



Avaliação de metodologias de limpeza química com proposta de projeto de manutenção dos trocadores de calor do LADEQ

Eduardo Gazaneo Barboza

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Fabiana Valéria da Fonseca, D.Sc.

Prof. Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Março de 2020

AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE LIMPEZA QUÍMICA COM PROPOSTA DE PROJETO DE MANUTENÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR DO LADEQ

Eduardo Gazaneo Barboza

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:

Jéssica Rodrigues Pires da Silva, M.Sc.

Ladimir José de Carvalho, D.Sc.

Orientado por:

Fabiana Valéria da Fonseca, D.Sc.

Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Março de 2020

Barboza, Eduardo Gazaneo.

Avaliação de metodologias de limpeza química com proposta de projeto de manutenção dos trocadores de calor do LADEQ/ Eduardo Gazaneo Barboza. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2020.

x, 59 p.; il.

Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2020.

Orientadores: Fabiana Valéria da Fonseca e Rossana Odette Mattos Folly.

1. Trocador de calor. 2. Incrustação. 3. Limpeza química. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Fabiana Valéria da Fonseca e Rossana Odette Mattos Folly. I. Avaliação de metodologias de limpeza química com proposta de projeto de manutenção dos trocadores de calor do LADEQ.

À minha mãe Lys,
Ao meu pai Clovis,
Ao meu irmão Claudio.

“Que Deus nos conceda serenidade para aceitar aquilo não podemos mudar,
coragem para mudar as coisas que podemos
e sabedoria para discernir entre as duas.”

(Reinhold Niebuhr)

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Lys, por ter sido incansável na criação minha e do meu irmão sozinha com amor infinito e incondicional, e graças a quem foi possível mais esta realização.

Ao meu irmão Claudio, por seu companheirismo durante todos esses anos e suas piadas infames e essenciais em nossas vidas.

Ao meu pai Clovis, por ter sido um pedacinho de luz em cada pessoa com quem conviveu e ter deixado uma marca em todas elas, além de sua cópia viva em mim.

Às minhas avós Léa e Jorgina, por serem exemplos de mulheres tão guerreiras e tão gentis ao mesmo tempo.

À minha namorada Carol, por todo o seu carinho sem fim, sorrisos e incentivo para que eu concluísse mais essa etapa.

À minha família, em especial meu tio e padrinho Mário e minha prima Giulia, por todo amor, suporte e força que nos deram sempre, principalmente nos momentos mais difíceis.

A todos os meus amigos e colegas da turma, por tornarem esses anos de universidade muito divertidos e amenos, e por muito me ensinarem da vida além da engenharia.

Aos meus amigos do EQGatos que compartilharam tantos momentos comigo, desde estudo desesperado a alegria desmedida, de quem tenho muito orgulho e certeza que serão profissionais tão incríveis quanto os seres humanos que são: Gabi, Raquel, Chico, Ana, Samir, Dany e Barbara.

Ao meu amigo Zequinha pela enorme ajuda e iluminação durante a elaboração deste trabalho.

Ao caro professor Ladimir, por ter me ajudado a dar os primeiros passos deste projeto, e à Maju, por toda a assistência nas análises e solicitude nos meus vários pedidos de socorro.

Às minhas orientadoras, professoras Fabiana e Rossana, pela orientação, paciência, ensinamentos e dedicação.

Ao LADEQ, por disponibilizar os trocadores de calor para estudo.

Ao Laboratório de Tecnologia do Hidrogênio (LabTech) da Escola de Química/UFRJ pelas análises realizadas.

Ao Laboratório de Tratamento de águas e reuso de efluente (LabTare) e toda sua equipe, em especial ao técnico Leandro, pelas análises realizadas.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro, em especial à Escola de Química, pelo ensino da mais alta qualidade e vivência proporcionados.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

Este trabalho apresenta a comparação de três metodologias de intervenção química em trocadores de calor, duas delas com aplicação prática em indústrias de grande porte e a terceira apresentada somente como proposta, referindo-se ao sistema de trocadores de calor em escala piloto presentes no Laboratório de Engenharia Química da UFRJ (LADEQ). Os dois primeiros estudos de caso se dedicam a analisar a aplicação prática de duas diferentes intervenções químicas, uma neutralização e uma limpeza química *online*, evidenciando as dificuldades e êxitos encontradas no campo no momento de colocar a teoria na prática. A partir deles e da literatura disponível, visou-se a elaboração de um projeto de limpeza química, a fim de recuperar o trocador do LADEQ, avaliando a conjuntura atual, os parâmetros de processo e os dados dos equipamentos e incrustação, propondo uma metodologia para se alcançar um aumento de eficiência de troca térmica dos equipamentos. Informações sobre o material e configuração dos trocadores de calor foram levantados, e análises da água e da incrustação foram realizadas. Com esses elementos, um roteiro de limpeza química foi proposto, considerando alguns cenários mais usuais quando os dados eram incompletos ou inexistentes. Portanto, não foi possível a elaboração completa e precisa de uma limpeza química. Apesar disso, trabalhos futuros podem se desenvolver a partir deste, dando continuidade à elaboração de um projeto completo e até a implantação da limpeza.

AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE LIMPEZA QUÍMICA COM PROPOSTA DE PROJETO DE MANUTENÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR DO LADEQ

Eduardo Gazaneo Barboza

Março, 2020

Orientadores: Prof. Fabiana Valéria da Fonseca, D.Sc.
Prof. Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

ÍNDICE

Capítulo I - Introdução	1
Capítulo II - Revisão bibliográfica	3
II.1 - Trocador de calor	3
II.1.1 - Classificação dos trocadores de calor	3
II.2 - Incrustação	11
II.2.1 - Custo	12
II.2.2 - Categorias	14
II.2.3 - Etapas fundamentais da incrustação	15
II.2.4 - Controle de incrustação	18
II.3 - Limpeza química	19
Capítulo III - Metodologias	23
III.1 - Apresentação dos casos	23
III.2 - Caso 1: Neutralização de trocadores de calor de resfriamento de ácido sulfúrico	23
III.2.1 - Apresentação do caso	23
III.2.2 - Metodologia	25
III.2.3 - Planejamento	27
III.2.4 - Execução	29
III.2.5 - Conclusão	31
III.3 - Caso 2: Limpeza química online de trocador de calor resfriador de MEA	33
III.3.1 - Apresentação do caso	33
III.3.2 - Metodologia	36
III.3.3 - Planejamento	38
III.3.4 - Execução	40
III.3.5 - Conclusão	44
III.4 - Projeto de limpeza	45
III.4.1 - Apresentação do caso	45
III.4.2 - Análises realizadas	47
III.4.3 - Roteiro de projeto de limpeza	54
Capítulo IV - Considerações Finais	59
Referências bibliográficas	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Critérios usados na classificação de trocadores de calor modificado (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012) (adaptado)	4
Figura 2. Classificação dos trocadores de calor segundo Shah (Kakaç, Bergles e Mayinger, 1981; Shah e Sekulic, 2003) (adaptado)	5
Figura 3. Trocador de calor casco e tubo com um passe no casco e um passe nos tubos (modelo de operação co-corrente) (Shah e Sekulic, 2003) (adaptado).	8
Figura 4. Trocador de calor do tipo casco e tubo com dois passes no tubo e um passe no casco com chicanas (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012)	9
Figura 5. Trocador de calor casco e tubo com tubo em U e passe único no casco com chicanas (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012)	9
Figura 6. Trocador de calor casco e tubo similar ao da Figura 5, porém com cabeçote flutuante (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012) (adaptado)	9
Figura 7. Classificação de trocadores de calor segundo configuração do escoamento: (a) cocorrente; (b) contracorrente; (c) cruzado com ambos fluidos não misturados; (d) cruzado, com fluido 1 misturado e fluido 2 não misturado (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012) (adaptado)	10
Figura 8. Desenho esquemático de um tubo incrustado (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012) (adaptado)	12
Figura 9. Desenho esquemático da formação de incrustação com alguns processos de deposição e remoção (Kazi, 2012)	17
Figura 10. Configuração dos trocadores de calor E-7409, E7416 e E-7417, de cima para baixo	24
Figura 11. Fluxograma lógico da metodologia proposta (elaboração própria)	26
Figura 12. Esquema simplificado da vista superior da área de intervenção e seus arredores. Ao centro, vê-se os 3 trocadores de calor, dentro do dique de contenção (elaboração própria)	28
Figura 13. Conexões de entrada (N7) e saída (N1 e N2) da solução no trocador durante a neutralização por circulação	28
Figura 14. Esquema do projeto de montagem do sistema de circulação (elaboração própria)	29
Figura 15. Altura da purga em relação à altura do retorno ao tanque (elaboração própria)	29
Figura 16. Esquema da montagem final do sistema de circulação (elaboração própria)	30
Figura 17. Linha de drenagem dos trocadores com o bloqueio realizado (elaboração própria)	33
Figura 18. Fluxograma simplificado de um sistema de absorção de CO ₂ com MEA (Souza, 2012).	34
Figura 19. Configuração do trocador de calor E-119	35
Figura 20. Fluxograma lógico da metodologia proposta (elaboração própria)	37
Figura 21. Posicionamento dos contêineres (foto própria)	39
Figura 22. Esquema do circuito de limpeza química com skid (elaboração própria)	40
Figura 23. Ponto de injeção de ácido na linha de água (foto própria)	40
Figura 24. Curva de pH ao longo do procedimento de limpeza.	42
Figura 25. Curvas de vazão (a) e temperatura de saída da MEA/concentração de CO ₂ na corrente de saída de gás do absorvedor (b)	42
Figura 26. Temperatura de saída da água de refrigeração ao longo do tempo	43

Figura 27. Bateria de trocadores de calor do LADEQ (foto própria)	46
Figura 28. Esquema simplificado do circuito de refrigeração (elaboração própria)	46
Figura 29. Foto do trocador fora de uso com o casco aberto (foto própria)	48
Figura 30. (a) Exterior do feixe dos tubos indicando os pontos de amostragem; (b)(c)(d) Da esquerda para direita: pontos de amostragem Casco 1, Casco 2 e Casco 3 em evidência (fotos próprias)	48
Figura 31. Interior de alguns tubos do trocador exposto (fotos próprias)	49
Figura 32. Potencial zeta da amostra.	51
Figura 33. Taxa de corrosão do aço carbono para diferentes pH no ferro e aço (AFSA - Aluminium Federation Of South Africa, 2011) (adaptado)	52
Figura 34. Partes do circuito atual do sistema de refrigeração, constituído de PVC (fotos próprias)	53
Figura 35. Esquema do caminho percorrido pelos fluidos (elaboração própria)	54
Figura 36. Etapas do procedimento de limpeza sugerido (elaboração própria)	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Custos anuais de incrustação total em todos os equipamentos e processos em alguns países (estimativa de 1992) (Awad, 2011)	13
Tabela 2. Efeito de parâmetros na incrustação (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012) (adaptado)	18
Tabela 3. Ácidos e respectivas substâncias removidas (Gentil, 1983)	20
Tabela 4. Agentes químicos e materiais base compatíveis (Gentil, 1983)(Aranha, 1994) (adaptado)	20
Tabela 5. Vantagens e desvantagens da limpeza química	22
Tabela 6. Dados técnicos dos trocadores de calor	24
Tabela 7. Principais conexões dos trocadores de calor	25
Tabela 8. Tempo de residência de cada trocador de calor	27
Tabela 9. Tempo de cada neutralização e consumo de água e barrilha.	31
Tabela 10. Consumo de água de cada etapa da neutralização do trocador E-7417	32
Tabela 11. Dados técnicos do trocador de calor	35
Tabela 12. Caracterização da incrustação no trocador. (*Orgânicos voláteis e umidade)	35
Tabela 13. Cronologia da atividade.	41
Tabela 14. Cálculo da quantidade de calor trocada antes e depois da limpeza.	44
Tabela 15. Comparação dos principais parâmetros antes e depois da limpeza química	45
Tabela 16. Características dos trocadores de calor do LADEQ	45
Tabela 17. Resultados dos parâmetros analisados	51
Tabela 18. Valores de potencial zeta medidos da amostra	51
Tabela 19. Condições operacionais em limpeza química com ácidos clorídrico e sulfâmico	56

Capítulo I - Introdução

Trocadores de calor são componentes essenciais em sistemas complexos de engenharia relacionados à transformação e geração de energia em cenários industriais (Taher *et al.*, 2012). Sua importância tem crescido cada vez mais do ponto de vista de conservação, conversão e recuperação de energia bem como sob a ótica das preocupações ambientais, tais quais poluição térmica, do ar, da água e eliminação de resíduos. Somente nos Estados Unidos, os trocadores de calor constituem uma indústria multibilionária, havendo, em 2003, mais de 300 empresas envolvidas na manufatura de uma larga gama deste equipamento, segundo Shah e Sekulic (2003).

O desenvolvimento dessa tecnologia e sua crescente importância acarretaram ao surgimento dos mais diversos tipos de trocadores de calor, de modo que muitas são as formas em que podem ser classificados, desde quanto à sua configuração como pela extensão de sua área de troca e sua funcionalidade.

Essa variedade e versatilidade se deram devido a demandas extremamente particulares das mais variadas aplicações nas indústrias, estando presente no aquecimento de ambientes, no condicionamento de ar, na produção de potência, na recuperação de calor em processos e no processamento químico (Incropera *et al.*, 2008). Nestas últimas, encontram-se exemplos como em refinarias, fertilizantes, gases industriais, álcalis, entre outras, onde a troca térmica é necessária ora para acondicionamento de produto, ora para favorecer uma reação química, ou ainda para economizar energia.

O princípio implementado por um trocador de calor é normalmente visto como sendo o processo de transferência de calor entre dois fluidos que estão a diferentes temperaturas e se encontram separados por uma parede sólida. Embora esse seja o arranjo mais comum, há casos em que as circunstâncias variam um pouco, como em torres de resfriamento, onde não há separação física entre os fluidos, que estão em contato direto. Em todo caso, independentemente da conformação do equipamento, um permutador deve realizar a troca desejada nas condições térmicas das diferentes correntes com quedas de pressão dentro dos valores aceitáveis e continuar a fazê-lo por um período de tempo específico (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012). Contudo, durante a operação, a superfície de troca térmica tende a acumular material, condição que forma a chamada incrustação, cujo aumento ocasiona uma elevação na resistência térmica e na queda de pressão, resultando numa perda de eficiência.

