo não considera o efeito da variação da área de troca térmica sobre o comportamento do sistema, o qual interage com a dinâmica do líquido, assim como outros detalhes tais como o escoamento gasoso e o comportamento da coluna de destilação, especialmente com relação à pressão. Além disso, este modelo não pode ser considerado completo, pois a diferença de pressão entre a coluna e o vaso de topo é parâmetro de entrada, e não saída, do mesmo.

#### 2.4.2 Modelo dinâmico proposto por Fydrzewski (2011)

Fydrzewski (2011) propôs um modelo para o sistema *hot-bypass* considerando o escoamento gasoso, assim como o balanço de massa e energia nos equipamentos envolvidos: torre de destilação (último prato), condensador e vaso de topo. Para o equacionamento, as considerações gerais foram as seguintes: massa específica do líquido constante, geometria do condensador e do vaso de topo como cilindros verticais, gases com comportamento ideal, vapor deixando a coluna na temperatura de saturação e escoamento isotérmico.

O modelo proposto por Frydrzewski (2011) é capaz de descrever o comportamento da pressão na coluna, condensador e vaso de topo, a vazão de vapor que condensa no condensador, em função da área de troca térmica e carga térmica do mesmo, assim como no vaso de topo, em função da temperatura de sub-resfriamento do condensado. Os balanços de massa da fase líquida do condensador e do vaso de topo forneceram o nível de líquido nesses equipamentos, porém é necessário ressaltar que a geometria adotada para eles foi distante da real. Para descrever o escoamento líquido, foram utilizadas as equações de Bernoulli e Colebrook-White (FOX & McDONALD, 1998), enquanto que o

gasoso foi descrito por quatro equações algébricas, uma para cada trecho, retiradas de Branam (2002). Por fim, foi feito o equacionamento da válvula e inserido um controlador proporcional de nível no vaso de topo.

Tabela 2-1 Comparação entre valores reais e simulados e demais valores encontrados pelo modelo. (Fonte: Fydryzewski, 2011)

Variáveis	Dados da planta em operação	Resultado do modelo proposto
$P_0$ [kgf.cm <sup>-2</sup> ]	11,00	11,74
$P_1$ [kgf.cm <sup>-2</sup> ]	-	10,16
$P_2$ [kgf.cm <sup>-2</sup> ]	10,12	9,64
$P_A$ [kgf.cm <sup>-2</sup> ]	-	10,52
$P_B$ [kgf.cm <sup>-2</sup> ]	-	10,26
$P_C$ [kgf.cm <sup>-2</sup> ]	-	10,25
$\dot{m}_0$ [lb.h <sup>-1</sup> ]	-	175200,75
$\dot{m}$ [lb.h <sup>-1</sup> ]	-	11145,5
$\dot{m}_1$ [lb.h <sup>-1</sup> ]	-	164055,25
$\dot{m}_2$ [lb.h <sup>-1</sup> ]	-	164055,25
$\dot{m}_{1,cond}$ [lb.h <sup>-1</sup> ]	-	164055,25
$\dot{m}_{3v}$ [lb.h <sup>-1</sup> ]	-	11145,5
$\dot{m}_3$ [lb.h <sup>-1</sup> ]	-	11145,5
$f_l$ [adimensional]	-	0,01913
$h_1$ [ft]	-	49,03
$h_2$ [ft]	1,31	15,55

A notação empregada nesta Tabela está ilustrada na Figura 2-7.

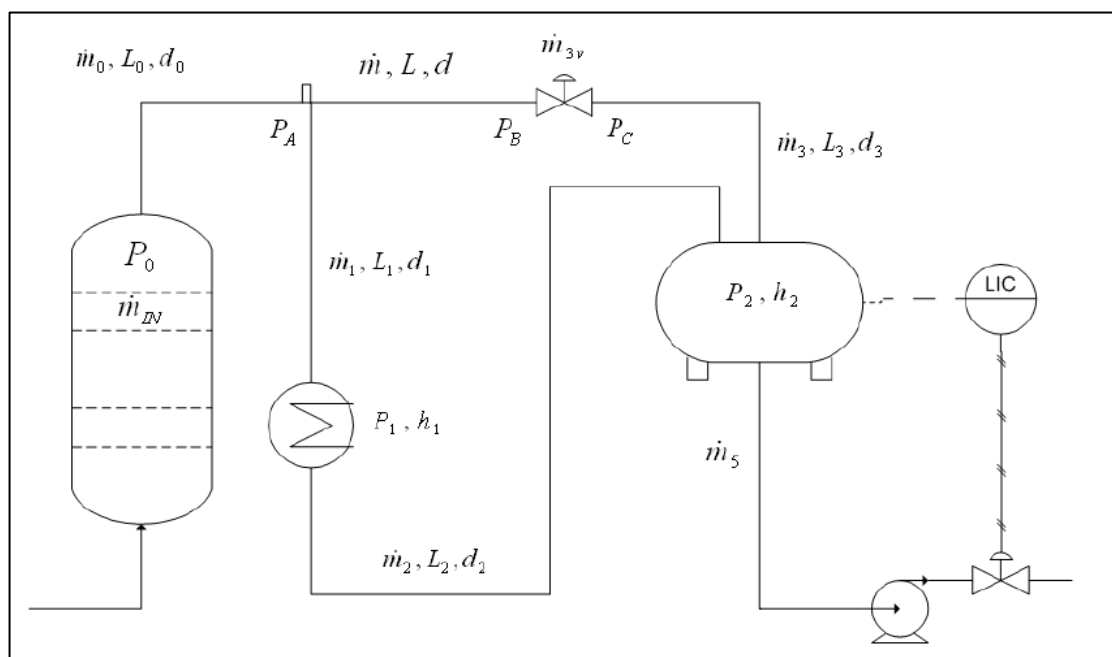


Figura 2-7 Variáveis e representação esquemática no modelo de Fydryzewski (2011)

condição estacionária do sistema. Os resultados obtidos para as variáveis foram comparados com dados reais provenientes de um sistema de *hot-bypass* presente em

uma coluna debutanizadora. Como a maioria das variáveis calculadas não apresentava medição correspondente na planta, a avaliação do desempenho do modelo ficou dificultada. O comparativo é apresentado na Tabela 2-1 e permite concluir que, embora tenha fornecido valores satisfatórios para pressão da coluna e do vaso de topo, o modelo não foi capaz de prever corretamente o nível do vaso de topo.

Assim, percebe-se que alguns pontos do modelo devem ser aperfeiçoados, tais como a geometria dos equipamentos e a troca térmica no condensador e no vaso de topo. Essa última é muito importante, uma vez que determina a massa de vapor que condensa.

Além disso, é de grande interesse não apenas o comportamento estacionário, mas a resposta dinâmica desse sistema, objetivando determinar como as pressões da coluna e do vaso de topo variam com o tempo e com variações em parâmetros como a vazão da carga da coluna ou a abertura da válvula do *hot-bypass*.

Alguns desses aspectos foram discutidos no trabalho de Pessoa (2013), e outros serão discutidos ao longo do presente trabalho.

#### 2.4.3 Modelo dinâmico proposto por Pessoa (2013)

Pessoa (2013) baseou-se no modelo elaborado por Fydrzewski (2011), propondo também uma representação matemática para o sistema *hot-bypass* baseada em balanços de massa e energia, utilizando as mesmas equações fenomenológicas para descrever os escoamentos líquidos e gasosos.

