Capitulo 1 – Introdução

1.1. Motivação para o desenvolvimento do trabalho

Atualmente existe uma grande preocupação das indústrias químicas em geral na utilização correta e eficiente dos recursos energéticos disponíveis para a fabricação de seus produtos. Como a principal fonte de energia e de matéria prima para as indústrias químicas é o petróleo, e, devido à elevação contínua do seu preço no mercado internacional, diferentes metodologias foram propostas para realizar a integração energética de correntes de processo. Como exemplo, é possível citar a tecnologia *Pinch*, "que permitiu o estabelecimento de metas de consumo e de custo, bem como regras para a síntese sistemática de redes de trocadores de calor (RTC)" (NOVAZZI, 2006), síntese essa que anteriormente era realizada por profissionais com uma vasta experiência e conhecimento no processo em questão, porém sem a utilização de uma metodologia e um roteiro para o desenvolvimento do estudo.

Ao se falar em indústrias ou plantas de processos químicos, existe uma grande quantidade de correntes de processo, que transportam os produtos finais, subprodutos ou utilidades quentes ou frias, necessárias para a operação da planta. As utilidades quentes e frias são usadas nos processos para a produção dos produtos finais nessas empresas em diferentes estágios e equipamentos. As utilidades mais comuns e utilizadas são o vapor de água a alta pressão e a água gelada, geradas utilizando sistemas externos ao processo, e que empregam fontes de energia convencionais ou alternativas (elétrica, gás natural, solar, etc.) para que essas utilidades possam ser geradas.

Um fato importante e fundamental para a operação dessas plantas é o uso eficiente das fontes de energia necessárias para a geração das utilidades quentes e frias. Ao longo do processo, tem-se que algumas correntes quentes precisam ser resfriada, e algumas correntes frias precisam ser aquecida. Com o intuito de minimizar o consumo dessas fontes de energia, utiliza-se um equipamento conhecido como trocador de calor, que promove a troca de energia entre essas correntes, caracterizando dessa forma a integração energética comentada anteriormente.

Geralmente, nesses processos são empregados vários trocadores de calor constituindo assim uma RTC. A RTC será a responsável por promover a integração

energética entre as correntes de processo e reduzir assim o consumo das utilidades quente e fria. “A diminuição desse consumo é também vantajosa do ponto de vista ambiental, uma vez que o calor rejeitado num processo químico não somente representa um desperdício de combustível, mas também significa que mais poluição está sendo gerada” (NOVAZZI, 2006).

Como já mencionado anteriormente, a integração energética das correntes do processo se dá por meio de uma RTC. No projeto da rede, o dimensionamento é realizado levando em consideração as condições nominais de vazão e temperatura das correntes. Entretanto, durante a operação da planta, oscilações nos valores nominais das temperaturas de entrada de cada corrente podem ocorrer e, devido à integração energética, essas oscilações afetarão também outras correntes que não estão necessariamente interligadas à que sofreu a oscilação (NOVAZZI, 2006).

Dessa forma, percebe-se que a operação de uma RTC é uma tarefa não muito fácil, pois é necessário manter as temperaturas de saída de cada trocador de calor dentro de faixas específicas e preferencialmente constantes, com o objetivo de manter-se inalteradas as exigências energéticas que o processo demanda.

A diferença básica entre um sistema sem integração energética e um sistema energeticamente integrado é que no sistema energeticamente integrado, as temperaturas não são mais alteradas diretamente em função do uso da utilidade quente ou fria e sim através da disponibilidade energética em cada corrente quente ou fria do processo. Através da manipulação das válvulas de *bypasses* existentes na RTC, é possível diminuir ou aumentar a carga térmica do trocador de calor, desviando uma fração maior ou menor da vazão principal, que é fornecida ao trocador de calor, diretamente para a saída do mesmo.

Através dos fatos apresentados anteriormente, nota-se que é fundamental a utilização de um sistema de controle eficiente em uma RTC, sendo que o sistema de controle deve atender os requisitos de *set-point* fixo para as temperaturas de saída da RTC, realizando a rejeição dos possíveis distúrbios que possam eventualmente ocorrer durante a operação da planta, manipulando adequadamente as válvulas de *bypasses* existentes em cada trocador de calor de uma RTC, alterando a carga térmica do trocador de calor e consequentemente, atingindo as especificações previamente estabelecidas.