A natureza dos depósitos pode ser diversa. É classificada normalmente quanto ao mecanismo de formação da incrustação, podendo ser por deposição de particulado, cristalização/precipitação, corrosão, reação química ou bioincrustação. Cada um desses mecanismos provém das características do sistema no qual se encontra, tanto pelas condições operacionais quanto pela composição físico-química dos fluidos e impurezas presentes, que gera um depósito de características distintas.

Enquanto o aprimoramento da compreensão dos mecanismos de troca térmica e o desenvolvimento de correlações e técnicas para aplicação no projeto de trocadores de calor foi alvo de muita atenção, ao fenômeno da incrustação por muito tempo foi dada relativamente pouca importância (Bott, 1995). Entretanto, o custo gerado pela negligência desse processo

espontâneo é elevado, e só começou a ser mais abordado a partir do final da década de 1980, ganhando mais visibilidade a partir de meados da década de 1990 e no início do século seguinte. Juntamente com essa nova percepção de custos, a manutenção foi mais valorizada e seus métodos se desenvolveram a fim de atender a esse problema.

Muitos dos esforços realizados são no sentido de retardar ou eliminar o processo de formação da incrustação. Para tal, são utilizados produtos químicos como inibidores, dispersantes e biocidas, a fim de atuar sobre os causadores de depósitos. Ajustes dos processos também são aplicados para mitigação desse fenômeno. Apesar dessas estratégias, o acúmulo de material nas superfícies de troca eventualmente acontece. Nesses casos, é necessário adotar medidas corretivas que visem eliminar esse material e recuperar a eficiência de troca do equipamento. Limpezas mecânicas são técnicas comumente usadas, mais frequentemente com o equipamento fora de operação (também chamadas de off-line) do que em operação (chamadas de limpezas online), porém possuem limitações para alcançar regiões de difícil acesso. Em certos casos, o único modo de alcançar essas regiões é utilizando uma limpeza química (Awad, 2011), que normalmente apresenta maior eficiência que a mecânica. Muitas variáveis são envolvidas nesse processo, desde a escolha dos produtos químicos com maior compatibilidade com o depósito e menor agressão ao material, quanto aos parâmetros ideais para que a recuperação do trocador seja máxima e a agressão à superfície do permutador seja nula ou mínima.

Neste trabalho, são apresentadas no Capítulo III três metodologias de intervenção química em trocadores de calor, duas delas com aplicação prática em indústrias de grande porte. A terceira metodologia, apresentada somente como proposta, referiu-se a um sistema de trocadores de calor em escala piloto.

Devido à importância dos permutadores de calor nas indústrias e no cotidiano dos mais variados processos abrangidos na engenharia química, o Laboratório de Engenharia Química da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro possui dois trocadores de calor, para que os alunos possam experimentar uma maior vivência prática com equipamentos de maior porte que os de escala de bancada (Tomaz e Silva, 2016). Por se tratar de trocadores que vem sendo usados há mais de quatro décadas sem passar por manutenção adequada, partículas foram sendo acumuladas ao longo dos anos em suas superfícies de troca, que, embora tenha sido feita uma limpeza no interior de seus tubos, o lado externo não sofreu manutenção, devido à dificuldade de acesso.

Dado as circunstâncias, este trabalho visou a elaboração de um projeto de limpeza química, a fim de recuperar esse trocador por completo, avaliando a conjuntura atual, os parâmetros de processo e os dados dos equipamentos e incrustação, propondo uma metodologia para se alcançar um aumento de eficiência de troca térmica dos equipamentos em questão.

Capítulo II - Revisão bibliográfica

II.1 - Trocador de calor

Trocadores de calor são dispositivos que promovem a transferência de energia térmica entre dois ou mais fluidos a diferentes temperaturas (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012). Incropera *et al.* (2008) restringem essa definição ao adicionar que os fluidos, além de estarem a diferentes temperaturas, estão separados por uma parede sólida. Uma definição mais abrangente e completa sobre os trocadores de calor é dada por Shah e Sekulic (2003): “Um trocador de calor é um dispositivo usado para transferir energia térmica (entalpia) entre dois ou mais fluidos, entre uma superfície sólida e um fluido, ou entre partículas sólidas e um fluido, a diferentes temperaturas e em contato térmico”.

Um permutador de calor consiste em elementos de transferência de calor, como o núcleo ou matriz contendo a superfície de troca térmica, e elementos de distribuição do fluido, como *headers*, *manifolds*, tanques, entradas e saídas de bocais ou tubulações (Shah e Sekulic, 2003).

A superfície de troca térmica é a superfície do núcleo que está em contato direto com os fluidos e através da qual o calor é transferido por condução. Esta parte da superfície a qual está em contato direto com ambos os fluidos quente e frio e transfere energia térmica entre eles é denominada de superfície primária ou direta. Ainda segundo Shah e Sekulic (2003), a fim de aumentar a área de transferência de calor, apêndices podem ser conectados à superfície primária para fornecer uma superfície estendida, secundária ou indireta. Esses elementos da superfície estendidas são chamados de aletas. Desse modo, o calor é conduzido pela aleta e transferido por convecção (e/ou radiação) dela (através da área superficial) para o fluido ao entorno, ou vice-versa, dependendo as aletas estão sendo resfriadas ou aquecidas. Como resultado, a adição de aletas à superfície primária reduz a resistência térmica neste lado e conseqüentemente aumenta a transferência de calor total da superfície para uma mesma diferença de temperatura.

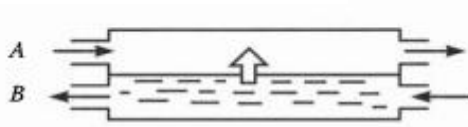
II.1.1 - Classificação dos trocadores de calor

Os trocadores de calor são utilizados nas indústrias de processos, energia, petróleo, transporte, condicionamento de ar, refrigeração, criogênica, recuperação de calor, combustível alternativo e manufatura, entre outras. Essa versatilidade é possível pois os permutadores de calor se apresentam nas mais diversas configurações estruturais e de processo. Conseqüentemente, podem ser classificados de muitos modos diferentes.

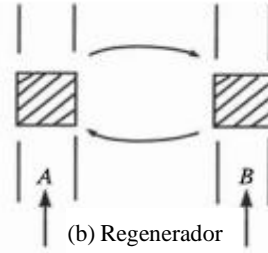
Trocadores de calor convencionais são normalmente classificados principalmente quanto à geometria de construção e configuração do escoamento. A classificação quanto a trocadores recuperadores e regeneradores é outra forma de classificar. Embora alguns autores façam essa distinção dentro de outras classificações (como de acordo com processo de transferência ou tipo de construção), outros preferem explicitá-la a fim de ressaltar sua importância, considerando critérios principais (Figura 1): recuperadores/regeneradores, processos de transferência (contato direto ou contato indireto), geometria de construção (tubos, placas e superfícies estendidas), mecanismos de transferência de calor (fase única ou duas fases) e configuração do escoamento (paralelo, contracorrente e escoamento cruzado) (Hewitt, Shires e Bott, 1994; Kakaç, Bergles e Mayinger, 1981; Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012).

Figura 1. Critérios usados na classificação de trocadores de calor modificados (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012) (adaptado)

- Recuperador/regenerador

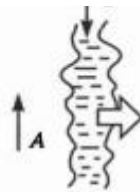


(a) Recuperador

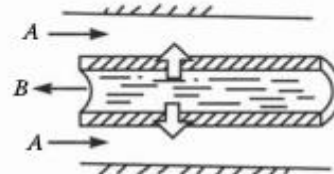


(b) Regenerador

- Transferência por contato direto/indireto



(c) Transferência por contato direto
Transferência de calor através da interface entre dois fluidos

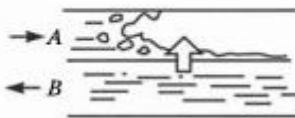


(d) Transferência por contato indireto
Transferência de calor através de parede: fluidos não estão em contato

- Fase única/duas fases



(e) Fase única

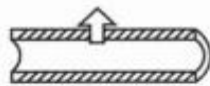


(f) Evaporação

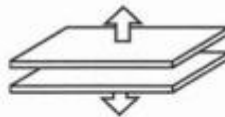


(g) Condensação

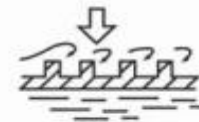
- Geometria



(h) Tubos



(i) Pratos



(j) Superfícies estendidas

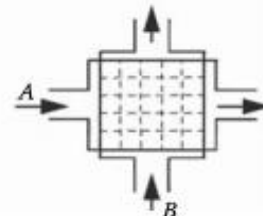
- Configuração do escoamento



(k) Paralelo



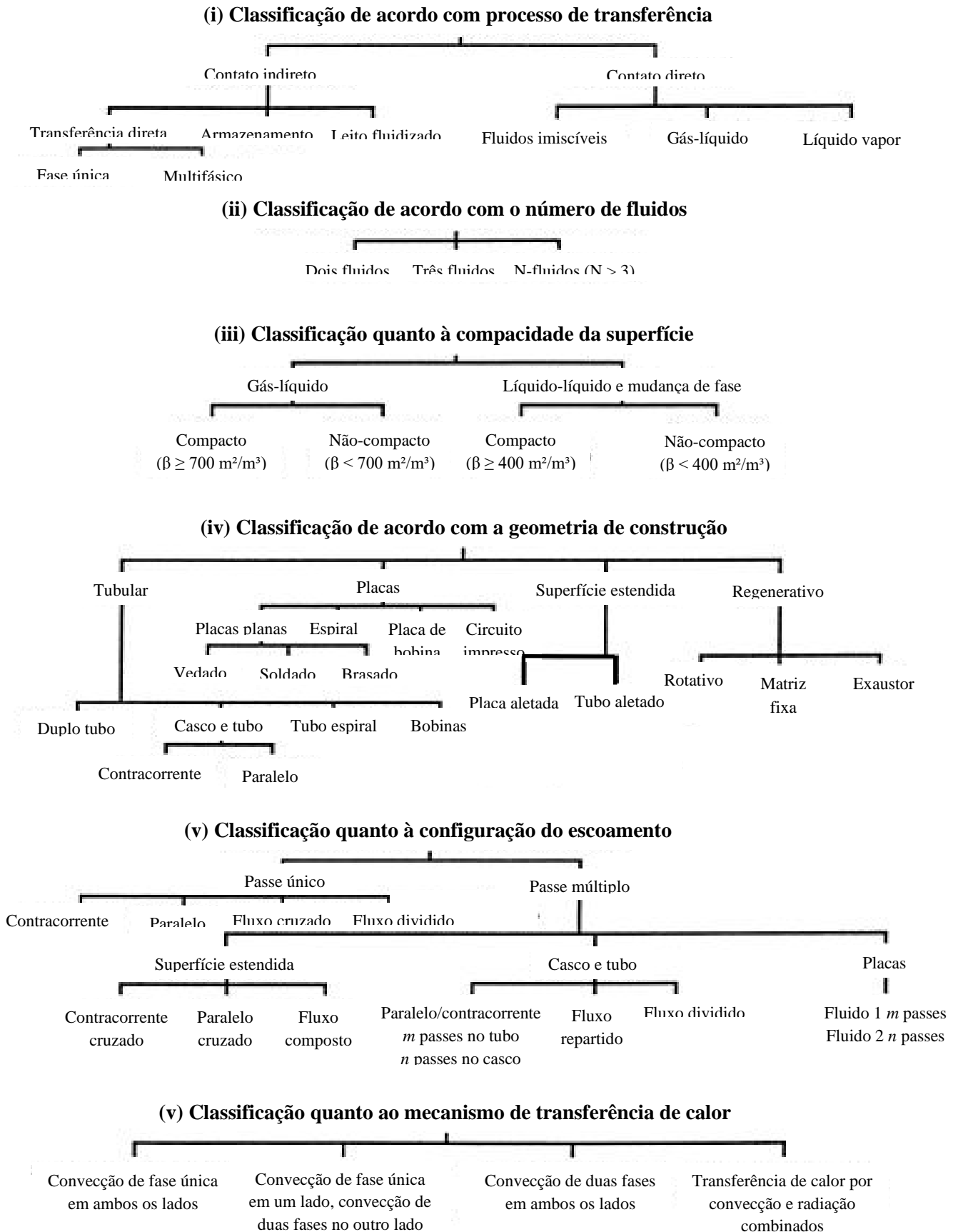
(l) Contracorrente



(m) Escoamento cruzado

Shah e Sekulic (2003) já utilizam outros critérios adicionais de classificação para trocadores, como número de fluidos e razão área de superfície de troca térmica/volume, e organizam em subseções de forma mais detalhada e clara, apresentado sob a forma de diagrama na Figura 2. Pela maior riqueza de detalhes e precisão, o presente trabalho seguirá esta classificação.

Figura 2. Classificação dos trocadores de calor segundo Shah (Kakaç, Bergles e Mayinger, 1981; Shah e Sekulic, 2003) (adaptado)



Como se observa nas figuras acima, existem diversas formas de classificação e subclassificação dos trocadores de calor que podem ser abordadas. Visto que os equipamentos em questão neste trabalho se tratam de trocadores de calor casco e tubo, sendo um condensador e um aquecedor, o interesse neste momento é enquadrá-los segundo cada classificação citada no segundo diagrama (Figura 2), algumas das quais também são apresentadas na Figura 1, sem entrar naquelas que não os concernem. O leitor interessado em se aprofundar nos outros tipos não abordados aqui encontrará-los em Kakaç et al (2012) e Shah e Sekulic (2003).

(i) Classificação de acordo com processo de transferência

Os trocadores de calor são aqui classificados conforme o processo de troca térmica, podendo ser esta do tipo de contato direto ou indireto. No contato direto, caso menos comum, o calor é transferido entre os fluidos quente e frio através do contato direto um com o outro. Não há parede entre as correntes e a troca térmica ocorre através da interface entre ambas, como ilustrado na Figura 1.c. No equipamento situado no LADEQ, por se tratar de um trocador casco tubo (Tomaz e Silva, 2016), os fluidos não possuem contato e a troca se dá através da superfície que separa ambos, configurando-o, portanto, do tipo contato indireto.