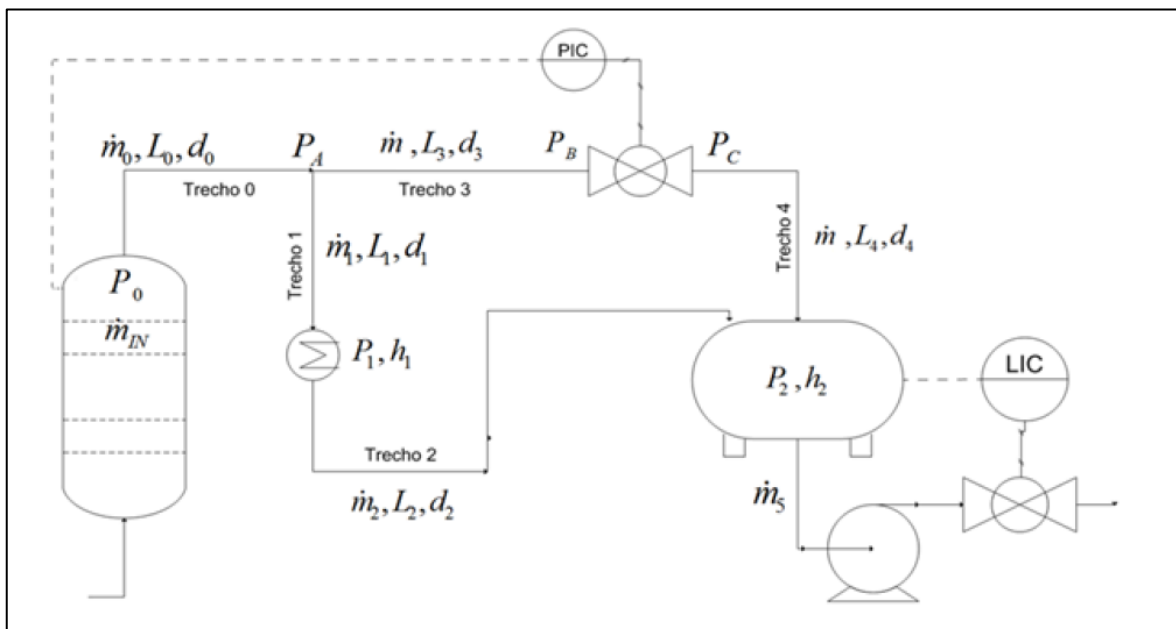


Figura 2-8 Variáveis e representação esquemática no modelo de Pessoa (2013)

As principais contribuições da autora foram as seguintes: a consideração dos gases envolvidos como sendo reais, através da inclusão do fator de compressibilidade na equação dos gases ideais; uma representação geométrica mais próxima da realidade do condensador e do vaso de topo, relacionando melhor a variação da área de troca térmica de condensação com a variação do nível no condensador; inclusão do termo derivativo no



controlador de nível do vaso de topo e a equação do controlador da pressão do topo da coluna.

Porém, foram necessárias simplificações no modelo para implementar a simulação dinâmica, a fim de se evitar dificuldades numéricas, principalmente no equacionamento da geometria do condensador.

Tabela 2-2 Comparação entre valores reais e simulados e demais valores encontrados pelo modelo de Pessoa, 2013

Variáveis	Dados da planta em operação	Resultado do modelo proposto
$A_{1liq}$ [m <sup>2</sup> ]	-	188,6
$A_{1v}$ [m <sup>2</sup> ]	-	282,4
$LMTD_{1liq}$ [K]	-	7,7
$LMTD_{1v}$ [K]	-	9,8
$P_0$ [Pa]	1078731	1049355
$P_1$ [Pa]	-	1049134
$P_2$ [Pa]	992433	1024973
$Q_{1liq}$ [J.s <sup>-1</sup> ]	-	145440,8
$Q_{1v}$ [J.s <sup>-1</sup> ]	-	2760000
$Q_2$ [J.s <sup>-1</sup> ]	-	145457,6
$T_c$ [K]	-	314,2
$T_{wliq}$ [K]	-	308,1
$T_{wv}$ [K]	-	309,9
$V_{1liq}$ [m <sup>3</sup> ]	-	186,2
$V_{2liq}$ [m <sup>3</sup> ]	-	4,7
$h_1$ [m]	-	4,2
$m$ [kg.s <sup>-1</sup> ]	-	16,4
$m_2$ [kg.s <sup>-1</sup> ]	-	9,0
$m_{cond}$ [kg.s <sup>-1</sup> ]	-	0,3
$m_{wliq}$ [kg.s <sup>-1</sup> ]	-	228,7
$m_1$ [kg.s <sup>-1</sup> ]	-	6,1

Apesar de complementar o modelo feito por Fydryzewski (2011) de forma mais detalhada, as contribuições de Pessoa (2013) tampouco são suficientes para prever de forma completamente satisfatória o comportamento qualitativo do sistema de *hot-bypass*, principalmente no seu caráter oscilatório.

Esse aspecto de análise qualitativa será o mais abordado neste trabalho.

### 3 Modelagem dinâmica proposta para o sistema de *hot-bypass*

Tendo em vista as diferentes abordagens vistas no Capítulo 2.4, será proposto a seguir um modelo que descreva o comportamento do sistema *hot-bypass*, sem nenhuma malha de controle, envolvendo tanto o balanço de forças empregado por Campos e Teixeira (2010), quanto alguns dos balanços mássicos e energéticos descritos por Fydrzewski (2011). As contribuições de Pessoa (2013) ficam como opção para uma descrição matemática mais detalhada e buscando análises quantitativas, como proposta de trabalhos futuros.

A seguir é apresentada uma figura esquemática que representa o volume de controle envolvido, contendo as principais variáveis utilizadas no modelo.

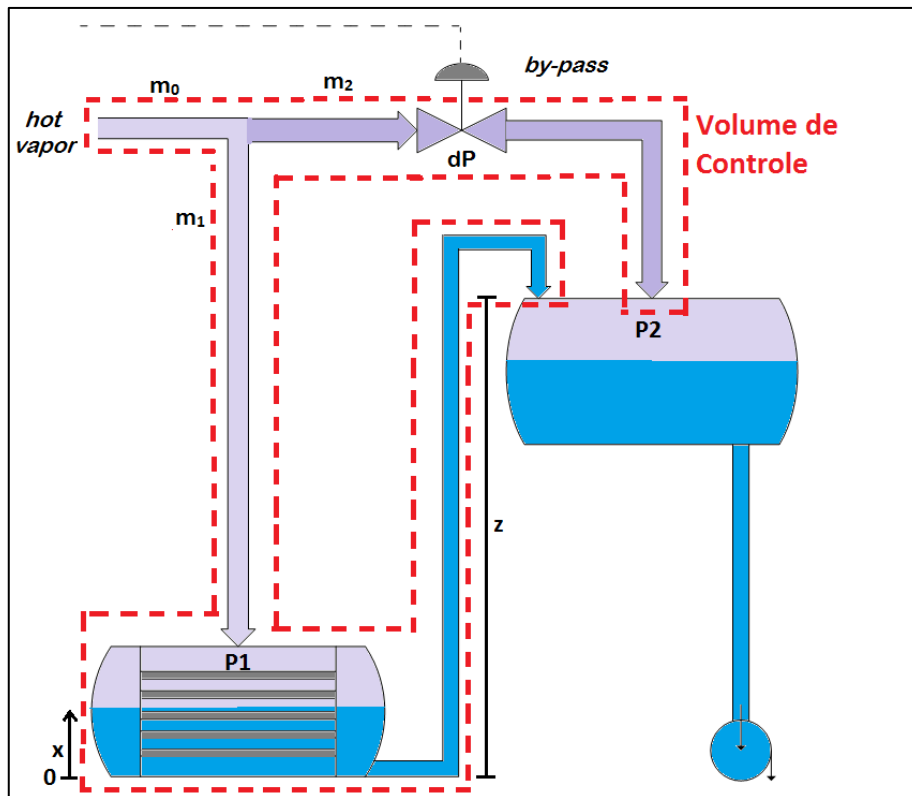


Figura 3-1 Esquema simplificado do sistema *hot-bypass*

#### 3.1 Balanço de forças no líquido do sistema

Como descrito no Capítulo 2.4.1., a influência das forças que agem sobre a massa de líquido do sistema é dada pelo balanço:

$$P_1 \cdot A_{COND.ef} - P_2 \cdot A_{TUB} - \rho_L \cdot A_{TUB} \cdot (z - x) \cdot g - F_A = M_{TOT} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.1)$$

Onde:

$P_1$  = pressão no topo da coluna de destilação [Pa];

$A_{COND.ef}$  = área transversal efetiva do condensador [m<sup>2</sup>];

$P_2$  = pressão no vaso de topo [Pa];

$A_{TUB}$  = área transversal da tubulação [ $m^2$ ];

$\rho_L$  = massa específica do líquido [ $kg.m^{-3}$ ];