1.2. Justificativa para o desenvolvimento do trabalho

O presente trabalho tem a sua justificativa associada ao uso correto e eficiente da energia disponível em processos químicos, através da integração energética entre as correntes de processo. Embora o foco principal do trabalho não seja a integração propriamente dita, o principal equipamento e o responsável pela integração, que é o trocador de calor, será o objeto de estudo inicial, sendo apresentadas as suas respostas dinâmicas, tanto em simulação como também de forma experimental. O estudo do trocador de calor e das suas dinâmicas é fundamental, pois uma RTC é formada através da interconexão de dois ou mais trocadores de calor, para que as metas estabelecidas de consumo e de custo pela análise *Pinch* possam ser estabelecidas.

Além do estudo das dinâmicas do trocador de calor, serão demonstradas no presente trabalho técnicas de controle baseadas em controle ótimo, técnicas essas que não foram encontradas na revisão bibliográfica resolvendo o problema de controle das RTC´s. As técnicas em questão são representadas nesse trabalho pelo controle LQR (Regulador Linear Quadrático) e pelo controle H-Infinito, representando uma solução de controle intermediária, entre as técnicas de controle mais simples (PID) e as mais complexas (Preditivos), sob o ponto de vista de projeto e equacionamento. Além disso, não foram encontradas na revisão bibliográfica aplicações da técnica LQR e H-Infinito direcionadas à implementação do controle em malha fechada de uma RTC.

1.3. Metodologia e objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal, apresentar a aplicação de duas técnicas de controle multivariável em uma RTC, fornecendo os resultados obtidos em simulação e também experimentais. Utilizou-se como suporte para o desenvolvimento dos projetos dos controladores e também para a obtenção dos resultados em simulador, o modelo matemático do trocador de calor do tipo casco e tubo, desenvolvido por NOVAZZI (2006), modelo esse que será detalhado mais adiante.

Para que os resultados experimentais das técnicas de controle pudessem ser obtidos, um projeto de uma RTC em escala piloto, contendo duas correntes quentes

e apenas uma corrente fria, foi desenvolvido e posteriormente montado no Laboratório de Engenharia Química do Centro Universitário da FEI. As variáveis controladas da RTC são as temperaturas de saída de cada corrente fria e as variáveis manipuladas são as posições dos *bypasses* frios. A Figura 1.1 apresenta um esquema simplificado do projeto proposto, contendo toda a instrumentação necessária para a aplicação das técnicas de controle. A nomenclatura utilizada para representar a instrumentação designa *TT* para os transmissores de temperatura e *FT* para os transmissores de vazão. Já as bombas de circulação são representadas por *B1*, *B2* e *B3* e os trocadores de calor estão representados por *TC1* e por *TC2*. As válvulas de desvio (*bypass*) da vazão de cada trocador são de abertura proporcional. A geração das correntes quentes será realizada através de um sistema de aquecimento baseado em resistências elétricas. Já para a corrente fria optou-se por utilizar a água externa proveniente da caixa d'água disponível no laboratório. Todos os sinais dos transmissores de temperatura, de vazão e também os sinais necessários para a abertura e fechamento das válvulas, serão fornecidos a partir de um sistema de aquisição de dados, através de uma placa de aquisição instalado em um computador PC.