A maior parte dos trocadores de calor funcionam por contato indireto (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012), exemplificado na Figura 1.d, onde as correntes de fluido permanecem separadas e a transferência de calor ocorre continuamente através de uma parede divisória impermeável ou entrando e saindo de uma parede de forma alternada. Portanto, idealmente, não há contato direto entre os fluidos interagindo termicamente. Esse tipo de permutador pode ser ainda subdividido em três categorias: transferência direta, armazenamento e leito fluidizado. Este último, como evidente pelo próprio nome, se utiliza do princípio da condição de fluidização de partículas para uniformizar a temperatura em todo o leito e obter coeficientes de troca térmica muito maiores em comparação aos de partículas livres. Os outros dois correspondem, respectivamente, às classificações de recuperador e regenerador, mencionados anteriormente.

No trocador de armazenamento (Figura 1.b), ambos os fluidos fluem alternadamente através da mesma passagem, e, conseqüentemente, a troca de calor é intermitente, armazenando calor numa matriz que posteriormente aquecerá o fluido frio, o que não é o caso do trocador do tipo casco e tubo, sendo então considerado, de acordo com essa classificação, do tipo de transferência direta. Neste, o calor é transferido continuamente do fluido quente para o fluido frio através da parede divisória e, embora dois ou mais fluidos estejam presentes ao mesmo tempo no equipamento, não há mistura deles, pois cada um está num compartimento separado, como exemplificado na Figura 1.a.

(ii) Classificação de acordo com o número de fluidos

A maioria dos processos de aquecimento, resfriamento, recuperação de calor e rejeição de calor envolvem a troca térmica entre dois fluidos. Trocadores de calor com três fluidos são comuns em processos criogênicos e alguns processos químicos, como sistemas de separação de ar, unidade de separação ar-hélio, entre outros (Shah e Sekulic, 2003). No caso deste

trabalho, os fluidos utilizados são somente água em fase líquida e em fase vapor, sendo considerado, portanto, um trocador de dois fluidos.

(iii) Classificação quanto à compacidade da superfície

Conhecidos por trocador de calor compacto, são caracterizados por uma grande área de superfície de troca térmica por unidade de volume do trocador, resultando em espaço, peso, estrutura de suporte, custo, energia, etc. reduzidos. Possuem densas matrizes de tubos aletados ou placas e são tipicamente usados quando pelo menos um dos fluidos é um gás, segundo Incropera *et al.* (2008).

Para serem compactos, a densidade de área de superfície de um trocador deve ser superior a $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ para gases e um valor de $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ para líquidos (Incropera *et al.*, 2008). Um trocador típico do tipo casco e tubo da indústria de processo possui uma densidade de área superficial menor que $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ no lado de um dos fluidos com tubos planos, podendo aumentar esse valor duas ou três vezes com uma alta densidade de aletas em tubos aletados (Shah e Sekulic, 2003) Como o trocador não possui sequer aletas, é classificado como não compacto.

(iv) Classificação de acordo com a geometria de construção

As características de construção são uma das formas mais comuns de caracterização dos trocadores de calor (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012; Shah e Sekulic, 2003). Os principais tipos de construção são tubular, de placas, superfícies estendidas e regenerativos. Os regenerativos entram nesta categoria por apresentarem a particularidade de possuírem uma matriz de armazenamento de calor, o que dá a seu projeto e, conseqüentemente, construção uma característica única.

Conforme observa-se no diagrama na Figura 2, os trocadores casco e tubo se encontram, dentro dessa classificação, no subgrupo do tipo tubular.

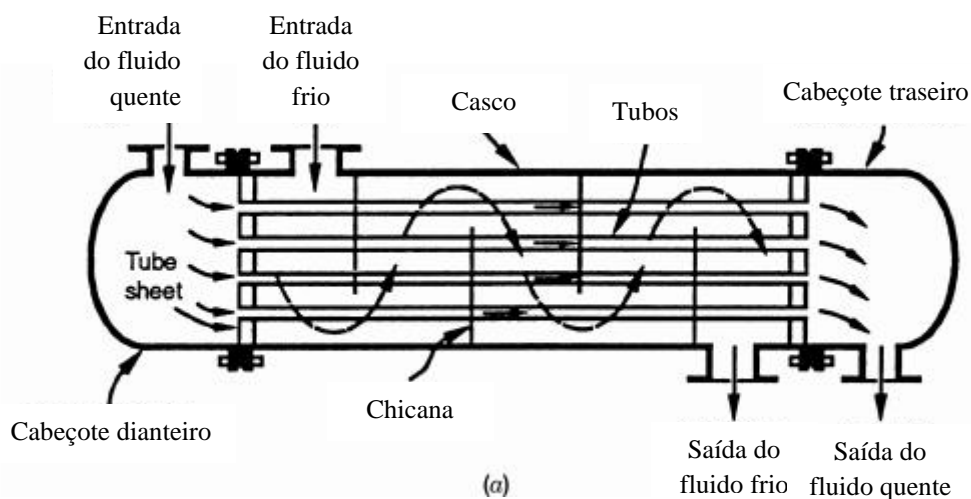
Os trocadores tubulares são normalmente constituídos de tubos circulares, embora tubos elípticos, retangulares ou ainda retorcidos são utilizados em algumas aplicações (Shah e Sekulic, 2003). Neles, um fluido escoar por dentro dos tubos e o outro pelo lado externo dos mesmos. Seu projeto possui uma considerável flexibilidade, visto que o diâmetro, número, comprimento e arranjo dos tubos pode variar. Essa categoria é utilizada principalmente para aplicações de transferência de calor entre líquidos ou entre líquido e mudança de fase (condensação e evaporação) por não possuírem grande área superficial a fim de obter uma boa transferência de calor com gases. São classificados em tubos concêntricos ou bitubular, tubo em espiral e casco e tubo, configuração dos estudos de caso e do trocador do LADEQ (Tomaz e Silva, 2016), portanto a de interesse neste trabalho.

- Trocadores de calor casco e tubo

Permutadores de calor do tipo casco e tubo são constituídos por um feixe de tubos geralmente redondos montados em grandes cascos cilíndricos com o eixo dos tubos paralelo ao do casco. Uma corrente de fluido escoar por dentro dos tubos enquanto a outro pelo lado

externo (lado casco), através ou ao longo deles. Os componentes principais deste tipo de trocador são os tubos (ou feixe de tubos), casco, cabeçote frontal, cabeçote traseiro, chicanas (ou defletores) e espelhos. Formas específicas desse tipo de trocador de calor diferem de acordo com os números de passes no casco e nos tubos. Sua forma mais simples envolve um único passe nos tubos e no casco, sendo mostrada na Figura 3. Geralmente, são instaladas chicanas para aumentar o coeficiente convectivo no fluido no lado do casco, induzindo turbulência e um componente de velocidade na direção do escoamento. Além disso, as chicanas apoiam fisicamente os tubos, reduzindo a vibração dos tubos induzida pelo escoamento (Incropera *et al.*, 2008).

Figura 3. Trocador de calor casco e tubo com um passe no casco e um passe nos tubos (modelo de operação co-corrente) (Shah e Sekulic, 2003) (adaptado).



Os principais objetivos do projeto deste equipamento são acomodar a expansão térmica (reduzir o estresse térmico), facilitar a limpeza ou alcançar a construção de menor custo se outras características não forem importantes. Ademais, há uma variedade de construções internas a se considerar na hora do projeto, dependendo da transferência de calor e queda de pressão desejadas, além dos métodos empregados para prevenir vazamentos, conter pressões e temperaturas de operação, controlar corrosão etc.

Os três tipos mais comuns de trocadores do tipo casco e tubo são os de espelho fixo, tubo em U e cabeçote flutuante (Figuras 4, 5 e 6). Em todos os três, o cabeçote frontal é estacionário enquanto o traseiro pode ser tanto estacionário quanto flutuante, dependendo do estresse térmico no casco, tubos ou espelhos devido a diferenças de temperatura resultantes da transferência de calor. No tipo de espelhos fixos, caso do trocador do LADEQ (Tomaz e Silva, 2016), o casco é soldado aos espelhos e não há acesso à parte externa dos tubos para limpeza mecânica. Essa opção de baixo custo possui um limite de expansão térmica, que pode ser um pouco aumentado com o uso de juntas de expansão; em contrapartida, a limpeza dos tubos é simples (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012).

O tubo em U é o tipo de construção de menor custo porque só é necessário um espelho. Os tubos não podem ser limpos por meio mecânico devido à acentuada curva em forma de U. Somente um número par de passes pode ser acomodado, entretanto a expansão térmica é

ilimitada. No cabeçote flutuante, o espelho é móvel, de modo a se mover conforme a expansão térmica. A Figura 6 mostra o tipo clássico de trocador com cabeçote flutuante, que permite a remoção do feixe de tubos com o mínimo de desmontagem, como requerido para unidades fortemente incrustantes. Esse tipo de trocador possui alto custo.

Figura 4. Trocador de calor do tipo casco e tubo com dois passes no tubo e um passe no casco com chicanas (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012)

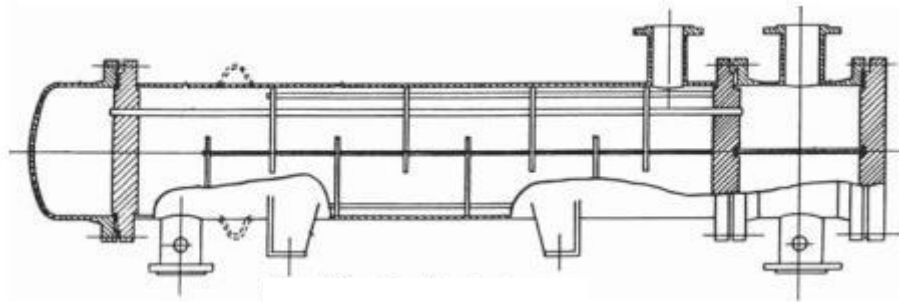


Figura 5. Trocador de calor casco e tubo com tubo em U e passe único no casco com chicanas (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012)

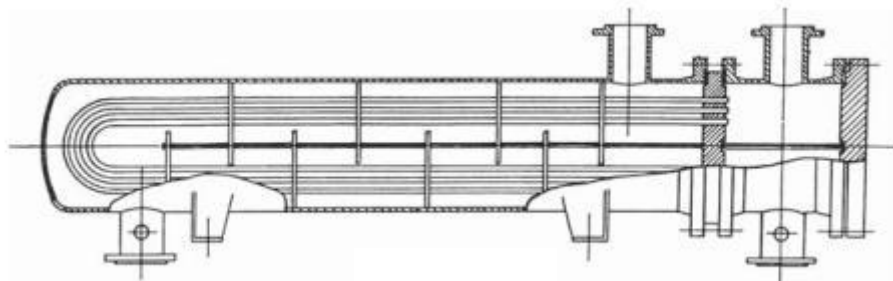
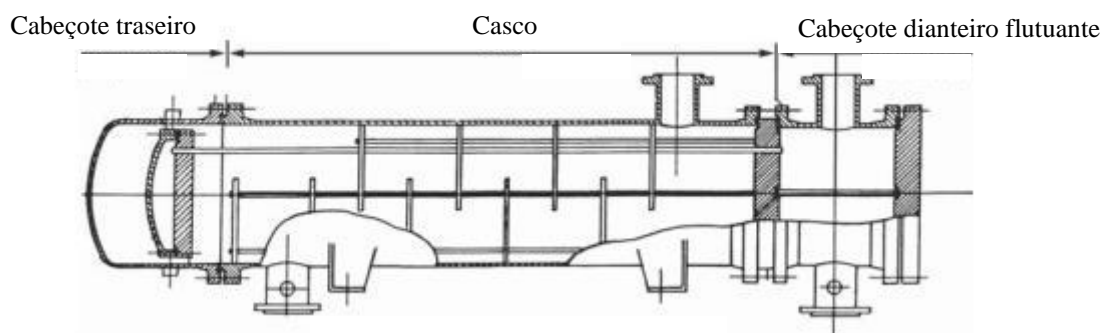


Figura 6. Trocador de calor casco e tubo similar ao da Figura 5, porém com cabeçote flutuante (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012) (adaptado)



Trocadores de calor tubulares são amplamente utilizados na indústria pois podem ser projetados customizados para virtualmente qualquer capacidade ou condição de operação, podendo ir de altíssimas pressões (acima de 100 MPa) e temperaturas (aproximadamente 1100 °C) e qualquer diferença de temperatura e pressão entre os fluidos, limitados somente pelo material de construção (Shah e Sekulic, 2003). Eles podem ser projetados para condições de operação especiais: vibração, incrustação pesada, fluidos de alta viscosidade, erosão, corrosão, toxicidade, radioatividade, misturas de multicomponentes, entre outras. São os trocadores mais

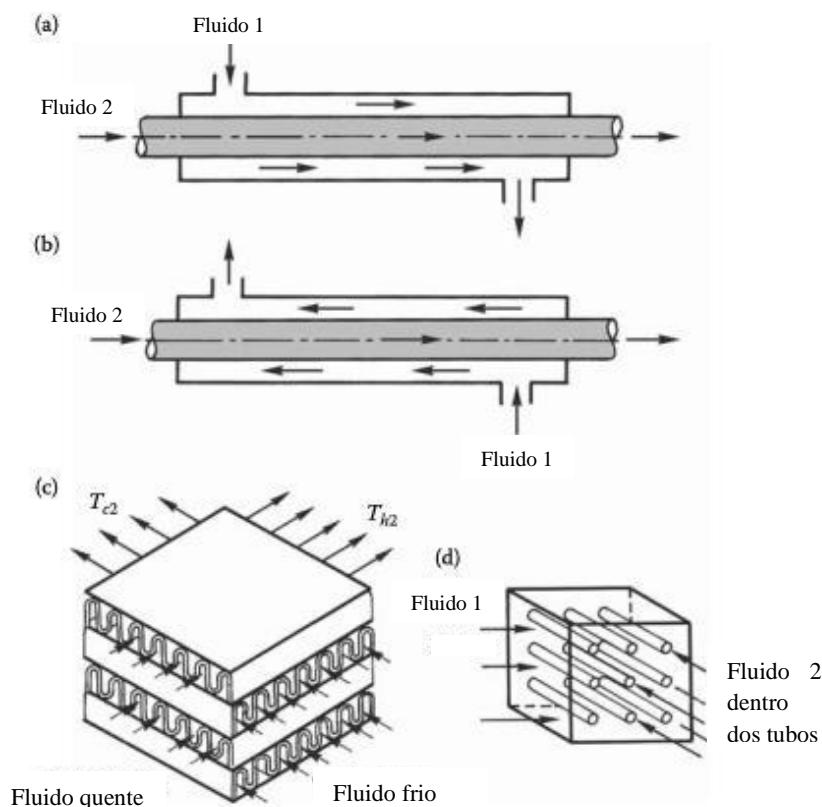
versáteis, feitos a partir de uma variedade de materiais metálicos e não metálicos e de tamanhos de pequenas ($0,1 \text{ m}^2$) até enormes (acima de 10^5 m^2) áreas superficiais.

