Capítulo 7 – Conclusões

A presente tese de doutorado apresentou estudos de controle multivariável aplicado a uma rede de trocadores de calor com *bypasses*. Utilizou-se um modelo matemático do trocador de calor do tipo casco e tubo com *bypasses* e a partir desse modelo matemático, foi apresentada a validação experimental do mesmo. Uma RTC em escala piloto foi construída com sucesso e duas técnicas de controle (LQR e H-Infinito) foram desenvolvidas para a implementação do controle em malha fechada da RTC.

O desenvolvimento de todo o equipamento experimental é uma contribuição importante da presente tese. Foi elaborado um projeto contemplando a construção de um equipamento em escala piloto, com características semelhantes a uma RTC aplicada em um processo químico de escala industrial, projeto esse detalhado no Capítulo 3. Foi desenvolvida toda a instrumentação e também o sistema de aquisição de dados para que todas as etapas da tese que envolvesse validações experimentais pudessem ser realizadas. Todo o equipamento desenvolvido nesta tese ficará à disposição dos professores e alunos do Centro Universitário da FEI para estudos na área de eficiência energética, operações unitárias e de controle de processos.

Além do projeto, montagem, instrumentação e da aquisição de dados desenvolvida para a RTC, uma das principais contribuições da presente tese foi de apresentar a validação experimental do modelo matemático do trocador de calor, onde os resultados dessa validação foram apresentados no Capitulo 4. Nota-se que as dinâmicas do trocador de calor e da RTC foram representadas adequadamente pelo modelo, salvo as pequenas variações encontradas nas temperaturas de saída quente e fria. Como o modelo matemático não contempla uma parcela de perda de energia para o meio ambiente, os valores das temperaturas fornecidos pelo modelo matemático do trocador foram ligeiramente mais elevados que os valores obtidos experimentalmente, para os trocadores da RTC. Porém, esse fato não foi observado no trocador do kit da *Armfield*, apresentando resultados gerados pelo modelo matemático mais consistentes e próximos aos dados aquisitados do equipamento físico. Justifica-se a diferença pelo simples fato que os equipamentos físicos são diferentes do ponto de vista construtivo: quantidade e tamanho das tubulações maiores na RTC e também, os trocadores de calor são confeccionados com

materiais distintos (aço inox para os trocadores da RTC e acrílico para o trocador da *Armfield*). Dessa forma, a RTC naturalmente apresentará uma perda de energia maior para o meio ambiente, fato comprovado pelos experimentos e simulações realizadas.

As contribuições da tese na parte de controle foram direcionadas em aplicações de técnicas de controle multivariável com características de controle ótimo. Foi desenvolvido inicialmente o projeto de um controlador LQR tradicional, onde todos os estados do sistema a ser controlado devem estar disponíveis e por essa razão, em sistemas de ordem superior, a estrutura tradicional do LQR, apresentada pela Figura 2.1 não é a solução mais adequada, pois demanda a presença de um *setpoint* para cada variável de estado. Uma solução mais conveniente para sistemas de ordem superior foi apresentada pela Figura 2.2, onde integradores foram incorporados ao projeto LQR, permitindo assim o acréscimo de estados ao sistema. Essa inclusão de estados permitiu que os *setpoints* passassem a serem fornecidos pelas variáveis de saída do sistema, e não mais pelos estados do sistema. Através das razões acima apresentadas, a estrutura escolhida para a implementação do controle em malha fechada na RTC foi a da Figura 2.2, que juntamente com um observador de estados de ordem plena, conseguiu atingir as premissas iniciais para um sistema de controle de uma RTC: capacidade de realizar mudança de *setpoint* e de rejeição a distúrbios, mantendo estáveis as temperaturas de saída, onde os resultados simulados (Capítulo 5) e experimentais (Capítulo 6) comprovam o exposto.

A técnica de controle LQR permite que possa ser determinada uma lei de controle equivalente baseada em controladores PID, obtendo dessa forma uma sintonia com características de controle ótimo. Os resultados obtidos em simulação com essa lei de controle equivalente foram apresentados em congresso (DELATORE *et al.*, 2009b).

Além do controle LQR, o controle H-Infinito foi apresentado como uma segunda técnica para a operação em malha fechada da RTC. O projeto apresentado na tese difere um pouco do projeto tradicional, e utiliza o *model matching* como uma ferramenta de suporte ao projeto H-Infinito. No *model matching*, um modelo de referência $G_{REF}(s)$ é utilizado para obter um controlador $K(s)$ que torne a matriz de transferência do sistema em malha fechada $G(s).K(s)$, idêntico ao modelo referência (Figura 2.7).