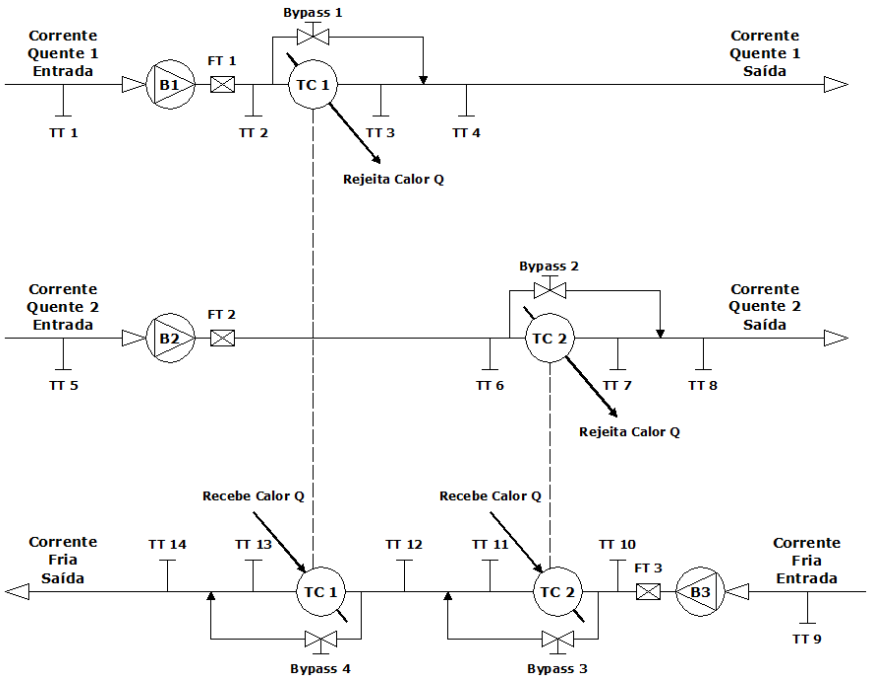

Figura 1.1 – Esquema simplificado da RTC.

O modelo do trocador de calor proposto por NOVAZZI (2006) apresenta uma incerteza paramétrica, que é o coeficiente global de troca térmica – *U*. Esse

coeficiente é o parâmetro responsável por englobar todas as aproximações realizadas na elaboração do modelo. O presente trabalho apresentará a validação experimental da estrutura do modelo por derivadas parciais proposto por NOVAZZI (2006), uma vez que o autor apresentou estudos e resultados obtidos apenas em simulação.

A validação será obtida através de um procedimento previamente estabelecido, sendo esse procedimento aplicado em três diferentes trocadores de calor: um trocador do kit didático *Armfield* e dois trocadores da RTC. Através da variação do coeficiente global de troca térmica é possível ajustar os resultados simulados com os resultados obtidos experimentalmente, onde o critério de erro quadrático foi utilizado como uma forma de demonstrar a qualidade do ajuste realizado.

Com o modelo matemático validado e a RTC construída, a etapa final é a realização do controle em malha fechada da RTC. Escolheu-se a técnica de controle LQR e a H-Infinito para implementar o controle em malha fechada na RTC projetada, sendo técnicas de controle alternativas entre alguns dos controladores mais utilizados em plantas químicas, como por exemplo, o controlador PID, o sistema de desacoplamento de variáveis (*decoupling system*) e também, os controladores preditivos.

1.4. O trocador de calor

Uma característica comum a diversos processos industriais é que em sua grande maioria, as indústrias têm como objetivo a transformação da matéria prima em produtos finais, fazendo algum tipo de transformação física ou química dessa matéria prima. Para que essa transformação ocorra, as indústrias utilizam uma grande quantidade de energia na forma de calor.

Sendo assim, é necessário que esse calor gerado seja utilizado com uma máxima eficiência, evitando assim um consumo extra de energia, geralmente obtida a partir da queima de algum tipo de combustível fóssil.

Porém, apesar da maioria dos processos industriais necessitarem de energia na forma de calor para a produção de seus produtos, alguns outros processos necessitam que essa energia na forma de calor seja retirada, ou seja, necessitam resfriar os seus produtos finais. Dessa forma, surge a figura de um importante

equipamento, que promove a troca de energia entre esses processos, equipamento esse conhecido como trocador de calor.

Os trocadores de calor são equipamentos responsáveis por realizar a tarefa de transferir energia térmica de um sistema qualquer para o meio ambiente ou entre as partes de um sistema. Os trocadores de calor são geralmente classificados considerando apenas a forma com que a troca térmica é realizada e também através das características de sua construção, dividindo-os com relação à forma com que a troca térmica é realizada, estabelecendo dois tipos básicos de trocadores: os de contato indireto e os de contato direto.