Devido a essa versatilidade de uso, suas aplicações são as mais diversas. São utilizados como trocadores de calor de processo nas indústrias de refino de petróleo e química; como geradores de vapor, condensadores, aquecedores de água alimentadora de caldeira e resfriadores de óleo em usinas de energia; como condensadores e evaporadores em algumas aplicações de refrigeração e ar condicionado; em aplicações de recuperação de calor residual a partir de líquidos e fluidos em condensação; no controle ambiental (Shah e Sekulic, 2003).

(v) Classificação quanto à configuração do escoamento

As três configurações básicas dessa classificação são: escoamento paralelo (ou cocorrente), contracorrente e cruzado. Em paralelo, os fluidos quente e frio entram pela mesma extremidade, escoam no mesmo sentido e deixam o equipamento também na mesma extremidade. Já na contracorrente, os fluidos entram por extremidades opostas, escoam em sentidos opostos e deixam o equipamento em extremidades opostas. Ainda, alternativamente, os fluidos podem se mover em escoamento cruzado (um fluido esco perpendicularmente ao outro) (Incropera *et al.*, 2008). Essas configurações são exemplificadas na Figura 7.

Figura 7. Classificação de trocadores de calor segundo configuração do escoamento: (a) cocorrente; (b) contracorrente; (c) cruzado com ambos fluidos não misturados; (d) cruzado, com fluido 1 misturado e fluido 2 não misturado (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012) (adaptado)



A escolha de um desses arranjo em particular é baseada na eficiência requerido do trocador, perda de carga disponível, velocidades máxima e mínima permitidas, caminhos de escoamento do fluido, estresse térmico disponível, níveis de temperatura, dentre outros parâmetros de projeto.

Os trocadores do LADEQ, como veremos posteriormente, foram projetados com a configuração contracorrente (Tomaz e Silva, 2016), fazendo parte desse grupo portanto.

(vi) Classificação quanto ao mecanismo de transferência de calor

Dentro desse critério, existem três tipos de mecanismos que podem ser divididos em:

1. Convecção de fase única em ambos os lados
2. Convecção de fase única em um dos lados e duas fases no outro
3. Convecção de duas fases em ambos os lados

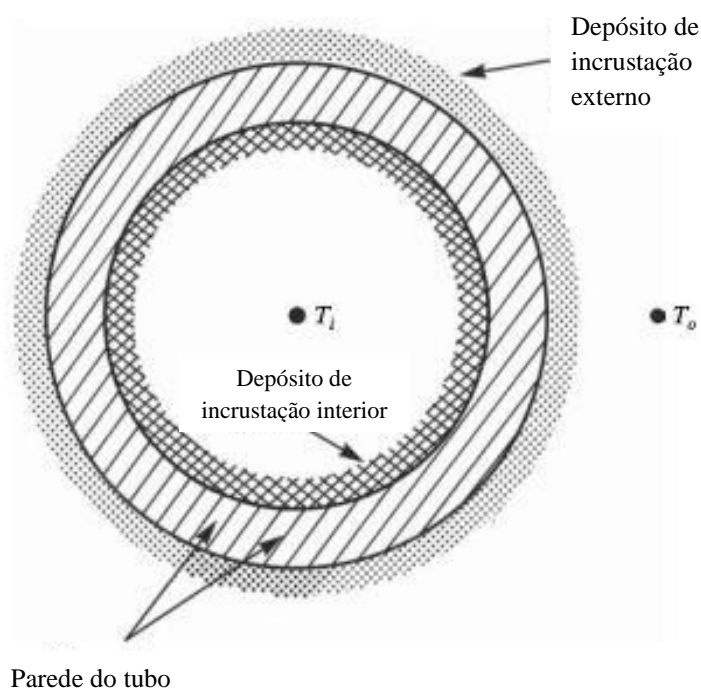
Esses subgrupos são exemplificados na Figura 1.e-g. Na Figura 1.f é demonstrado um evaporador, onde o fluido A recebe calor do fluido B e passa da fase líquida para vapor. Na Figura 1.g, o contrário: o fluido A perde calor para o fluido B e condensa, passando de vapor para líquido.

II.2 - Incrustação

O acúmulo de material indesejado nas superfícies de trocadores de calor é geralmente denominado incrustação (*fouling*, em inglês) (Bott, 1995; Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012). A presença e crescimento desse depósito acarreta uma diminuição da eficiência do equipamento, uma vez que se apresenta como uma resistência à transferência de calor entre os fluidos quente e frio. Além desse efeito, com o aumento da camada de depósitos nas paredes do equipamento, a área da seção transversal por onde o fluido escoar é reduzida, aumentando a queda de pressão no equipamento. Uma representação dessa camada é apresentada na Figura 8. Por causa desses efeitos, muitas vezes o equipamento chega a tal ponto de deterioração que é necessário tirá-lo de operação, seja para recuperá-lo ou, dependendo do estado, trocá-lo por um novo. Toda essa atividade gera custo, o qual, por vezes, não é levado em consideração na fase de projeto.

As origens da incrustação são diversas e sua formação é um fenômeno extremamente complexo (Awad, 2011). Seu caráter está associado à natureza do fluido, se este contém impurezas, à forma como a superfície foi condicionada, seu material, e muitos outros parâmetros. Bott (1995) coloca de forma abrangente, dizendo que a formação de depósitos pode ocorrer como um resultado dos fluidos em questão e seus constituintes em combinação com as condições operacionais como temperatura e velocidade.

Figura 8. Desenho esquemático de um tubo incrustado (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012) (adaptado)



A deposição de material nas superfícies é um processo inevitável aos trocadores de calor, podendo ocorrer mais cedo ou mais tarde. Sendo o problema reconhecido e enfrentado desde a fase de projeto, é possível postergar por longos prazos o tempo de operação do trocador até parada para limpeza. Entretanto, a natureza do fluido pode ser um fator que corrobora com a formação de incrustação. Por conseguinte, esse processo ocorre na maior parte das indústrias químicas e de processo, incluindo refinarias, papel e celulose, produção de polímero e fibras, dessalinização, processamento de alimentos, laticínios, geração de energia e recuperação de energia (Awad, 2011).

II.2.1 - Custo

A incrustação está diretamente relacionada à eficiência do trocador. Esse custo pode ser maior do que se pode esperar em um primeiro momento, pois se apresenta em quatro áreas principais (Awad, 2011; Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012):

- (i) Aumento no investimento de capital;
- (ii) Aumento no custo de manutenção;
- (iii) Perda de produção;
- (iv) Perda energética.

Uma estimativa com os custos anuais provenientes da incrustação em alguns países é apresentada na Tabela 1. Os dados expostos na tabela deixam claro o quão significativos são os custos advindos da incrustação, direto ou indiretamente. Embora não tenha sido encontrado o custo anual no Brasil, trata-se de uma informação relevante para avaliar a importância de operações de manutenção industrial a nível nacional.

Tabela 1. Custos anuais de incrustação total em todos os equipamentos e processos em alguns países (estimativa de 1992) (Awad, 2011)

País	Custos por incrustação (milhões de dólares)	Custo por incrustação/PIB %
EUA	14175	0.25
Reino Unido	2500	0.25
Alemanha	4875	0.25
França	2400	0.25
Japão	10000	0.25
Austrália	463	0.15
Nova Zelândia	64.5	0.15

O incremento de capital já se inicia na fase de projeto. Visando o acúmulo de depósitos futuros, a área projetada para uma determinada superfície de transferência de calor é maior do que para condições em que o trocador se encontra limpo. Segundo Awad (2011), esse excesso de área consiste em 20-50% para trocadores tubulares e 15-25% para trocadores compactos. Com isso, bombas também são superdimensionadas para compensar a área extra e o aumento de queda de pressão resultante da redução de área de escoamento. Embora essa prática implique num aumento do capital investido na planta, ela visa uma economia durante a operação tanto no aumento de tempo dos ciclos de operação do trocador antes da parada para manutenção quanto no aumento do próprio tempo de vida útil.

Além disso, se for prevista uma deposição muito severa, pode-se considerar a adição de dispositivos de limpeza em operação ou, no caso de o processo ser de suma importância a ponto de não tolerar as paradas no ritmo necessário do trocador, a instalação de um trocador de reserva, o qual entra em operação quando o principal sai para limpeza. Em alguns casos, ainda é necessário o uso de materiais de alto custo, como titânio, aço inoxidável ou grafite (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012).

A geração de custos operacionais ou de manutenção é devida a dois fatores, principalmente. O primeiro é a necessidade de manter o fluxo de calor diminuído com a formação de depósitos. Para tal, é necessário um trabalho de bombeamento maior, portanto um maior custo de bombas. Além disso, uma vez que a incrustação esteja formada, é necessário tomar ação corretiva e retirá-la para recuperar a eficiência do equipamento, adicionando-se mais o custo da limpeza.

A perda de produção consiste intuitivamente aos momentos nos quais a planta não está produzindo devido à manutenção do trocador. Esse aspecto tem grande relação quanto aos dois anteriores. Levando-se em consideração o problema de incrustação durante o estágio de projeto do trocador, pode-se determinar o ciclo de limpeza do equipamento e realizar paradas programadas, que minimizam este custo (embora se o resto da planta estiver operacional e somente o permutador estiver parado, seja também considerada uma perda de produção). O

que impacta mais, porém, é quando se faz necessária uma parada não programada ou de emergência, caso no qual os custos são bem mais elevados (Bott, 1995).

Por fim, as perdas energéticas se dão pela sobrecarga nas bombas devido ao aumento de queda de pressão, como mencionado anteriormente, e pela própria redução na transferência de calor no equipamento.

II.2.2 - Categorias

Praticamente todo material sólido pode vir a se tornar uma incrustação, porém alguns são comumente encontrados na indústria, como (Bott, 1995):

Materiais inorgânicos:

- Poeira e sólidos do ar
- Lama e sedimentos da água
- Sais de cálcio e magnésio
- Óxido de ferro

Materiais orgânicos:

- Substâncias biológicas
- Óleos e graxas
- Depósitos orgânicos pesados
- Carbono

Os processos através dos quais esses e outros compostos se depositam podem ser classificados de muitas formas diferentes. Como considera-se cada situação de incrustação única devido à diversidade de condições de processo, é comum realizar essa categorização de acordo com o processo causador do depósito sugerido por Epstein (1978). São eles: particulado, cristalização (ou precipitação), reação química, corrosão e bioincrustação. A seguir essas categorias são brevemente descritas, porém uma leitura mais profunda pode ser feita em Bott (1995), que as descreve detalhadamente.

(i) Particulado: é resultado do acúmulo de sólidos suspensos na corrente de fluido sobre superfície de troca térmica. Pode ocorrer em sistemas com líquido ou gás. Quando a corrente é líquida, a matéria particulada pode ser constituída de produtos de corrosão de outros pontos da rede que foram arrastados pelo fluido (Bott, 1995). A deposição de partículas mais pesadas ocorre por gravidade sobre as superfícies horizontais; outros mecanismos são responsáveis pela deposição de partículas mais finas em superfícies inclinadas (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012). Os materiais mais comuns que compõem esse tipo de incrustação são produtos de corrosão dispersos nos fluidos, argila e minerais em águas fluviais, sólidos suspensos em água de resfriamento, sais em sistemas de dessalinização, partículas de poeira em radiadores, entre outros (Awad, 2011).

(ii) Cristalização ou precipitação: ocorre quando a solução formada pelo fluido e sais inorgânicos nele dissolvidos se torna supersaturada devido a mudança de temperatura, alterando a solubilidade desses sais e levando à precipitação deles sobre a superfície de troca térmica, onde sofrem o processo de cristalização. Esse mecanismo pode ocorrer tanto em sistemas de resfriamento quanto aquecimento. Em sistemas de aquecimento, sais de

solubilidade normal precipitam próximo à superfície, que está a uma temperatura menor do que o seio do fluido, formando, ao cristalizar, uma camada porosa e de consistência mole (Awad, 2011), de remoção mais fácil. A preocupação é maior nos sistemas de refrigeração, onde o mesmo processo ocorre, porém com sais de solubilidade inversa. Estes têm comportamento inverso aos sais normais: quanto maior a temperatura do fluido, menor sua solubilidade. São sais habitualmente presentes em sistemas de resfriamento, como carbonatos, silicatos e fosfatos de cálcio e magnésio. Quando a corrente fria, contendo esses sais, passam pela superfície quente de troca térmica, ocorre a precipitação desses sais, os quais formam uma camada dura e tenaz que requer tratamento mecânico vigoroso ou químico (Bell e Mueller, 2001; Kazi, 2012).

(iii) Reação química: os depósitos assim classificados são provenientes de uma ou mais reações químicas indesejadas que ocorrem durante o processo de troca térmica. A superfície de troca térmica não atua como reagente, sendo estes os fluidos presentes no escoamento, mas pode atuar como catalisador como no craqueamento, coqueamento e polimerização (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012). Incrustação por reação química é encontrada em muitas aplicações da indústria de processos, como petroquímicas, refino de óleo, resfriamento de gases e óleo, polimerização de monômeros, entre outras. Esse tipo de depósito é frequentemente muito tenaz e necessita de medidas especiais para eliminar os depósitos das superfícies a fim de se obter uma vida útil de operação satisfatória (Bell e Mueller, 2001; Kazi, 2012).

