



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



Proposta de uma Estratégia de Controle para um Conjunto de Fornos de Destilação

Autor: Everton Colling

Orientador: Jorge Otávio Trierweiler

Porto Alegre, junho de 2012

Sumário

| | |
|--|------|
| Sumário | ii |
| Agradecimentos | iv |
| Resumo | v |
| Lista de Figuras | vi |
| Lista de Tabelas | vii |
| Lista de Abreviaturas e Siglas | viii |
| 1 Introdução | 1 |
| 2 Revisão Bibliográfica | 2 |
| 2.1 Visão Geral de um Forno de Aquecimento de Petróleo | 2 |
| 2.2 O Processo de Combustão | 3 |
| 2.3 Eficiência de Combustão | 4 |
| 2.4 Controles de Processo | 6 |
| 2.5 Malhas de Controles de Combustão | 7 |
| 2.6 Controle de Tiragem e Vazão de Ar | 10 |
| 2.7 Limites Cruzados | 13 |
| 2.8 Controle do Excesso de Ar | 15 |
| 2.9 Controle do Poder Calorífico do Combustível | 17 |
| 2.10 Controle Feedforward | 18 |
| 2.11 Estratégias de Controle Avançadas | 20 |
| 3 Proposição de uma Estratégia de Controle | 21 |
| 3.1 Descrição dos Fornos | 21 |
| 3.2 Caracterização do Problema de Controle | 23 |
| 3.3 Objetivos dos Controladores Estudados | 25 |
| 3.3.1 Controlador de Distribuição de Ar entre os Fornos | 25 |
| 3.3.2 Controlador de Vazão total de Ar para os Fornos | 27 |
| 3.4 Variáveis Controladas e Manipuladas | 28 |
| 3.5 Propostas de Solução dos Problemas Encontrados | 29 |
| 3.5.1 Proposta para o problema de Vazão Total de Ar | 29 |
| 3.5.2 Proposta para o problema de Distribuição de Ar entre os Fornos | 30 |
| 4 Resultados | 32 |
| 4.1 Modelo para Ilustrar o sistema Estudado | 32 |
| 4.2 Resultados Esperados | 33 |
| 5 Conclusões e Trabalhos Futuros | 35 |
| 6 Referências | 36 |
| APÊNDICE A | 37 |

| | |
|------------|----|
| APÊNDICE B | 39 |
| APÊNDICE C | 41 |
| APÊNDICE D | 46 |

Agradecimentos

Quero agradecer a todos aqueles que me auxiliaram durante a realização deste trabalho e àqueles que, dispondo de seu tempo e conhecimentos, contribuíram para o aperfeiçoamento de minha formação acadêmica. Destaco, dentre os colegas de trabalho da REFAP, Paulo Ricardo Kugland de Azevedo, Luis Gustavo Soares Longhi, Ana Lídia Wild, Ronaldo Machado da Silva, Sandro Costa da Rocha, Sandro Luis Alencastro Pereira, Ézio Slongo, Marcos Aurélio Pinheiro, Eduardo Almeida Feitosa de Lima, Ricardo Landal de Campos Carlos e José Lopes Madruga.

Agradeço também aos professores do Departamento de Engenharia Química que além de compartilharem seus vastos conhecimentos em aula, estiveram sempre disponíveis para trocar uma idéia ou tirar uma dúvida. Em especial os professores Marcelo Farenzena e Jorge Otávio Trierweiler.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a minha irmã, Emanoele Colling, meu pai, João Elberto Braum Colling e minha mãe, Marlise Finkler Colling, os quais sempre me apoiaram em todas os meus desafios.

Resumo

O presente trabalho busca estudar a malha de controle de um conjunto de fornos de destilação, identificando seus problemas e propondo novas estratégias para solucionar tais problemas. Para isso, a malha de controle implementada na planta foi estudada e, juntamente com dados de histórico de processo, um modelo do sistema foi criado para propor uma nova estratégia de controle.

Quando a vazão de petróleo na entrada dos fornos se aproxima da carga máxima o forno apresenta sintomas de falta de ar para combustão. No entanto existem, pelo menos, duas variáveis que podem ser manipuladas para aumentar a vazão de ar e não são utilizadas pela estratégia de controle.

Foi desenvolvida uma nova estratégia de controle para tentar solucionar o problema de falta de ar em condições de carga alta. Além disso foi desenvolvido um modelo simplificado da planta para ilustrar o funcionamento da nova estratégia de controle.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Forno de Aquecimento de Petróleo..... | 3 |
| Figura 2. Ar mínimo em função do combustível..... | 4 |
| Figura 3. Efeitos do Excesso de Oxigênio..... | 5 |
| Figura 4. Pré-aquecedor de Ar Ljungstrom..... | 6 |
| Figura 5. Sistema de Preaquecimento de Ar para Combustão..... | 6 |
| Figura 6. Controles de Processo de um Forno de Aquecimento de Petróleo..... | 7 |
| Figura 7. Controle de Combustível com cascata TIC-FIC..... | 8 |
| Figura 8. Controle de Combustível com cascata TIC-PIC..... | 9 |
| Figura 9. Controle de Combustível com cascata TIC-FIC-PIC..... | 9 |
| Figura 10. Forno com Tiragem NATURAL..... | 11 |
| Figura 11. Forno com Tiragem FORÇADA..... | 11 |
| Figura 12. Forno com Tiragem INDUZIDA..... | 12 |
| Figura 13. Forno com Tiragem Balanceada..... | 13 |
| Figura 14. Estratégia de Limites Cruzados..... | 14 |
| Figura 15. Composição do gás de combustão para queima do metano..... | 15 |
| Figura 16. Efeito do ar na análise do gás de combustão..... | 16 |
| Figura 17. Medida condicionada de oxigênio..... | 17 |
| Figura 18. Poder calorífico do gás em base volumétrica..... | 18 |
| Figura 19. Estratégia de controle <i>Feedforward</i> | 19 |
| Figura 20. Controle com Limites Cruzados Aprimorado..... | 20 |
| Figura 21. Representação da carga e combustíveis dos fornos estudados..... | 21 |
| Figura 22. Representação dos sistemas de ar e gás de combustão dos fornos estudados..... | 22 |
| Figura 23. Efeito do Aumento de Carga..... | 24 |
| Figura 24. Surgimento da condição de <i>LowOverride</i> | 25 |
| Figura 26. Cálculo da PV do Controlador de Distribuição de Vazão de Ar..... | 26 |
| Figura 27. Estratégia atual para Distribuição de Ar..... | 26 |
| Figura 28. Cálculo da PV e SP do Controlador de Vazão Total de Ar..... | 27 |
| Figura 29. Estratégia Atual para Controle da Vazão Total de Ar..... | 27 |
| Figura 30. Proposta para a Estratégia da Vazão Total de Ar..... | 30 |
| Figura 31. Proposta para a Estratégia de Distribuição de Ar..... | 31 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Variáveis Controladas versus Manipuladas em Tiragem NATURAL | 28 |
| Tabela 2. Variáveis Controladas versus Manipuladas em Tiragem FORÇADA..... | 28 |
| Tabela 3. Variáveis Controladas versus Manipuladas em Tiragem BALANCEADA | 29 |
| Tabela 4. Proposta para o Controle da Vazão Total de Ar | 29 |
| Tabela 5. Proposta para o Controle da Distribuição de Ar entre os Fornos | 31 |

Lista de Abreviaturas e Siglas

- AIC – Controlador Indicador de Análise
- AT – Transmissor de Análise
- FI – Indicador de Vazão
- FIC – Controlador Indicador de Vazão
- FIT – Transmissor Indicador de Vazão
- FT – Transmissor de Vazão
- FV – Válvula de Vazão
- FY – Cálculo de Vazão
- HIC – Controlador Indicador Manual
- HV – Válvula Manual
- OP – Saída
- PAF – Pré-aquecedor de Ar de Forno
- PDT – Transmissor de Pressão Diferencial
- PDV – Válvula de Pressão Diferencial
- PIC – Controlador Indicador de Pressão
- PT – Transmissor de Pressão
- PV – Variável do Processo
- SP – *Setpoint*
- TE – Elemento de Temperatura
- TI – Indicador de Temperatura
- TIC – Controlador Indicador de Temperatura
- TT – Transmissor de Temperatura
- TV – Válvula de Temperatura
- VBP – Vapor de Baixa Pressão

1 Introdução

Os Fornos são equipamentos de grande importância para diversos setores da indústria química, petroquímica e energética. São equipamentos onde um fluido pode ser aquecido e/ou vaporizado de maneira controlada para atingir uma condição necessária para algum processo físico-químico.

Os Fornos que serão abordados no presente trabalho têm a função de aquecer e vaporizar o petróleo até uma temperatura ideal para seu fracionamento. Devido ao alto consumo de combustível e ao grande impacto que o controle de temperatura do petróleo na saída dos fornos tem sobre o resto do processo, esses fornos têm grande influência sobre a eficiência operacional e econômica da planta.

Para aumentar a vazão de carga da unidade e manter a mesma temperatura na saída dos fornos é preciso também aumentar a vazão de combustível e ar para queima. Durante os anos a carga da unidade foi elevada acima da carga de projeto, até que a vazão de ar para queima nos fornos se tornou o gargalo da unidade. Ao operar a planta em carga máxima a vazão de ar que cada forno recebe não é mais controlada, levando a uma oscilação considerável na temperatura de saída dos fornos.

O objetivo desse trabalho será estudar a estratégia de controle atual para o sistema de fornecimento de ar para os fornos e com isso propor novas estratégias de controle onde aplicável. Com isso espera-se aumentar a eficiência energética e operacional dos fornos quando esses operam em carga máxima.

No capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica contendo considerações sobre o processo de combustão e as estratégias de controle usuais empregadas em fornos industriais. No capítulo 3 serão apresentadas as estratégias de controle atualmente empregadas nos fornos estudados, seus problemas e propostas para solucionar os problemas de controle. No capítulo 4 serão apresentados detalhes da implementação das propostas no SDCD, a descrição de um modelo desenvolvido para ilustrar o funcionamento da nova estratégia de controle e os resultados esperados com as modificações.

2 Revisão Bibliográfica

Os fornos industriais são equipamentos importantes na integração energética da planta operacional, conseguem controlar a temperatura de um produto, mesmo com grandes variações nos processos precedentes. Dessa forma, diferenciam-se dos permutadores de calor. Contudo, sua operação inadequada pode ter grandes impactos na capacidade e qualidade da produção da planta, sendo que o objetivo principal, que deve ser buscado na operação destes fornos, é a segurança do processo. Segundo Lipták (2006), os principais riscos na operação de fornos incluem:

- Fogo ou explosão causada pela ruptura de algum tubo;
- Explosão na câmara de combustão causada pela perda de chama, pressurização do forno ou por procedimentos inadequados de purga ou ignição;
- Implosão do forno causada por tiragem excessiva.

Para aumentar a eficiência operacional da planta, reduzir perturbações nos processos subsequentes e garantir uma operação segura, são implementados sistemas regulatórios para controlar a operação de fornos.

Segundo Campos e Teixeira (2010), os principais objetivos do controle de um forno industrial são:

- Manter constante e estável a temperatura de saída do produto.
- Manter constantes as vazões de cada passe do forno.
- Manter constante e em um valor seguro a pressão interna da fornalha.
- Manter o excesso de oxigênio nos gases de combustão em um valor ótimo.
- Manter constante a pressão, dentro dos limites de segurança operacional, dos queimadores.
- Manter a vazão do gás combustível em um valor requerido para fornecer a carga térmica desejada naquele instante.
- Manter a vazão de ar para os queimadores no valor desejado.

2.1 Visão Geral de um Forno de Aquecimento de Petróleo

O Forno é composto por uma câmara inferior, denominada seção de radiação, uma região superior, denominada seção de convecção, a chaminé dos gases de combustão e o sistema de combustíveis que supre gás ou óleo combustível para os queimadores (Campos e Teixeira, 2010).

O processo de combustão ocorre nos queimadores. Esses normalmente são instalados no piso do forno, onde são alimentados pelo header de combustível e pela tubulação de ar para combustão (também chamada de plenum).

O petróleo, antes de ser destilado em diversas frações (nafta, querosene, diesel, gasóleo, óleo combustível e resíduo) na torre de destilação, precisa ser aquecido até aproximadamente 375°C e parcialmente vaporizado. Para tanto, ele é dividido em múltiplos passes que entram no forno pela seção de convecção onde o fluido é aquecido. A vaporização acontece no final de cada passe na seção de radiação do forno (onde os passes estão expostos à chama). O produto parcialmente vaporizado entra na torre de destilação, onde sofre processo de flash e é destilado nos cortes desejados (Lipták, 2006). A Figura 1 apresenta uma representação de um forno de aquecimento de petróleo.

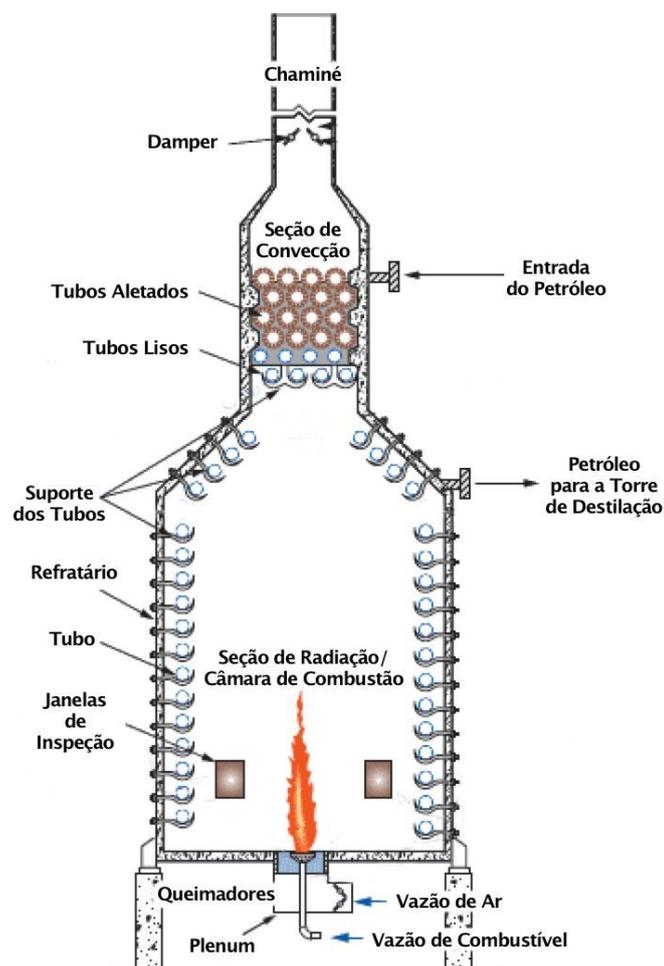


Figura 1. Forno de Aquecimento de Petróleo (adaptado de Vinayagam, 2007)

2.2 O Processo de Combustão

Para queimar completamente qualquer combustível, uma quantidade ideal de oxigênio e, portanto uma quantidade ideal de ar é necessária (Lipták, 2006). A quantidade

ideal de ar (estequiométrica) necessária para a queima completa do combustível depende da composição do mesmo. A Figura 2 apresenta uma relação entre o tipo de combustível gasoso e o ar mínimo necessário para combustão completa (King, 2011).

Em condições reais, as ineficiências na combustão e na mistura de combustível e comburente requerem que uma quantidade extra de ar seja fornecida para garantir a combustão completa. A quantidade acima da estequiométrica é chamada de excesso de ar (Lipták, 2006).

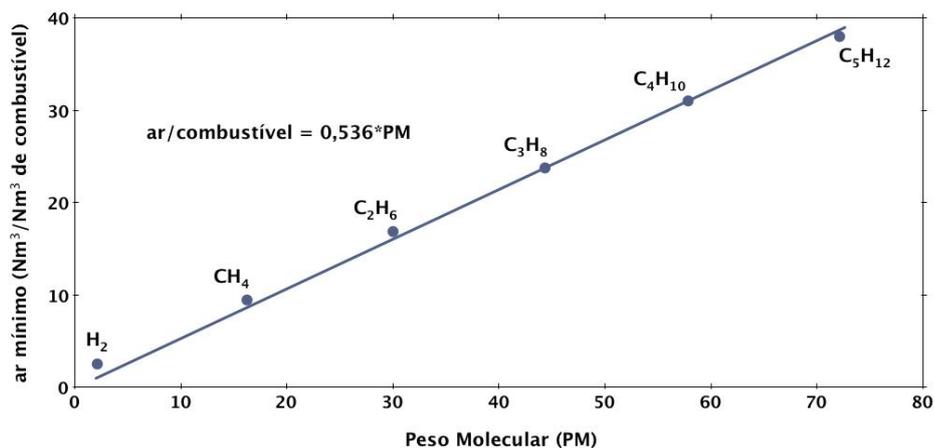


Figura 2. Ar mínimo em função do combustível (adaptado de King, 2011)

2.3 Eficiência de Combustão

O objetivo principal do processo de combustão é obter a maior quantidade de energia possível com a menor quantidade de combustível, ou seja, buscar a maior eficiência energética. Para tanto, é necessário garantir uma relação molar adequada entre os reagentes e um bom grau de homogeneização da mistura.

O grau de homogeneização da mistura está atrelado principalmente ao projeto dos queimadores, logo não é uma variável manipulável. No entanto, a turbulência da corrente de ar e de combustível, o tipo de combustível e a pressão da câmara de combustão podem influenciar também nessa variável.

A variação da relação molar entre os reagentes para a reação de combustão se traduz na variável excesso de ar. Sendo “*a*” a quantidade ideal (mínima) de ar requerido para a combustão completa e “ $(1 + x) \cdot a$ ” a quantidade atual de ar fornecida, então “*x*” é o coeficiente de excesso de ar (Lipták, 2006). Em base volumétrica, o excesso de ar requerido (*E* em %) pode ser calculado por

$$E = K \left[\frac{21}{21 - \%O_2} - 1 \right] \cdot 100$$

onde $K = 0,9$ para gás, $0,94$ para óleo e $0,97$ para carvão (Lipták, 2006).

A percentagem ótima de oxigênio em excesso é alguma percentagem maior que aquela necessária para combustão completa teórica. Essa margem fica normalmente entre 2 e 4% para maioria dos fornos (Lipták, 2006). A Figura 3 mostra a relação entre o excesso de ar e a perdas nos gases de combustão.

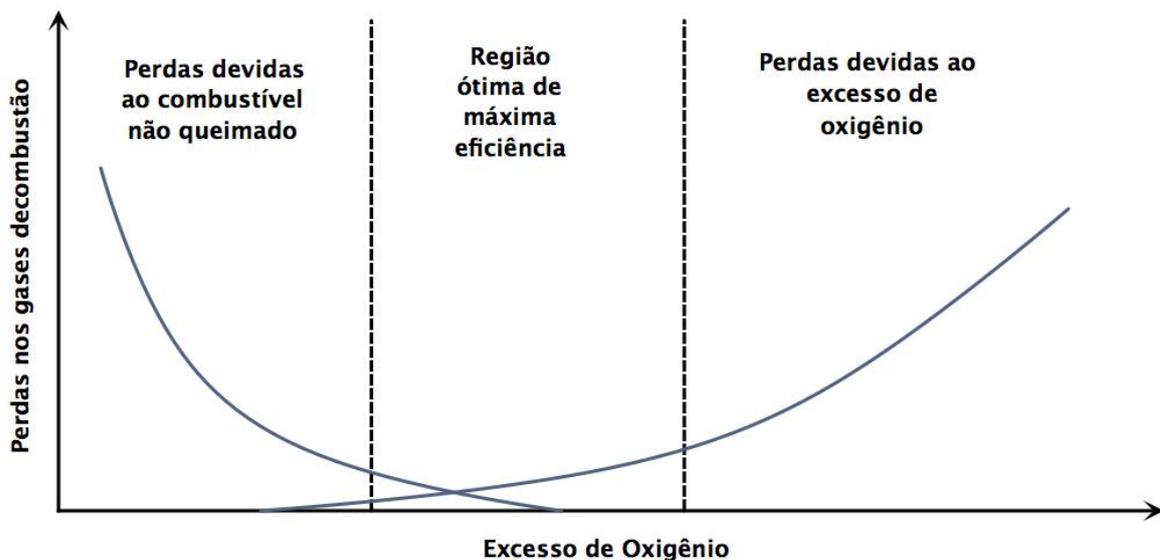


Figura 3. Efeitos do Excesso de Oxigênio (adaptado de Campos e Teixeira, 2010)

Outra maneira para aumentar a eficiência térmica do forno é aproveitar a energia dos gases de combustão para aquecer o ar fornecido para a combustão. O ar entrando mais quente no forno “rouba” menos calor da queima, aumentando a energia disponível para o produto (Campos e Teixeira, 2010). Este processo é realizado em um trocador de calor, normalmente chamado de Pré-aquecedor de Ar do Forno (PAF), onde o modelo mais comum adotado é o Rotativo Ljungstrom, apresentado na Figura 4.