Trocadores de calor de calor de contato indireto:

Em um trocador de calor de contato indireto, os fluidos permanecem separados e o calor é transferido continuamente através de uma parede de separação dos fluidos, parede essa responsável por realizar a transferência de calor. Além disso, é possível ainda subdividir os trocadores de contato indireto em dois outros grupos, que são:

- ✓ ***Transferência Direta*:** nesse tipo de trocador, a troca de calor entre os fluidos ocorre de uma forma contínua através da parede que os separa. Esses trocadores de calor também são conhecidos também como trocadores de calor de recuperação e representam a maioria dos trocadores de calor usados em processos. Como exemplos desses tipos de trocadores têm-se o trocador de placa, tubular e de superfície estendida;
- ✓ ***Transferência Indireta*:** já nesse tipo de trocador, a troca de calor ocorre pela passagem do fluido por uma superfície de transferência de calor, conhecida também como matriz de troca térmica. Esses trocadores de calor também são conhecidos como trocadores de calor de regeneração. Como exemplos desse tipo de trocador têm-se o chuveiro elétrico e o bebedouro de água gelada.

Trocadores de calor de calor de contato direto:

O outro tipo de trocador de calor é o trocador de calor de contato direto. Nesse tipo de trocador, o fluido quente e frio se misturam, fazendo com que, além da transferência de calor, ocorra também uma troca de massa entre os fluidos. É

possível que sejam atingidas elevadas taxas de troca térmica quando comparadas às dos trocadores de contato indireto, além de apresentar um custo de construção relativamente pequeno. Como exemplo, podemos citar as torres de resfriamento de água. Nesse equipamento, a troca térmica é realizada entre a água (que possui um movimento descendente) e o ar (que atravessa essa água com um movimento ascendente).

Os trocadores de calor utilizados no presente trabalho são de contato indireto casco tubo do tipo 1-1. Como já comentado anteriormente, nesse tipo de trocador os fluidos permanecem separados e o calor é transferido continuamente através de uma parede que os separa. O índice 1-1 está relacionado com a quantidade de passagens do fluido dentro do equipamento, seja ele quente ou frio, conforme pode ser observado na Figura 1.2.

O trocador de calor do tipo casco e tubo foi escolhido levando em consideração que os trocadores de calor do tipo casco e tubo representam algo em torno de 60% de todos os trocadores de calor empregados nos processos industriais, pois são trocadores de calor que podem ser projetados para operar em diferentes escalas de pressão e de temperatura (HEWITT, 1993).

Geralmente, logo após alguns estudos de eficiência energética e de integração de sistemas, os projetistas identificam a necessidade de se utilizar não apenas um único trocador de calor, mas sim de se utilizar um conjunto de trocadores de calor, conjunto esse que recebe o nome de RTC, que será o próximo assunto a ser abordado neste capítulo.