(iv) Corrosão: similar à reação química, porém neste caso um dos reagentes é a própria superfície de transferência térmica e pode causar incrustação de duas formas. A primeira é, após a reação de corrosão, o produto se adere à superfície onde o processo ocorreu e ali se acumula. Na segunda, o produto formado não se adere ao local onde ocorreu a reação, porém é arrastado pelo fluido e se deposita em outro trecho da rede como uma incrustação particulada. Parâmetros importantes são o pH, que pode dissolver os produtos de corrosão e impedir sua adesão à superfície, e a velocidade de escoamento, responsável por arrastar os depósitos que se aderem e não são muito resistentes.

(v) Bioincrustação: micro e macro organismos que se aderem à superfície de troca térmica e se desenvolvem, bem como os produtos gerados por ele que também se fixam ali. A incrustação biológica geralmente se apresenta na forma de um biofilme ou limo na superfície caracterizada por ser irregular, deformável, porém de difícil remoção (Awad, 2011). Além do impacto na troca térmica e fluxo de água, esses organismos podem propiciar a formação de pilhas de aeração diferencial, gerando acentuada corrosão sob o depósito (Gentil, 1996). A situação pode se agravar com o surgimento de bactérias anaeróbias, como as redutoras de sulfato, gerando H_2S , o qual ataca o metal base. Os depósitos biológicos são problemas geralmente em sistemas de água e, embora possam ocorrer em correntes líquidas adequadas, estão normalmente associados com sistemas abertos com recirculação ou sistemas de passagem única com água de refrigeração.

II.2.3 - Etapas fundamentais da incrustação

A incrustação de material na superfície de troca térmica é um fenômeno extremamente complexo, ainda que não se considere as interações das diferentes categorias. O motivo principal disso são as mais diversas variáveis que influenciam a formação de incrustação. Os

mecanismos sob um ponto de vista mais fundamental, denominados eventos sequenciais por Epstein (1983), são iniciação, transporte, adesão, remoção e envelhecimento, apresentados a seguir.

(i) Iniciação: a superfície é condicionada para a incrustação que irá ocorrer futuramente. Certos parâmetros como temperatura da superfície, material, acabamento da superfície, rugosidade e revestimentos possuem grande influência no período inicial de atraso, indução ou incubação. Em processos de cristalização, por exemplo, esse tempo tende a diminuir com o aumento do grau de supersaturação em relação à temperatura da superfície de troca. Também há um decréscimo no período de indução com o aumento da temperatura no caso de incrustação por reações químicas, devido à aceleração das reações de indução. A rugosidade da superfície tende a diminuir o período de incubação (Knudson, 1984), sendo suas projeções provocando o aumento de sítios para nucleação de cristais e sulcos propiciando regiões para depósitos particulados (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012).

(ii) Transporte: durante esta fase, o material é deslocado do seio da solução à superfície de transferência de calor. Muitos são os mecanismos pelos quais essa locomoção é realizada: difusão, sedimentação, termoforese, entre outros. O fluxo de deposição local na superfície, \dot{m}_d , pode ser expresso pela Equação 1:

$$\dot{m}_d = h_D(C_b - C_s) \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde C_b e C_s representam as concentrações das espécies incrustantes, oxigênio ou reagente no seio da solução e adjacente à superfície de troca, respectivamente, e h_D é o coeficiente de transferência de massa convectivo obtido do número de Sherwoods ($Sh=h_D D/D$) o qual, por sua vez, depende dos parâmetros de escoamento e geometria. Essa diferença de concentrações resulta no transporte por difusão.

Outro fenômeno de transporte é a sedimentação. A força motriz nesse caso é a própria gravidade, fazendo as partículas se depositarem nas superfícies horizontais e inclinadas. Possui papel fundamental em circunstâncias onde as partículas são pesadas e o escoamento é lento (Kazi, 2012). A termoforese, por sua vez, é o movimento de pequenas partículas numa corrente de fluido quando há presença de um gradiente de temperatura. Paredes frias atraem partículas coloidais, enquanto quentes têm o efeito inverso. É um efeito com maior significância para partículas menores que 5 μm e se torna dominante em torno de 0.1 μm (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012).

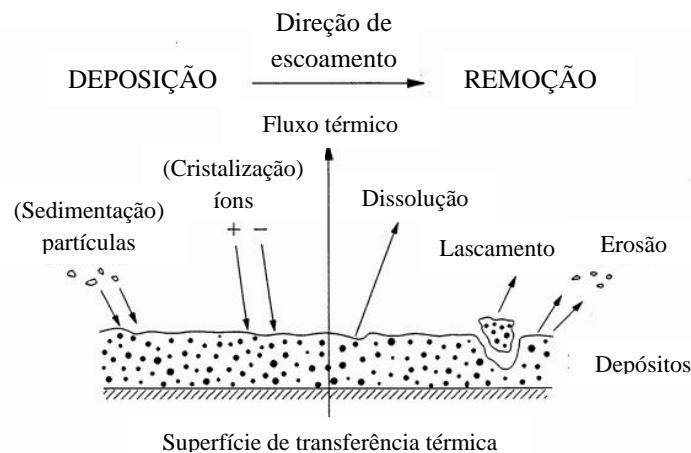
(iii) Adesão: estágio no qual os depósitos são aderidos à superfície e entre si (no caso de já haver uma camada de incrustação). É um fenômeno que envolve ambos processos químicos e físicos, e sobre o qual existe bastante incerteza. Três fatores interrelacionados desempenham um papel crucial no processo de adesão: as condições da superfície, as forças superficiais e a probabilidade de fixação. A ação combinada e simultânea dessas forças tem grande influência nessa etapa (Awad, 2011). Ademais, propriedades do material como densidade e tamanho também possuem importância.

(iv) Remoção: parte do material que se deposita na superfície será removido, seja imediatamente ou algum tempo após sua deposição. No geral, a remoção desses depósitos é atribuída às forças de cisalhamento na interface fluido-incrustação. Estas, por sua vez, são consideradas dependentes do gradiente de velocidade na superfície, viscosidade do fluido e

rugosidade da superfície. Dissolução, erosão e lascamento (“spalling”) foram propostos como mecanismos plausíveis para a remoção (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012). A dissolução ocorre quando a incrustação ou as condições operacionais do fluido sofreram algum tipo de alteração, de ordem que parte do material acumulado assumiu forma iônica ou molecular, tornando-se assim mais uma vez solúvel no fluido. A erosão está associada com a remoção de material particulado, e é afetada pela velocidade do fluido, tamanho de partícula, rugosidade da superfície e a ligação do material. No lascamento, uma grande massa de material é despreendida da camada. Sofre influência do estresse térmico causado pela transferência de calor. Um esquema representando esses fenômenos é apresentado na Figura 9.

(v) Envelhecimento: uma vez que o acúmulo de material começa, as propriedades mecânicas da camada podem sofrer alterações ao longo do tempo, seja no sentido de fortalecimento ou enfraquecimento. Isto por diversos fatores, como mudanças na estrutura cristalina ou composição química, por exemplo, ou ainda o envenenamento lento dos microrganismos devido à corrosão na superfície, que pode enfraquecer a camada de bioincrustação.

Figura 9. Desenho esquemático da formação de incrustação com alguns processos de deposição e remoção (Kazi, 2012)



O resultado final geral da formação e variação da camada de incrustação nas superfícies de troca térmica ao longo do tempo é a diferença entre a taxa de deposição, \dot{m}_d , e a taxa de remoção, \dot{m}_r , e é expresso de acordo com a Equação 2.

$$\frac{dm_f}{dt} = \dot{m}_d - \dot{m}_r \text{ (Equação 2)}$$

Esses processos ocorrem simultaneamente e são afetados pelas condições de operação. Os efeitos qualitativos de alguns parâmetros nas taxas de deposição e remoção bem como no acúmulo de material são resumidos na Tabela 2 (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012; Knudson, 1984). Observa-se nela que a velocidade de escoamento é o único parâmetro cujo aumento reduz o acúmulo de depósitos, embora existam algumas exceções.

Tabela 2. Efeito de parâmetros na incrustação (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012) (adaptado)

Parâmetro aumentado	Taxa de deposição	Taxa de remoção	Acúmulo de incrustação
Temperatura superficial	Aumenta	Questionável	Aumenta
Dureza	Questionável	Diminui	Aumenta
Rugosidade	Aumenta	Aumenta	Questionável
Corrosão	Aumenta	Questionável	Aumenta
Velocidade	Diminui	Aumenta	Diminui

II.2.4 - Controle de incrustação

Dado os altos custos gerados pela incrustação vistos anteriormente, tornou-se de interesse das indústrias métodos que busquem eliminar, reduzir ou retardar esse processo intrínseco nos trocadores de calor. As técnicas podem ser classificadas de acordo com o seu propósito, isto é, são preventivas, cuja intenção é retardar ou reduzir a acumulação de depósitos, ou corretivas, nas quais a incrustação já está formada e o objetivo é eliminá-la para recuperar a eficiência de troca térmica. O primeiro tipo é visado durante a fase de projeto do trocador e da planta ou durante a operação, enquanto o segundo pode ocorrer durante operação, porém é comumente aplicado com o equipamento parado, já debilitado funcionalmente.

Uma das técnicas preventivas consiste em projetar a planta ou o processo de tal maneira que a condição geradora de incrustação seja limitada ou reduzida. No projeto do trocador de calor também deve ser levado em consideração a incrustação, de modo a superdimensionar a área de troca térmica para tempo de vida útil satisfatório antes da necessidade de parada. A instalação de sistemas de limpeza em operação, chamados *online*, é outro método utilizado. Esses sistemas idealmente devem ser previstos também na fase de projeto, desde que o problema de potencial incrustação tenha sido reconhecido; se ele só se tornar aparente após a operação, é possível adaptar os equipamentos de limpeza online, porém o custo normalmente é mais elevado do que quando incluído no projeto inicial (Bott, 1995).

A adição online de aditivos químicos/inibidores e anti-incrustantes na corrente líquida faz parte das técnicas mais frequentes de controle de incrustação utilizadas. De um modo geral, esses compostos possuem a função de minimizar a incrustação, bloqueando inteira ou parcialmente os processos pelos quais os depósitos se formam. Exemplos dessas substâncias são: dispersantes para manter partículas em suspensão (particulado), compostos para prevenir polimerização e reações químicas, inibidores de corrosão ou passivantes para minimizar a corrosão, modificadores de cristais e agentes quelantes (cristalização), biocidas e biodispersantes (Bott, 1995).

Outra forma de controle da incrustação são os métodos de limpeza dos equipamentos. Eles podem ser classificados em *online* (em operação) e *offline* (fora de operação) (Bott, 1995). Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012) classificam essas limpezas como contínua ou periódicas, porém não é muito precisa pois, embora a maior parte das técnicas de limpeza online sejam

contínuas, algumas delas, como limpeza química, podem ser realizadas com o equipamento em operação, porém periodicamente.

As limpezas em operação são normalmente concebidas na fase de projeto ou início da operação. Dentre elas, duas das mais utilizadas são os sistemas de bolas de esponja e o de escova (Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij, 2012). A primeira consiste na recirculação de bolas de borracha em um loop separado alimentadas a montante do trocador. Elas são então recuperadas a jusante e reinseridas no loop. A segunda é um sistema onde escovas de filamentos de metal adequado ou polímero atravessam os tubos e são retidos por gaiolas em ambas extremidades dos tubos. Após um tempo pré-determinado pelo projeto, o fluxo é revertido, fazendo com que as escovas passem novamente pelos tubos, porém em sentido contrário. O processo se repete continuamente.

Na maioria das aplicações, entretanto, o processo de incrustação termina ocorrendo, ainda que de forma retardada ou reduzida, apesar de um bom projeto, operação eficiente e manutenção preventiva. Portanto, quando os trocadores de calor chegarem a um nível mínimo ou abaixo de performance aceitável, devem ser limpos a fim de restaurar a eficiência de operação. Nesses casos, o equipamento é retirado de operação para que a manutenção adequada seja realizada, sendo caracterizada como off-line. Essas limpezas podem ser realizadas por processos mecânicos ou químicos. Muitas são as possibilidades para se realizar de forma mecânica, como o jateamento com água a alta pressão, varetamento, vapor etc., que são escolhidas de acordo com a região a ser limpa e configuração do trocador. A limpeza química possui a vantagem de atingir áreas de difícil alcance. Entretanto, o produto químico escolhido não deve ser corrosivo para a superfície de troca.

II.3 - Limpeza química

A limpeza química envolve a utilização de produtos químicos visando dissolver ou enfraquecer os depósitos (Awad, 2011). De um modo geral, é aplicada com o equipamento fora de operação (off-line), porém é possível realizar limpeza química online. Este último possui a vantagem de não necessitar a parada do equipamento, mas tem como problema associado a contaminação do meio pelo produto químico utilizado, que pode persistir mesmo após a dosagem ser finalizada (Bott, 1995).

Previamente a qualquer limpeza química, existem certas informações que devem ser levadas em consideração. Algumas principais levantadas por Bott (1995) são:

- Natureza do depósito para que o tratamento adequado possa ser selecionado;
- Material de construção do equipamento bem como da tubulação e equipamentos associados, a fim de evitar avarias provenientes de corrosão;
- Volume total do sistema para que a quantidade de produto químico possa ser estimada;
- Problemas do efluente gerado associados ao descarte seguro e adequado do(s) químico(s) utilizado(s);
- Riscos associados ao processo de limpeza e medidas de segurança necessárias.

Segundo Awad (2011), obter informações sobre a composição do depósito através de análises é extremamente útil para a identificação dos principais componentes da incrustação e posterior desenvolvimento do tratamento adequado. Ele afirma ainda que a amostra deve ser

representativa da área de incrustação mais crítica, a qual, para trocadores de calor e caldeiras, corresponde à maior área de troca térmica. Algumas das análises típicas de caracterização são a difração de raios X, espectrometria de raios X e espectroscopia com emissão óptica. No lado da água de refrigeração, normalmente são encontrados minerais, como óxidos de ferro (produtos de corrosão), carbonatos de cálcio e magnésio (produtos de dureza) e sílica, sendo outros minerais encontrados em casos individuais (Kazi, 2012). Em situações onde não se tem conhecimento da natureza do depósito, é possível analisar a água utilizada no sistema de forma a se ter indícios dos potenciais tipos de incrustações que podem ser encontrados. Elementos que compõem os depósitos característicos desse meio, pH, turbidez e condutividade são alguns dos parâmetros analisados nesse caso.