Para utilizar um PAF, é necessário instalar um ou mais ventiladores de ar, fazendo o ar circular neste sistema que têm pouca pressão disponível. A Figura 5 mostra um sistema onde se coloca um ventilador de tiragem induzida (exaustor), que succiona os gases de combustão do Forno, para forçá-los a passar pelo PAF, que pré-aquece o ar de combustão. Os gases de combustão voltam depois para a chaminé. Utiliza-se também um ventilador de tiragem forçada (soprador), que succiona o ar do ambiente e o envia para o PAF e depois alimenta os queimadores do forno (Campos e Teixeira, 2010).

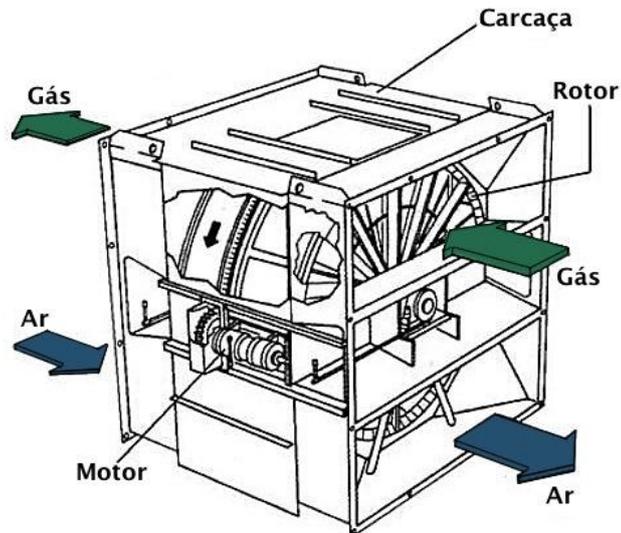


Figura 4. Pré-aquecedor de Ar Ljungstrom (adaptado de <<http://steamofboiler.blogspot.com.br>>)

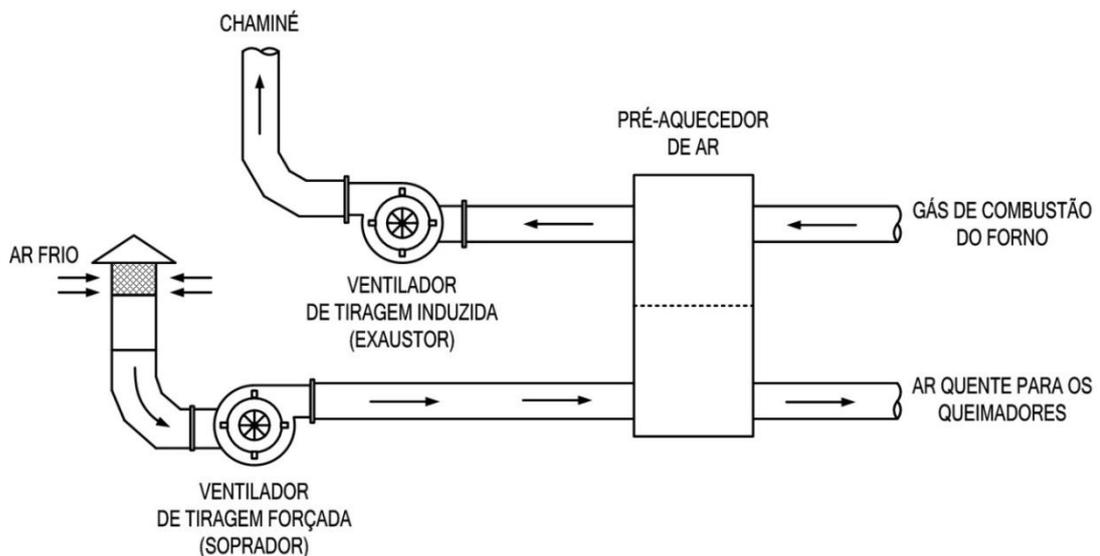


Figura 5. Sistema de Preaquecimento de Ar para Combustão (adaptado de Lipták, 2006)

2.4 Controles de Processo

Segundo Lipták (2006), as principais variáveis que precisam ser controladas são:

- A vazão de carga para a unidade;
- A divisão adequada da vazão total entre os passes do forno, de maneira a prevenir sobreaquecimento em alguma das correntes e o possível coqueamento resultante.
- A quantidade correta de energia térmica fornecida a corrente de processo.

A quantidade correta de energia térmica fornecida a corrente de processo é traduzida no controle da temperatura do produto do forno e esse é sem dúvida a variável mais importante de um forno para ser controlada (Campos e Teixeira, 2010)

A Figura 6 mostra os controles típicos de processo para esse tipo de forno. A vazão de alimentação de carga é controlada pelo controlador de carga (FIC-4). Essa vazão é dividida entre os passes do forno pelo ajuste manual no set de abertura das válvulas pelos Controles Manuais (HIC-1, HIC-2 e HIC-3).

Os indicadores de temperatura TI-1, TI-2 e TI-3 (podem existir diversos TIs em cada passe) indicam o desbalanceamento nas temperaturas de cada passe (Lipták, 2006). O controle da temperatura de saída do produto (TIC-4) é realizado após a junção dos passes (Campos e Teixeira, 2010). O TIC-4 define a demanda de queima através de uma cascata com a vazão de ar/combustível (Lipták, 2006).

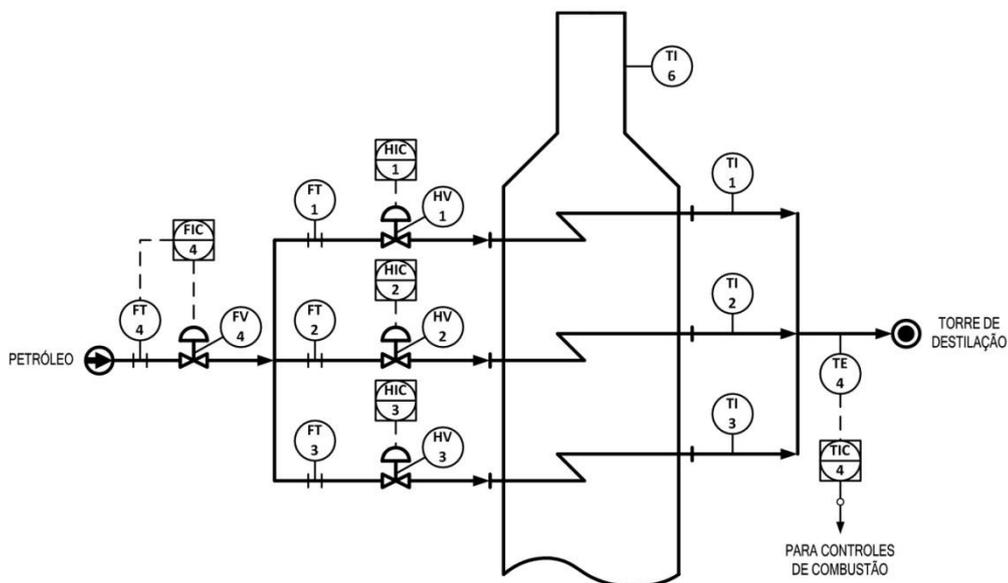


Figura 6. Controles de Processo de um Forno de Aquecimento de Petróleo (adaptado de Lipták, 2006)

2.5 Malhas de Controles de Combustão

O controle de temperatura do produto do forno irá atuar no sistema de combustível, através de uma estratégia cascata, gerando o *setpoint* (SP) para o controlador de combustível. Existem várias possibilidades para o controle do combustível. As principais estratégias envolvem um controlador de pressão, de vazão ou uma combinação dos dois.

A primeira possibilidade é mostrada na Figura 7 onde se manipula a vazão de combustível. A desvantagem desta estratégia é não respeitar os limites de pressão seguros para a operação dos queimadores (Campos e Teixeira, 2010).

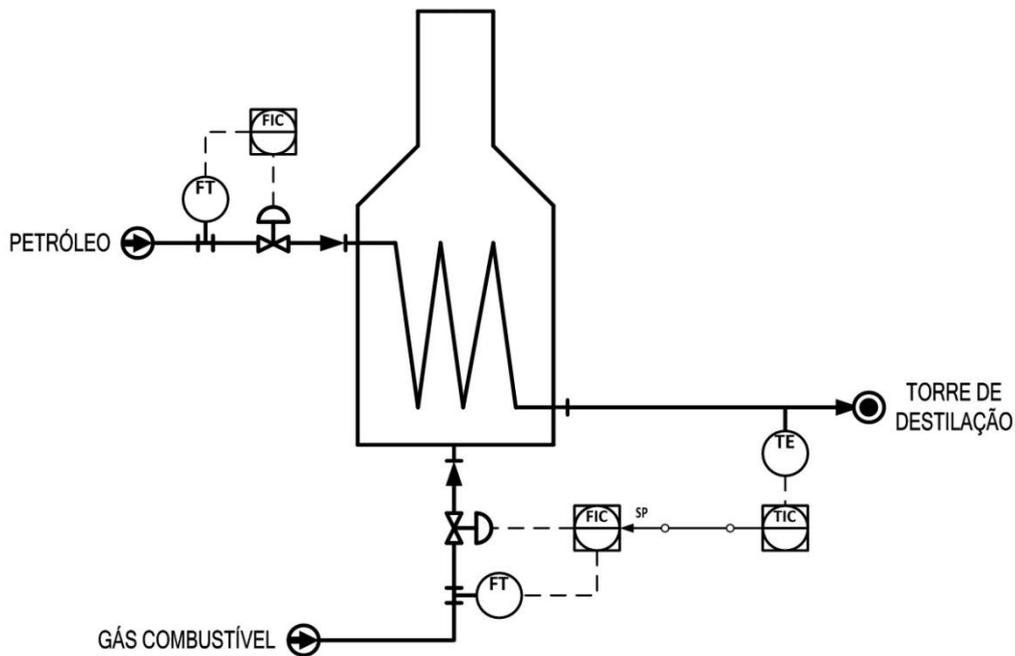


Figura 7. Controle de Combustível com cascata TIC-FIC (adaptado de Campos e Teixeira, 2010)

Pressão muito alta pode levar a velocidade do combustível a exceder a velocidade da chama fazendo com que essa se separe da ponta do queimador, correndo o risco de se extinguir. Por outro lado, uma pressão muito baixa de combustível pode não sustentar a queima e extinguir a chama (King, 2011).

Outra opção é mostrada na Figura 8. Caso o controle de temperatura necessite de mais calor, ele irá aumentar o *setpoint* do controlador de pressão, admitindo mais combustível para os queimadores. No entanto a saída do controlador de pressão é limitada entre os valores mínimos e máximos permitidos de pressão para a operação dos queimadores (Campos e Teixeira, 2010).

Este tipo de controle permite compensar perturbações na pressão do combustível e garante os limites operacionais dos queimadores. Entretanto, caso sejam colocados ou removidos queimadores de operação, a vazão de combustível para cada queimador se manterá constante, pois a pressão do header é controlada pelo PIC. Só quando a temperatura do produto “sentir”, o sistema de controle irá compensar e mudar o *setpoint* do controlador de pressão. Em alguns fornos industriais, isto poderá ter grande impacto, principalmente naqueles com grandes tempos de resposta.

Uma outra alternativa de controle é mostrada na Figura 9. Neste caso, introduziu-se um controlador de vazão em cascata com a pressão do combustível. Como a vazão é definida pelo controle de temperatura do produto, qualquer perturbação nessa vazão é compensada rapidamente manipulando-se a pressão do combustível. Além disso, o controlador de pressão garante a proteção dos queimadores, limitando a pressão máxima e mínima em seu *setpoint* (Campos e Teixeira, 2010).

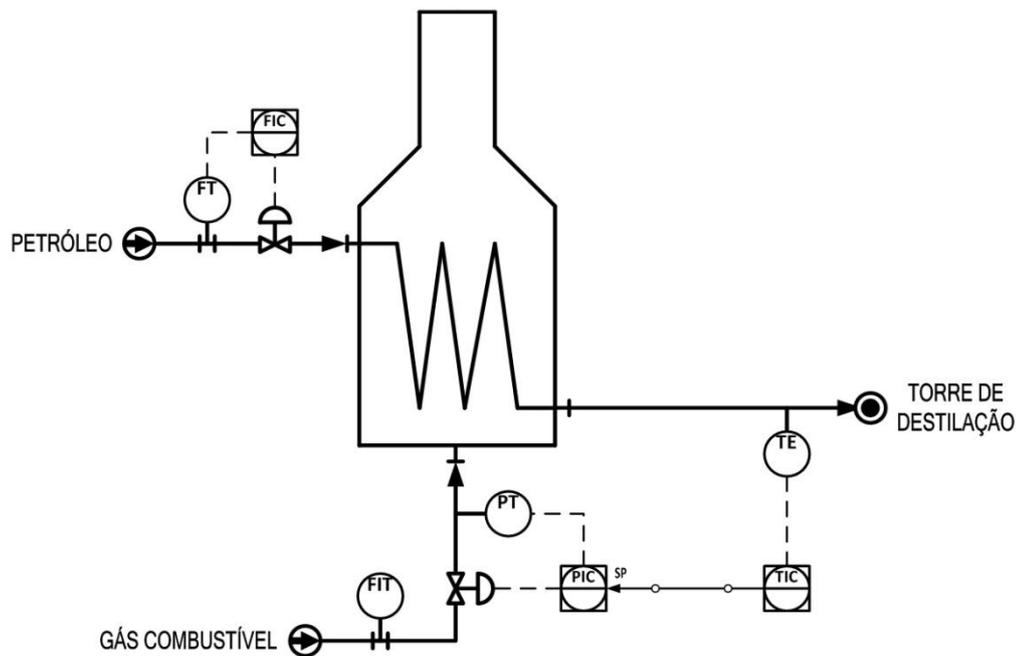


Figura 8. Controle de Combustível com cascata TIC-PIC (adaptado de Campos e Teixeira, 2010)

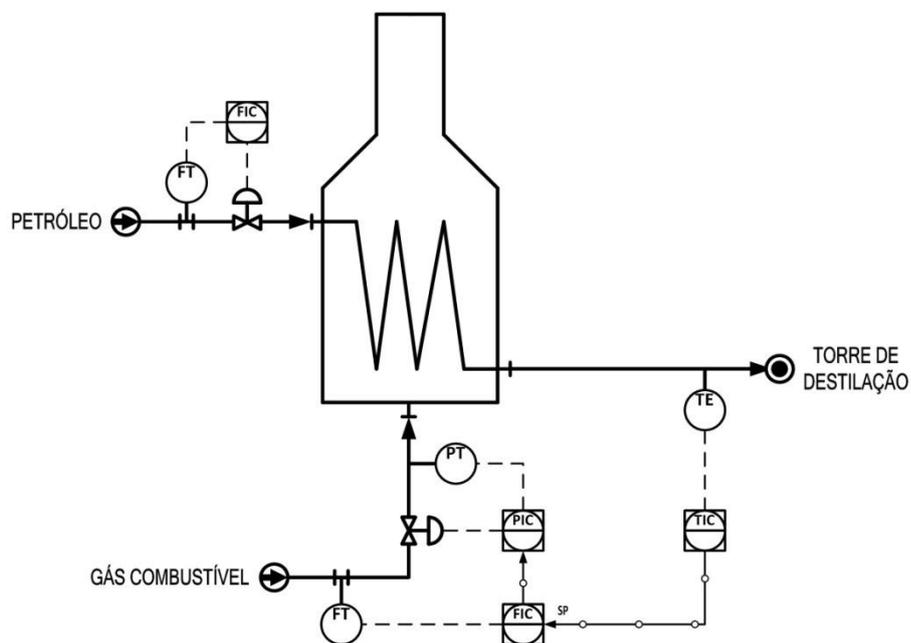


Figura 9. Controle de Combustível com cascata TIC-FIC-PIC (adaptado de Campos e Teixeira, 2010)

Há também outra situação que dificulta o controle de combustão, a presença de combustíveis com alta viscosidade como o óleo combustível. Para prevenir obstruções nas tubulações, esses combustíveis precisam ser aquecidos e mantidos acima de uma determinada temperatura. Se sua vazão cair abaixo de um limite, as perdas de calor pela

tubulação podem resultar numa redução de sua temperatura abaixo da mínima necessária. Para garantir que uma vazão mínima seja mantida o combustível circula pela planta passando por um tanque de armazenamento aquecido (King, 2011).

A tubulação passa por cada queimador que consome uma vazão específica. Como não é prática a medição individual de vazão para cada queimador, são instalados dois medidores de vazão, um antes dos queimadores e outro no retorno ao tanque de armazenamento. O consumo de combustível é determinado pela diferença entre essas medidas. No entanto, como o consumo é pequeno frente a vazão de circulação, o cálculo é propenso a erros de medição (King, 2011).

2.6 Controle de Tiragem e Vazão de Ar

O controle da pressão interna da câmara de combustão do forno é chamado de controle de tiragem (Campos e Teixeira, 2010). Este controle influencia diretamente no controle da vazão de ar para a queima nos queimadores, pois essa tem grande dependência com o gradiente de pressão que se desenvolve ao longo do forno.

Essa pressão interna do forno deve ser mantida ligeiramente abaixo da pressão atmosférica, de maneira a facilitar a entrada de ar nos queimadores, e evitar que haja uma tendência de o combustível sair do forno e ser queimado fora. Isto traria risco aos operadores e às instalações (Campos e Teixeira, 2010). Também não é desejável uma pressão excessivamente baixa, pois nessa condição pode ocorrer a entrada de ar através de vazamentos na carcaça do forno e, caso um PAF esteja operando, podem ocorrer vazamentos no permutador. O ar falso que está a temperatura ambiente, ao entrar no forno se aquece a temperatura dos gases de combustão, “roubando” calor que iria para o fluido de processo.

Basicamente existem quatro tipos de tiragem em fornos industriais:

- NATURAL
- FORÇADA
- INDUZIDA
- BALANCEADA

A mais simples de todas é a Tiragem NATURAL, onde os gases quentes oriundos da combustão, e com uma densidade menor do que o ar, tendem a subir pela chaminé criando uma pressão negativa no interior do forno. Nesse modo de tiragem o ar é puxado por janelas ou virolas pelos lados ou fundo do forno e a pressão é controlada por dampers pneumáticos ou motorizados instalados nas chaminés. O nome “natural” é usado, pois a aspiração de ar para a queima é conduzida sem uso de meios mecânicos (LIPTÁK, 2006). A Figura 10 mostra um forno com tiragem NATURAL.

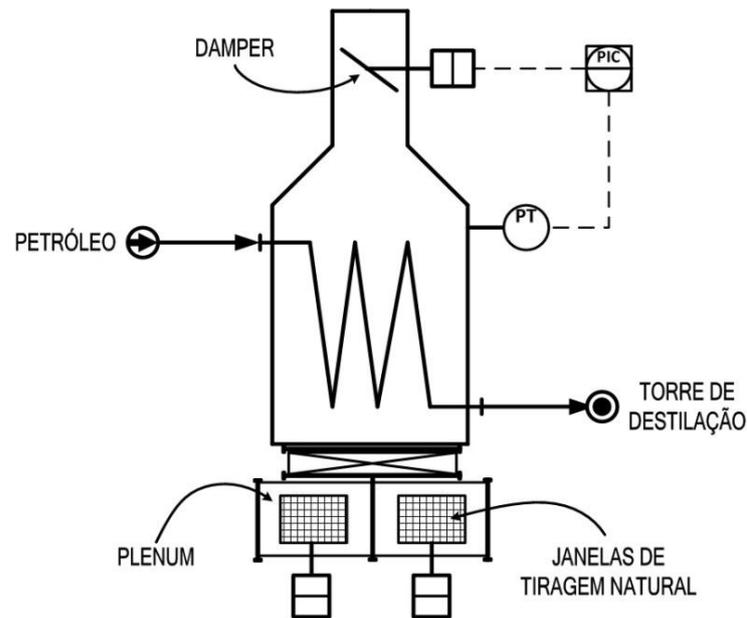


Figura 10. Forno com Tiragem NATURAL

A tiragem FORÇADA emprega o uso de energia mecânica, através de um ventilador (Soprador), para forçar o fornecimento de ar atmosférico para o plenum. A vazão de ar, nesse caso, depende menos do gradiente de pressões desenvolvido ao longo do forno e pode ser controlada variando a rotação do soprador ou modulando a abertura de um damper na sucção do soprador. O controle de pressão continua sendo feito regulando a abertura do damper da chaminé. Na Figura 11 é apresentado um forno em Tiragem FORÇADA.