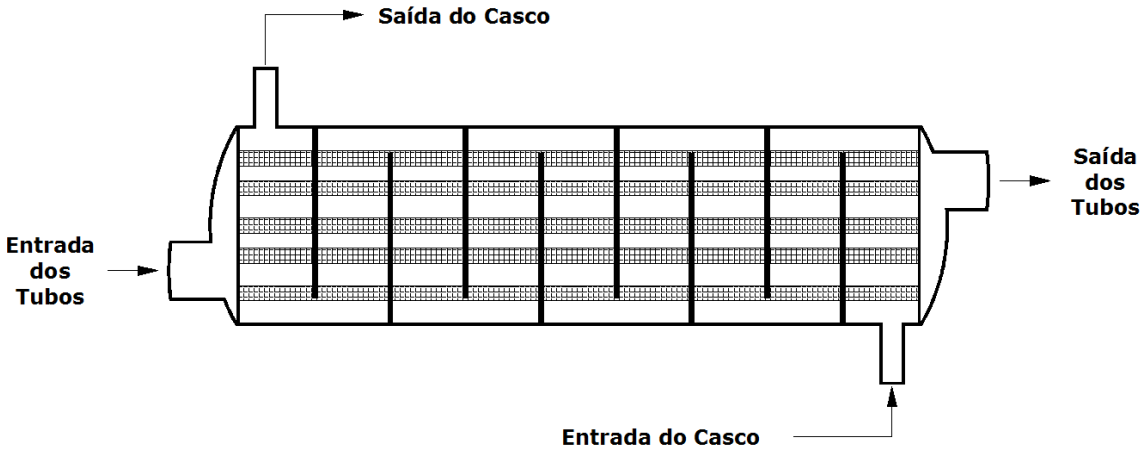

Figura 1.2 – Trocador de calor do tipo casco e tubo: estrutura interna simplificada.

1.5. A integração energética nos processos

As RTC's representam uma etapa importante nos processos químicos industriais, pois nesses processos existem correntes quentes que precisam ser resfriadas e correntes frias que precisam ser aquecidas. Diante desse cenário, o trocador de calor representa um papel vital na conservação de energia no processo produtivo.

Seguindo essa linha de raciocínio, a Figura 1.3 ilustra o exemplo de um reator químico com integração energética e sem integração energética. Por características de processo, identificou-se que uma elevação na temperatura dos seus reagentes proporciona um aumento da eficiência da reação, obtendo assim um produto final de qualidade superior. Devido à reação ser exotérmica, o produto final deixa o reator a uma alta temperatura e necessita ser resfriado para posteriormente ser estocado.

Sendo assim, a instalação de um trocador de calor promovendo a troca térmica entre a corrente de saída do reator com a corrente de entrada, caracteriza a integração energética do processo, diminuindo o consumo de utilidades quentes e frias que seriam necessárias para aquecer a matéria prima e resfriar o produto final.

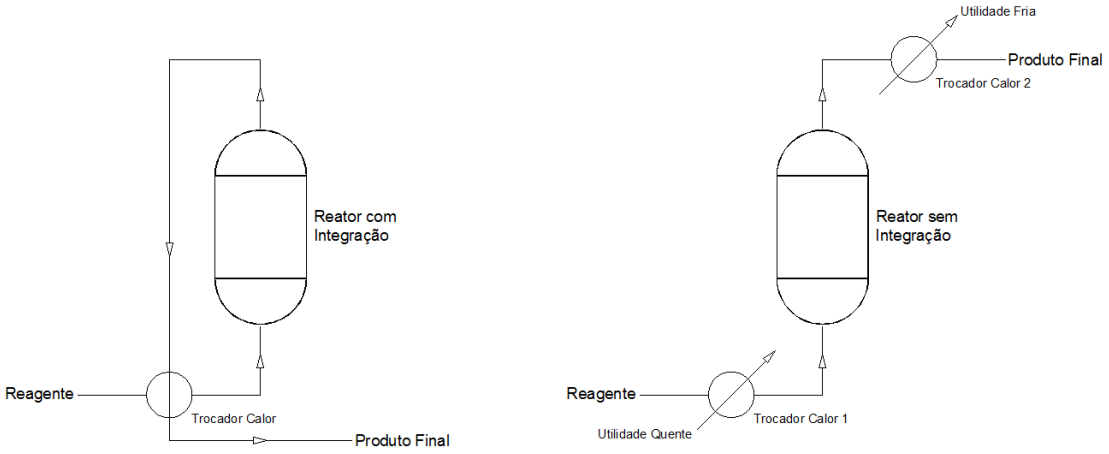

Figura 1.3 – Reator com e sem integração energética.

Para a realização do aquecimento / resfriamento descrito no exemplo acima, caso não fosse utilizada à técnica de integração energética, além da utilização de um trocador de calor extra, seriam utilizadas fontes externas de fornecimento de calor (no caso de aquecimento de uma corrente fria) ou fontes externas de retirada de calor (no caso de resfriamento de uma corrente quente). Essas fontes externas são conhecidas como utilidades quentes ou frias.