De acordo com a natureza da incrustação determinada, são utilizadas diferentes substâncias. Depósitos orgânicos, normalmente são utilizadas soluções alcalinas para óleos, graxas leves e carbonáceos, ou, em circunstâncias com depósitos orgânicos pesados, solventes orgânicos (Awad, 2011). Para o caso dos depósitos encontrados no lado da água, essas substâncias são normalmente ácidos orgânicos e inorgânicos (Gentil, 1996). A Tabela 3 apresenta alguns ácidos usados para a remoção dos depósitos mais comuns. Além da compatibilidade com o depósito, é importante que o agente químico escolhido não danifique o material nem do trocador nem do circuito envolvido na limpeza química. A Tabela 4 mostra os solventes e os materiais bases compatíveis frequentemente utilizados.

Tabela 3. Ácidos e respectivas substâncias removidas (Gentil, 1983)

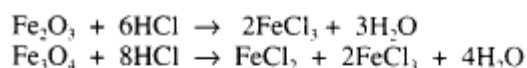
Ácidos usados na remoção do depósito	Depósito removido
Ácido clorídrico	Carbonato de cálcio e óxidos de ferro
Ácido sulfâmico	Carbonato de cálcio e óxidos de ferro
Ácido fluorídrico	Silicatos e sílica
Ácido cítrico	Óxidos de ferro

Tabela 4. Agentes químicos e materiais base compatíveis (Gentil, 1983)(Aranha, 1994) (adaptado)

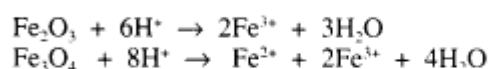
Material	Agente químico compatível
Aço carbono	Ácidos inorgânicos e orgânicos inibidos, ácidos orgânicos, solventes orgânicos, álcalis e quelantes
Aços inoxidáveis austeníticos	Ácido fluorídrico inibido, ácidos nítrico, sulfúrico, fosfórico e orgânicos, quelantes e solventes orgânicos não clorados
Cobre, níquel e suas ligas	Ácidos sulfúrico ou orgânicos inibidos, solventes orgânicos
Alumínio	Ácidos fracos somente (ex.: cítrico ou sulfâmico), solventes orgânicos
Ferro fundido	Ácidos minerais ou orgânicos inibidos, solventes orgânicos

Mesmo utilizando um ácido compatível com o material do equipamento, ainda existe a possibilidade de, após a remoção dos depósitos, haver a corrosão do metal base, seja pelo ácido ou pelos produtos da reação dele com o depósito. Para impedir esse efeito, aditivos são adicionados juntamente ao ácido. Um exemplo é a adição de estanho para inibir o Fe III proveniente da dissolução de depósitos de ferro, demonstrado por Gentil (1996) na sequência de reações abaixo em meio ácido com HCl.

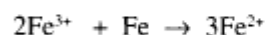
- presença do Fe³⁺, devido ao HCl solubilizar o Fe₂O₃ ou Fe₃O₄:



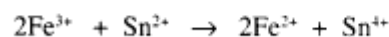
ou sob a forma iônica:



— ação corrosiva do Fe³⁺:



— ação protetora do Sn²⁺, reduzindo o Fe³⁺ e evitando portanto a sua ação corrosiva:



ou a equação total:



Costuma-se adicionar inibidores de corrosão às soluções ácidas, a fim de garantir a integridade do trocador de calor. O inibidor de corrosão é uma substância, ou mistura de substâncias, capazes de reduzir ou eliminar a corrosão quando presentes na solução nas concentrações adequadas (Gentil, 1996). Para que se obtenha uma atuação eficiente, certos fatores devem ser considerados: as causas da corrosão, para que se possa identificar os problemas que podem ser solucionados com o uso de inibidores; o custo de seu emprego, em comparação com o custo das perdas originadas do processo de corrosão; as propriedades e mecanismos dos inibidores, de modo a verificar se são compatíveis com o processo de operação e materiais metálicos; e as circunstâncias de adição e controle adequadas.

Gentil (1996) classifica essas substâncias em dois grupos principais: quanto à sua composição, podendo ser orgânico ou inorgânico, e quanto ao seu comportamento, sendo oxidante, não oxidante, anódico, catódico e de adsorção. Em suas considerações sobre as três últimas, os inibidores anódicos são aqueles que reprimem as reações anódicas, enquanto os catódicos atuam reprimindo as reações catódicas. Os de adsorção, por sua vez, funcionam como películas protetoras. São amplamente utilizados, dado que possuem a capacidade de formar essas películas tanto sobre as áreas catódicas quanto anódicas, interferindo na ação eletroquímica. Neste grupo estão incluídas substâncias orgânicas com grupamentos fortemente polares, como: coloides, sabões de metais pesados e substâncias orgânicas com átomos de oxigênio, enxofre ou nitrogênio.

Inibidores de corrosão de adsorção possuem tal denominação, pois, à medida que o ácido vai removendo a camada de óxidos e impurezas da superfície de troca, esses inibidores são adsorvidos no material metálico, originando uma proteção contra o ataque de ácidos. Os inibidores usados normalmente em limpezas químicas de superfícies de troca térmica com ácido clorídrico são, normalmente, derivados de tiourea (Gentil, 1996).

Genericamente, o procedimento de limpeza química é dividido nas seguintes etapas:

- (i) Lavagem com água para a remoção de detritos soltos ou fracamente aderidos;
- (ii) Aquecimento da água e circulação;
- (iii) Adição do(s) químico(s) e inibidores na água circulando;
- (iv) Após tempo suficiente, descarte da solução e lavagem intensa do sistema com água;
- (v) Passivação da superfície metálica;
- (vi) Lavagem com água para a remoção de todos os traços de substâncias químicas.

Os passos supracitados representam um dos principais métodos de limpeza química offline, a circulação. Durante este tipo de limpeza, alguns pontos devem ser cuidadosamente observados. A concentração e temperatura da solução devem ser monitoradas ao longo de toda a limpeza, bem como a ação do inibidor de corrosão. A eficiência de remoção está também diretamente ligada à velocidade do fluido e temperatura. Velocidades e temperaturas altas de operação permitem uma limpeza mais eficiente, com a primeira aumentando as forças de cisalhamento e a segunda a taxa de reação do agente químico com os depósitos, assistindo a limpeza química. É de significativa importância também a etapa de lavagem com água após a etapa de remoção de depósitos com o produto limpante, pois a existência de zonas de baixa velocidade pode levar ao acúmulo de produtos químicos acarretando problemas durante etapas posteriores da limpeza ou ainda na operação subsequente do equipamento (Bott, 1995).

A limpeza química é vantajosa em muitos aspectos, embora também possua certas desvantagens. Ambas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Vantagens e desvantagens da limpeza química

Vantagens	Desvantagens
Limpeza uniforme e completa em alguns casos	Possível manuseamento de produtos perigosos
Sem necessidade de desmontar a unidade (mas isolamento é necessário)	Pode requerer processos de descarte de efluente elaborados
Capacidade de limpar áreas inacessíveis	Pode emitir gases nocivos de reações inesperadas
Custo de limpeza moderado e intervalos longos entre limpezas	Potencial de corrosão

Capítulo III - Metodologias

III.1 - Apresentação dos casos

Neste capítulo, são apresentadas as três metodologias estudadas no trabalho. As duas primeiras têm origem em trabalhos realizados em indústrias de grande porte pelo autor e uma equipe em conjunto. Os dados e resultados discutidos nestes dois primeiros casos foram obtidos dessas atividades e as metodologias elaboradas através da análise dos documentos fornecidos ou gerados das mesmas e não da literatura, de modo que, dada a sua confidencialidade, estes não podem ser apresentados, bem como certas informações neles contidos.

O primeiro caso trata-se de uma intervenção química com o intuito de neutralizar a acidez residual do lado ácido de trocadores de calor de ácido sulfúrico concentrado em indústria de fertilizantes e o segundo de uma limpeza química em operação numa indústria de produção de gases, mais especificamente num resfriador de MEA. Ambos os episódios retratam diferentes operações de limpeza e frequentemente constituem etapas de uma limpeza química usual, com o equipamento parado. A terceira metodologia, apresentada como proposta, foi desenvolvida a partir do cenário dos trocadores de calor do LADEQ. Apresentada por último, trata-se somente da proposta, sem a realização prática, e foi explorada mais detalhadamente seu processo de elaboração até sua estruturação final.

III.2 - Caso 1: Neutralização de trocadores de calor de resfriamento de ácido sulfúrico

III.2.1 - Apresentação do caso

Na planta de ácido sulfúrico de uma empresa de fertilizantes, há uma etapa de resfriamento do ácido concentrado. Esse resfriamento é feito em três trocadores de calor casco tubo, denominados E-7409, E-7416 e E-7417. Nos três, ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 98%) passa no lado do casco e água do sistema de refrigeração (AGR) no lado dos tubos.

Em época de manutenção desses trocadores, antes que se possam realizar outros serviços (como o hidrojateamento, serviços de caldeiraria, teste hidrostático etc.), é realizada a neutralização desses equipamentos, para que as outras atividades ocorram de forma segura e não causem avarias no equipamento. Este item apresenta a metodologia utilizada para esse procedimento bem como as etapas da atividade.

III.2.1.1 - Características dos trocadores de calor

Os trocadores apresentam grande semelhança em suas características, sendo o tamanho a distinção mais significativa entre eles. Os dados técnicos dos trocadores de calor se encontram na Tabela 6. A configuração dos equipamentos (Figura 10) também é muito similar, notando-se diferença na posição do dreno do casco do trocador E-7409 e na saída da água de refrigeração do E-7417, que se dá pela parte inferior, devido ao número de passes diferente dos demais.

Tabela 6. Dados técnicos dos trocadores de calor

Parâmetro	Unidade	E-7409	E-7416	E-7417
Número de passes no tubo	qtd	1	1	2
Número de passes no casco	qtd	1	1	1
Material	-	Inox 316L	Inox 316L	Inox 316L
Diâmetro interno do casco	mm	1092.2	1067	540
Número de tubos	qtd	1302	827	308
Diâmetro externo dos tubos	mm	19.05	19.05	19.05
Comprimento dos tubos	mm	10058	8534	7315
Volume útil do casco	m ³	5.691	5.619	1.033

Figura 10. Configuração dos trocadores de calor E-7409, E7416 e E-7417, de cima para baixo

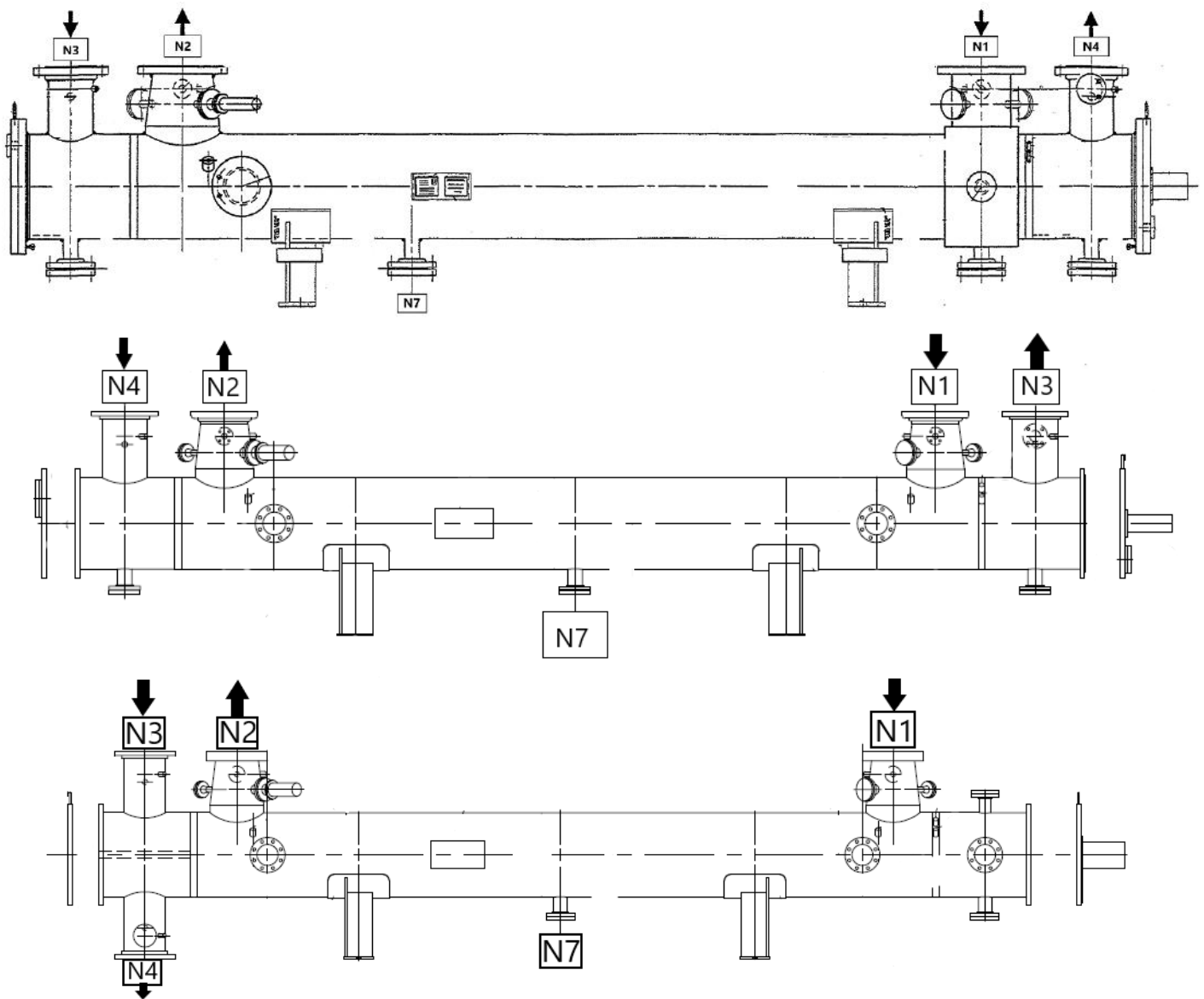


Tabela 7. Principais conexões dos trocadores de calor

Conexão	E-7409	E-7416	E-7417
N1	Entrada H ₂ SO ₄	Entrada H ₂ SO ₄	Entrada H ₂ SO ₄
N2	Saída H ₂ SO ₄	Saída H ₂ SO ₄	Saída H ₂ SO ₄
N3	Entrada H ₂ O	Saída H ₂ O	Entrada H ₂ O
N4	Saída H ₂ O	Entrada H ₂ O	Saída H ₂ O
N7	Dreno casco	Dreno casco	Dreno casco

III.2.2 - Metodologia

O procedimento proposto para neutralizar o lado do casco do trocador de calor contaminado com ácido sulfúrico foi o método de circulação química. Ele consiste em injetar uma solução química (no caso, de caráter básico) no sistema inteiro até preenchimento do mesmo, seguido de recirculação até atingir o objetivo ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$), podendo purgar ou adicionar solução de make-up conforme necessidade. A metodologia utilizada é apresentada no fluxograma da Figura 11.