$z$  = diferença de altura entre o fundo do condensador e a parte superior do vaso de topo [ $m$ ];

$x$  = nível de líquido no condensador [ $m$ ];

$g$  = aceleração da gravidade [ $m.s^{-2}$ ];

$F_A$  = força de atrito do líquido com as paredes da tubulação e do condensador [ $N$ ];

$M_{TOT}$  = massa total do líquido [ $kg$ ];

A área do condensador efetiva é usada pela mesma razão que Campos e Teixeira (2010) consideram a área do condensador equivalente à área transversal da tubulação, conforme descrito no Capítulo 2.2.1 , e está definida por:

$$A_{COND.ef} = C_f \cdot A_{COND} \quad (3.2)$$

Onde:

$C_f$  = coeficiente de correção da área efetiva do condensador [adimensional];

$A_{COND}$  = área transversal do condensador [ $m^2$ ];

Diferentemente de Campos e Teixeira (2010), foi considerada a massa de líquido contida no condensador, no cálculo da massa total do líquido em movimento. Assim, essa variável é uma função do nível no condensador, considerando que a tubulação até o vaso está sempre cheia, conforme segue:

$$M_{TOT} = \rho_L \cdot (V_{COND} + (A_{TUB} \cdot L_{TUB})) \quad (3.3)$$

$$V_{COND} = x \cdot A_{COND} \quad (3.4)$$

Onde:

$V_{COND}$  = volume de líquido condensado contido no condensador [ $m^3$ ];

$L_{TUB}$  = comprimento da tubulação entre o condensador e o vaso de topo [ $m$ ];

A seguir são definidas as outras variáveis apresentadas acima que estão relacionadas através dos balanços mássico e energético e de relações constitutivas tais como a força de atrito e a equação da válvula.

### 3.2 Força de atrito

A relação para a força de atrito utilizada neste trabalho é descrita em Campos e Teixeira (2010) em função da área superficial da tubulação e das paredes do condensador, porém essa última é desconsiderada frente à primeira, conforme segue:

$$F_A = 2\pi \cdot r_{TUB} \cdot L_{TUB} \cdot \tau_0 \quad (3.5)$$

$$\tau_0 = \frac{0,0535 \cdot \rho_L^{0,75} \cdot \mu_L^{0,25} \cdot \bar{v}^{1,75}}{D_{TUB}^{0,25}} \cdot v \quad (3.6)$$

Onde:

$r_{TUB}$  = raio da tubulação entre o condensador e o vaso de topo [m];

$\tau_0$  = coeficiente de atrito [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ];

$\mu_L$  = viscosidade do líquido [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$\bar{v}$  = velocidade média com que o nível de líquido no condensador se desloca [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$v$  = velocidade com que o nível de líquido no condensador se desloca [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$D_{TUB}$  = diâmetro da tubulação entre o condensador e o vaso de topo [m];

A velocidade de deslocamento da massa de líquido é dada por:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (3.7)$$

### 3.3 Balanços do vapor de topo

#### 3.3.1 Balanço de massa

Como o inventário de gás na válvula de controle é pequeno, a vazão mássica de entrada pode ser considerada igual à que sai da válvula, logo esta equação pode ser omitida. A vazão mássica que sai do topo da coluna é dividida entre a corrente que segue pelo *by-pass* e a corrente que segue para o condensador, conforme a equação:

$$\dot{m}_0 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (3.8)$$

Onde:

$\dot{m}_0$  = vazão mássica que sai do último prato da coluna [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$\dot{m}_1$  = vazão mássica que vai para o condensador [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$\dot{m}_2$  = vazão mássica que passa pela válvula de controle [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

O valor de  $\dot{m}_0$  é considerado uma variável especificada do modelo (entrada), cujo efeito sobre o comportamento do sistema será estudado. Do ponto de vista prático,  $\dot{m}_0$  pode ser associado à variáveis de operação da coluna (taxa de refervimento ou através do balanço de massa do topo da coluna).

Já a vazão de vapor  $\dot{m}_1$  estará envolvida no balanço mássico do vapor no condensador. A relação entre o vapor que entra no condensador e a o vapor que deixa esse volume de controle, condensando-se, é descrita pela seguinte equação, baseada no equacionamento feito por Fydryzewski (2011), porém considerando-se constante o volume ocupado pelo vapor, o qual envolve o topo da coluna, tubulação e condensador:

$$\frac{dP_1}{dt} = (\dot{m}_1 - \dot{m}_{1cond}) \cdot \frac{R \cdot T_{SAT}}{\bar{M} \cdot V_{1vap}} \quad (3.9)$$

Onde:

$P_1$  = pressão do vapor que sai do último prato da coluna [Pa];

$\dot{m}_{1cond}$  = vazão mássica de vapor que condensa no condensador [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$R$  = constante dos gases ideais [ $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

$T_{SAT}$  = temperatura de saturação do vapor nas condições do topo da coluna [K];

$\bar{M}$  = massa molar do componente [ $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ];

$V_{1vap}$  = volume ocupado pelo vapor do topo da coluna até o condensador [ $\text{m}^3$ ];

A temperatura de saturação também é considerada por simplicidade como constante e correspondente às condições do topo da coluna, sendo que na realidade, ela varia com a variação da pressão. O volume ocupado pelo vapor no condensador também é variável, conforme a equação:

$$V_{1vap} = V_{1TOT} - V_{COND} \quad (3.10)$$

Onde:

$V_{1TOT}$  = volume total no condensador [ $\text{m}^3$ ];

### 3.3.2 Balanço de energia

Por sua vez, a vazão de vapor condensante  $\dot{m}_{1cond}$  considerada na equação (3.9), é descrita pela equação da troca térmica no condensador:

$$\dot{m}_{1cond} \cdot \lambda = U_v \cdot A_{ttv} \cdot \Delta T_{ML} \quad (3.11)$$

Onde:

$\lambda$  = calor latente de condensação do vapor [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$U_v$  = coeficiente global de troca térmica para a fase vapor [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

$A_{ttv}$  = área de troca térmica em contato com o vapor [ $\text{m}^2$ ];

$\Delta T_{ML}$  = média logarítmica da diferença de temperatura entre o lado quente (vapor) e o lado frio (fluido de refrigeração) [K];

A área de troca efetiva  $A_{ttv}$  varia com o nível de inundação do condensador, sendo uma das principais variáveis para este sistema. Foi considerado para o equacionamento que a área de troca térmica total do condensador é proporcional ao nível deste, da seguinte forma:

$$A_{ttv} = \left( \frac{H_{cond-x}}{H_{cond}} \right) \cdot A_{tt} \quad (3.12)$$

Onde:

$A_{tt}$  = área de troca térmica total do condensador [m<sup>2</sup>];

$H_{cond}$  = altura total do condensador [m];

Deste modo, é considerada uma geometria simplificada para o condensador, em que a área de troca térmica apresenta uma distribuição homogênea ao longo da altura do equipamento.

### 3.4 Equação da válvula

A vazão de vapor para o *by-pass* na equação (3.1),  $\dot{m}_2$ , será descrita pela equação da válvula. Para esta, foi feita uma simplificação da equação utilizada por Fydrzewski (2011), conforme segue:

$$\dot{m}_2 = C_v \cdot L_v \cdot \sqrt{(P_1 - P_2) \cdot \rho_v} \quad (3.13)$$

Onde:

$C_v$  = coeficiente de descarga da válvula [kg.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1/2</sup>];

$L_v$  = função para o obturador da válvula [adimensional];

$\rho_v$  = massa específica do vapor [kg.m<sup>-3</sup>];

Consideramos uma válvula com abertura linear, onde:

$$L_v = 100 \cdot x_a \quad (3.14)$$

$x_a$  = abertura da válvula [adimensional],  $0 \leq x_a \leq 1$ ;

### 3.5 Graus de liberdade

Para que o modelo seja passível de resolução, é necessário que o número de graus de liberdade seja zero, ou seja, que o número de variáveis seja igual ao número de equações mais o número de variáveis especificadas. Esse inventário está apresentado na tabela a seguir:

Tabela 3-1 Contabilidade de variáveis e equações

		TOTAL
Variáveis	$v, M_{TOT}, V_{COND}, F_A, \tau_0, x, \dot{m}_1, P_1, V_{1vap}, \dot{m}_{1cond}, A_{ttw}, \dot{m}_2, L_v, P_2, \dot{m}_0, x_a$	16
Especificações	$P_2, x_a, \dot{m}_0$	3
Equações	(3.1), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.11), (3.12), (3.13) e (3.14)	13

Esclarecendo que a equação (3.2) não foi contabilizada por relacionar apenas parâmetros, não tendo nenhuma variável envolvida.