Para a geração dessas utilidades torna-se necessária a utilização de algum tipo de energia, que pode ser elétrica, térmica, solar, etc. Em sua grande maioria, as utilidades quentes nas indústrias são produzidas através das caldeiras, que são equipamentos capazes de gerar vapor de água em alta pressão a partir da queima de algum tipo de combustível.

Já as utilidades frias são produzidas basicamente de duas formas diferentes. A primeira forma é utilizando um sistema conhecido por torre de resfriamento. Nesse equipamento, a água quente entra pela parte superior da torre e vai escoando através de uma malha plástica semelhante a uma colméia. O ar é soprado para dentro da torre, atravessando essa malha em ângulos retos em relação ao fluxo de água. O resfriamento da água ocorre devido à agitação da água em torno da malha plástica, complementada pela circulação forçada de ar, tendo como produto final uma corrente de água com temperatura mais baixa. Uma segunda forma de produção de utilidade fria é através do equipamento chamado de *chiller,* onde o seu funcionamento assemelha-se ao de uma geladeira doméstica ou de um aparelho de ar condicionado. É usado um ciclo de refrigeração clássico, baseado na compressão e expansão de um gás refrigerante, em que a água a ser resfriada circula em torno de uma serpentina que contém esse gás a uma temperatura mais baixa.

A conclusão a que se chega é, que tanto para a geração de utilidade quente quanto para a geração de utilidade fria, tem-se a necessidade de utilização de alguma fonte externa de energia. Normalmente tem-se um custo elevado para a manutenção de ambos os sistemas em operação.

Sendo assim, as RTC´s são elementos importantes nos processos químicos, pois conforme comentado anteriormente, a necessidade da rede de trocador de calor é identificada logo após um estudo de integração energética, fazendo com que as correntes quentes do processo forneçam calor para as correntes frias que necessitam ser aquecidas e vice-versa, reduzindo consideravelmente dessa forma, o consumo de utilidades quentes/frias e diminuindo o gasto operacional da indústria.

Porém, o grande problema enfrentado nessa integração energética pelos engenheiros de processo é escolher quais correntes quentes devem e podem ser resfriadas e quais correntes frias devem e podem ser aquecidas, fazendo com que elas troquem calor entre si, conforme apresentado no exemplo do início desta seção.

Uma das técnicas atuais para desenvolver esse estudo e auxiliar os engenheiros a realizar a integração energética do processo da indústria é a

chamada tecnologia *Pinch* (conhecido também como método do estrangulamento energético – MPE) (HEWITT, 1993). O projeto da rede baseado nessa tecnologia prevê que o seu início deve ser feito a partir do ponto de estrangulamento energético, que é aquele em que a força motriz para a troca de calor entre uma corrente quente e uma fria é mínima.

A tecnologia *Pinch* nada mais é do que um estudo prévio, em que são estipulados basicamente três itens para que a RTC possa ser implantada:

- Estabelecer uma meta de consumo energético, fazendo com que o consumo de utilidades quentes e frias diminua, reduzindo os custos operacionais da planta;
- A área de troca térmica envolvida, que futuramente irá definir o número de trocadores de calor da rede;
- Os custos envolvidos para a implantação da RTC.

Atualmente, essa metodologia é uma ferramenta já consolidada na área de Projeto e Análise de Processos, sendo descrita e aplicada em muitos livros de Engenharia Química.

1.6. Revisão bibliográfica

NOVAZZI (2006) desenvolve em sua tese de doutorado, a modelagem e a simulação de trocadores de calor do tipo casco e tubo 1-1 e 1-2 em regime permanente. Um modelo não linear do trocador foi desenvolvido através do método da efetividade, levando-se em conta as condições operacionais, como a temperatura de entrada das correntes, vazão e posição dos *bypasses* nos trocadores. O modelo dinâmico é descrito por equações diferenciais parciais, que foram discretizadas e resolvidas pelo método das diferenças finitas. Além disso, o autor promoveu um estudo de controle em malha aberta e fechada, baseado em controle ótimo, objetivando a minimização do consumo de utilidade quente e fria, usando uma RTC. Segundo o autor, a minimização do consumo de utilidades foi atingida, satisfazendo as especificações de temperatura, com uma resposta dinâmica rápida.