Uma etapa importante na metodologia é a preparação da solução antes do envio para o trocador. Uma vez que os químicos (barrilha e inibidor de corrosão) são adicionados nas concentrações adequadas, é feita uma recirculação interna da solução a fim de diluir o químico e homogeneizar a solução, para então o volume ser bombeado para o trocador de calor para neutralização. É essencial que não seja enviado água pura diretamente para o trocador sem estar neutro, a fim de não diluir o ácido sulfúrico concentrado evitando o aumento drástico da corrosividade.

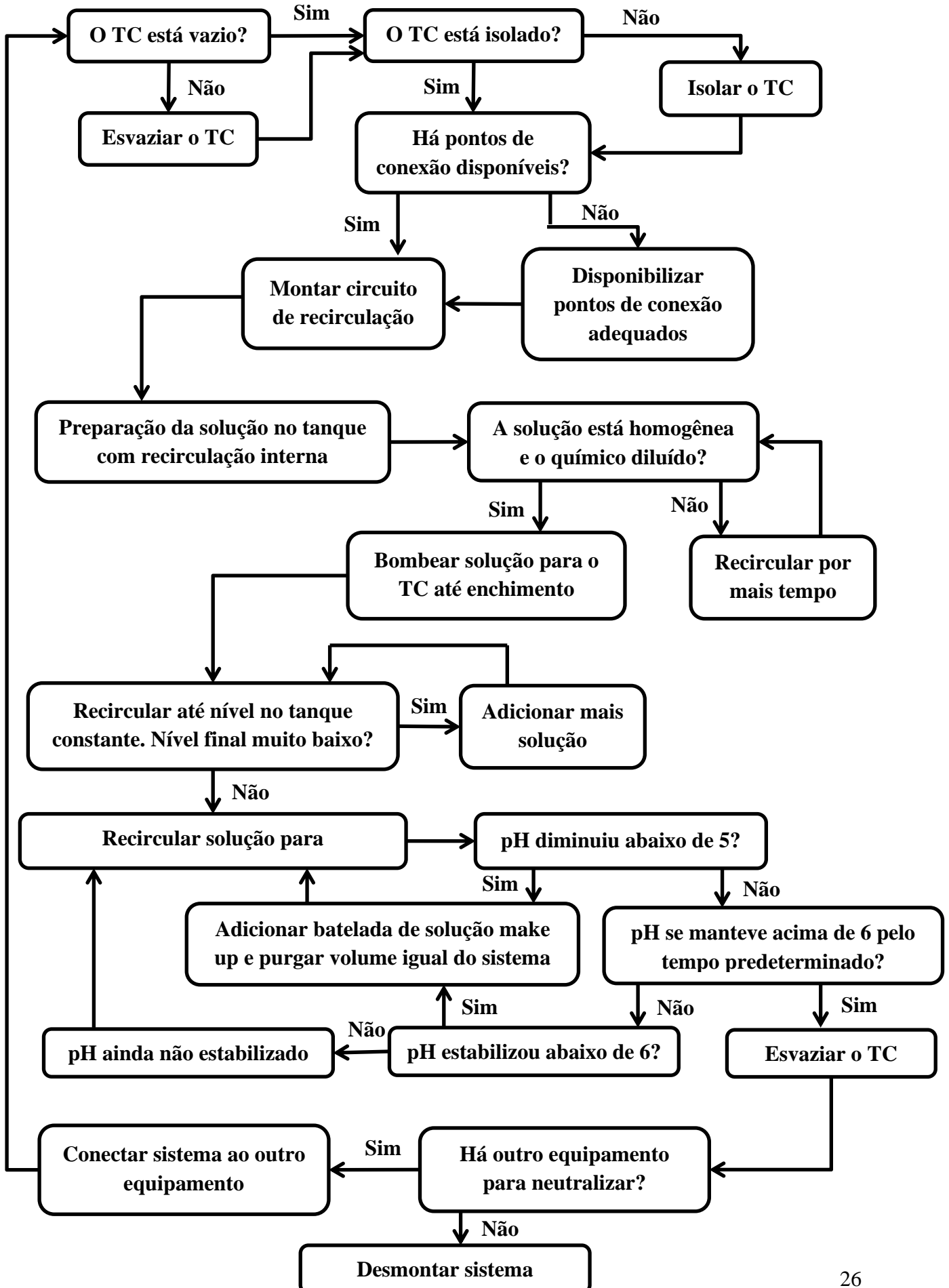
Num primeiro momento, o sistema ainda não é considerado estável devido a bolhas de ar na tubulação, que são expulsas do trocador e da tubulação conforme a bomba promove a circulação. Deve-se atentar que a evacuação do ar no interior do sistema causa uma diminuição no nível do tanque até sua estabilização, e, caso o nível fique muito baixo, pode-se adicionar mais solução.

Durante a circulação, o pH deve ser constantemente monitorado. Caso o pH desça abaixo de 5, deve-se adicionar mais uma batelada de solução de barrilha (make-up) e purgar o volume equivalente de solução antiga. A neutralização é considerada completa quando o pH permanece acima de 6 por duas vezes o tempo de retenção do equipamento, que é calculado pela Equação 3.

$$t = \frac{V_{sist}}{Q} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde t é o tempo de residência, V_{sist} é o volume do sistema de recirculação de cada trocador (soma do volume dos trocadores com o volume do circuito de conexões) e Q é a vazão da bomba utilizada.

Figura 11. Fluxograma lógico da metodologia proposta (elaboração própria)



Dada a equação e conhecendo os volumes dos trocadores, o volume do circuito de conexões e a vazão da bomba, o tempo de residência de cada trocador pode ser calculado (Tabela 8).

Tabela 8. Tempo de residência de cada trocador de calor

Conexão	E-7409	E-7416	E-7417
Volume TC (m ³)	5.691	5.619	1.033
Volume circuito (m ³)	1	1	1
Vazão bomba (m ³ /h)	15	15	15
Tempo de residência (min)	26.8	26.5	8.1

III.2.3 - Planejamento

III.2.3.1 - Materiais

De acordo com a metodologia estabelecida, os seguintes materiais foram designados para a execução da atividade:

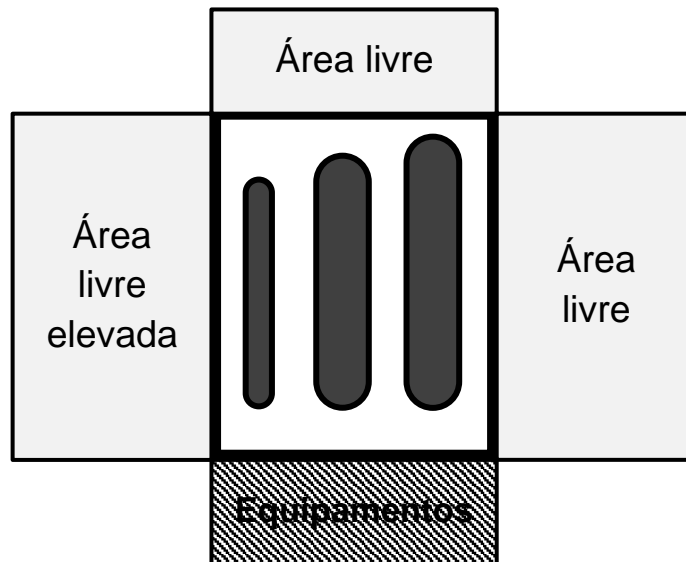
- Unidade de bomba centrífuga multiestágio com vazão (Q) de 15 m³/h e 8 bar e pressão;
- Tanque de ruptura para circulação com volume total de 1 m³ e volume útil de 700 L;
- Adaptações necessárias aos pontos de *tie-in* (provido pelo cliente)
- Mangueiras flexíveis e válvulas (diâmetro 2")
- Manifold
- Medidor de pH (fita)
- Carbonato de sódio (barrilha)
- Inibidor de corrosão (comercial)

III.2.3.2 - Localização

Os trocadores estão situados numa área reservada exclusivamente para o resfriamento do ácido sulfúrico. Por essa razão, trata-se uma região de fácil acesso, apresentando espaços livres em três de seus quatro lados, com possibilidade da instalação dos equipamentos utilizados para a neutralização.

Como representado esquematicamente na Figura 12, os trocadores se apresentam em uma ordem de tamanho e são resguardados por um dique de contenção retangular abaixo deles. O local escolhido para o posicionamento e montagem dos equipamentos foi no lado do trocador de calor de menor tamanho, pois este apresenta certa elevação em relação aos outros lados, de forma a diminuir a distância entre as conexões com o trocador e os equipamentos.

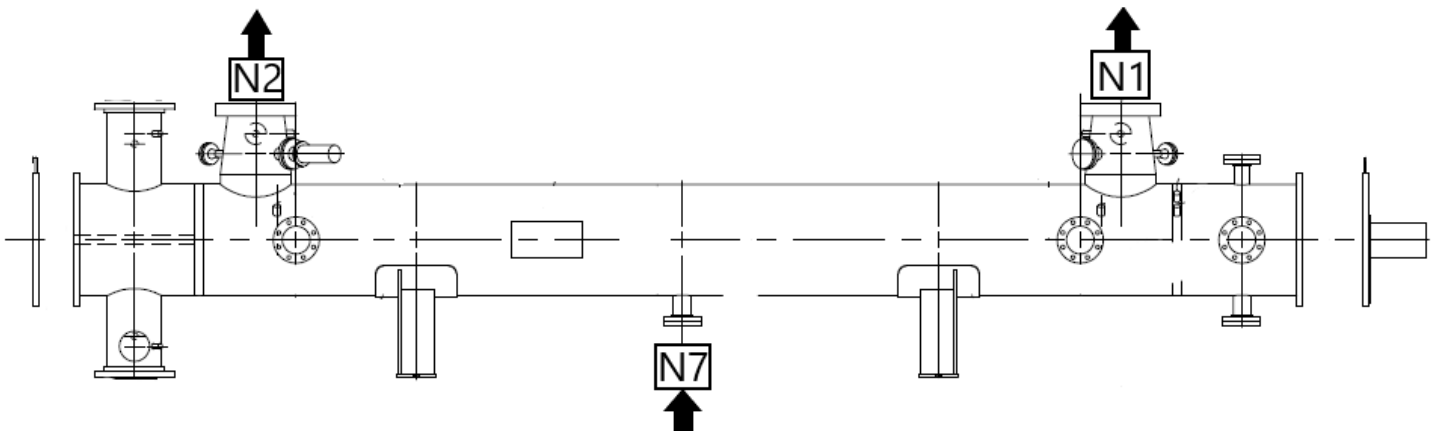
Figura 12. Esquema simplificado da vista superior da área de intervenção e seus arredores. Ao centro, vê-se os 3 trocadores de calor, dentro do dique de contenção (elaboração própria)



III.2.3.3 - Circuito

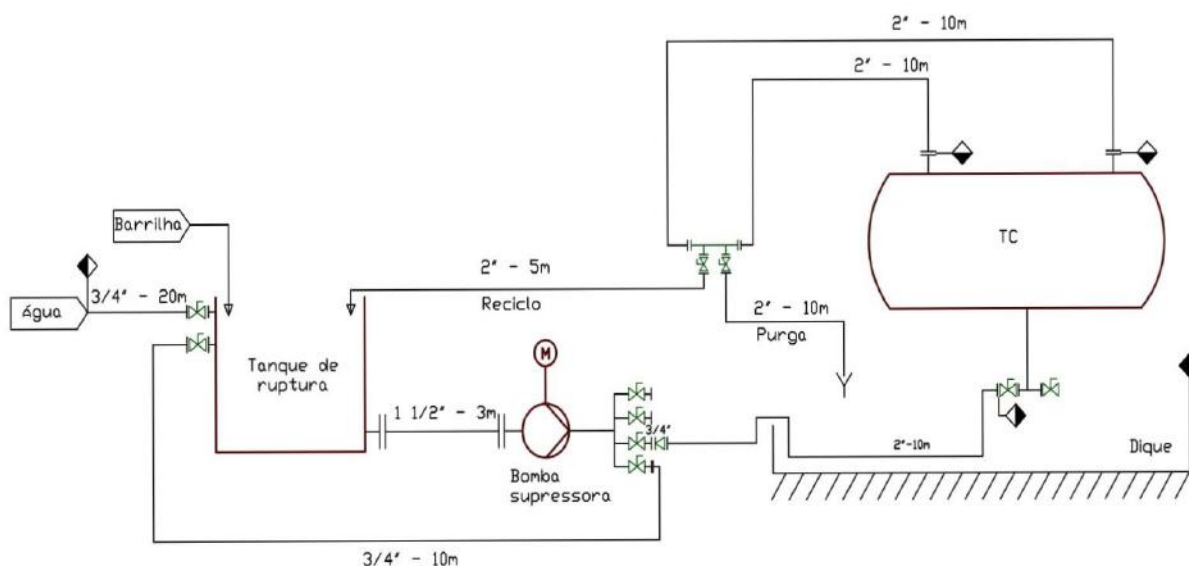
Dada a disponibilidade de pontos de *tie-in* (Figura 13), houve possibilidade de projetar a instalação de um sistema temporário partindo da bomba de circulação até o trocador de calor e deste para o tanque de ruptura.