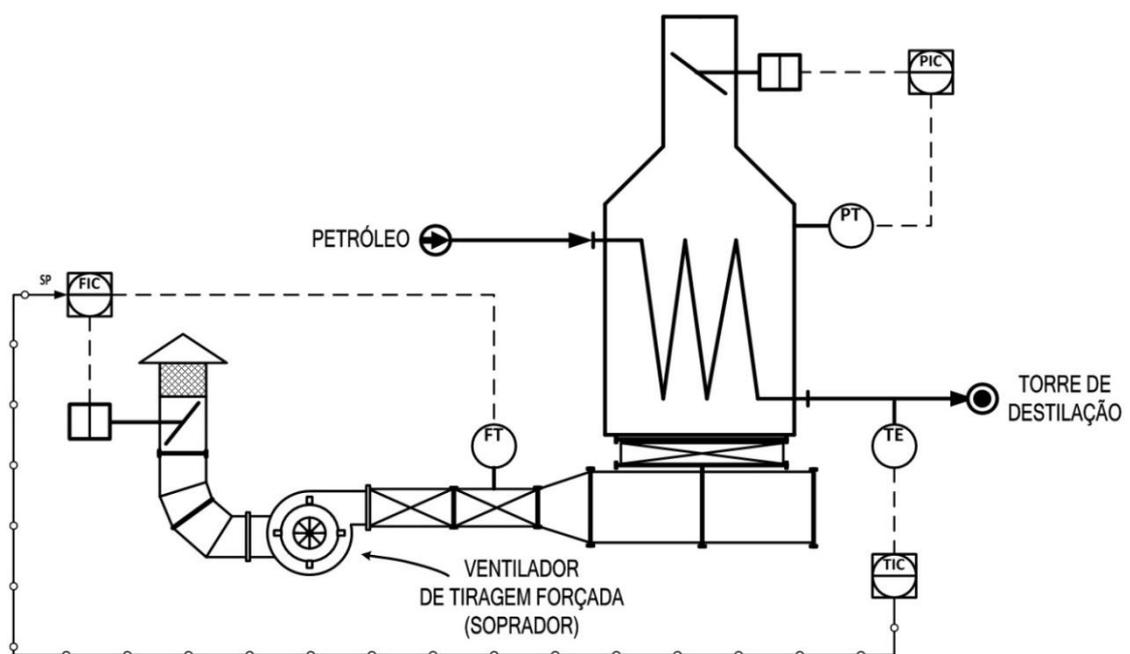


Figura 11. Forno com Tiragem FORÇADA

Dois riscos que devem ser considerados quando este modo de tiragem é implementado são:

- Possível pressurização da câmara de combustão, onde o damper da chaminé pode fechar enquanto o ventilador continua ligado;
- A falta de ar suficiente para a combustão, visto que agora o controle da vazão de ar não é mais natural e está por conta do controlador de vazão de ar.

A tiragem INDUZIDA é pouco empregada. Ela utiliza um ventilador (Exaustor) para gerar uma pressão levemente negativa no interior da câmara de combustão. O gradiente de pressão estabelecido entre o interior e o exterior do forno succiona os gases da combustão direcionando-os para a chaminé. O ar de combustão é alimentado através das janelas de tiragem natural pelo efeito da pressão negativa no interior do forno.

A grande desvantagem desse modo de tiragem é que, da mesma forma que na tiragem NATURAL, tanto a vazão de ar para combustão quanto a pressão na câmara de combustão são manipuladas pelo mesmo controlador. O elemento final de atuação pode ser a variação da rotação do exaustor ou a modulação da abertura de um damper na sucção do exaustor. A Figura 12 apresenta um forno com este modo de tiragem.

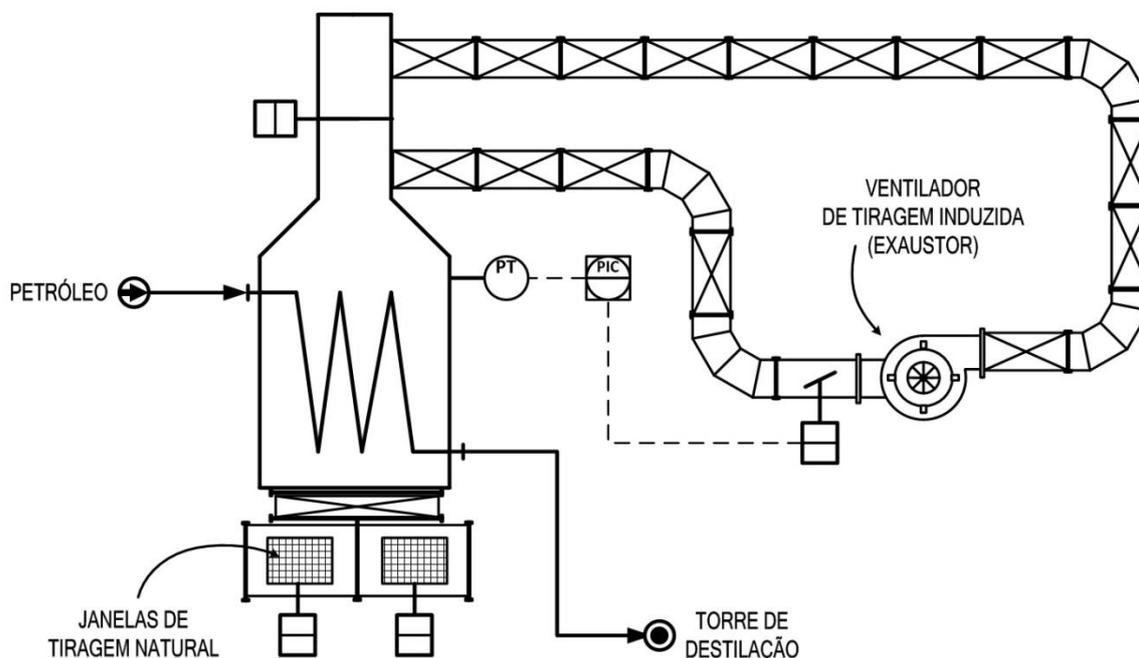


Figura 12. Forno com Tiragem INDUZIDA

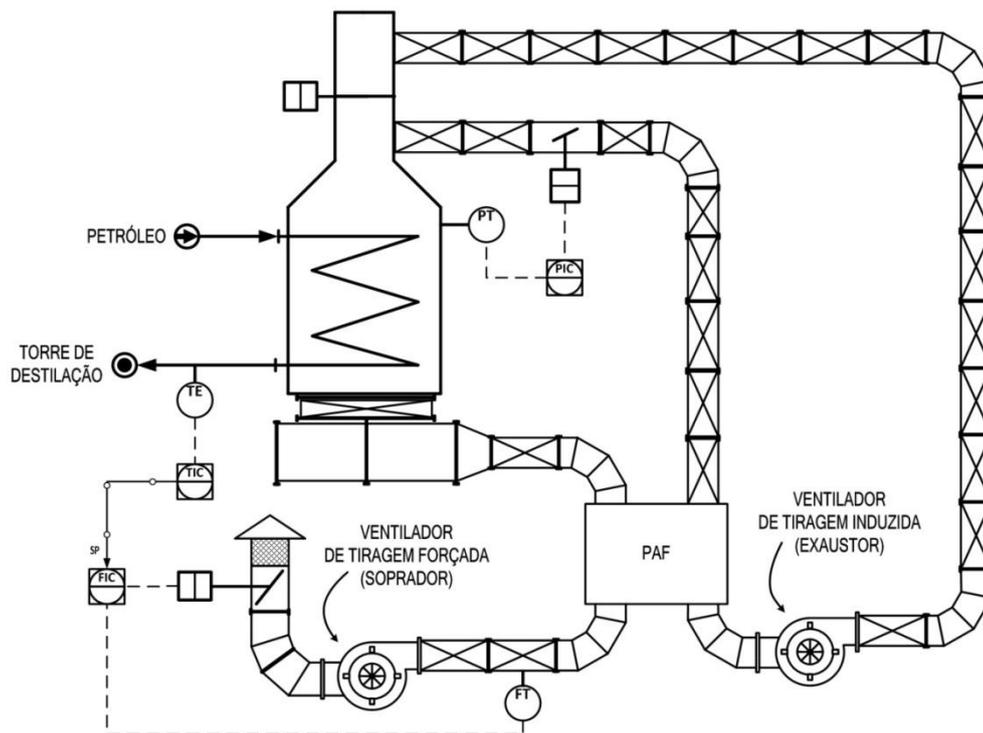


Figura 13. Forno com Tiragem Balanceada

A combinação dos efeitos de tiragem forçada com os efeitos de tiragem induzida é denominada tiragem **BALANCEADA**, esse modo é o que apresenta maior eficiência energética. Nesse caso o ar necessário para a combustão é fornecido pelo Soprador, passando pelo pré-aquecedor de ar antes de entrar no plenum. O controlador de vazão de ar recebe seu *setpoint* do controlador de temperatura do produto e atua variando a rotação do soprador ou manipulando a abertura de um damper na sucção do soprador (Lipták, 2006).

Por outro lado, o Exaustor remove os gases quentes de combustão do forno, fazendo-os passar pelo pré-aquecedor de ar. Em seguida os gases de combustão seguem para a chaminé. A pressão da câmara de combustão é controlada variando a rotação do exaustor ou modulando a abertura de um damper na sucção do exaustor.

A grande vantagem deste modo de tiragem, além de possibilitar vazões maiores de ar para combustão, é a possibilidade de instalação de um pré-aquecedor de ar (PAF), que aumenta consideravelmente a eficiência energética do forno. A Figura 13 ilustra um forno em tiragem **BALANCEADA**.

2.7 Limites Cruzados

Para operar o forno de maneira eficiente e segura é necessário controlar a razão entre o ar e o combustível. Uma maneira de efetuar esse controle é medir a vazão de combustível e colocar um controlador de razão para ajustar a vazão de ar. Porém, a

desvantagem desta estratégia é que a vazão de combustível aumentará antes da do ar, e neste transiente a queima não será completa. O ideal é ajustar o controle de tal forma que exista sempre um excesso de ar (Campos e Teixeira, 2010).

Esta é a idéia do controle chamado de limite cruzado, garantir sempre em regime permanente uma relação ar/gás ótima para queima e nos regimes transitórios uma relação ar/gás maior ou igual a do regime permanente (excesso de ar). A Figura 14 apresenta a estratégia de Limites Cruzados.

Nesta estratégia, a saída do controlador de temperatura do produto do forno regula a vazão desejada de combustível que está associada à carga térmica necessária. Este sinal é enviado para dois seletores, um de maior e outro de menor. A saída do seletor de maior define o *setpoint* do controlador de ar, enquanto a saída do seletor de menor define o *setpoint* do controlador de combustível. A outra entrada do seletor de maior é a vazão atual de combustível. A saída do seletor é dividida pela razão combustível/ar, gerando o ar requerido. A outra entrada do seletor de menor é a vazão de ar requerida multiplicada pela razão combustível/ar, gerando o combustível máximo que aquele ar pode queimar (King, 2011; Campos e Teixeira, 2010).

No caso onde a demanda aumenta, a saída do TIC irá crescer, mas só a saída do seletor de maior irá aumentar, fazendo primeiramente com que entre mais ar no forno. Quando a vazão de ar aumentar, o segundo sinal do seletor de menor aumentará, liberando a colocação do combustível no forno. De forma equivalente, caso a demanda diminua, o sistema fará com que se reduza primeiro a vazão de combustível e só depois a de ar (King, 2011; Campos e Teixeira, 2010).

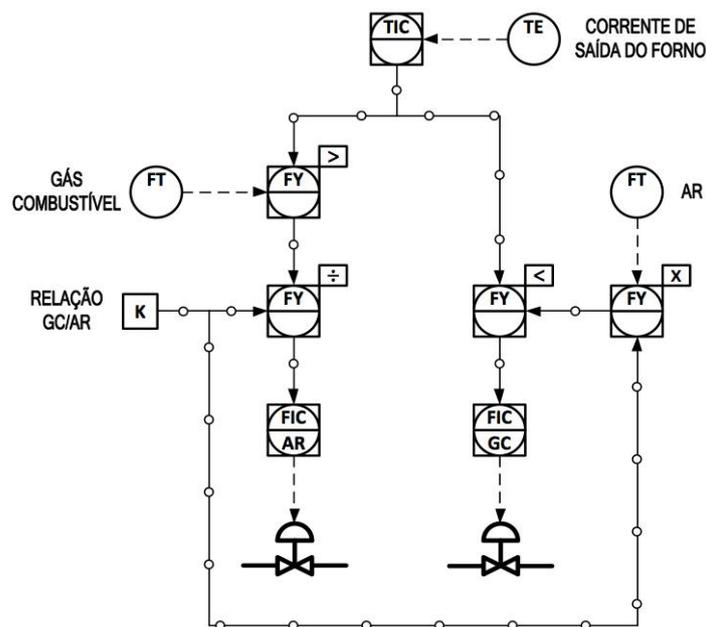


Figura 14. Estratégia de Limites Cruzados

No entanto, mesmo utilizando a estratégia de limites cruzados, é possível que haja uma falta de ar transiente suficiente para levar a mistura à condição subestequiométrica. Devido ao tamanho do atuador da tubulação de ar (damper), a dinâmica da vazão de ar é mais lenta que a dinâmica da vazão de gás combustível (King, 2011). Para compensar as diferenças nas dinâmicas do combustível e ar, pode ser adicionado um módulo de atraso (LAG) dinâmico exponencial. Este módulo é adicionado de maneira a retardar as medições de ar e combustível, garantindo o excesso de ar durante estados transientes, mesmo com grandes atuadores (Lipták, 2006).

2.8 Controle do Excesso de Ar

Caso exista pouco ar disponível para a combustão, parte do combustível não será queimado, o que em pequena proporção representará uma perda econômica, mas em grande proporção aumentará o perigo de explosão. Por outro lado, se existir um excesso de ar muito grande, a eficiência do forno cairá, pois este ar será aquecido sem necessidade (Campos e Teixeira, 2010). O gráfico da Figura 3 demonstra essa idéia.

A Figura 15 mostra o efeito da variação do excesso de ar sobre a composição do gás de combustão, usando metano como exemplo (King, 2011). Pela medição da composição do gás de combustão pode-se avaliar o nível de ar em excesso. A medição mais prática é a de O_2 . Existem analisadores de oxigênio, baseados em eletrodos de óxido de zircônio, que podem ser inseridos diretamente na chaminé e apresentam resposta rápida às variações na composição do gás. Desde que haja excesso de ar, o oxigênio varia aproximadamente linearmente com a vazão de ar facilitando a sintonia do controlador (King, 2011).

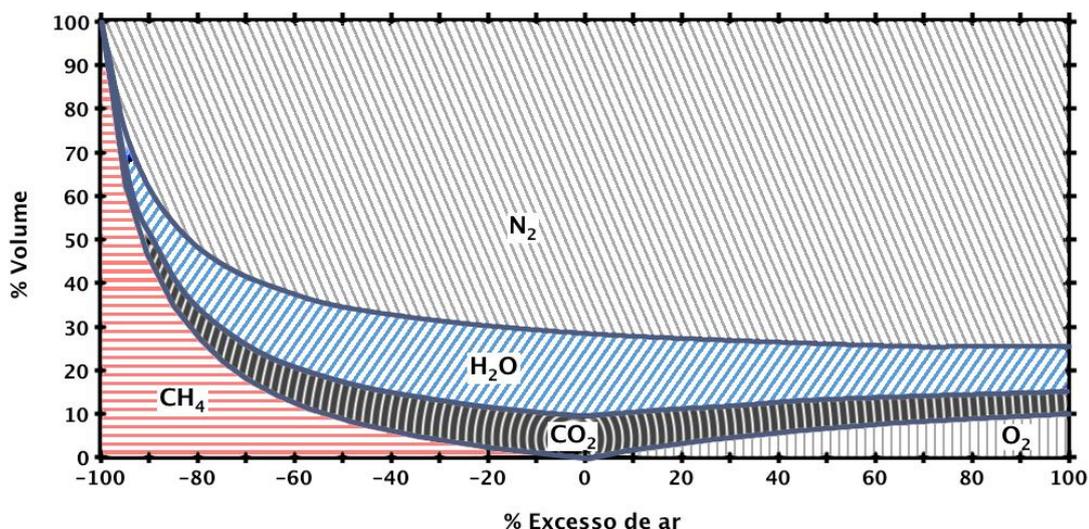


Figura 15. Composição do gás de combustão para queima do metano (adaptado de King, 2011)

O analisador de oxigênio pode atuar ajustando a razão de Ar/Combustível ou atuar como um “bias” na vazão de ar medida, fazendo com que a vazão considerada para o

controle seja maior ou menor do que a medida, de forma a ajustar o excesso de oxigênio (Campos e Teixeira, 2010).

A maior limitação em usar O_2 para inferir o excesso de ar decorre de que ele não dá nenhuma indicação de quão subestequiométrica está a relação ar-combustível. Logo, o controlador irá responder com a mesma velocidade não importando o quão grande é a falta de ar (King, 2011).

Não considerado na Figura 15 é o CO (monóxido de carbono). À medida que a razão ar-combustível se aproxima da mistura estequiométrica, pequenas quantidades de CO serão detectadas no gás de combustão. Isso irá aumentar notavelmente a medida que o ar cai abaixo do mínimo requerido. A medição de CO não pode ser usada sozinha pois, assim como a de O_2 , ela somente tem indicação sob parte do intervalo de operação, indicando zero independente de quanto excesso de ar é fornecido. A Figura 16 mostra a variação da medição de CO e O_2 , no gás de combustão em função da relação ar/combustível (King, 2011).

Quando a medição de CO é disponível, essa pode ser usada para condicionar a variável de processo do controlador de oxigênio.

$$PV = O_2 - K \times CO$$

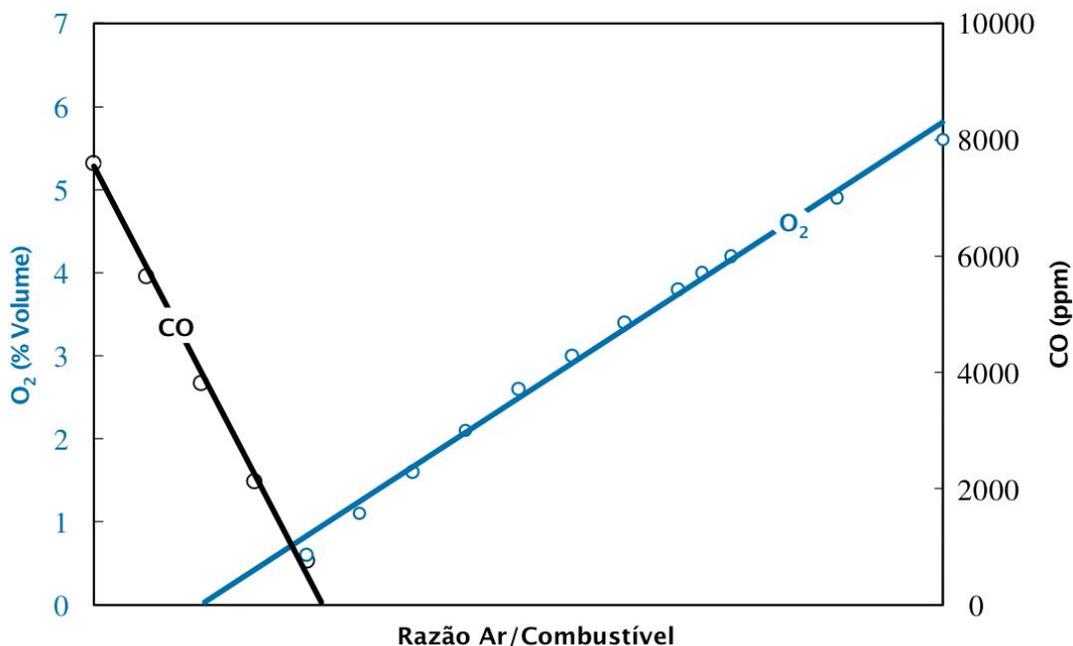


Figura 16. Efeito do ar na análise do gás de combustão (adaptado de King, 2011)

O coeficiente (K) é determinado de modo que o ganho do processo se mantenha aproximadamente constante em todo intervalo de operação. A Figura 17 mostra como a medida condicionada varia com o excesso de ar.