JALILI-KHARAAJOO (2005) desenvolveu um controlador baseado em rede neural e que foi posteriormente implementado em uma planta piloto de trocadores de calor. A dinâmica da planta foi identificada usando uma rede neural, dinâmica essa

que foi utilizada para que a estratégia de controle preditivo pudesse fornecer o *setpoint* de saída da planta. Além disso, o desempenho desse controlador foi comparado em simulações realizadas com um Controle Preditivo Generalizado (GPC) e os resultados obtidos demonstraram a eficácia do controlador proposto.

O artigo TELLEZ *et al.* (2006a) apresenta a necessidade e a importância da determinação do comportamento dos distúrbios na temperatura e na variação da vazão das correntes quentes e frias de entrada em um trocador de calor. De acordo com o artigo, o estudo desse comportamento definirá a flexibilidade e a habilidade para que o sistema seja capaz de atingir as novas condições de operação. A análise da flexibilidade da rede de trocadores é extremamente importante para o desenvolvimento de controladores robustos e também para realizar modificações na estrutura do trocador ou da rede como um todo.

TELLEZ *et al.* (2006b) apresentam o estudo sobre a controlabilidade de RTC's. Ele afirma que a rede é o coração de uma planta energeticamente integrada, e as metodologias de síntese clássicas partem do princípio de que todas as condições e valores de projeto são constantes. Dessa forma, a controlabilidade pode ser obtida através de cinco etapas, permitindo que seja determinada a configuração da rede que apresente a melhor controlabilidade.

LU (1996) descreve um estudo experimental sobre o desempenho de um trocador de calor, onde as correntes quentes e frias estão configuradas para um fluxo em contra-corrente. Seis diferentes configurações de fluxo, com diferentes tubos foram testadas em um sistema de túnel de vento para estudar a importância da diferença da uniformidade de temperatura no desempenho efetivo do trocador de calor. O campo de diferenças de temperatura (TDF) e o fator da diferença da uniformidade de temperatura são fatores usados na construção do trocador e também para avaliar o seu desempenho.

VARGA *et al.* (1995) descrevem em seu trabalho um estudo sobre a controlabilidade e observabilidade estrutural de redes de trocadores de calor, com base em informações qualitativas sobre os trocadores de calor e também na topologia da rede. O autor ainda realizou uma modelagem matemática da RTC, considerando que os efeitos da variação das vazões são variáveis desconhecidas ao longo do tempo, que as temperaturas de entrada de cada corrente são consideradas como distúrbios e que as variações das cargas térmicas dos aquecedores e dos *chillers* são as variáveis de entrada.

GARCIA e ELSO (2008) desenvolveram uma metodologia de controle para ser aplicada em sistemas de turbinas de vento. Em seu trabalho, eles desenvolveram um sistema de controle, baseado em *gain schedule,* capaz de realizar a transição entre os diferentes ganhos, de forma estável, eficiente e rápida. A escolha entre os diferentes parâmetros existentes é dada a partir da análise da amplitude do erro da variável a ser medida. A técnica proposta foi testada em um sistema de posicionamento de geradores eólicos. Segundo os autores, esse controle de posição é extremamente crítico nesse tipo de sistema, pois uma combinação entre robustez, fadiga mecânica e desempenho do sistema como um todo é fundamental. A idéia apresentada nesse trabalho pelos autores pode contribuir para a utilização da RTC em diferentes pontos de operação, modificando apenas os ganhos do controlador.

PAPASTRATOS *et al.* (1993) desenvolveram um programa de computador do tipo CAD (*Computer Aided Design*), usando os conceitos básicos da termodinâmica, visando a auxiliar o desenvolvimento do projeto de redes de trocadores de calor. Segundo o autor, a parte mais importante e complexa em um projeto de uma rede é obter uma rede que não apresente um custo de implantação muito elevado. No projeto deve ser considerada, uma parcela quantitativa (custo dos trocadores de calor e da geração das utilidades quentes e frias) e uma parcela qualitativa (flexibilidade e controlabilidade na operação da rede). Dessa forma, o programa desenvolvido permite que os engenheiros projetistas possam ter mais flexibilidade e controle no projeto da rede, visando atingir o mínimo custo da mesma. Apesar do projeto da rede ser uma parte importante, o enfoque maior dado pelo autor foi dado à dinâmica e controle da rede.