Dessa forma, o controlador *K(s)* foi obtido com as especificações apresentadas no domínio do tempo em função da resposta temporal apresentada pelo modelo de referência, diferentemente do projeto H-Infinito tradicional em que as especificações são apresentadas no domínio da frequência através da alocação das barreiras $W_1(s)$, $W_2(s)$ e $W_3(s)$, que penalizam o erro *e(s)*, o esforço de controle *u(s)* e a saída *y(s)*, respectivamente.

Os resultados obtidos mostraram que o controlador projetado foi capaz de realizar o controle em malha fechada da RTC, com características dinâmicas de resposta semelhantes às características obtidas com o projeto LQR.

Uma vantagem na utilização do projeto *model matching* / H-Infinito em detrimento ao projeto LQR, está relacionada com a ordem do controlador que deverá ser implementado. No projeto LQR a matriz $K_{LQR}(s)$ apresentou ordem igual a 27x27, resultando posteriormente nas matrizes $K_x(s)$ e $K_Z(s)$ de ordem 25x25 e 2x2 respectivamente. Já no projeto H-Infinito, a matriz $K_{H\text{-}INF.}$ apresentou ordem inicial de 52x52 e pode ser reduzida para uma ordem igual a 6x6, sem prejuízos para o controle do sistema.

Tanto no controle LQR como no controle H-Infinito, foi observado que as amplitudes das variáveis manipuladas foram ligeiramente maiores nos resultados experimentais, em função principalmente das variações existentes na linha fria, do ponto de vista de vazão e também da temperatura de entrada. A bomba utilizada apresentou algumas variações ao longo do seu funcionamento e a temperatura de entrada ficava oscilando em função da temperatura ambiente.

Sugestões para trabalhos futuros

Do ponto de vista do equipamento montado, algumas mudanças permitirão obter melhores resultados, aumentando principalmente a eficiência do trocador de calor e por consequência, a eficiência da RTC.

O trocador de calor montado por uma empresa contratada externa acabou não seguindo à risca o projeto desenvolvido e apresentado para construção. O trocador foi construído sem as chicanas (aletas) internas, que deveriam existir para aumentar a eficiência do equipamento (Figura 1.2). Além disso, o número de tubos instalado acabou sendo menor do que o especificado e com um diâmetro maior do que o projetado.

Por se tratar de um trocador de aço inox, esse trocador com poucos tubos e de diâmetro elevado (¼ polegada), sem as chicanas internas, demonstrou ser insuficiente para uma troca térmica maior entre as correntes quentes e frias. O problema foi parcialmente contornado com a utilização de uma resistência de aquecimento de maior valor, obtendo assim valores de TH_{IN} maiores, satisfazendo a equação de balanço de energia para cada trocador,

$$Q = m.c_P.\Delta T \ ,$$

onde m é a vazão mássica, c_p é o calor específico, ΔT é a diferença de temperatura da entrada e da saída da corrente em questão.

Outro item importante, ainda referente às mudanças no equipamento, seria a inclusão de um sistema para a geração de água gelada para o abastecimento da linha fria da rede de trocadores de calor em que a temperatura de entrada fria TC_{IN} permanecesse mais estável, de forma análoga ao obtido com a utilização do controlador PI para a temperatura das linhas quentes.

Além das mudanças no equipamento físico, é possível explorar um pouco mais algumas outras técnicas de controle para a RTC. Como o modelo matemático possui uma incerteza paramétrica, que é o coeficiente global de troca térmica, a técnica de controle QFT (*Quantitative Feedback Theory*) multivariável seria uma opção a ser estudada, pois o projeto QFT utiliza uma metodologia de projeto baseada no domínio da freqüência, através do emprego das cartas de Nichols, para que o controlador possa ser obtido sobre a região onde as incertezas paramétricas do modelo se apresentam.

Além do controle QFT, seria possível explorar um pouco mais o projeto H-Infinito incorporando as especificações de robustez ao projeto, uma vez que o projeto desenvolvido apenas levou em consideração a ponderação de desempenho $W_1(s)$.

Com relação ao modelo matemático, a inclusão da parcela de perda de energia para o meio ambiente, permitiria obter resultados simulados mais próximos aos resultados experimentais. Esse estudo poderia ser realizado através da realização de uma série de levantamentos experimentais, identificando assim uma relação entre a temperatura ambiente e a parcela de energia perdida, comparando os resultados das variáveis de saída geradas pelo modelo matemático com as variáveis geradas pelo sistema físico.