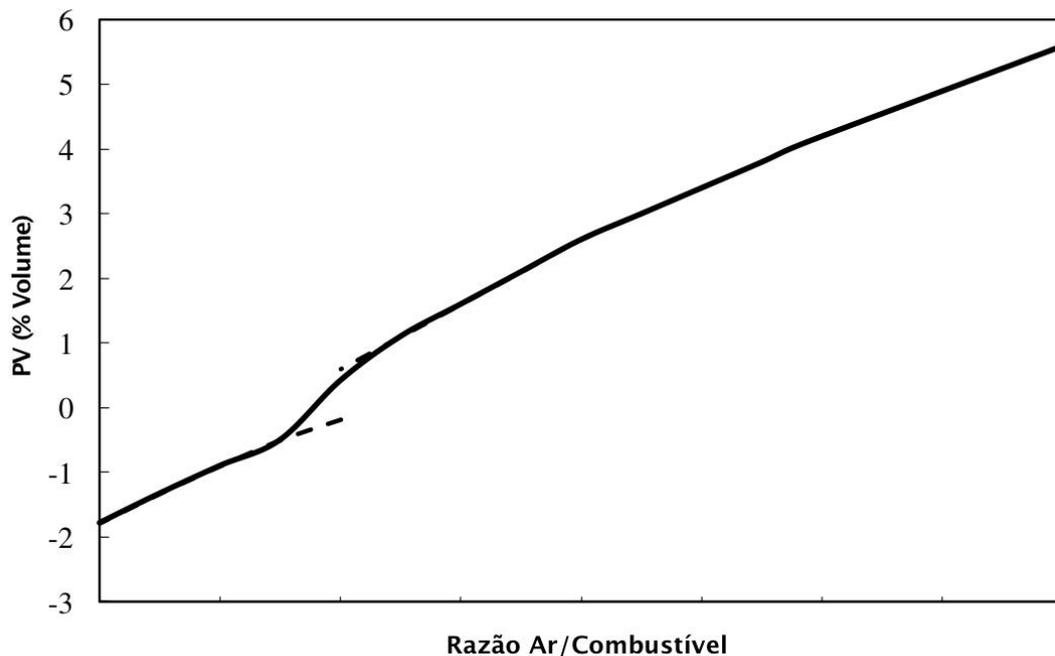


Figura 17. Medida condicionada de oxigênio (adaptado de King, 2011)

Além da inevitável mudança no ganho do processo quando ambos analisadores apresentam uma medição, temos uma relação aproximadamente linear. E o mais importante é que essa se estende por todo o intervalo de operação, fornecendo medições aparentemente negativas de O_2 quando não há ar suficiente (King, 2011).

2.9 Controle do Poder Calorífico do Combustível

A medição direta do Poder Calorífico Inferior (PCI) é uma técnica relativamente cara e apresenta dinâmica de resposta lenta, o que não é desejável para controle. A medição direta emprega calorímetros ou cromatógrafos (King, 2011).

Outro analisador que pode ser empregado para inferir o PCI é o densímetro, sendo este muito mais barato. Além disso, este analisador possui menor custo de instalação e apresenta vantagens para a dinâmica de controle. Densímetros tem uma resposta quase imediata. Qualquer atraso pode resultar na temperatura de saída do forno sentir o distúrbio e tomar uma ação de controle antes que o analisador responda. Essa correção atrasada para a mudança na composição irá causar então um segundo distúrbio (King, 2011).

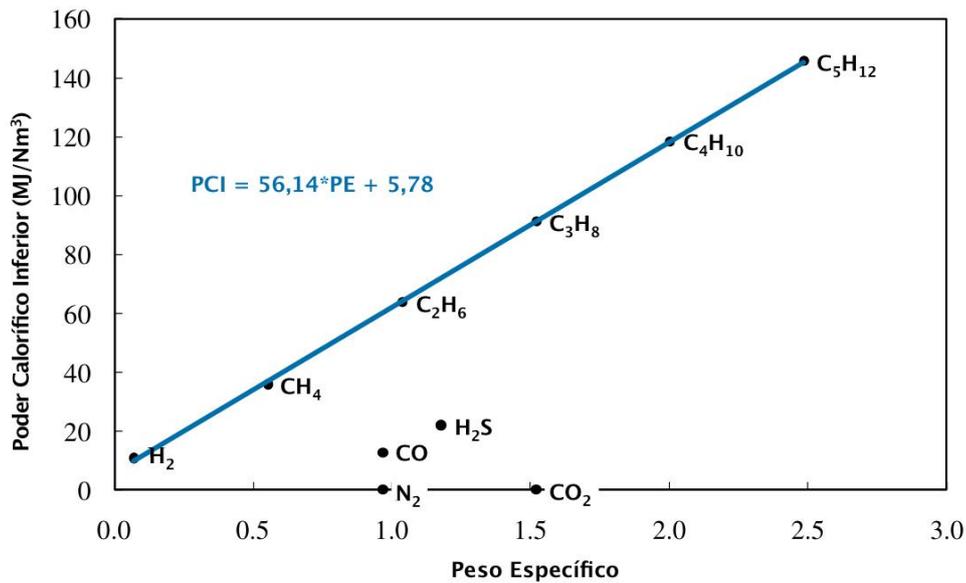


Figura 18. Poder calorífico do gás em base volumétrica (adaptado de King, 2011)

A Figura 18 mostra a relação entre o poder calorífico inferior (PCI), em base volumétrica e o peso específico (PE). Nessa base o poder calorífico de hidrocarbonetos varia com peso específico de maneira que é possível inferir a seguinte relação (King, 2011).

$$PCI = aPE + b$$

Os coeficientes podem ser calculados a partir dos dados de PCI e PE de gases puros. Nas unidades de engenharia usadas pelo gráfico, a é 56,14 e b é 5,78. No entanto esses valores devem ser usados somente como guia. Os valores reais irão depender de quais outros componentes estão presentes no combustível. A presença de inertes como N₂ e CO₂ irá mudar essa relação, assim como qualquer combustível que não seja um hidrocarboneto como CO e H₂S (King, 2011)

Se o combustível contém concentração significativa de gases que não sejam hidrogênio e hidrocarbonetos, cuja concentração pode variar rapidamente, então o PCI inferido pode não ser confiável. Por exemplo, se ocorrer um aumento considerável nos teores de N₂ ou CO₂ do gás combustível, o PE irá aumentar, mas o PCI irá reduzir. Uma possível solução para este problema seria a utilização de um analisador de Índice de Wobbe (King, 2011).

2.10 Controle Feedforward

A alimentação do forno geralmente é pré-aquecida em permutadores de calor com correntes de outras partes do processo. Qualquer mudança na vazão ou entalpia dessas correntes pode causar um distúrbio. Esse distúrbio provavelmente será traduzido em um

impacto semelhante na temperatura de saída do forno, e possivelmente essa alteração pode ser propagada novamente de volta ao forno pela integração energética (King, 2011).

Quando a razão entre o tempo morto e a constante de tempo do processo for grande, o controle *feedback* não é capaz de evitar grandes desvios da variável controlada em relação ao *setpoint* em função das perturbações. Logo, com o objetivo de minimizar estes desvios, pode ser interessante medir as principais perturbações e implementar um controle *feedforward* (Campos e Teixeira, 2010).

Nesse tipo de controle, um modelo simplificado do processo é usado para prever o efeito de distúrbios antes que esses possam alcançar e alterar a variável controlada. O controle *feedback*, por sua vez, precisa primeiro detectar um erro na variável de processo controlada antes que possa iniciar uma ação corretiva (Campos e Teixeira, 2010).

Um exemplo simples de controle *feedforward* é apresentado na Figura 19. Aqui a malha *feedback* consiste no controlador de temperatura (TIC-1) que gera o *setpoint* para o controlador de vazão de combustível (FIC-2). Quando a vazão de carga para o forno muda (essa vazão é uma variável independente nesse sistema), surge a necessidade de mudar a taxa de queima do combustível (Lipták, 2006).

A malha *feedforward* inclui o transmissor de vazão de carga (FT-1), o qual detecta a mudança na vazão de carga e essa é multiplicada por uma constante em FY-1. Essa constante se relaciona com o poder calorífico do gás combustível e se uma medição de poder calorífico estiver disponível (AT-1) a correção pode ser automaticamente obtida. Esse bloco de multiplicação determina a relação entre uma variação na vazão de carga e a correspondente variação necessária na pressão de gás combustível. Esse é um valor determinado empiricamente e pode ser ajustado no campo (Lipták, 2006).

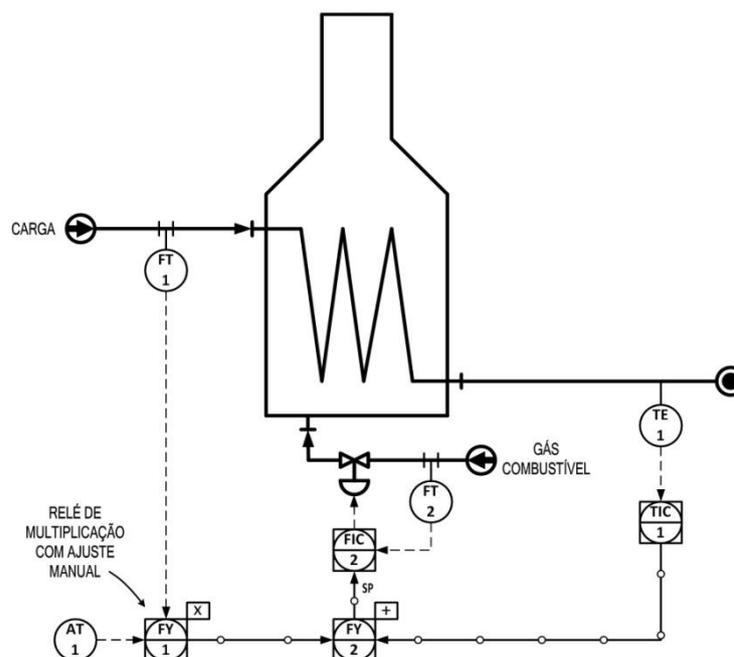


Figura 19. Estratégia de controle *Feedforward* (adaptado de Lipták, 2006)

O sinal modificado em FY-1 é somado em FY-2 com o sinal de saída do controlador de temperatura, ajustando uma nova vazão de gás combustível através do FIC-2.

Sem a parte *feedforward* da malha (FY-1 e FY-2), o ajuste necessário na demanda de combustão somente seria feito muito mais tarde, após o controlador de temperatura (TIC-1) detectar o erro na variável controlada.

2.11 Estratégias de Controle Avançadas

A Figura 20 apresenta uma estratégia aprimorada para os controles de combustão de um forno aquecedor de petróleo, incluindo as estratégias de controle *feedforward*, limites cruzados, correção de excesso de ar, medição do poder calorífico e LAG.

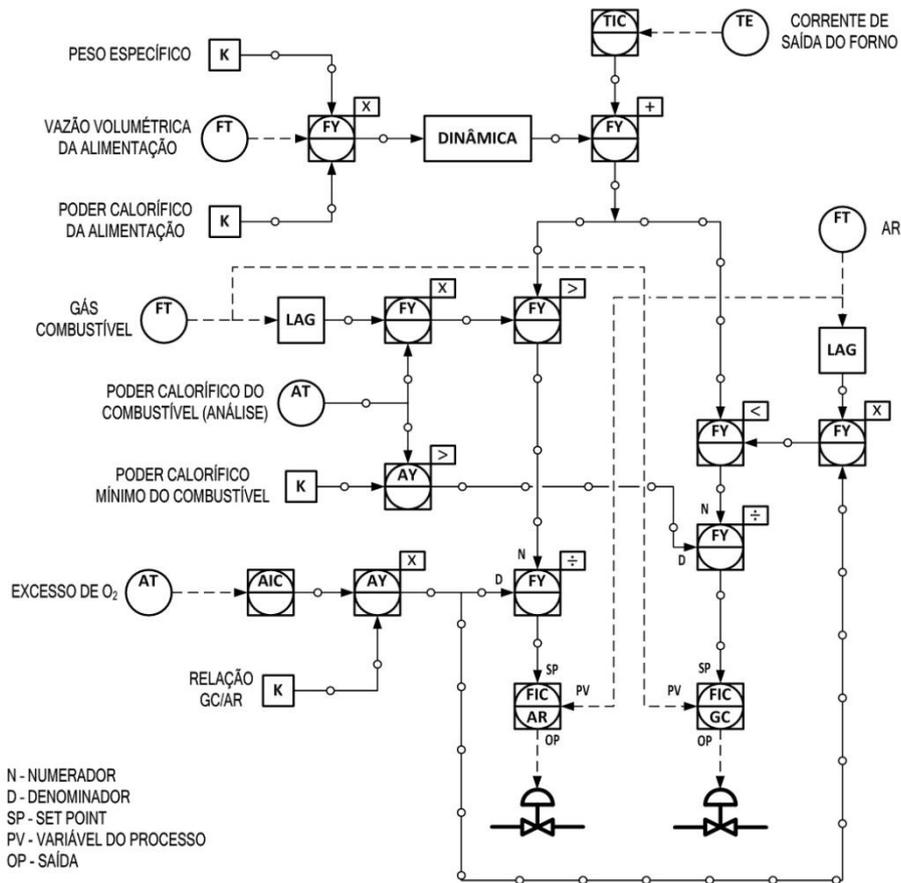


Figura 20. Controle com Limites Cruzados Aprimorado (adaptado de Lipták, 2006)

Outras estratégias de Controle Avançado encontradas na prática em Fornos Industriais são o Controle de Balanceamento de Passes e o Controle baseado em Modelos de Processo (MPC).

3 Proposição de uma Estratégia de Controle

3.1 Descrição dos Fornos

O sistema de controle estudado é aplicado em fornos de aquecimento de petróleo, os quais possuem sistemas independentes de controle e distribuição de combustível. Entretanto, o sistema de distribuição do ar para queima, pré-aquecimento de ar e coleta do gás de combustão é compartilhado entre os fornos. As Figuras 21 e 22 apresentam uma representação simplificada dos fornos estudados ilustrando a instrumentação utilizada para controle.

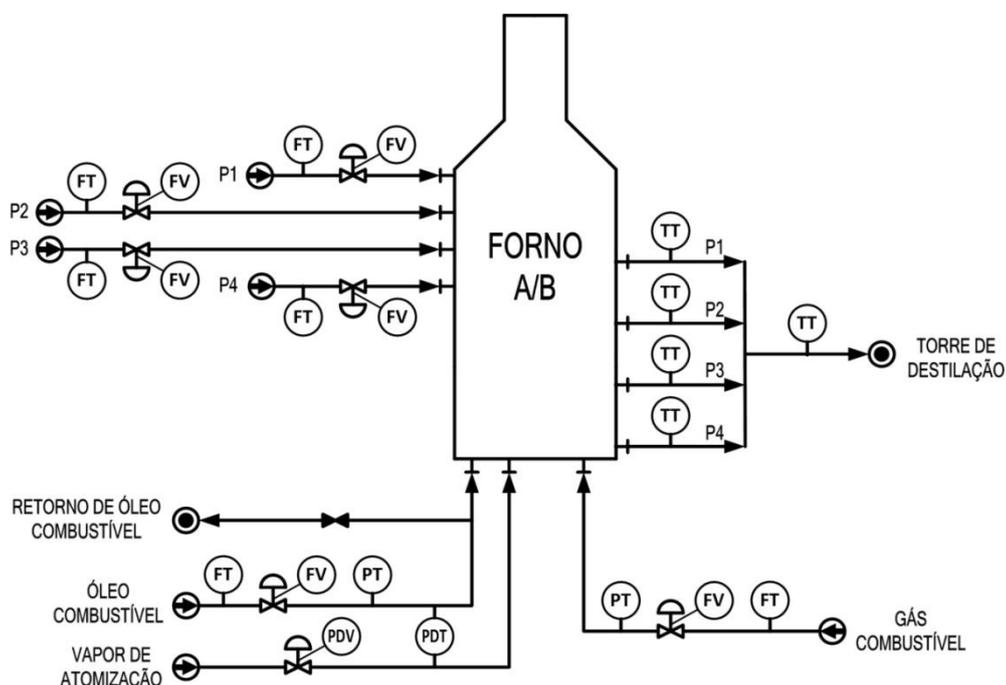


Figura 21. Representação da carga e combustíveis dos fornos estudados

A carga de petróleo é dividida em 4 passes em cada forno. A vazão de petróleo em cada passe é controlada por uma estratégia de balanceamento de passes que busca a equalização das temperaturas da saída dos passes, atuando na FV de cada passe. Com a equalização das temperaturas em cada passe o forno opera com maior eficiência e pode operar mais tempo sem manutenção, pois os passes são deteriorados igualmente ao longo da campanha. Na saída de cada forno as correntes de cada passe se juntam novamente e seguem para a torre de destilação.

A principal variável controlada nesse tipo de forno é a temperatura do petróleo após a junção dos passes. Esta variável gera a demanda de combustão do forno, sinal que define a quantidade de combustível e ar que devem ser queimados para manter a temperatura do efluente do forno.

Os combustíveis que podem ser queimados nesses fornos são gás combustível (GC) e óleo combustível (OC). A estratégia de controle da vazão de ambos combustíveis utiliza

um controlador de vazão, que recebe o sinal da demanda de combustão, em cascata com um controlador de pressão, que controla a FV do combustível. A demanda de combustão é distribuída entre os combustíveis de modo a priorizar a queima de gás combustível.

O sistema de OC mantém uma vazão mínima circulando pela unidade, regulada pela válvula manual globo representada na Figura 21, para garantir que o OC não solidifique dentro da tubulação. O vapor de média para a tomição é utilizado quando o combustível queimado é OC, a vazão de vapor é controlada mantendo uma diferença de pressão entre o OC e o vapor.

Os modos possíveis de tiragem para os fornos são: NATURAL, FORÇADA e BALANCEADA. O forno A pode assumir um modo de tiragem independentemente do outro forno, mas o forno B só pode passar para tiragem BALANCEADA se o forno A também estiver em tiragem BALANCEADA. A passagem entre os modos de tiragem deve seguir a seguinte ordem, primeiro tiragem NATURAL, seguida de FORÇADA e por fim BALANCEADA. Quando o forno sai de tiragem BALANCEADA para FORÇADA ou NATURAL ou sai de tiragem FORÇADA para NATURAL dizemos que o modo de tiragem do forno degradou.

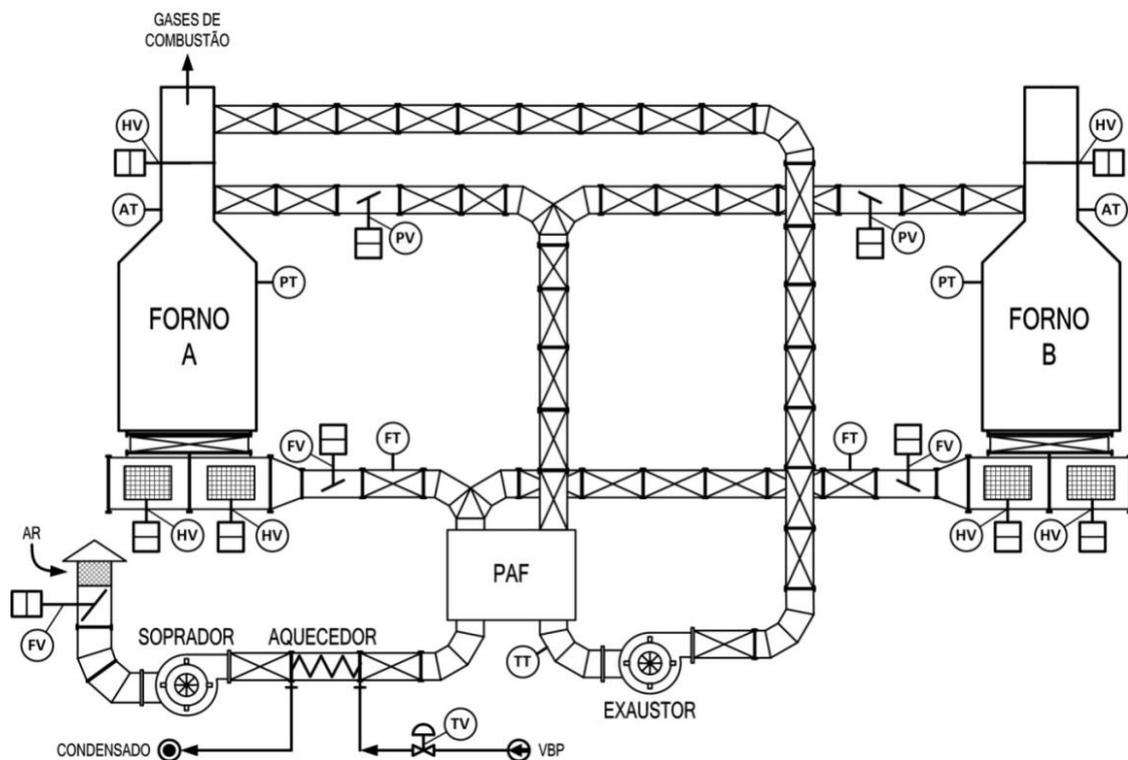


Figura 22. Representação dos sistemas de ar e gás de combustão dos fornos estudados

No modo de tiragem NATURAL a admissão de ar para a queima é feita através das “janelas de tiragem natural”, dampers instalados na lateral do plenum. Nesse modo o ar para combustão é auto-aspirado devido ao gradiente de pressão que se forma ao longo da câmara de combustão. O controle de pressão atua nos dampers de cada chaminé.