#### 4 Simulação do modelo proposto e avaliação dos resultados

A implementação do modelo desenvolvido no Capítulo 3 foi feita através do software EMSO, que resolve sistemas algébrico-diferenciais, sendo portanto adequado para o uso neste trabalho. O modelo foi desenvolvido com o uso das estruturas do modelo (“Model”) do ambiente de programação, de modo que possa ser usado também em outras simulações.

A fim de gerar resultados qualitativamente corretos, foram adotados valores para dimensões do condensador e da tubulação, propriedades do fluido e demais parâmetros do modelo, compatíveis com sistemas desse tipo. Por uma questão numérica, foi especificada a variável que descreve o volume ocupado pelo vapor no condensador, não utilizando a equação (3.10). Esses valores estão apresentados na tabela a seguir:

Variáveis	Valores do modelo proposto
$A_{cond}$ [m <sup>2</sup> ]	2,0
$A_{tt}$ [m <sup>2</sup> ]	20,0
$C_v$ [m <sup>2</sup> ]	0,01669
$D_{tub}$ [in]	2
$H_{cond}$ [m]	1,0
$\lambda$ [J.kg <sup>-1</sup> ]	2
$L_{tub}$ [m]	4,0
$\bar{M}$ [kg.mol <sup>-1</sup> ]	0,058
$\mu$ [kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]	0,00790
$P_2$ [kg.s <sup>-2</sup> .m <sup>-1</sup> ]	1078730
$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	600
$\rho_g$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	2,71
$\Delta T_{ML}$ [K]	10,0
$T_{sat}$ [K]	300
$U_v$ [J.s <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> ]	13,29
$V_{1vap}$ [m <sup>3</sup> ]	0,00122
$z$ [m]	4,0

Tabela 4-1 Valores utilizados no modelo proposto

Na simulação dinâmica do modelo a partir do valor base dos parâmetros adotados, cuja implementação completa pode ser vista no Anexo A, foram obtidos os resultados mostrados nas Figuras 4-1 e 4-2.



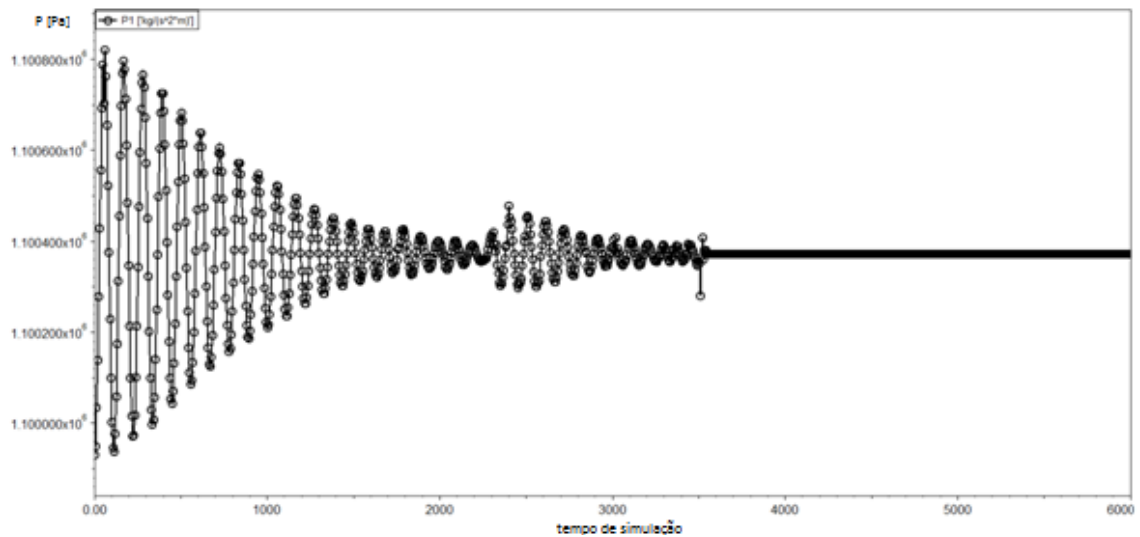


Figura 4-1 Estabilização da pressão de topo da coluna para o estado estacionário

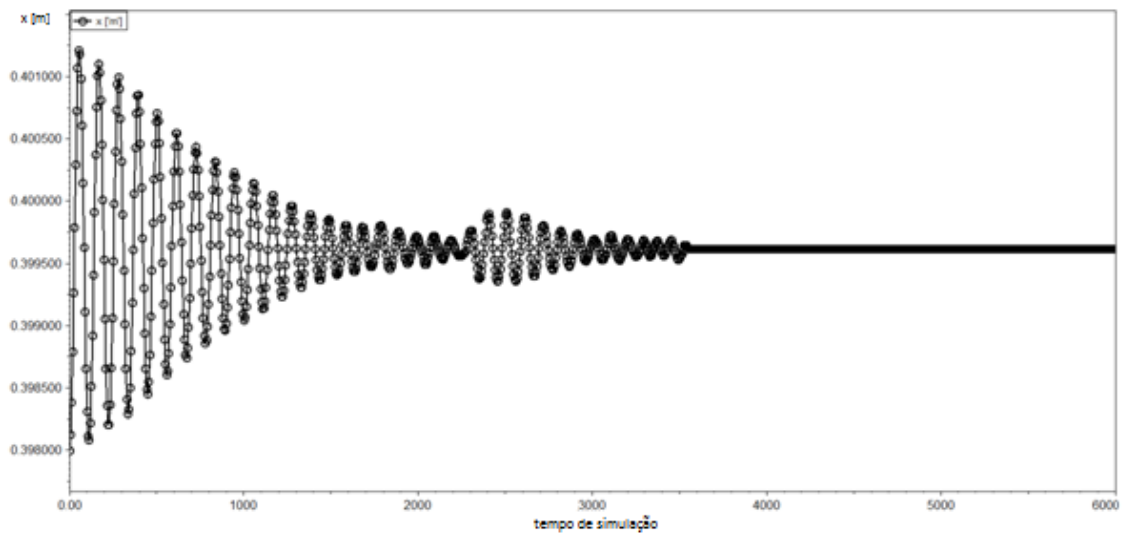


Figura 4-2 Estabilização do nível de líquido no condensador para o estado estacionário

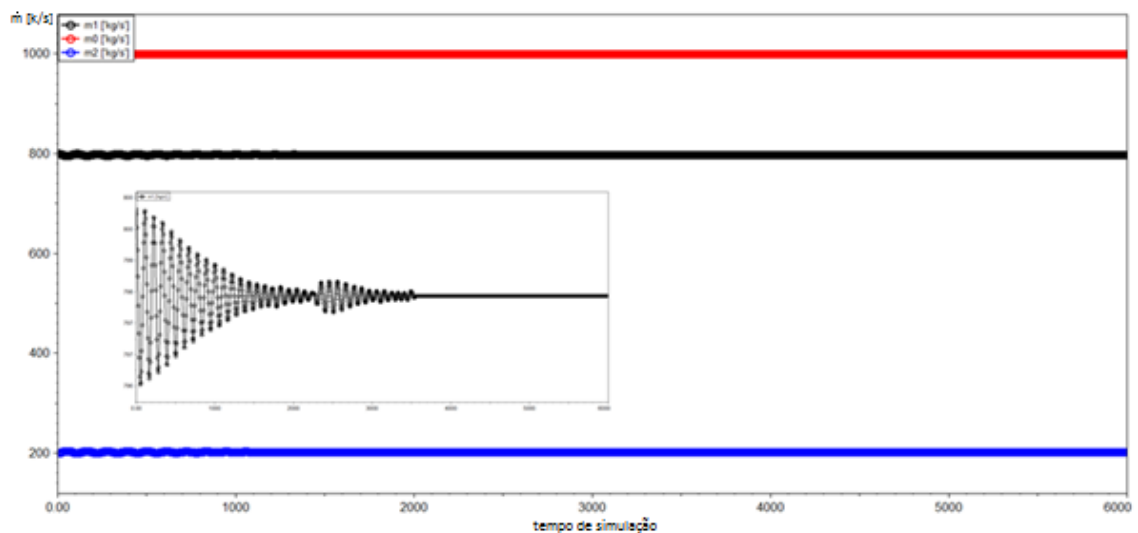


Figura 4-3 Estabilização das vazões mássicas para o estado estacionário, com detalhe em escala para o comportamento subamortecido

Nos gráficos apresentados acima, pode ser observado que o modelo converge para um estado estacionário constante, tendo o comportamento oscilatório até a convergência.