SKOGESTAD *et al.* (2007) apresenta um trabalho desenvolvido para uma RTC (HEN – *Heat Exchanger Network*). Segundo o autor, quando apenas as válvulas de *bypass* e as utilidades quentes e frias são usadas como variáveis manipuladas, caracteriza-se como um problema de controle com restrições dinâmicas. O autor propõe na sua publicação um sistema de controle capaz de implementar a condição de operação ótima da rede de trocadores. A partir de informações fornecidas da rede e também, dos distúrbios nas variáveis de entrada, a estrutura de controle correspondente é obtida através da resolução de um problema de programação linear inteira (ILP), com duas funções objetivo. As simulações

dinâmicas demonstraram a capacidade da estrutura de controle, obtida através da ILP, em fornecer as condições ótimas de operação à rede de trocadores.

ODLOAK *et al.* (2006) apresentam em seu trabalho, uma proposta de controle e otimização *online* de uma RTC usando uma estrutura de controle em dois níveis. O nível mais baixo de controle é formado por um controlador preditivo (MPC), enquanto o nível mais alto é formado por um sistema de otimização *online.* O algoritmo do controlador MPC utiliza um modelo linear aproximado da rede, sendo capaz de predizer as variáveis de saída da rede a partir das restrições apresentadas. Já o sistema de otimização, emprega um modelo preciso da rede, capaz de calcular os valores ótimos para as variáveis manipuladas do MPC. Essa técnica foi testada pelo autor através de uma simulação rigorosa em uma rede de trocadores típica de um processo industrial.

1.7. Contribuições do trabalho

O presente trabalho trouxe como principal contribuição, o projeto, a montagem e a instrumentação de uma RTC no Laboratório de Engenharia Química do Centro Universitário da FEI, sendo que o mesmo passará a ser utilizado para fins didáticos voltado para o ensino e pesquisa em controle, eficiência energética e de operações unitárias.

Além do projeto e da construção da RTC, o trabalho também contribuiu realizando a validação matemática do modelo não linear de um trocador de calor casco tubo desenvolvido por NOVAZZI (2006). Em sua tese, NOVAZZI realizou apenas simulações em Matlab/Simulink com o modelo por ele desenvolvido.

As técnicas de controle propostas finalizam as contribuições da presente tese. São apresentados os resultados experimentais e simulados da aplicação da estratégia de controle LQR e do controle H-infinito, executando o controle em malha fechada da RTC. Além do projeto e dos resultados experimentais e simulados das técnicas de controle, um estudo demonstrando o relacionamento do controle LQR com o controlador PID é apresentado, permitindo assim que a sintonia do controlador PID possa ser realizada não de forma empírica ou baseada em tabelas de sintonia, mas sim com características de controle ótimo.

1.8. Estrutura do texto

O presente texto está estruturado em 7 Capítulos. No Capítulo 1 são apresentados o objetivo, a metodologia, justificativa e a motivação para o desenvolvimento do trabalho, além de apresentar a revisão bibliográfica sobre a proposta do trabalho a ser desenvolvido.

O Capítulo 2 tem como objetivo apresentar a fundamentação teórica necessária para o entendimento do trabalho proposto.

O Capitulo 3 apresenta as características do aparato experimental desenvolvido.

O Capítulo 4 apresenta a validação experimental do modelo matemático do trocador de calor. São apresentadas também as dinâmicas envolvidas no trocador de calor quando ocorre uma variação na vazão ou na temperatura de entrada do equipamento.

O Capítulo 5 apresentará os projetos e as simulações dos controladores da rede de trocadores de calor.

Finalizando o trabalho, o Capítulo 6 irá apresentar os resultados experimentais dos controladores LQR e H-infinito.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas com o trabalho desenvolvido, bem como os próximos passos e sugestões para desenvolvimentos e estudos futuros.