Na tiragem FORÇADA um ventilador SOPRADOR aspira altas vazões de ar atmosférico para o sistema. Na sucção do SOPRADOR é instalado um damper para modular a vazão total de ar entregue aos fornos. O ar soprado pelo SOPRADOR passa por dois permutadores (só utilizados no modo de tiragem BALANCEADA) e então é bifurcado, distribuindo sua vazão entre os dois fornos. O controle de distribuição da vazão de ar entre os fornos é feito por dampers a jusante da bifurcação de ar. Em cada forno, o ar entra no plenum, abastecendo os queimadores combinados de GC e OC. Nesse modo de tiragem, o controle de pressão também atua nos dampers de cada chaminé.

No modo de tiragem BALANCEADA o ar soprado pelo SOPRADOR pode ser aquecido em dois permutadores antes de ser bifurcado. O primeiro permutador é um AQUECEDOR de ar com vapor de baixa, que normalmente não opera. O segundo é um pré-aquecedor de ar regenerativo LjungstromPAF, que aquece o ar ao mesmo tempo que resfria os gases de combustão.

A função do AQUECEDOR é garantir uma temperatura mínima dos gases de combustão na saída do PAF, pré-aquecendo o ar atmosférico antes desse entrar no PAF. A condição de temperatura mínima dos gases de combustão surge quando o combustível queimado nos fornos é o óleo combustível. Nesse caso o gás de combustão possui concentração considerável de SO_x e NO_x, gases que, em contato com água líquida, formam ácidos corrosivos. Como água também faz parte dos gases de combustão, é preciso garantir que essa se mantenha na forma de vapor até sair pela chaminé, e isso é feito controlando uma temperatura mínima no gás saindo do PAF.

Na tiragem BALANCEADA os dampers das chaminés são totalmente fechados e o gás saindo da seção de convecção de cada forno, a montante dos dampers das chaminés, é succionado por um ventilador EXAUSTOR. Antes de passar pelo EXAUSTOR o gás de combustão é resfriado no PAF, pré-aquecendo o ar para queima. Em seguida o gás é encaminhado para a chaminé do forno A, num ponto acima do damper da chaminé. O controle de pressão nesse modo atua em dampers localizados a montante da junção do gás de combustão de cada forno.

Para garantir uma quantidade adequada de excesso de ar disponível para a combustão existe um analisador de oxigênio acima da seção de convecção de cada forno. Com a mudança da composição da mistura de combustível a relação estequiométrica ar/combustível muda, levando a sobra ou falta de ar. O analisador sente essa variação e o controlador de excesso de ar faz a devida correção na estratégia de controle.

3.2 Caracterização do Problema de Controle

A estratégia de controle desenvolvida para os fornos é compreende grande parte das tecnologias existentes e funciona bem para uma ampla faixa operacional, porém quando deseja-se maximizar a produção, o forno se torna o gargalo da unidade.

O problema que surge quando a carga da unidade é maximizada é a saturação do controlador de vazão total de ar para os fornos, devido ao dimensionamento do sistema

de fornecimento de ar para o forno. A Figura 23 apresenta uma situação onde a carga é aumentada gradativamente.

Com o aumento da carga, a demanda de combustão aumenta para manter a temperatura do petróleo na saída do forno. Esse aumento na demanda de combustão eleva o *setpoint* do controlador de vazão total de ar, o que leva a abertura da FV de ar. Esse comportamento é esperado, no entanto o problema surge quando a carga chega em torno de 85% da carga máxima da unidade, ponto em que a FV de ar já está toda aberta.

Nessa situação, um aumento adicional na carga da unidade irá necessitar de mais ar para manter a temperatura do petróleo na saída. O sistema de controle irá elevar o *setpoint* do controlador de vazão total de ar, porém este não consegue mais resultado algum sobre sua variável controlada, pois seu elemento de atuação está saturado.

Fica evidente ao observar a Figura 23 que o sistema não consegue aumentar suficientemente a vazão de ar, à medida que a carga aumenta. Com isso, a temperatura, chega a cair mais de 10°C e começa a apresentar notável oscilação. Vale notar que a temperatura do petróleo na saída do forno influencia diretamente no fracionamento do petróleo na torre de destilação. A instabilidade dessa variável leva instabilidade para diversas malhas de controle subsequentes.

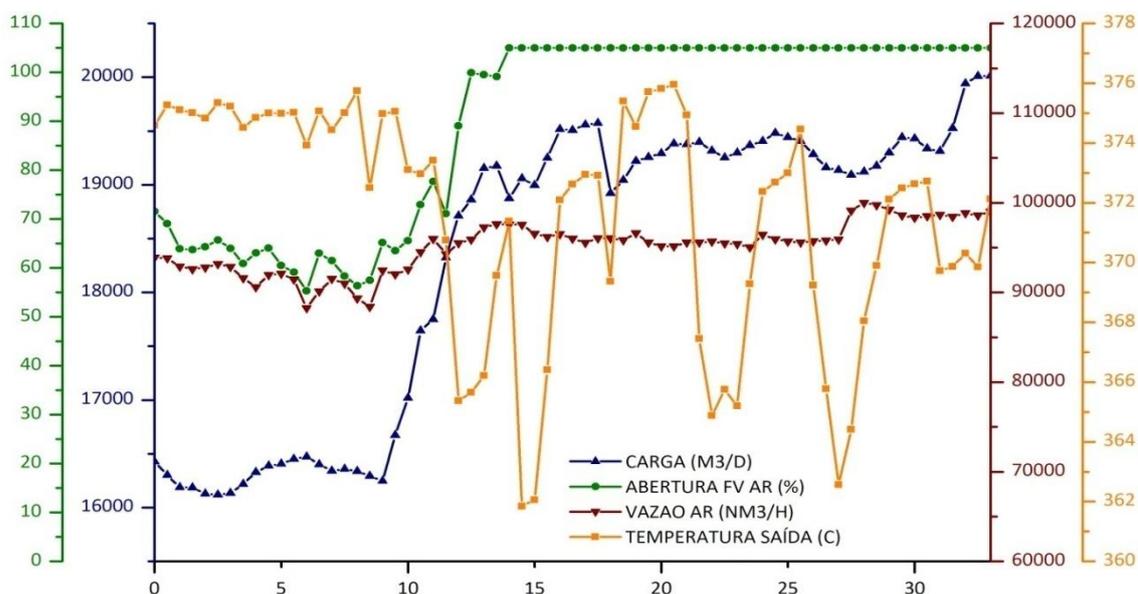


Figura 23. Efeito do Aumento de Carga

Uma solução para este problema seria a instalação de um soprador de ar mais potente, a redução das perdas de carga nas tubulações que levam ao plenum e sanar vazamentos de ar nos permutadores e tubulações de fornecimento de ar. No entanto, essa solução possui um alto custo de implementação e só pode ser realizada com a parada dos fornos, portanto precisa de um estudo de viabilidade, podendo levar vários anos até ser aprovada.

Além do principal problema, a limitação no suprimento de ar, outro problema que surge freqüentemente na operação dos fornos é a condição de *LowOverride* (LO) no controlador de temperatura de saída dos fornos. Este problema está relacionado com a estratégia de limites cruzados. A condição de LO é atingida quando em um determinado instante a vazão de ar atual é menor que a vazão de ar estequiométrica (calculada a partir da vazão de combustível atual).

A Figura 24 apresenta uma situação onde o ar fornecido ao forno A começa a cair, até ficar menor que o ar requerido para a queima. Nessa condição o controlador da temperatura de petróleo na saída do forno entra no modo LO (indicado pelas faixas de cor cinza), cortando combustível. Essa lógica está correta e garante a segurança do forno. No entanto, quando isso ocorre com uma freqüência alta é um sinal de que algo está errado com o sistema de fornecimento de ar.

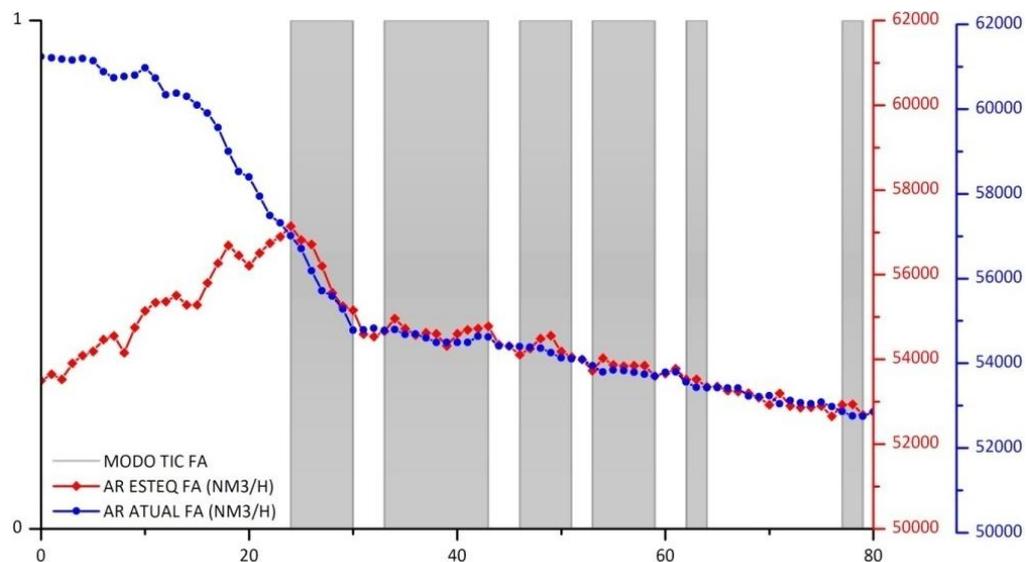


Figura 24. Surgimento da condição de *LowOverride*

3.3 Objetivos dos Controladores Estudados

Os controladores que tem envolvimento direto com o sistema de fornecimento de ar são: o controlador de Distribuição de Ar entre os Fornos e o controlador de Vazão total de Ar.

3.3.1 Controlador de Distribuição de Ar entre os Fornos

O controlador de distribuição de ar para os fornos recebe o sinal das diferenças de vazão de ar atual e requerido e atua de forma a manter a razão de vazões entre os ramais dos fornos. A Figura 26 apresenta o cálculo da PV deste controlador.

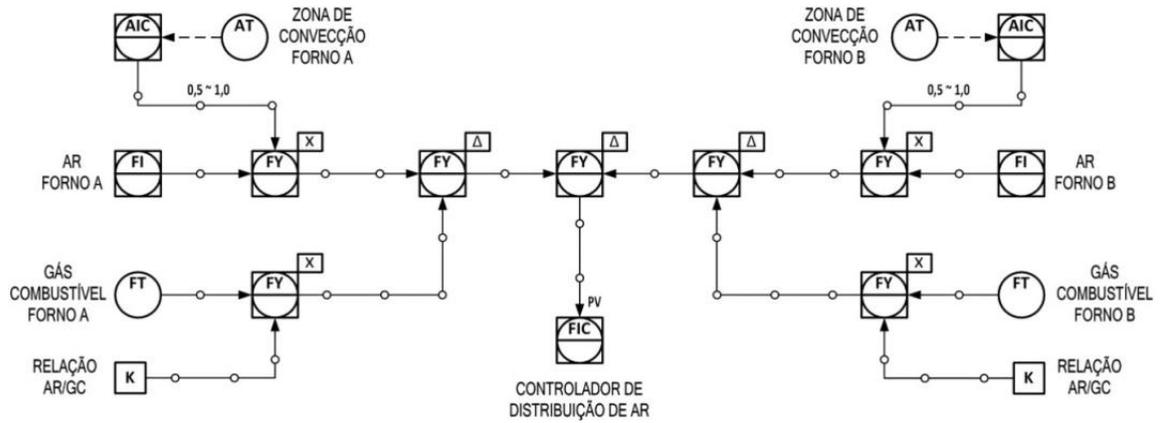


Figura 25. Cálculo da PV do Controlador de Distribuição de Vazão de Ar

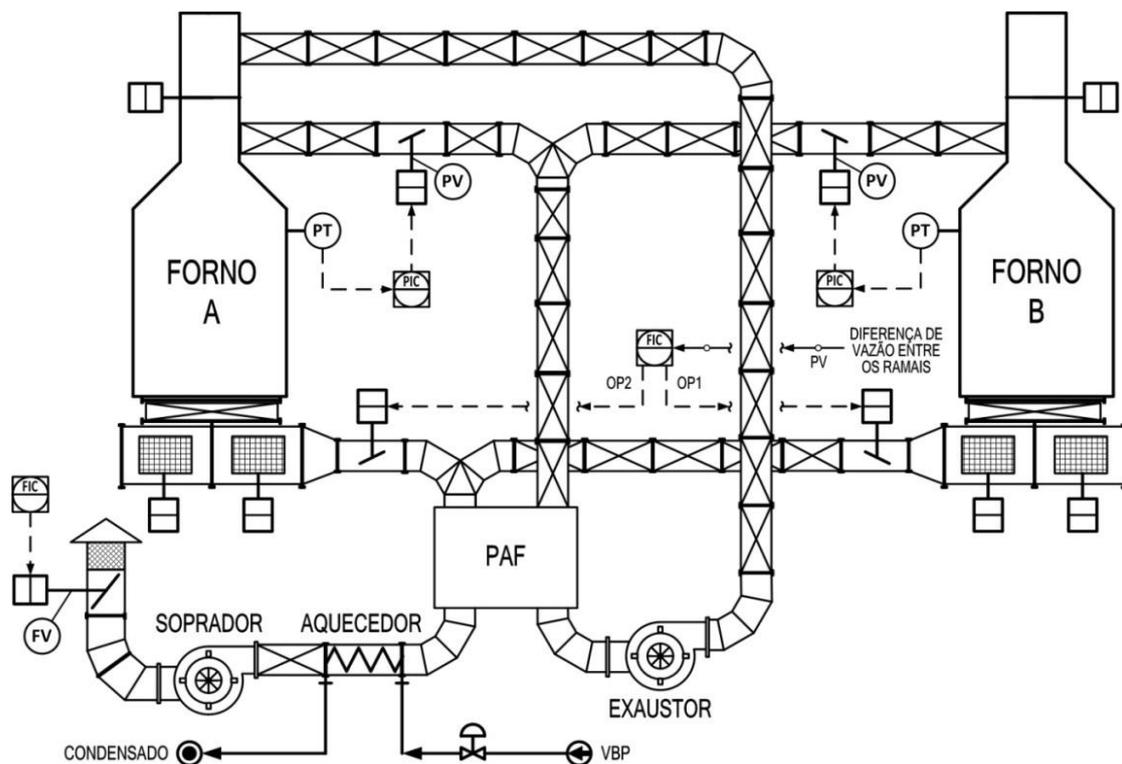


Figura 26. Estratégia atual para Distribuição de Ar

A saída do controlador é dividida em dois elementos de atuação, utilizando uma estratégia split range. Os elementos de atuação são uma válvula na entrada do plenum de cada forno. Desta forma, o controlador pode fechar uma ou outra de modo a regular a distribuição na vazão de ar entre os fornos. A Figura 27 traz uma representação da estratégia atual para distribuição de ar.

Hoje em dia, com as condições da planta operando com carga máxima, a vazão de ar é fator limitante operacional. Logo, a restrição de qualquer uma das válvulas de entrada do plenum acarreta em um aumento da perda de carga na seção de entrada de ar e conseqüentemente uma redução na vazão total de ar para os fornos. Portanto, esse controlador é sempre mantido em modo manual mantendo ambas as válvulas abertas.

3.3.2 Controlador de Vazão total de Ar para os Fornos

A soma da vazão de ar corrigida para excesso de ar de cada forno se torna o sinal da PV do controlador de vazão total de ar para os fornos. Por outro lado, o SP (a demanda de ar) é definido pelo sinal de saída do TIC do petróleo na saída do forno ou pela vazão de ar requerida para queima da vazão atual de combustível, o que for maior. A Figura 28 apresenta os cálculos do SP e PV desse controlador.

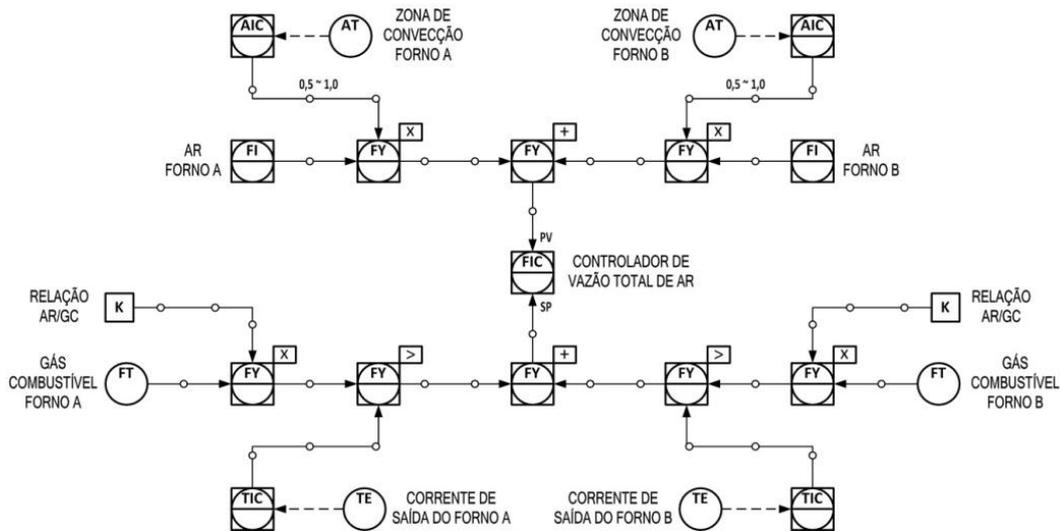


Figura 27. Cálculo da PV e SP do Controlador de Vazão Total de Ar

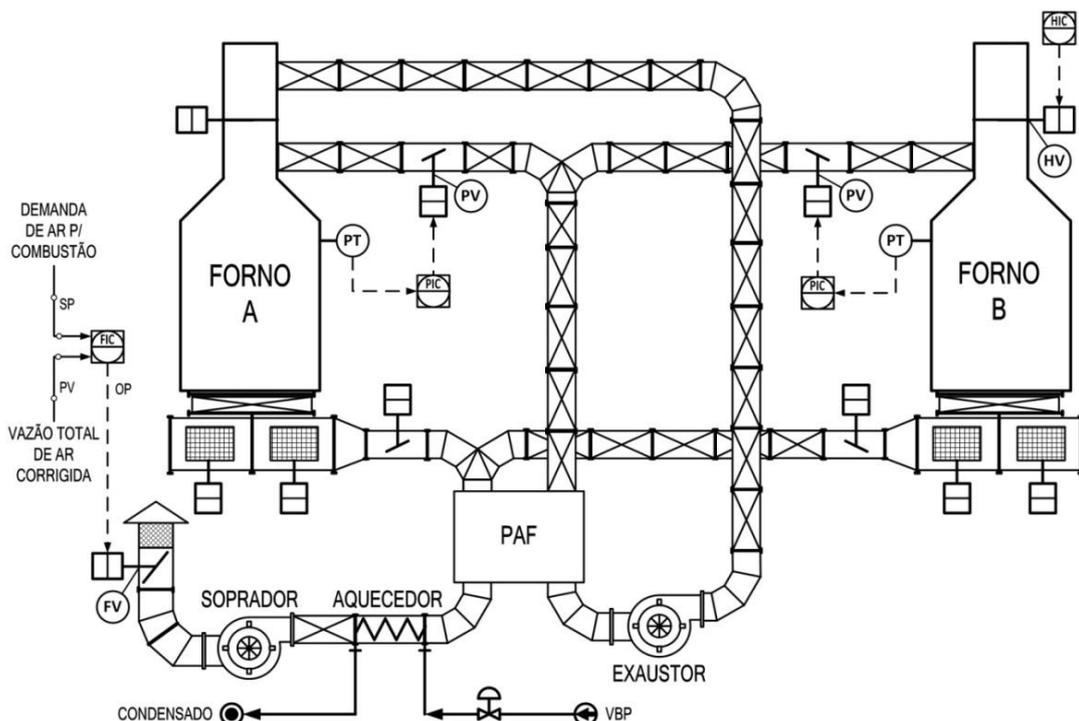


Figura 28. Estratégia Atual para Controle da Vazão Total de Ar

O sinal de saída do controlador de vazão total de ar atua no damper na sucção do SOPRADOR, como ilustrado na Figura 29. Porém, como visto anteriormente, a abertura total desse atuador ocorre antes de atingir a carga máxima da unidade. Sabendo disso, os operadores da planta colocam esse controlador em modo manual com abertura máxima quando o sinal de saída desse chega em valores próximos a 100%. A partir desse ponto, a vazão total de ar deixa de ser uma variável manipulada e passa a ser um distúrbio que afeta fortemente a estabilidade da temperatura de saída dos fornos e, conseqüentemente os processos subseqüentes.