A seguir, foram feitas variações nas especificações do modelo, a fim de observar o efeito desses parâmetros no comportamento do sistema.

Os resultados obtidos apresentam-se a seguir:

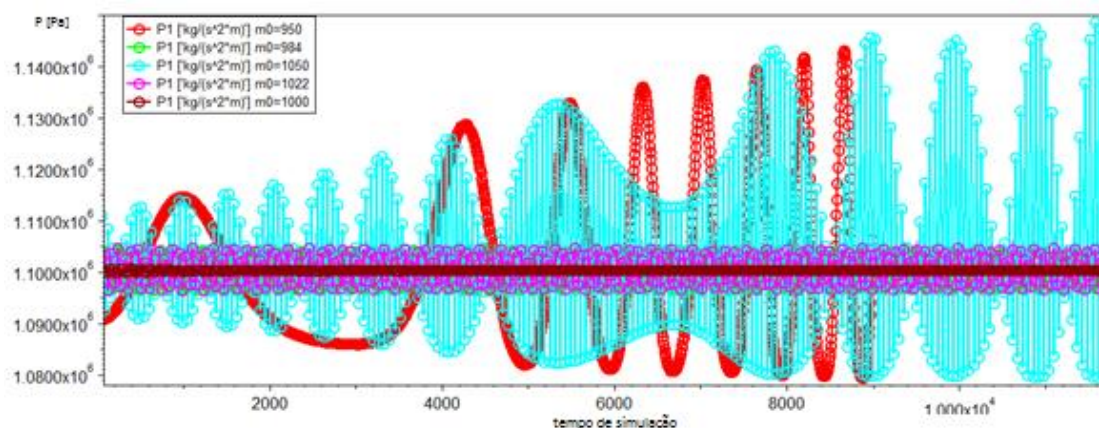


Figura 4-4 Variação da vazão mássica de vapor que sai do topo da coluna e resposta da pressão de topo

A Figura 4-4 representa o efeito de perturbações em  $\dot{m}_0$ , a partir do estado estacionário correspondente ao valor base de  $\dot{m}_0$  igual a 1000 kg/s, correspondente à linha central com menor amplitude. Observa-se que a resposta encontrada para valores de  $\dot{m}_0$  iguais a 984 kg/s e 1022 kg/s correspondem ao valor limite para os quais qualquer valor abaixo e acima, respectivamente, irão instabilizar a planta. Isso é exemplificado nas linhas das cores vermelho e azul claro no gráfico. Percebe-se, além disso, que o  $\dot{m}_0$  tem um efeito sobre a natureza qualitativa da resposta, não apenas sobre o amortecimento.

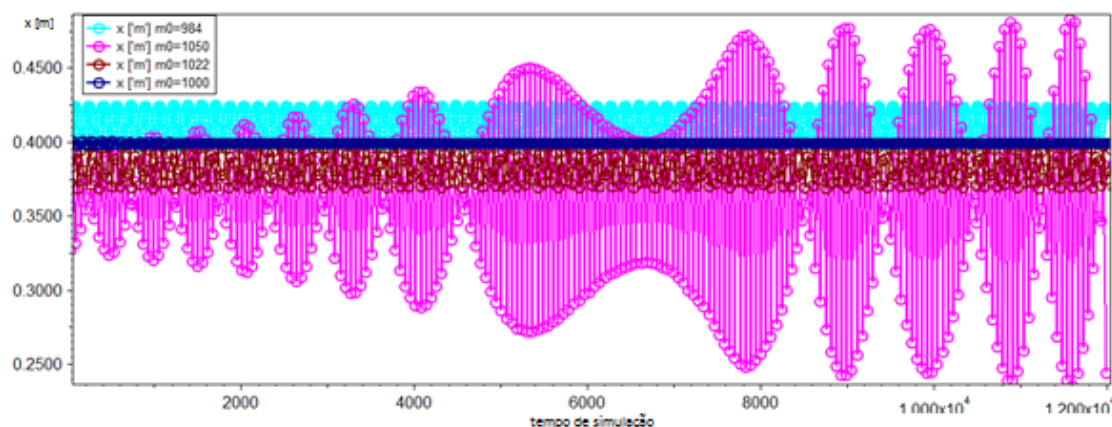


Figura 4-5 Variação da vazão mássica de vapor que sai do topo da coluna e resposta do nível de líquido no condensador

Na Figura 4-5, para o mesmo teste descrito para a Figura 4-4, observa-se que os dois valores de  $\dot{m}_0$  no limite de estabilidade estão relacionados a um nível diferente no condensador. Isso evidencia que o modelo prevê variação do nível no condensador conforme distúrbios de  $\dot{m}_0$ .

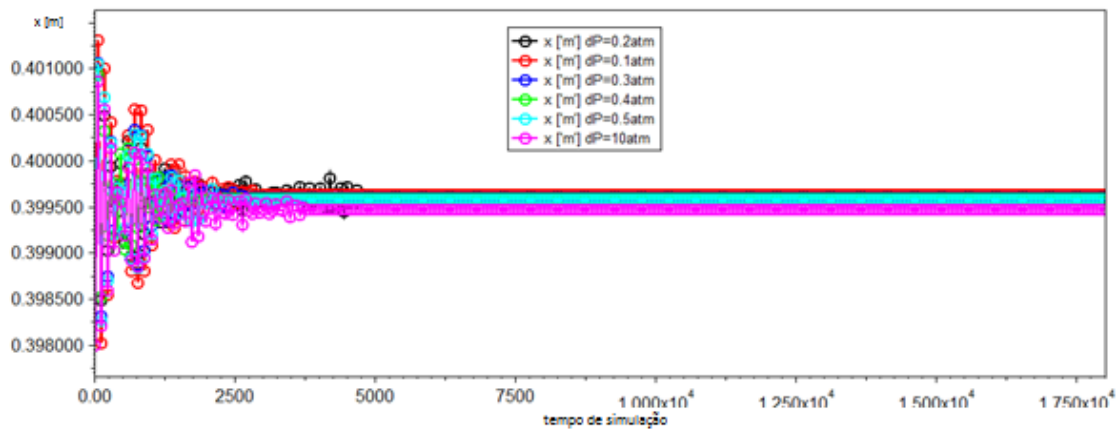


Figura 4-6 Variação da pressão no vaso de topo e resposta do nível de líquido no condensador

Para variações da  $P_2$  especificada, traduzida na legenda do gráfico da Figura 4-6 como diferença de pressão com relação a  $P_1$  inicial, é observado variações muito pequenas no nível do líquido no condensador, mesmo para uma variação razoavelmente grande da pressão.