3.4 Variáveis Controladas e Manipuladas

As Figuras 21 e 22 representam os elementos controlados e manipulados para os diversos modos de tiragem. As variáveis manipuladas e controladas mudam de acordo com o modo de tiragem. As Tabelas 1, 2 e 3 resumem a relação entre as variáveis controladas e manipuladas.

Tabela 1. Variáveis Controladas versus Manipuladas em Tiragem NATURAL

| Variável Controlada | Variável Manipulada |
|--|---|
| Pressão na câmara do Forno A | % Abertura da HV da chaminé do Forno A |
| Pressão na câmara do Forno B | % Abertura da HV da chaminé do Forno B |
| Vazão de combustível no Forno A | % Abertura da FV de OC ou GC do Forno A |
| Vazão de combustível no Forno B | % Abertura da FV de OC ou GC do Forno B |
| Temperatura de saída do produto no Forno A | Demanda de combustão no Forno A |
| Temperatura de saída do produto no Forno B | Demanda de combustão no Forno B |

Tabela 2. Variáveis Controladas versus Manipuladas em Tiragem FORÇADA

| Variável Controlada | Variável Manipulada |
|---|--|
| Vazão total de ar | % Abertura da FV na sucção do SOPRADOR |
| Distribuição da vazão de ar entre os fornos | % Abertura das FVs após bifurcação do ar |
| Pressão na câmara do Forno A | % Abertura da HV da chaminé do Forno A |
| Pressão na câmara do Forno B | % Abertura da HV da chaminé do Forno B |
| Excesso de O ₂ no Forno A | Bias na vazão de ar do Forno A |
| Excesso de O ₂ no Forno B | Bias na vazão de ar do Forno B |
| Vazão de combustível no Forno A | % Abertura da FV de OC ou GC do Forno A |
| Vazão de combustível no Forno B | % Abertura da FV de OC ou GC do Forno B |
| Temperatura de saída do produto no Forno A | Demanda de combustão no Forno A |
| Temperatura de saída do produto no Forno B | Demanda de combustão no Forno B |

Tabela 3. Variáveis Controladas versus Manipuladas em Tiragem BALANCEADA

| Variável Controlada | Variável Manipulada |
|---|--|
| Vazão total de ar | % Abertura da FV na sucção do SOPRADOR |
| Distribuição da vazão de ar entre os fornos | % Abertura das FVs após bifurcação do ar |
| Pressão na câmara do Forno A | % Abertura da PV do Forno A |
| Pressão na câmara do Forno B | % Abertura da PV do Forno B |
| Excesso de O ₂ no Forno A | Bias na vazão de ar do Forno A |
| Excesso de O ₂ no Forno B | Bias na vazão de ar do Forno B |
| Vazão de combustível no Forno A | % Abertura da FV de OC ou GC do Forno A |
| Vazão de combustível no Forno B | % Abertura da FV de OC ou GC do Forno B |
| Temperatura de saída do produto no Forno A | Demanda de combustão no Forno A |
| Temperatura de saída do produto no Forno B | Demanda de combustão no Forno B |

3.5 Propostas de Solução dos Problemas Encontrados

Com base nos problemas encontrados na malha de controle estudada e após estudar todas as variáveis disponíveis para manipulação, desenvolvi juntamente com meu orientador propostas para os problemas de vazão total de ar e distribuição de ar entre os fornos.

3.5.1 Proposta para o problema de Vazão Total de Ar

A proposta para resolver o problema que surge quando o controle de vazão total de ar satura e passa a agir como distúrbio evolui a implementação de um split range na saída do controlador. A Tabela 4 relaciona os 3 atuadores que serão manipulados pela nova estratégia. Essa proposta somente considera o modo de tiragem BALANCEADA, pois esse é o mais utilizado.

Tabela 4. Proposta para o Controle da Vazão Total de Ar

| Variável Controlada | Variável Manipulada |
|---------------------|---|
| Vazão total de ar | % Abertura da FV na sucção do SOPRADOR |
| | SP (-2 a -20) para os controladores de Pressão do Forno A e B |
| | % Abertura da HV da chaminé do Forno B |

Na nova estratégia, o controlador de vazão total de ar irá manipular a abertura da FV na sucção do SOPRADOR como previamente já o fazia. Em seguida, quando a FV chegar a 100% de abertura, o controlador começa a reduzir o *setpoint* dos controladores de pressão de ambos os fornos. Com a redução da pressão das câmaras de combustão, mais ar é succionado para os fornos.

Quando a pressão atingir o limite inferior de -20 mmCA, o controlador passa a atuar no damper da chaminé do forno B. A abertura dessa válvula possibilita aumentar a tiragem, succionando mais ar para os fornos. A desvantagem da abertura dessa válvula é que o gás de combustão que sairá pela chaminé do forno B não irá trocar calor com o ar para combustão, desperdiçando sua energia térmica. Mas, por outro lado, com o aumento da tiragem é possível aumentar a carga da unidade, processando mais petróleo. A Figura 30 ilustra a estratégia proposta.

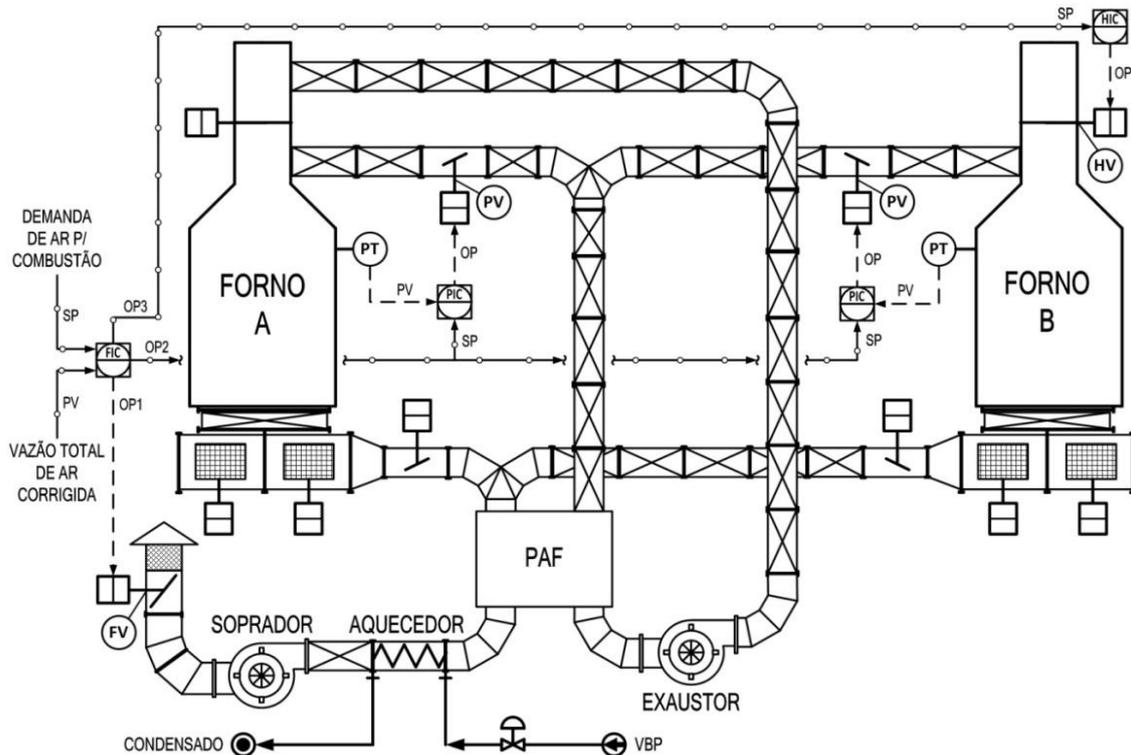


Figura 29. Proposta para a Estratégia da Vazão Total de Ar

3.5.2 Proposta para o problema de Distribuição de Ar entre os Fornos

Ao estudar diversas situações em que ocorrem os casos de LO no TIC do petróleo na saída do forno, foi constatado que o grande problema são as flutuações na vazão de ar para cada forno. Para resolver tal problema o controlador de Distribuição de ar entre os fornos deve estar operando, o que não ocorre quando a produção é maximizada.

Quando as FVs na tubulação de entrada do ar para o plenum de cada forno são mantidas abertas, o que define a distribuição da vazão de ar entre os fornos é a pressão em cada forno. Portanto, a proposta para manter o controlador de distribuição de ar operando em cargas altas envolve a implementação de uma chave que altera os elementos de atuação desse controlador, listados na Tabela 5.

Tabela 5. Proposta para o Controle da Distribuição de Ar entre os Fornos

| Variável Controlada | Variável Manipulada |
|---|--|
| Distribuição da vazão de ar entre os fornos | % Abertura das FVs após bifurcação do ar |
| | Diferença de pressão entre os fornos |

O sinal que alimenta a chave de seleção vem da abertura da FV na sucção do SOPRADOR. Quando a FV estiver operando de 0 a 100% o controlador de distribuição de ar pode manipular as válvulas de entrada do plenum de cada forno. Quando a FV da sucção do SOPRADOR estiver com abertura de 100% o controlador de distribuição de ar começa a atuar na diferença do *setpoint* entre controladores de pressão de cada forno.

Dessa forma a condição de maximização do ar disponível, mantendo as válvulas de entrada dos plenums abertas, e a condição de controle das flutuações nas vazões de ar para cada forno é atendida. A Figura 31 apresenta uma representação da estratégia proposta.

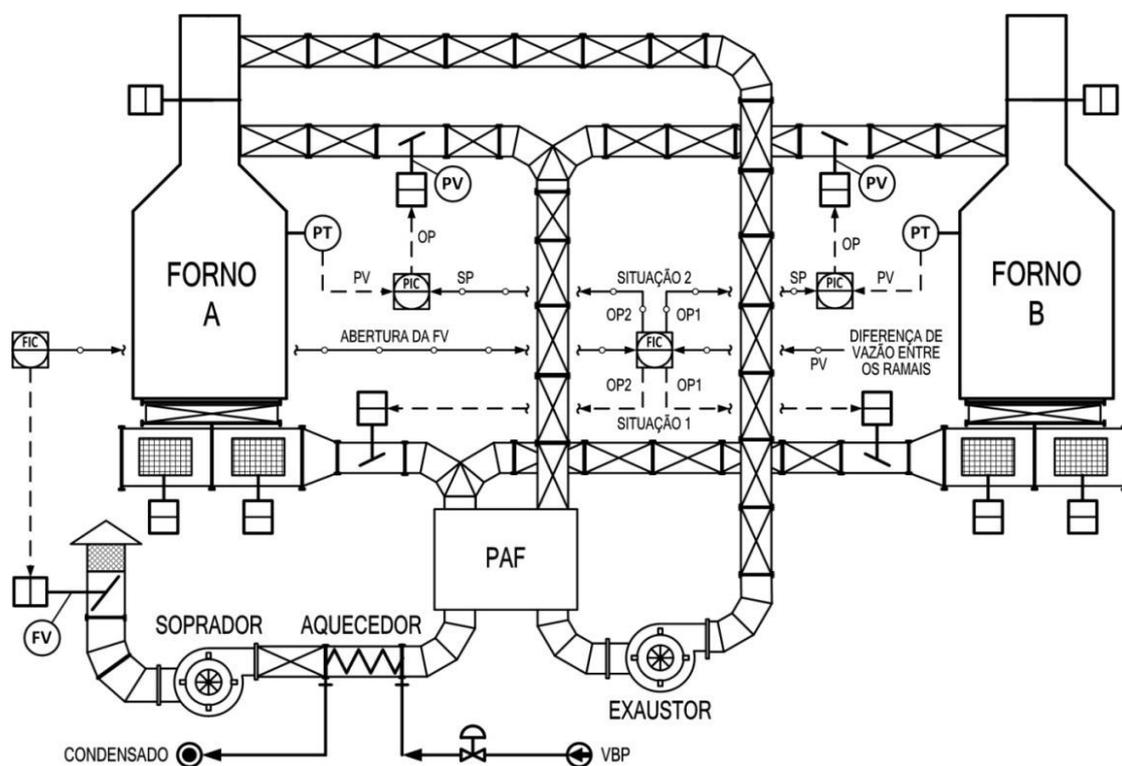


Figura 30. Proposta para a Estratégia de Distribuição de Ar

4 Resultados

As propostas tiveram boa aceitação por parte da Gerência de Otimização e da Gerência de Destilação (responsável pela operação dos fornos). As modificações dos controladores de vazão total de ar e distribuição de vazão de ar entre os fornos foram encaminhadas para implementação no SDCD. A sugestão de mudança na atuação do controlador de excesso de ar foi postergada para uma implementação futura, pois envolve uma mudança que envolve todo o sistema de controle. No Apêndice C são apresentados os detalhes de implementação das soluções propostas.

4.1 Modelo para Ilustrar o sistema Estudado

Para ilustrar a influência das novas variáveis manipuladas frente às variáveis controladas, foi desenvolvido um modelo simplificado dos fornos, utilizando o software Maple. Para tanto, foram propostas equações diferenciais que descrevem a variação da vazão de ar para ambos os fornos. O sistema formado foi linearizado e passado para o domínio da frequência. Em seguida foi gerada uma função de transferência para cada válvula de atuação. O desenvolvimento completo do modelo pode ser encontrado no Apêndice D.

A Figura 32 apresenta uma sucessão de degraus nas novas válvulas escolhidas na nova estratégia de controle. Onde x_{B2} se refere a abertura da válvula que controla a pressão do forno B, x_{A2} se refere a abertura da válvula que controla a pressão do forno A e x_{B3} se refere a abertura do damper da chaminé do forno B. Como era esperado, manipulando essas válvulas é possível variar a vazão total de ar para os fornos e também a distribuição da vazão de ar entre os fornos.

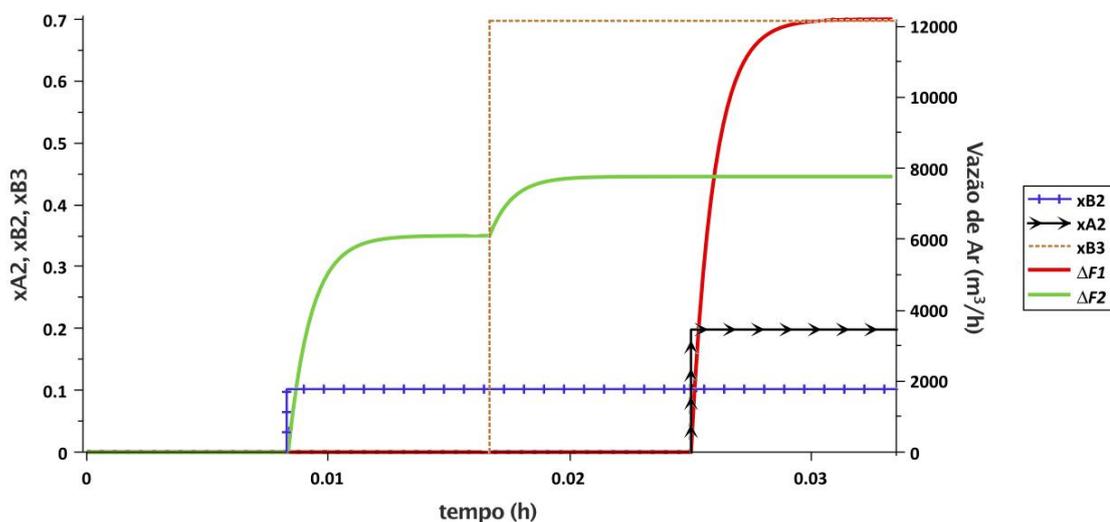


Figura 32. Influência das variáveis manipuladas sobre o Modelo

4.2 Resultados Esperados

A oscilação das variáveis controladas de um processo, causada por um sistema de controle mal configurado, pode ter grande influência no retorno econômico de uma planta industrial. Essa condição é agravada nos casos em que a máxima produção e eficiência são atingidas em condições específicas de operação ou limitadas pela capacidade de algum equipamento. Os fornos abordados no presente trabalho são um exemplo de processo que possui a condição de eficiência máxima em um ponto de operação específico e a condição de produção máxima limitada pela capacidade de um equipamento.

A quantidade de ar em excesso no gás de combustão saindo da chaminé tem um impacto direto na eficiência do forno e no consumo de combustível. Quando a quantidade de ar fornecida ao forno é maior que a requerida para combustão completa, o ar em excesso reduz a eficiência do forno, pois está consumindo energia térmica que não será aproveitada. À medida que o ar em excesso no gás de combustão vai sendo reduzido, em algum ponto será fornecido somente o ar necessário para permitir a combustão completa do combustível. A eficiência do forno irá cair se a quantidade de ar for reduzida além desse ponto, além disso, combustível não queimado sairá junto com o gás de combustão.

Para uma determinada demanda de combustão a melhor eficiência é atingida com uma vazão adequada de ar. Qualquer variação deste ponto irá resultar na redução da eficiência operacional e num possível risco de segurança (quando a mistura fica subestequiométrica). Com as modificações propostas e a atuação em conjunto dos controladores de vazão total de ar, de distribuição de ar e de excesso de ar espera-se que o excesso de ar em cada forno se mantenha no ponto ótimo com pequenas oscilações. O Apêndice A ilustra o resultado esperado.

Se a produção da planta não é limitada pelo mercado, ou seja, um aumento na produção sempre pode ser vendido, então o lucro máximo pode ser obtido operando a planta em capacidade máxima. Caso a produção não possa ser elevada devido a um limite físico de algum equipamento, a redução das variações do processo leva a um aumento da produção. Esse é o caso da limitação imposta pelo sistema de fornecimento de ar para os fornos, onde o aumento de produção é limitado em função da falta de ar. O Apêndice B ilustra como as modificações no controlador de vazão total de ar podem aumentar a produção da planta, levando o fornecimento de ar para mais próximo de seu limite.

Além da capacidade de produção e da eficiência dos fornos, o retorno econômico da planta de destilação, onde o forno está inserido, depende também da estabilidade da temperatura do petróleo na saída dos fornos.

Ao sair dos fornos o petróleo entra na torre de destilação e sua temperatura define a distribuição e qualidade de fracionamento da torre. Cada tipo de petróleo possui uma temperatura ideal para entrar na torre de destilação e fracionar nos diversos cortes. Uma temperatura menor que a adequada leva a perda de uma quantidade de óleo diesel para o resíduo atmosférico (RAT). Por consequência, o RAT irá resfriar-se e, devido a integração energética, o petróleo que entra no forno estará mais frio. Esse efeito pode reduzir ainda mais a temperatura de saída do forno. Por outro lado, uma temperatura

maior que a adequada poderá tirar o diesel de especificação para venda, pois parte dos pesados do RAT irão sair junto da corrente de diesel.

Além de modificar a composição dos produtos, a temperatura de entrada da carga da torre de destilação pode ser um distúrbio problemático para as malhas de controles da torre. Todos os controles de nível, o controle de refluxo e o controle de pressão da torre são afetados pela variação da temperatura de carga. Se a frequência de variação for muito grande essa pode ser propagada para os controladores upstream (subsequentes).

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho teve por objetivo revisar a estratégia de controle de um conjunto de fornos de destilação e propor modificações para melhorar o desempenho dos mesmos. Para tanto, foram elaboradas três propostas de modificação para as estratégias de controle atual.

Para verificar a validade das mudanças propostas foi elaborado um modelo simplificado dos fornos.

As três propostas foram aceitas pelo grupo de Engenharia e duas delas já estão sendo implementadas na planta. Com a melhoria do sistema de controle pela redução de variações do processo, espera-se que a produção da planta possa ser elevada mantendo a qualidade operacional e dos produtos.

Em um trabalho futuro pode ser feita uma avaliação estatística sobre os resultados obtidos pela implementação das mudanças propostas.

6 Referências

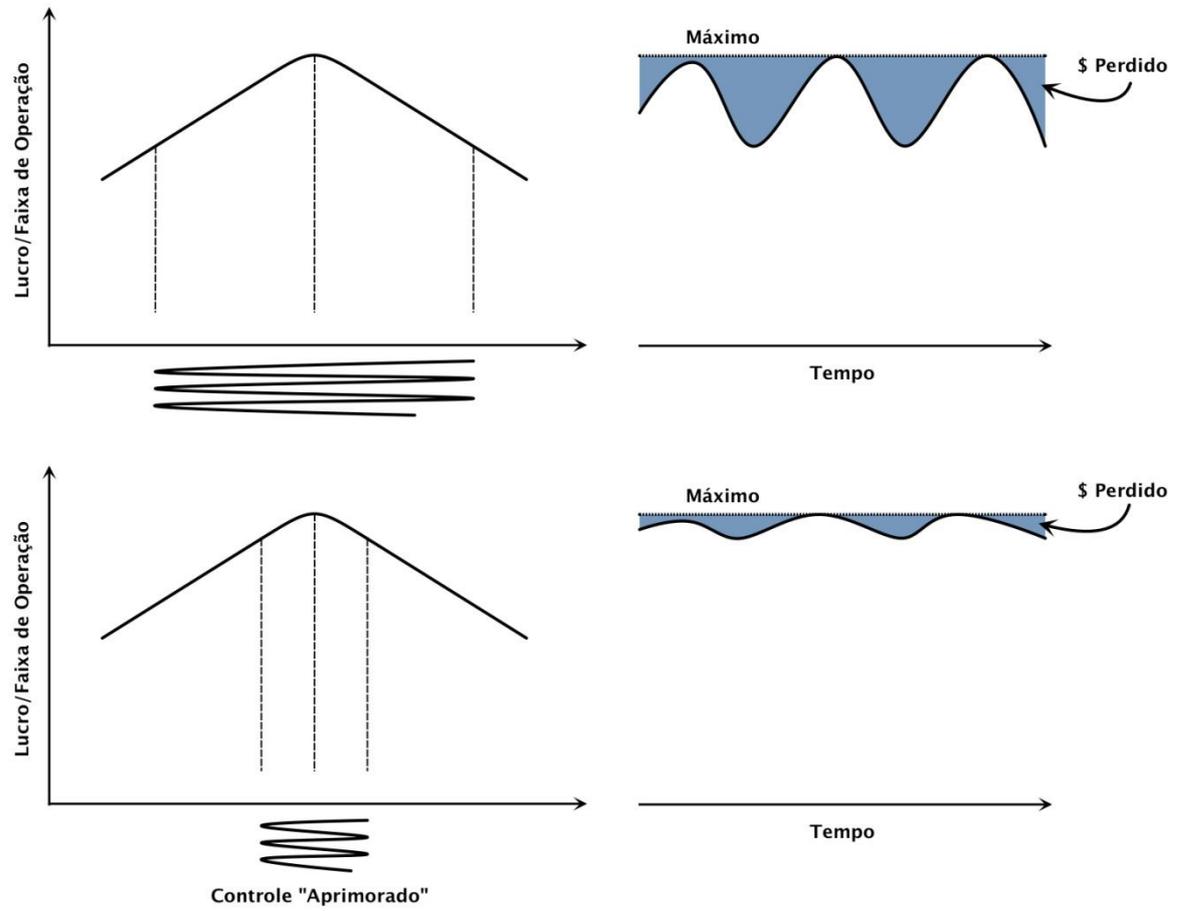
KING, M. **Process Control A Practical Approach**. [S.l.]: Wiley, 2011.

LIPTÁK, B. G. **Process control and optimization**. 4th. ed. [S.l.]: CRC Press, 2006. v. II

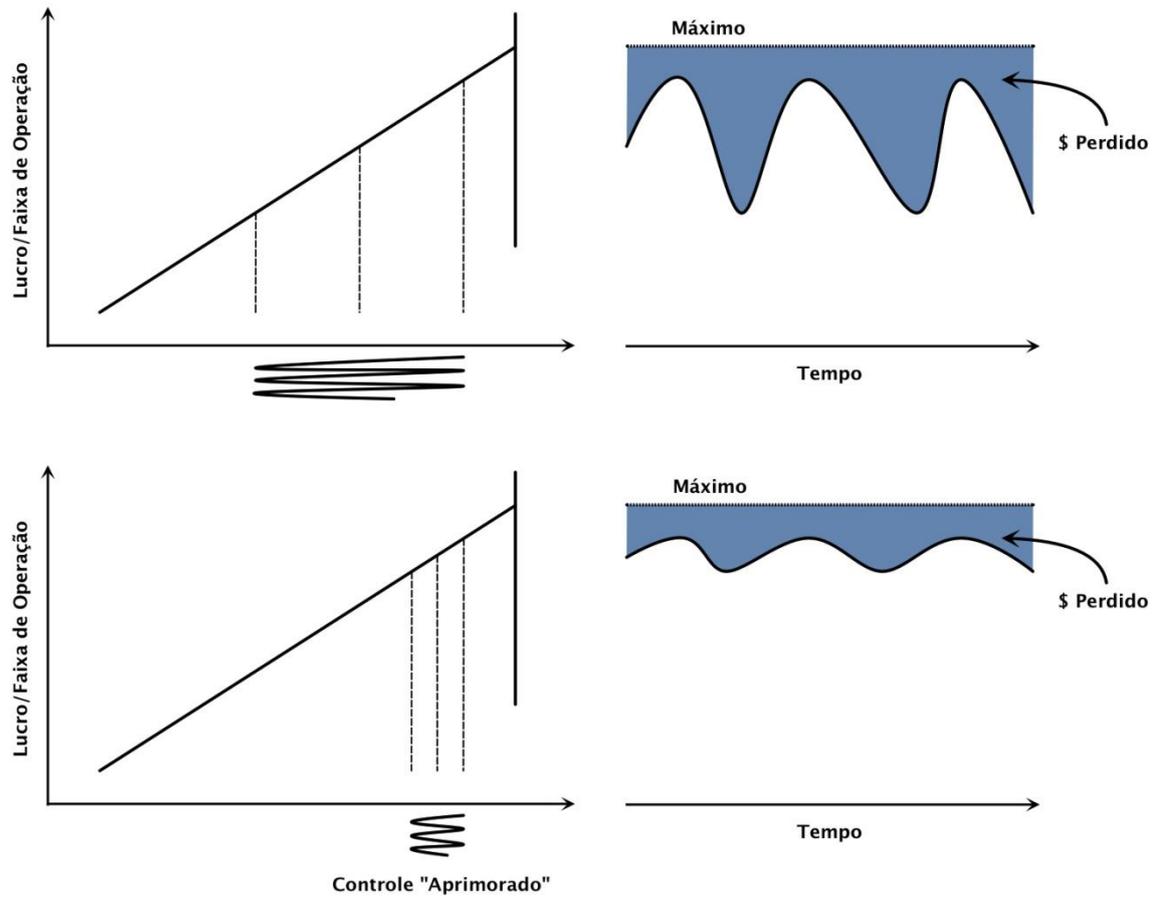
CAMPOS, M. C. M. de; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais**. 2nd. ed. São Paulo: Blucher, 2010. p. 396

VINAYAGAM, K. Understand the secrets of fired heaters tuning. **Hydrocarbon Processing**, 2007.

APÊNDICE A



APÊNDICE B

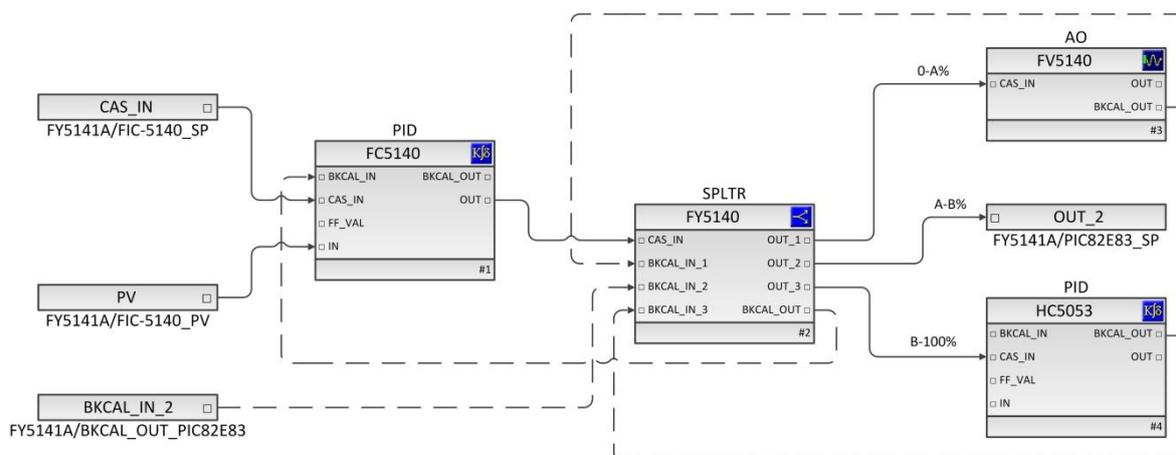


APÊNDICE C

Detalhes da Implementação

Controlador de Vazão total de Ar

O controlador de vazão total de ar passa a ter uma estratégia *Split-Range* onde seu *output* é dividido entre três elementos de atuação. A Figura abaixo representa a implementação em blocos funcionais segundo a especificação *Foundation Fieldbus*.



Implementação da proposta do controlador de vazão total de ar

O primeiro bloco é o bloco do controlador *PID* que recebe o sinal da *PV* e do *SP* do elemento FY-5141A (onde são realizados os cálculos apresentados na Figura 28). O sinal de saída do bloco *PID* é enviado para um bloco *Splitter* (*SPLTR*). Esse bloco divide o range de sua entrada em 3 ranges de saídas. Além dos sinais citados, os blocos são conectados entre si por sinais de *BKCAL*.

O *BKCAL* carrega o estado e o sinal de saída do bloco *upstream* de modo a garantir a transferência suave (*bumplesstransfer*) entre os modos de operação dos blocos.

Os limites de divisão no *output* do bloco *Splitter* devem ser calculados de modo a manter uma característica de resposta linear, evitando que o controlador apresente boa performance em uma região em detrimento das outras. Para tanto, precisamos determinar as vazões correspondentes a cada atuador.

Chamando a FV-5140 (damper na sucção do SOPRADOR) de atuador 1, os controladores de pressão de atuador 2 e a HV-5053 (damper da chaminé do forno B) de atuador 3, a tabela abaixo relaciona as condições para determinar essas vazões.

Variáveis medidas para determinar limites do *Split-Range* do FC-5140

| | Variável Medida | Condições |
|---------------------------|---|---|
| Vazão do atuador 1 | Vazão total de ar sem correção do excesso de ar | FV-5140 totalmente aberta Pressão do forno em -2 mmCA HV-5053 totalmente fechada |
| Vazão do atuador 2 | Vazão total de ar sem correção do excesso de ar | FV-5140 totalmente aberta Pressão do forno em -20 mmCA HV-5053 totalmente fechada |
| Vazão do atuador 3 | Vazão total de ar sem correção do excesso de ar | FV-5140 totalmente aberta Pressão do forno em -20 mmCA HV-5053 totalmente aberta |

A partir dos dados obtidos para cada atuador, os valores de A e B, podem ser determinados pelas seguintes equações:

$$A = 100 \times \left(\frac{\text{Vazão do atuador 1}}{\text{Vazão do atuador 3}} \right)$$

$$B = 100 \times \left(\frac{\text{Vazão do atuador 2}}{\text{Vazão do atuador 3}} \right)$$

Com os valores de A e B, o bloco *Splitter* é configurado conforme a tabela abaixo.

Configuração do Bloco FY5140

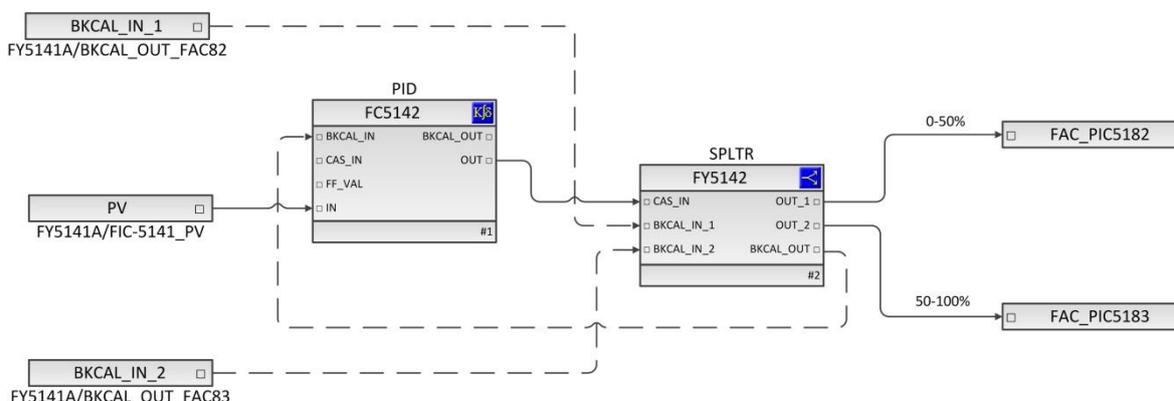
| Output do Controlador (%) | Atuador 1 (%) | Atuador 2 (mmCA) | Atuador 3 (%) |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| 0 – A | 0 – 100 | -2 | 0 |
| A – B | 100 | -2 – -20 | 0 |
| B – 100 | 100 | -20 | 0 – 100 |

Controlador de Distribuição de Ar

O controlador de Distribuição de Ar deve mudar seus elementos de atuação a partir do sinal de abertura da FV-5140. Apesar de ser possível implementar essa condição diretamente no controlador atual de distribuição de ar, é preferível criar um novo controlador que atue no diferencial de pressões entre os fornos. A mudança de um elemento de atuação para outro acarreta numa mudança no ganho e na constante de tempo do controlador. Também é possível implementar um ganho variável para o controlador, mas a configuração se torna mais complexa.

O sinal de abertura da FV-5140 passa por uma chave que ativa o controlador de distribuição de ar que atua nos dampers na entrada do plenum de cada forno (FIC-5141) ou o novo controlador de distribuição de ar que atua no diferencial de pressão entre os

fornos (FIC-5142). A figura abaixo representa a implementação do FIC-5142 em blocos funcionais.



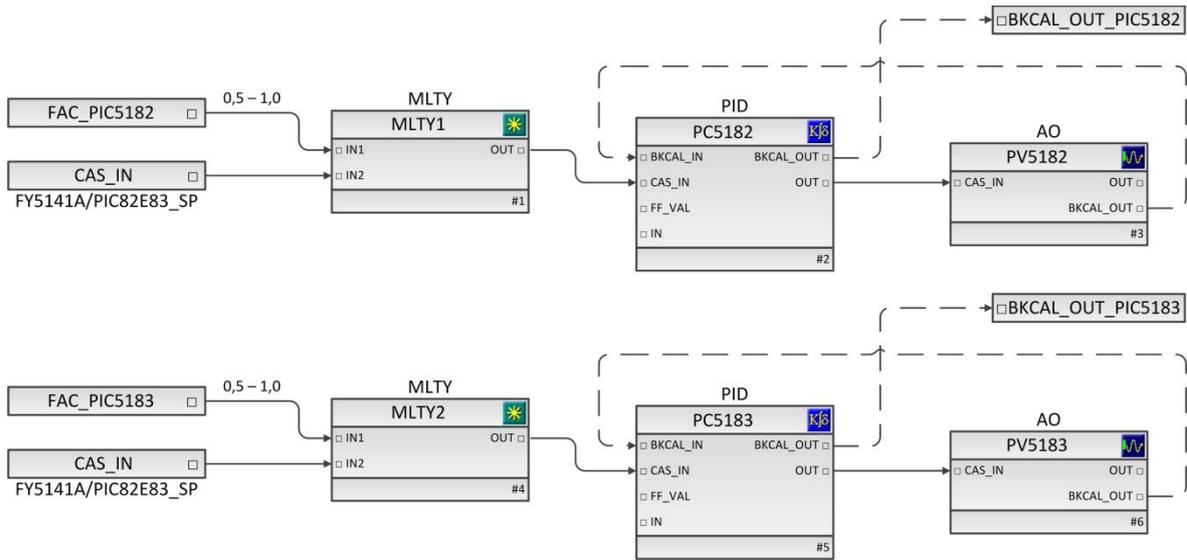
Implementação da proposta do controlador de distribuição de ar

O bloco *PID* recebe o sinal da PV do FY-5141A (onde é realizado o cálculo apresentado na Figura 26) e envia seu *output* para um bloco *Splitter* que é configurado conforme a tabela abaixo.

Configuração do Bloco FY5142

| Output do Controlador (%) | FAC_PIC5182 | FAC_PIC5183 |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|
| 0 – 50 | 0,5 – 1,0 | 1,0 |
| 50 – 100 | 1,0 | 1,0 – 0,5 |

A saída do FIC-5142 multiplica o sinal da cascata dos controladores de pressão gerado pelo controlador de vazão total de ar, criando um diferencial de pressão entre as câmaras de combustão dos fornos para corrigir a distribuição da vazão de ar entre esses. A Figura abaixo apresenta uma representação em blocos funcionais do cálculo do SP dos controladores de pressão.