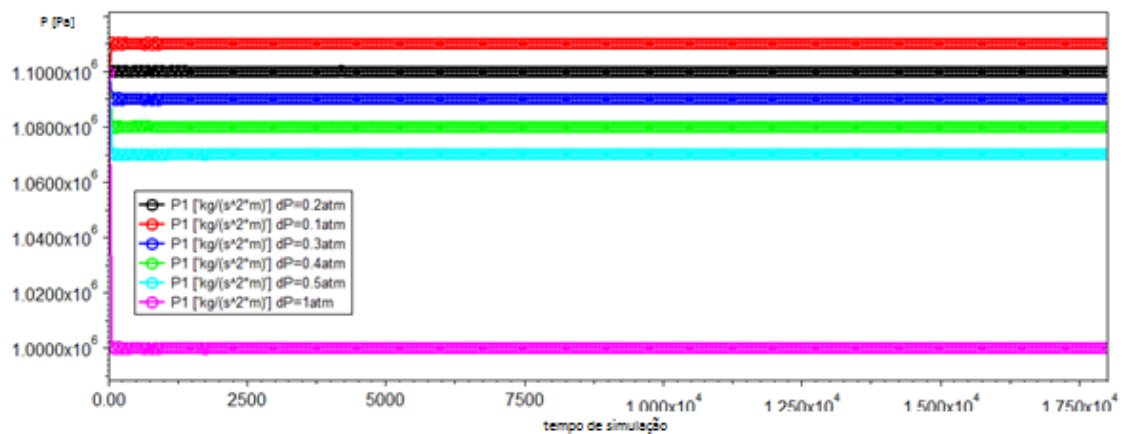


Figura 4-7 Variação da pressão no vaso de topo e resposta da pressão de topo da coluna

Na Figura 4-7, percebe-se que o modelo levou o sistema ao mesmo dP verificado no estado estacionário, variando  $P_1$  a mesma quantidade que foi variado  $P_2$ . Isso explica as poucas variações do nível no condensador observadas na Figura 4-6, pois a diferença de pressão continuou a mesma que para a definida para o estado estacionário.

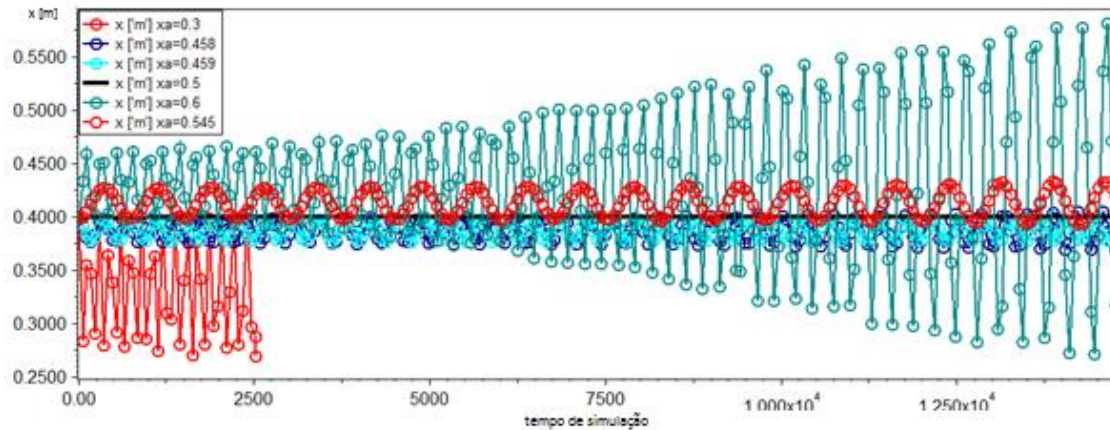


Figura 4-8 Variações da abertura da válvula de controle e resposta do nível de líquido no condensador

Na Figura 4-8, foram testados diferentes valores de abertura da válvula, sendo o valor arbitrado para o estado estacionário de  $x_a$  igual a 0,5. Os valores encontrados para a resposta de amortecimento igual a zero são  $x_a$  igual a 0,4585, aproximadamente, e 0,545. Pode-se observar que para valores abaixo e acima destes, respectivamente, a planta instabiliza. Deve-se observar que para a simulação para  $x_a$  igual a 0,3, que aparece interrompida, o modelo instabilizou naquele tempo de simulação.

Observa-se o mesmo subamortecimento e convergência dentro dos valores limites, para o teste avaliando a pressão no topo da coluna (Figura 4-9).

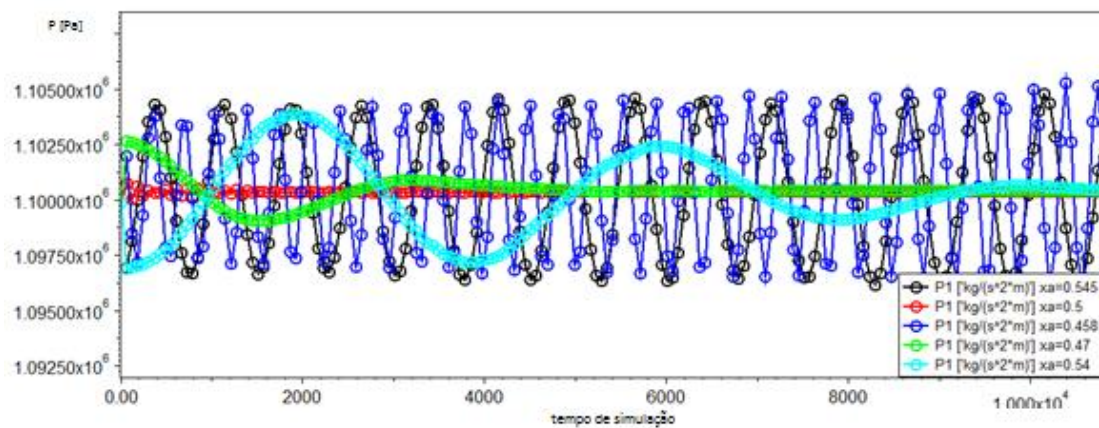


Figura 4-9 Variações da abertura da válvula de controle e resposta da pressão de topo da coluna

Foram feitos, porém, uma série de testes, representados na Figura 4-10, em que aparecem as respostas da pressão de topo da coluna às variações na abertura da válvula. Também foi simulada uma queda na pressão de topo, de aproximadamente 1 atm, e então uma abertura da válvula, o que deveria aumentar a pressão novamente. Porém, a resposta observada no modelo foi a de instabilização (nas linhas azul escuro e verde da Figura 4-10), e não o aumento de pressão esperado, que é o princípio de funcionamento do sistema de *hot-bypass*.



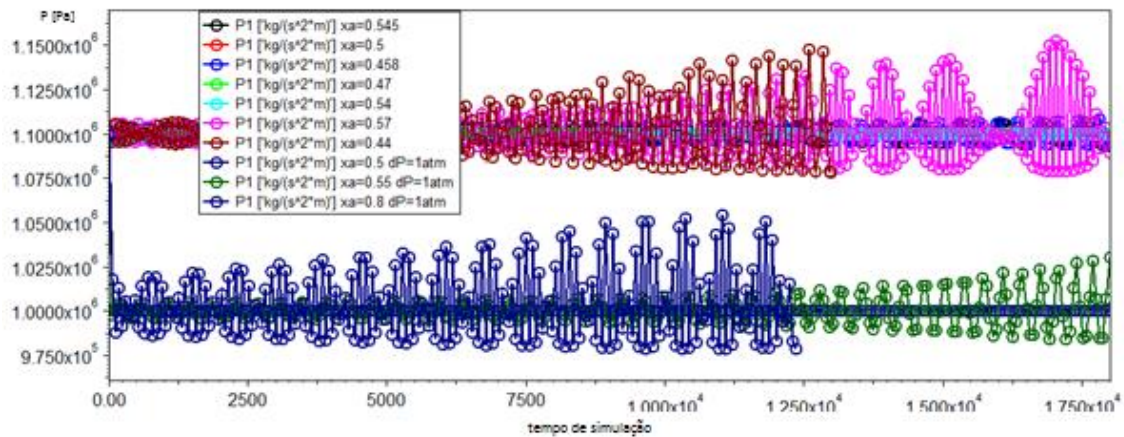


Figura 4-10 Variações de abertura da válvula de controle e resposta da pressão de topo da coluna, com teste de efeito da abertura da válvula para um distúrbio na pressão

Os resultados apresentados evidenciam que há melhorias a serem implementadas no modelo, sugeridas no Capítulo 5.

A seguir, é apresentada em detalhe a resposta da pressão de topo da coluna e do nível de líquido no condensador às variações em  $\dot{m}_0$ .