Cálculo do SP dos controladores de Pressão

APÊNDICE D

$$\begin{aligned}
 > dPA := \frac{R \cdot T}{V} \cdot (F1 + GA - F3); dPB := \frac{R \cdot T}{V} \cdot (F2 + GB - F4 - F5); \\
 & \quad dPA := \frac{RT(F1 + GA - F3)}{V} \\
 & \quad dPB := \frac{RT(F2 + GB - F4 - F5)}{V}
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 > eq1 := F1(t) = xA1 \cdot C1 \cdot \sqrt{PS - PA(t)}; eq2 := F2(t) = xB1 \cdot C2 \cdot \sqrt{PS - PB(t)}; \\
 & \quad eq1 := F1(t) = xA1 C1 \sqrt{PS - PA(t)} \\
 & \quad eq2 := F2(t) = xB1 C2 \sqrt{PS - PB(t)}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 > deq1 := \text{diff}(eq1, t); deq2 := \text{diff}(eq2, t); \\
 & \quad deq1 := \frac{d}{dt} F1(t) = -\frac{1}{2} \frac{xA1 C1 \left(\frac{d}{dt} PA(t) \right)}{\sqrt{PS - PA(t)}} \\
 & \quad deq2 := \frac{d}{dt} F2(t) = -\frac{1}{2} \frac{xB1 C2 \left(\frac{d}{dt} PB(t) \right)}{\sqrt{PS - PB(t)}}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Taxa de variação das vazões de ar na entrada de cada forno

$$\begin{aligned}
 > dF1 := -\frac{R \cdot T \cdot xA1 \cdot C1}{2 \cdot V \cdot \sqrt{PS - PA}} \cdot (F1 + GA - F3); dF2 := -\frac{R \cdot T \cdot xB1 \cdot C2}{2 \cdot V \cdot \sqrt{PS - PB}} \cdot (F2 + GB - F4 - F5); \\
 & \quad dF1 := -\frac{1}{2} \frac{RTxA1C1(F1 + GA - F3)}{V\sqrt{PS - PA}} \\
 & \quad dF2 := -\frac{1}{2} \frac{RTxB1C2(F2 + GB - F4 - F5)}{V\sqrt{PS - PB}}
 \end{aligned} \tag{7}$$

EDOs que descrevem o problema

$$\begin{aligned}
 > m[f] := [dF1, dF2]; \\
 & \quad m_f := \left[-\frac{1}{2} \frac{RTxA1C1(F1 + GA - F3)}{V\sqrt{PS - PA}}, -\frac{1}{2} \frac{RTxB1C2(F2 + GB - F4 - F5)}{V\sqrt{PS - PB}} \right]
 \end{aligned} \tag{8}$$

Variáveis controladas

$$\begin{aligned}
 > m[g] := [F1, F2]; \\
 & \quad m_g := [F1, F2]
 \end{aligned} \tag{9}$$

Equações algébricas que descrevem o problema

$$\begin{aligned}
 > m[n] := [F1 = xA1 \cdot C1 \cdot \sqrt{PS - PA}, F2 = xB1 \cdot C2 \cdot \sqrt{PS - PB}, F3 = xA2 \cdot C3 \cdot \sqrt{PA - PE}, F4 \\
 & \quad = xB2 \cdot C4 \cdot \sqrt{PB - PE}, F5 = xB3 \cdot C5 \cdot \sqrt{(\rho_{out} - \rho_{in}) \cdot A \cdot g}, GA = 0.095 \cdot xA1 \cdot C1 \\
 & \quad \cdot \sqrt{PS - PA}, GB = 0.095 \cdot xB1 \cdot C2 \cdot \sqrt{PS - PB}]; \\
 & \quad m_n := [F1 = xA1 C1 \sqrt{PS - PA}, F2 = xB1 C2 \sqrt{PS - PB}, F3 = xA2 C3 \sqrt{PA - PE}, F4 \\
 & \quad = xB2 C4 \sqrt{PB - PE}, F5 = xB3 C5 \sqrt{(\rho_{out} - \rho_{in}) A g}, GA = 0.095 xA1 C1 \sqrt{PS - PA}, \\
 & \quad GB = 0.095 xB1 C2 \sqrt{PS - PB}]
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{> } m[o] := \left[PA = PS - \frac{F1^2}{(xA1 \cdot C1)^2}, PB = PS - \frac{F2^2}{(xB1 \cdot C2)^2}, C3 = -26200 \cdot xA2 + 57500, C4 = \right. \\
 & \quad \left. -26200 \cdot xB2 + 57500, C5 = -4100 \cdot xB3 \cdot xB3 + 7600 \cdot xB3 + 1200 \right]; \\
 m_o & := \left[PA = PS - \frac{F1^2}{xA1^2 C1^2}, PB = PS - \frac{F2^2}{xB1^2 C2^2}, C3 = -26200 xA2 + 57500, C4 = \right. \\
 & \quad \left. -26200 xB2 + 57500, C5 = -4100 xB3^2 + 7600 xB3 + 1200 \right] \tag{11}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{> } m[h] := eval(m[n], m[o]); \\
 m_h & := \left[F1 = xA1 C1 \sqrt{\frac{F1^2}{xA1^2 C1^2}}, F2 = xB1 C2 \sqrt{\frac{F2^2}{xB1^2 C2^2}}, F3 = xA2 (-26200 xA2 \right. \\
 & \quad + 57500) \sqrt{PS - \frac{F1^2}{xA1^2 C1^2} - PE}, F4 = xB2 (-26200 xB2 \\
 & \quad + 57500) \sqrt{PS - \frac{F2^2}{xB1^2 C2^2} - PE}, F5 = xB3 (-4100 xB3^2 + 7600 xB3 \\
 & \quad + 1200) \sqrt{(\rho_{out} - \rho_{in}) A g}, GA = 0.095 xA1 C1 \sqrt{\frac{F1^2}{xA1^2 C1^2}}, GB \\
 & \quad = 0.095 xB1 C2 \sqrt{\frac{F2^2}{xB1^2 C2^2}} \left. \right] \tag{12}
 \end{aligned}$$

Variáveis de estado do sistema

$$\begin{aligned}
 & \text{> } m[x] := [F1, F2]; \\
 & \quad \quad \quad m_x := [F1, F2] \tag{13}
 \end{aligned}$$

Variáveis manipuladas e distúrbios

$$\begin{aligned}
 & \text{> } m[u] := [xA1, xA2, xB1, xB2, xB3, PS, PE]; \\
 & \quad \quad \quad m_u := [xA1, xA2, xB1, xB2, xB3, PS, PE] \tag{14}
 \end{aligned}$$

Especificações e constantes que definem o problema. (Todas unidades no SI)

$$\begin{aligned}
 & \text{> } m[p] := [\rho_{out} = 1.18, \rho_{in} = 0.32, g = 10, A = 50, R = 8.314, T = 1073, V = 2115, C1 = 1714, C2 \\
 & \quad = 1714]; \\
 m_p & := [\rho_{out} = 1.18, \rho_{in} = 0.32, g = 10, A = 50, R = 8.314, T = 1073, V = 2115, C1 = 1714, C2 \\
 & \quad = 1714] \tag{15}
 \end{aligned}$$

Determinação de um estado de operação estacionário.

$$\begin{aligned}
 & \text{> } a := [dF1 = 0, dF2 = 0]; b := eval(eval(a, m[h]), m[o]); c := eval(b, m[p]); \\
 a & := \left[-\frac{1}{2} \frac{RT xA1 C1 (F1 + GA - F3)}{V \sqrt{PS - PA}} = 0, -\frac{1}{2} \frac{RT xB1 C2 (F2 + GB - F4 - F5)}{V \sqrt{PS - PB}} = 0 \right] \tag{16}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{> } w := unapply(c, m[u]); w1 := w(1, 0.1, 1, 0.1, 0, 101325 + 1176.8, 101325 - 245.2); w2 \\
 & \quad := convert(w1, set) \mathbf{union} \{F1 > 0, F2 > 0\}; \tag{17}
 \end{aligned}$$

$$w1 := \left[-\frac{1}{\sqrt{F1^2}} \left(3614.766030 \left(0.0006388564761 \sqrt{2937796} \sqrt{F1^2} - 5488.00 \sqrt{1422.0 - \frac{1}{2937796} F1^2} \right) \sqrt{2937796} \right) = 0, \right. \\ \left. -\frac{1}{\sqrt{F2^2}} \left(3614.766030 \left(0.0006388564761 \sqrt{2937796} \sqrt{F2^2} - 5488.00 \sqrt{1422.0 - \frac{1}{2937796} F2^2} \right) \sqrt{2937796} \right) = 0 \right] \quad (17)$$

$$\begin{aligned} &> \text{sol1} := \text{solve}(w2) : \text{op1} := \text{sol1} \text{ union } \{x_{A1} = 1, x_{A2} = 0.1, x_{B1} = 1, x_{B2} = 0.1, x_{B3} = 0, PS \\ &= 101325 + 1176.8, PE = 101325 - 245.2\} \text{ union } \text{convert}(m_p, \text{set}); \\ \text{op1} &:= \{\rho_{in} = 0.32, A = 50, C1 = 1714, C2 = 1714, F1 = 61156.50060, F2 = 61156.50060, PE \\ &= 1.010798 \cdot 10^5, PS = 1.025018 \cdot 10^5, R = 8.314, T = 1073, V = 2115, g = 10, x_{A1} = 1, x_{A2} \\ &= 0.1, x_{B1} = 1, x_{B2} = 0.1, x_{B3} = 0, \rho_{out} = 1.18\} \end{aligned} \quad (18)$$

Linearização do modelo

> with(VectorCalculus) : with(DynamicSystems) : with(plots) :
Vetor contendo as EDOs.

$$\begin{aligned} &> c := \text{eval}(\text{eval}(m[f], m[h]), m[o]); \\ c &:= \left[-\frac{1}{2} \frac{1}{V \sqrt{\frac{F1^2}{x_{A1}^2 C1^2}}} \left(R T x_{A1} C1 \left(1.095 x_{A1} C1 \sqrt{\frac{F1^2}{x_{A1}^2 C1^2}} - x_{A2} (-26200 x_{A2} \right. \right. \right. \\ &+ 57500) \sqrt{PS - \frac{F1^2}{x_{A1}^2 C1^2} - PE} \left. \left. \left. \right) \right), \right. \\ &-\frac{1}{2} \frac{1}{V \sqrt{\frac{F2^2}{x_{B1}^2 C2^2}}} \left(R T x_{B1} C2 \left(1.095 x_{B1} C2 \sqrt{\frac{F2^2}{x_{B1}^2 C2^2}} - x_{B2} (-26200 x_{B2} \right. \right. \\ &+ 57500) \sqrt{PS - \frac{F2^2}{x_{B1}^2 C2^2} - PE} - x_{B3} (-4100 x_{B3}^2 + 7600 x_{B3} \\ &+ 1200) \sqrt{(\rho_{out} - \rho_{in}) A g} \left. \left. \left. \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

Aplicando o operador Jacobiano aos vetores que definem o sistema

> m[A] := Jacobian(c, m[x]) : m[B] := Jacobian(c, m[u]) : m[C] := Jacobian(m[g], m[x]) :
m[D] := Jacobian(m[g], m[u]) :

Matrizes que definem o modelo linearizado avaliadas no estado estacionário (op1).

```

> MA := evalf(eval(m[A], op1)); MB := evalf(eval(m[B], op1)); MC := m[C]; MD
:= m[D];

```

$$MA := \begin{bmatrix} -1059.441012 & 0. \\ 0. & -1059.441012 \end{bmatrix}$$

```

MB := [[5.800740422 107, 6.460415800 107, 0., 0., 0., 22781.89300, -22781.89300],
[0., 0., 5.800740422 107, 6.460415800 107, 2.520947822 106, 22781.89300, -22781.89300
]]

```

$$MC := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$MD := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Transformada de Laplace do Sistema linearizado aplicada ao estado op1

```

> ss := StateSpace(MA, MB, MC, MD, inputvariable = m[u], outputvariable = m[g],
statevariable = m[x]) : tf := TransferFunction(ss);

```

$$tf := \begin{array}{l} \text{Transfer Function} \\ \text{continuous} \\ 2 \text{ output(s); 7 input(s)} \\ \text{inputvariable} = [xA1(s), xA2(s), xB1(s), xB2(s), xB3(s), PS(s), PE(s)] \\ \text{outputvariable} = [F1(s), F2(s)] \end{array} \quad (21)$$

Resposta do sistema frente a abertura de 10% da PV do Forno A

```

> abertura := \begin{cases} 0 & t < \frac{1}{120} \\ 0.1 & \text{otherwise} \end{cases};

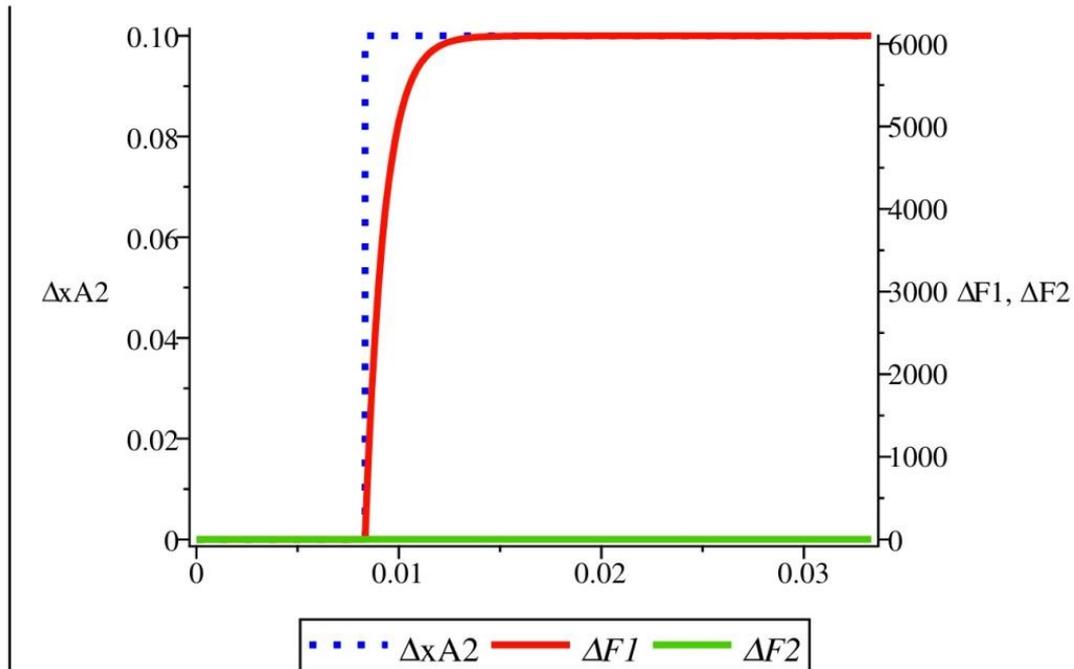
```

$$abertura := \begin{cases} 0 & t < \frac{1}{120} \\ 0.1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

```

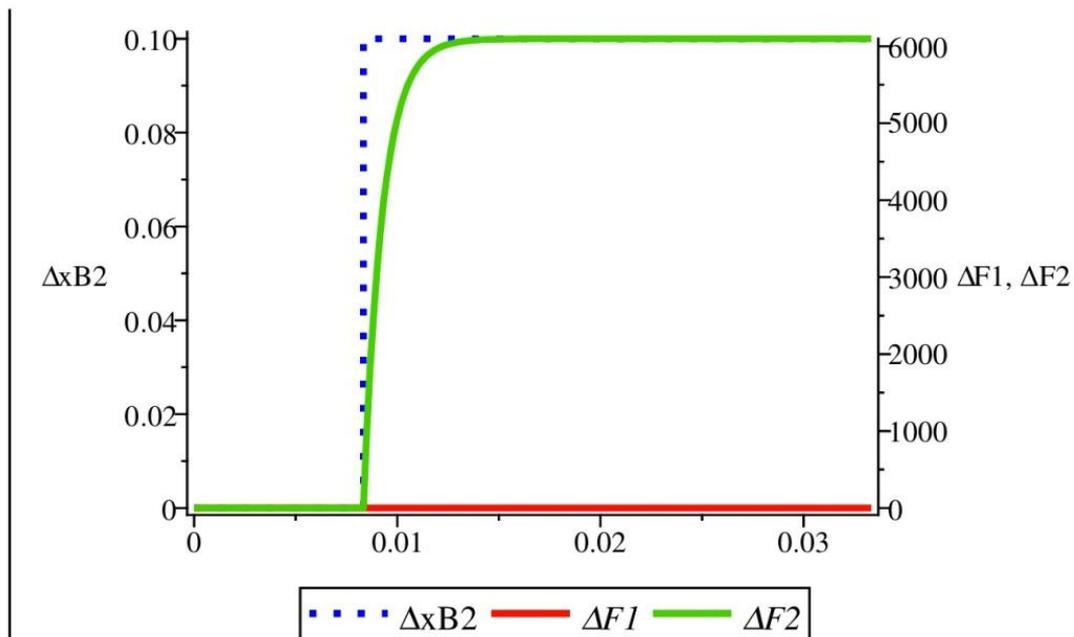
> g1 := ResponsePlot(tf, [0, abertura, 0, 0, 0, 0, 0], duration = \frac{2}{60}, dsolveargs = [maxfun = 0],
legend = [\Delta F1, \Delta F2], thickness = 3, labels = [ "", "\Delta F1", "\Delta F2" ]) : g2 := plot(abertura, t = 0
.. \frac{2}{60}, color = "blue", thickness = 3, legend = "\Delta xA2", labels = [ "", "\Delta xA2"], linestyle
= "dot" ) : dualaxisplot(g2, g1);

```



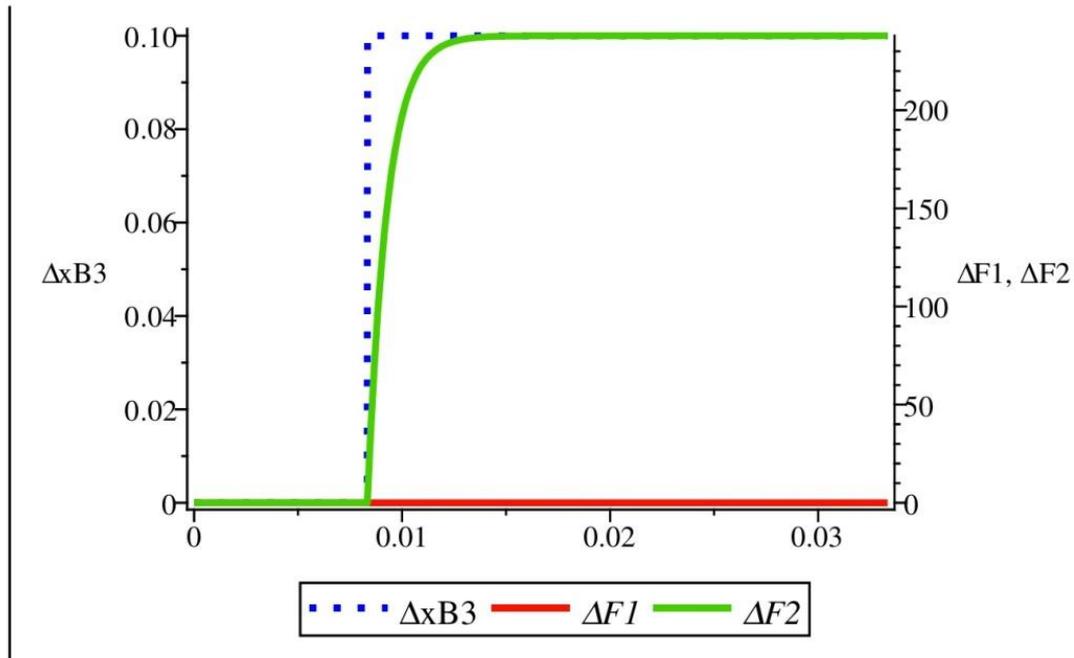
Resposta do sistema frente a abertura de 10% da PV do Forno B

```
> g1 := ResponsePlot(tf, [0, 0, 0, abertura, 0, 0, 0], duration =  $\frac{2}{60}$ , dsolveargs = [maxfun = 0],
  legend = [ $\Delta F1$ ,  $\Delta F2$ ], thickness = 3, labels = [ "", " $\Delta F1$ ", " $\Delta F2$ " ]) : g2 := plot(abertura, t = 0
  ..  $\frac{2}{60}$ , color = "blue", thickness = 3, legend = " $\Delta xB2$ ", labels = [ "", " $\Delta xB2$ " ], linestyle
  = "dot") : dualaxisplot(g2, g1);
```



Resposta do sistema frente a abertura de 10% do damper do Forno B

```
> g1 := ResponsePlot(tf, [0, 0, 0, 0, abertura, 0, 0], duration = 2/60, dsolveargs = [maxfun = 0],
  legend = [ΔF1, ΔF2], thickness = 3, labels = ["", "ΔF1, ΔF2"]) : g2 := plot(abertura, t = 0
  .. 2/60, color = "blue", thickness = 3, legend = "ΔxB3", labels = ["", "ΔxB3"], linestyle
  = "dot") : dualaxisplot(g2, g1);
```



Abertura simultânea para controle de distribuição de ar entre os fornos

$$> \text{abertura2} := \begin{cases} 0 & t < \frac{3}{120} \\ 0.2 & \text{otherwise} \end{cases}; \text{abertura3} := \begin{cases} 0 & t < \frac{1}{60} \\ 0.7 & \text{otherwise} \end{cases};$$

$$\text{abertura2} := \begin{cases} 0 & t < \frac{1}{40} \\ 0.2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{abertura3} := \begin{cases} 0 & t < \frac{1}{60} \\ 0.7 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

```
> g1 := ResponsePlot(tf, [0, abertura2, 0, abertura, abertura3, 0, 0], duration = 2/60, dsolveargs
= [maxfun = 0], legend = [ΔF1, ΔF2], thickness = 3, labels = ["", ""]) : g2
:= plot(abertura, t = 0 .. 2/60, color = "blue", thickness = 3, legend = "ΔxB2", linestyle
= "dot") : g3 := plot(abertura2, t = 0 .. 2/60, color = "black", thickness = 3, legend
= "ΔxA2", linestyle = "dot") : g4 := plot(abertura3, t = 0 .. 2/60, color = "gold", thickness
= 3, legend = "ΔxB3", linestyle = "dot") : g5 := display(g2, g3, g4, labels = ["", ""]) :
dualaxisplot(g5, g1, axesfont = ["Calibri", "Bold", 12], legendstyle = [font = ["Calibri",
"Bold", 12], location = right], labelfont = ["Calibri", "Bold", 12]);
```