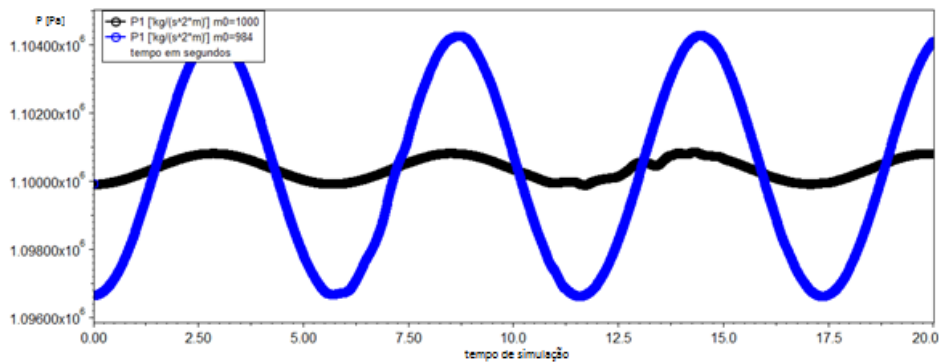


Figura 4-11 Variação da pressão de topo em função de distúrbio na vazão mássica de vapor que deixa a coluna

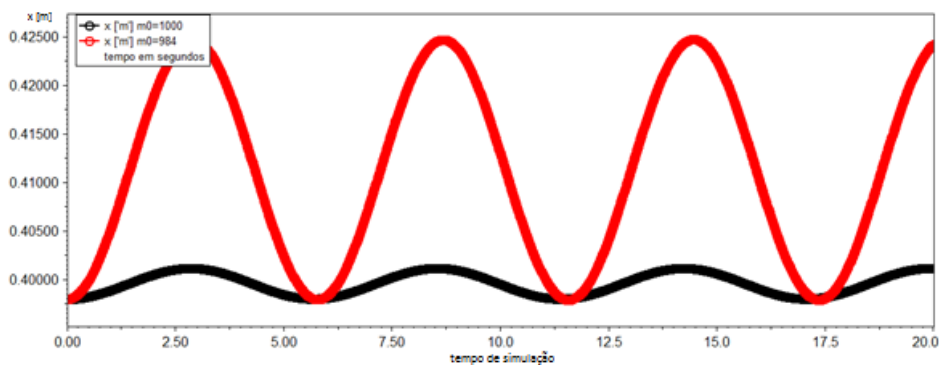


Figura 4-12 Variação do nível de líquido no condensador em função de distúrbio na vazão mássica de vapor que deixa a coluna

As Figuras 4-11 e 4-12 demonstram o comportamento oscilatório do sistema, esperado a partir da observação do comportamento da coluna real, conforme Figura 2-6 apresentada no Capítulo 2.4.1.

## 5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O objetivo deste trabalho foi implementar e simular um modelo matemático que complementasse os trabalhos apresentados na literatura para descrever o sistema de *hot-bypass*, de forma a prever o comportamento qualitativo do sistema. Foi elaborada uma modelagem baseada em equações já desenvolvidas anteriormente, e feita uma avaliação da dinâmica do modelo proposto.

Obteve-se um modelo que converge para um estado estacionário tomado como base, e foi possível prever o comportamento subamortecido esperado, similar ao observado na literatura. Assim, a análise qualitativa do modelo proposto é positiva. Porém a influência prevista da abertura da válvula agindo sobre a pressão de topo não foi observada na simulação, sendo uma falha do modelo que necessita análise. Portanto, o objetivo geral do trabalho, de contribuir para projetos e ajustes de controladores do sistema *hot-bypass* de colunas de destilação, foi alcançado em partes.

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se detalhar mais o modelo, e implementá-lo sem as simplificações nem as especificações de variáveis que foram feitas neste trabalho. Para isso, é necessário, pelo menos, adicionar uma equação para a pressão do vaso de topo, outra para o volume de vapor no condensador, e ainda as correlações para os escoamentos gasosos, já descritos por Fydryzewski (2011). Utilizar as equações que envolvem a geometria do condensador e a equação da válvula sem as simplificações feitas também deve melhorar os resultados.

Além disso, vale a pena analisar o comportamento do sistema utilizando outras correlações para o fator de atrito, que sejam bem definidas para todos os tipos de escoamento. Também podem ser feitas simulações variando parâmetros de projeto, como o comprimento da tubulação entre o condensador e o vaso de topo, a fim de verificar sua influência sobre o projeto do sistema.

Finalmente, também deve ser feita uma análise em malha fechada, considerando a função de transferência da válvula de controle do *hot-bypass* em si, e também dos controles de nível e de pressão do vaso de topo, descritos por Pessoa (2013).

Com essas melhorias no modelo e uma escolha cuidadosa dos parâmetros, espera-se chegar a resultados qualitativos e quantitativos satisfatórios em comparação a dados de uma planta real.

## 6 Referências

- BOYD, D. M. *Fractionator Instrumentation and Control Part 1*. Petr. Ref., 27 (10), Out. 1948, p. 115 – 118.
- BOYD, D. M. *Fractionator Pressure Control*. Petr. Ref., 26 (2), Fev. 1947, p. 113 – 115.
- BRANAN, C. R. *Rules of Thumb for Chemical Engineers*. 3 ed. Gulf Professional Publishing, 2002.
- BRANAN, C. R. *The Process Engineer's Pocket Handbook*. Vol. 1. Gulf Publishing Co., 1976.
- CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. *Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais*. 2 ed. Rio de Janeiro: Edgard Blücher, 2010, p. 143 – 155.
- CHIN, T. G. *Guide to Distillation Pressure Control Methods*. Hydroc. Proc., 86 (10), Out. 1979, p. 145 – 153.
- FLEMING, B.; SLOLEY, A. W. *Feeding and Drawing Products, the Forgotten Part of Distillation*. Presented at ChemShow and Exposition, New York, Dez. 1995.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T. *Introduction to fluid mechanics*. 5 ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- FYDRYSZEWSKI, J. P. B. *Modelagem e Simulação do Sistema Hot-bypass de Colunas de Destilação*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dez. 2011.
- HOLLANDER, L. *Pressure Control of Light-Ends Fractionators*. ISA J., 4 (5), Mai. 1957, p. 185 – 187.
- KISTER, H. Z. *Distillation Operation*. McGraw Hill, New York, 1989.
- LIEBERMAN, N. *Instrumenting a Plant to Run Smoothly*. Chem. Eng., 84 (19), Set. 1977, p. 140 – 154.
- LINSLEY, J. *New, Simpler Equations Calculate Pressure-Compensated Temperatures*. Oil & Gas J., 95 (2), Mar. 1997, p. 58 – 64.
- LUDWIG, E. E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*. Vol. 1. 2 ed. Gulf Publishing Co., 1977.
- PESSOA, C. M. *Modelagem e Simulação da Dinâmica do Hot-bypass de Colunas de Destilação*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Jan. 2013.
- RADEMAKER, O.; RIJNSDORP, J. E.; MAARLEVELD, A. *Dynamics and Control of Continuous Distillation Units*. Elsevier, Amsterdam, 1975.
- RIGGS, J. B. *Improve Distillation Column Control*. Chem. Eng. Progress, 94 (10), Out. 1998, p. 31 – 47.
- SLOLEY, A. W. *Effectively Control Column Pressure*. The Distillation Group, Inc., American Institute of Chemical Engineers, 2000.
- SLOLEY, A. W. *Simple Methods Solve Exchanger Problems*. Oil & Gas J., 96 (16), Abr. 1998, p. 58 – 59.
- SLOLEY, A. W. *Steady Under Pressure*. Presented at AIChE National Meeting, Atlanta. Disponível online em <http://www.distillationgroup.com/technical/081.html>, Mar. 2000.
- WHISTLER, A. M. *Locate Condensers at Ground Level*. Petr. Ref., 33 (3), Mar. 1954, p. 173 – 174.



## 7 ANEXO A – Implementação do modelo em EMSO

```

#*-----
* This file is property of the author and can't be used, copied
* or modified without permission.
*
*-----
* Author: Yana Jeanine Monge Pigatto
*
*-----
*
* 03-07-2013 17:00
*-----*#

```

Model coluna\_liquida

### PARAMETERS

```

pi as Real (Brief="pi",Default=3.141592);
g as Real (Brief="gravidade", Default=9.81, Unit='m/s^2');
ro as Real (Brief="densidade", Default=600, Unit='kg/m^3');
mi as Real (Brief="viscosidade", Default=0.00790, Unit='kg/(m*s)');
Dtub as Real (Brief="diâmetro interno da tubulação", Default=2, Unit='in');
Atub as Real (Brief="área da seção transversal da tubulação", Lower=0,
Unit='m^2');
Ltub as Real (Brief="comprimento da tubulação", Default=4, Unit='m');
Awtub as Real (Brief="área da parede da tubulação", Lower=0, Unit='m^2');
z as Real (Brief="diferença de altura entre a base do condensador e o topo do
vaso", Default=4, Unit='m');
Hcond as Real (Brief="altura total do condensador", Default=1, Unit='m');

```

Acond as Real (Brief="área da seção transversal do condensador", Default=2, Unit='m^2');

Cf as Real (Brief="coeficiente de correção da área efetiva do condensador", Default=0.001013);

Acondef as Real (Brief="área efetiva da seção transversal do condensador", Unit='m^2');

#### SET

Atub = (pi\*Dtub^2)/4;

Awtub = pi\*Dtub\*Ltub;

Acondef = Acond\*Cf;

#### VARIABLES

Mtot as Real (Brief="massa total da coluna líquida", Lower=0, Unit='kg');

dh as Real (Brief="diferença de altura da coluna líquida", Unit='m');

outx as Real (Brief="altura de líquido no condensador", Unit='m');

v as Real (Brief="velocidade da coluna líquida", Unit='m/s');

vm as Real (Brief="velocidade média", Unit='m/s');

Vcond as Real (Brief="volume de líquido do condensador", Unit='m^3');

Fa as Real (Brief="força de atrito", Unit='kg\*m/s^2');

tau as Real (Brief="perda de carga", Unit='kg/(m\*s^2)');

in P1 as Real (Brief="pressão no condensador", Unit='kg/(s^2\*m)');

in P2 as Real (Brief="pressão no vaso de topo", Unit='kg/(s^2\*m)');

#### EQUATIONS

if x > Hcond then

"massa total da coluna líquida"

```
Mtot = ro*(Vcond + (Atub*Ltub) + (Atub*(x-Hcond)));  
  
else  
  
"massa total da coluna liquida"  
  
Mtot = ro*(Vcond + (Atub*Ltub));  
  
end  
  
"diferenca de altura da coluna líquida"  
  
dh = z-x;  
  
"Velocidade da coluna liquida"  
  
v = diff(x);  
  
"Balanco de forcas"  
  
Mtot*diff(v) = - P1*Acond + P2*Atub + ro*g*dh*Atub - Fa;  
  
if x > Hcond then  
  
"volume de liquido no condensador constante" Vcond = Hcond*Acond;  
  
else  
  
if x <= 0*'m' then  
  
"volume de liquido no condensador nulo" Vcond = 0*'m'^3;  
  
else  
  
" volume de liquido no condensador variavel" Vcond = x*Acond;  
  
end  
  
end  
  
"Forca de atrito"  
  
Fa = tau*Awtub;
```

"Perda de carga variavel"

$$\tau = 0.0535 \cdot s/m \cdot \rho^{0.75} \cdot \mu^{0.25} \cdot v_m^{1.75} \cdot v / D_{tub}^{0.25};$$

end

Model vapor\_topo

PARAMETERS

Uv as Real (Brief="coeficiente global de troca térmica da fase vapor", Default=13.29, Unit='J/(s\*K\*m^2)');

#Uv calculado para est.est. m1cond ser igual m1 = 800

Tml as Real (Brief="média logarítmica da diferença de temperatura entre o vapor e o fluido de refrigeração", Default=10, Unit='K');

lambda as Real(Brief="calor latente de condensação do vapor", Default=2, Unit='J/kg');

Att as Real(Brief="área total de troca térmica", Default=20, Unit='m^2');

Hcond as Real (Brief="altura total do condensador", Default=1, Unit='m');

R as Real (Brief="constante dos gases", Default=8.314, Unit='kg\*m^2/(K\*mol\*s^2)');

M as Real (Brief="massa molar", Default=0.058, Unit='kg/mol');

Tsat as Real (Brief="temperatura de saturação média", Default=300, Unit='K');

VARIABLES

m0 as Real (Brief = "vazão mássica que sai do topo da coluna", Unit='kg/s');

m1 as Real (Brief="vazão mássica que vai para o condensador", Unit='kg/s');

in m2 as Real (Brief="vazão mássica que vai para a válvula", Unit='kg/s');

Attv as Real (Brief="área de troca térmica com o vapor", Unit='m^2');

m1cond as Real (Brief="vazão mássica de vapor que condensa no condensador", Unit='kg/s');

in x as Real (Brief="altura de líquido no condensador", Unit='m');

outP1 as Real (Brief="pressão no condensador", Unit='kg/(s^2\*m)');

V1vap as Real (Brief="volume de vapor no condensador", Unit='m^3');

#### EQUATIONS

"Balanco massico da vazao de vapor"

$$m0 = m1 + m2;$$

if x >= Hcond then

"Area de troca termica com o vapor nula" Attv = 0\*m^2';

else

if x <= 0\*m' then

"Area de troca termica com o vapor total" Attv = Att;

else

"Area de troca termica com o vapor variavel" Attv = (Hcond-x)\*Att/'m';

end

end

"Balanco de energia no condensador - fase vapor"

$$m1cond*\lambda = Uv*Attv*Tml;$$

"Balanco massico no condensador - fase vapor"

$$\text{diff}(P1) = (m1 - m1cond)*R*Tsats/(M*V1vap);$$

end

Model valvula\_de\_controle

#### PARAMETERS

Cv as Real (Brief="coeficiente da válvula", Default=0.01669, Unit='m^2');

#Cv calculado para que valvula.m2 inicial fosse igual a vapor.m2 = 200

rog as Real (Brief="densidade do gás", Default=2.71, Unit='kg/m^3');

g as Real (Brief="gravidade", Default=9.81, Unit='m/s^2');

#### VARIABLES

Lv as Real (Brief="função do obturador da válvula");

xa as Real (Brief="abertura da válvula");

out m2 as Real (Brief="vazão mássica que vai para a válvula", Unit='kg/s');

in P1 as Real (Brief="pressão no condensador", Unit='kg/(s^2\*m)');

out P2 as Real (Brief="pressão no vaso de topo", Unit='kg/(s^2\*m)');

#### EQUATIONS

"Obturador linear"

$Lv = 100 * xa;$

"Equacao da valvula"

$m2 = Cv * Lv * \sqrt{(P1 - P2) * rog};$

end

FlowSheet hot\_bypass

#### DEVICES

liquido as coluna\_liquida (Brief="liquido");

vapor as vapor\_topo (Brief="vapor de topo");

valvula as valvula\_de\_controle (Brief="valvula do hot-bypass");

## CONNECTIONS

valvula.m2 to vapor.m2;

liquido.x to vapor.x;

vapor.P1 to valvula.P1;

vapor.P1 to liquido.P1;

valvula.P2 to liquido.P2;

## SPECIFY

liquido.vm=0.01\*'m/s';

valvula.P2=1078730\*'kg/(s^2\*m)';

vapor.V1vap = 0.00122\*'m^3';

# V1vap calculado para x inicial

valvula.xa = 0.5;

# subamortecimento nas variações limites: xa=(algo entre 0.458 e 0.459), e xa=0.545

vapor.m0 = 1000\*'kg/s';

# subamortecimento nos distúrbios limites: m0=984 e m0=1022

## INITIAL

liquido.v = 0.00\*'m/s';

#converge iniciando com v = 0 até 0.01447, quando subamortece. daí em diante, instabiliza

liquido.x = 0.398\*'m';

# calculado para a P1 que funcionou testando para dentro da faixa  $0 < x < 1$  p/  
Dtub=2"

```
vapor.P1 = 1099930*'kg/(s^2*m)';
```

```
# P1 que funcionou testando para dentro da faixa  $0 < x < 1$  p/ Dtub=2"
```

```
OPTIONS
```

```
Dynamic = true;
```

```
TimeStep = 01;
```

```
TimeEnd = 300;
```

```
TimeUnit = 'min';
```

```
end
```