Figura 13. Conexões de entrada (N7) e saída (N1 e N2) da solução no trocador durante a neutralização por circulação



Planejou-se implementar temporariamente uma bomba de circulação e um tanque de ruptura, além das tubulações e um *manifold*, conforme necessário. A entrada da solução no trocador seria pelo dreno principal (N7) e as saídas para o tanque seriam as conexões de entrada e saída usuais do casco (N1 e N2). O tanque de ruptura teria como finalidade a adição de químicos (preparação da solução) e o recolhimento de amostras durante o processo de neutralização.

Figura 14. Esquema do projeto de montagem do sistema de circulação (elaboração própria)



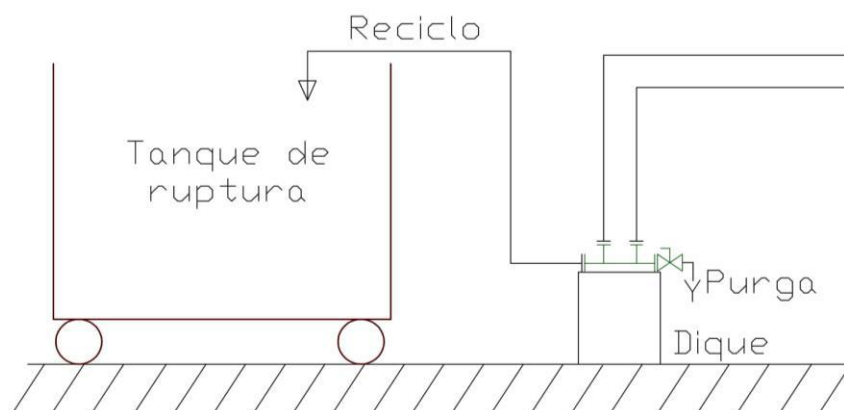
O projeto final do sistema completo de circulação é apresentado de forma esquemática na Figura 14. Ao fim do procedimento, o trocador de calor é drenado pelo *tie-in* N7. Uma vez que todos os trocadores tenham sido drenados, o sistema temporário é desconectado e o equipamento é entregue ao cliente.

III.2.4 - Execução

III.2.4.1 - Montagem e teste

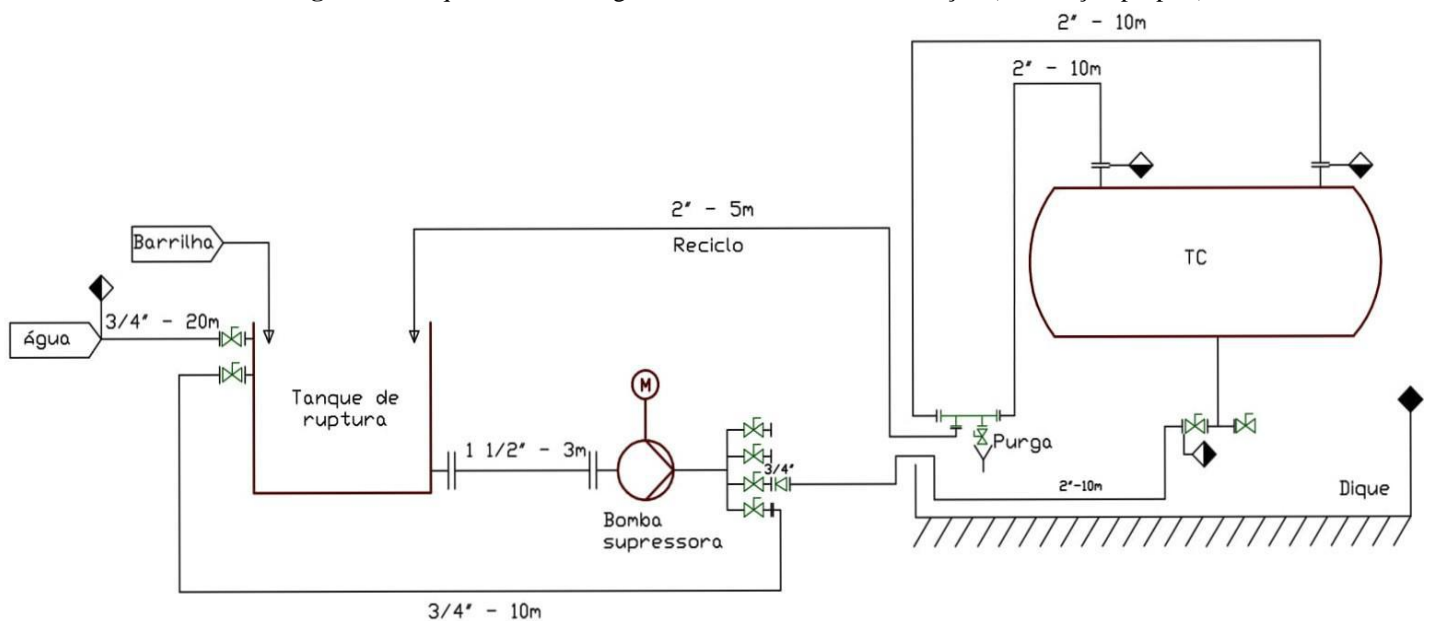
Devido a um problema na etapa de montagem, uma adaptação ao projeto apresentado teve de ser realizada. Como não foi possível colocar a válvula na linha de retorno para o tanque saindo do *manifold*, então, para contornar a situação, o ponto da purga foi posicionado num nível abaixo ao da saída da mangueira de retorno para o tanque (aproximadamente na altura de sucção do tanque), conforme a Figura 15.

Figura 15. Altura da purga em relação à altura do retorno ao tanque (elaboração própria)



Vale ressaltar também o fato que, embora não houvesse válvula para o retorno no tanque, à saída de purga foi adicionada uma válvula. Para tanto, não foi conectada nenhuma mangueira neste ponto. Isto, porém, só foi possível devido a configuração da área de trabalho: como o ponto de descarte do efluente gerado era o dique de contenção dos próprios trocadores de calor, e, portanto, próximo ao sistema, a purga foi direcionada diretamente para lá, não sendo necessária uma conexão para carregar o efluente até o ponto. Assim, a montagem final ficou conforme o Figura 16, apresentada abaixo:

Figura 16. Esquema da montagem final do sistema de circulação (elaboração própria)



III.2.4.2 - Neutralização

Após a instalação dos equipamentos, foi então realizada a neutralização. Os trocadores foram tratados individualmente, só sendo desconectadas as conexões e passadas ao próximo uma vez que o equipamento estivesse drenado e neutralizado. A ordem de intervenção foi do menor (o mais próximo) para o maior (mais distante).

Anteriormente ao início da recirculação, mediu-se o pH nos drenos dos trocadores, os quais apresentaram valores iguais a 1, sendo evidenciado pela existência de um fluido de cor verde, provavelmente pela presença de sulfato ferroso como produto de corrosão. Igualmente, fez-se a medição da solução básica no tanque a ser injetada, que alcançava um pH alcalino de valor 12.

Durante a recirculação, o pH, medido periodicamente ora no dreno, ora na mistura no interior do tanque, variou numa escala de 2 a 7 de acordo com o andamento da atividade. Nos trocadores de maior volume, percebeu-se que, mesmo com a injeção pura de solução básica, o pH medido no retorno era inicialmente ácido (na faixa de 2~3) e se mantinha assim durante um determinado período. Neste ínterim, a coloração da solução vinda do sistema apresentava tons esverdeados, parecidos, embora menos intensos, com a observada nos drenos anteriormente à neutralização. Assim, trabalhou-se com a hipótese de que havia pontos no interior do trocador de calor de acúmulo de ácido sulfúrico, os quais não eram drenados no momento do esvaziamento; quanto maior o volume do trocador, maior era o volume acumulado, de modo que o fenômeno passou despercebido no menor trocador.

Conforme o processo de recirculação corria, a coloração do retorno ia se modificando, adquirindo tons alaranjados, até finalizar em um laranja bem intenso, próximo a marrom. Se o tempo para que essa mudança de cor, que sinalizava a elevação do pH, fosse demorado, uma purga era realizada e uma nova solução era preparada e enviada para make-up. Ao final, o pH atingido foi igual a 7.

Os resultados de tempo e consumo de água e barrilha estão apresentados na Tabela 9. Como esperado, o consumo de reagentes foi proporcional ao tamanho do trocador. O E-7417, que possuía o menor volume dos três, teve um consumo significativamente menor de água e utilizou menos barrilha. Comparando o E-7416 e E-7409, cujos volumes eram próximos, percebe-se que ambos utilizaram a mesma quantidade de água, porém o segundo utilizou uma quantidade significativa a mais de barrilha.

Tabela 9. Tempo de cada neutralização e consumo de água e barrilha.

	E-7417	E-7416	E-7409
Tempo decorrido (h)	12	6	6
Consumo de água (L)	8400	14000	14000
Barrilha (kg)	175	200	250

III.2.5 - Conclusão

Como dito anteriormente, os trocadores foram neutralizados na ordem do menor para o maior, de modo que o E-7409 foi o último; nos trocadores de maior volume, foram percebidos os acúmulos de ácido sulfúrico, por estes serem mais significativos. Como esse fenômeno foi notado durante a limpeza do E-7416, o penúltimo, decidiu-se aumentar a concentração da solução básica de modo a compensar o volume de ácido presente no interior do equipamento. Como a concentração de uma solução é uma relação entre a massa de reagente e a massa de solvente, como demonstra a Equação 4, embora o volume de água utilizada nos dois maiores trocadores tenha sido o mesmo, utilizou-se uma maior quantidade de barrilha no último, obtendo-se uma concentração mais elevada.

$$C = \frac{M_{reag}}{M_{tot}} = \frac{M_{reag}}{M_{solv} + M_{reag}} \quad \text{(Equação 4)}$$

Embora os resultados de consumo de reagentes apresentem coerência com o esperado, o mesmo não pode ser dito do período de tempo. Devido às grandes semelhanças das características e condições nas quais os trocadores se encontravam, era esperado que o tempo destinado à cada equipamento também fosse proporcional à área de contato do trocador, representada pelo volume. A duração igual entre os dois últimos trocadores se explica facilmente pelo volume muito próximo e a diferença de concentração da solução utilizada, como discorrido anteriormente. Porém, quando se observa a duração do primeiro em

comparação com os seguintes, nota-se uma discrepância significativa. Inclusive, supondo uma relação linear entre volume do equipamento a ser neutralizado e consumo de reagentes, nota-se outra desconformidade em relação aos valores que poderiam ser esperados, dado que, embora o volume do menor trocador seja quase 6 vezes menor que os demais, a quantidade de água utilizada foi superior à metade necessária nos outros e a de barrilha foi de 70% a 85%, aproximadamente.

O motivo dos valores tão destoantes foi um erro ocorrido na configuração inicial, que passou despercebido e interveio nos resultados. Durante intervenção no trocador E-7417, quando o pH atingiu a neutralidade e assim se manteve durante o tempo determinado pela metodologia, o trabalho deu-se por concluído e começou-se a drenagem. Por precaução, mediu-se o pH na saída do dreno periodicamente enquanto o equipamento era esvaziado. O resultado das medições do pH foi 7 a maior parte do tempo; entretanto, quando o fluxo começou a diminuir, foi notada uma gradual diminuição do pH. A partir daí, ambos parâmetros seguiram uma relação proporcional: quanto menor a vazão que saía do trocador, menor era o pH medido. Quando a quantidade de fluido que saía do trocador era somente um filete, o pH era 1 e apresentava coloração verde esmeralda, evidenciando a presença de ácido puro. Levantou-se então a hipótese da presença de “bolsões” de ácido, os quais não teriam sido homogeneizados e, portanto, não haviam reagido com a solução básica, tendo sido desfeitos no momento do esvaziamento. Decidiu-se, então, encher novamente o trocador e realizar uma segunda recirculação, a fim de neutralizar o ácido remanescente.

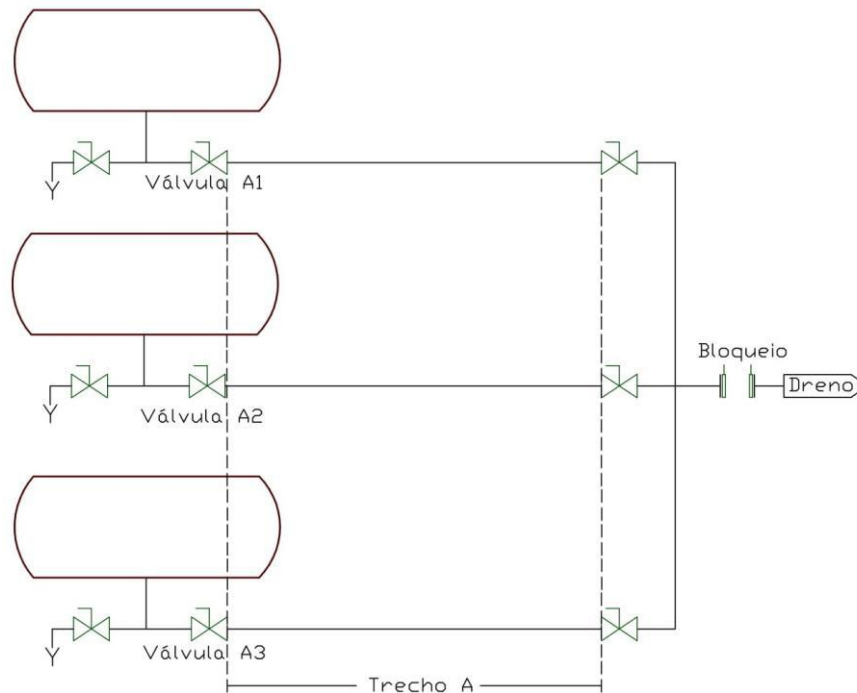
Durante o tempo previsto pela metodologia nesta segunda recirculação, o pH medido no tanque manteve-se constante e igual a 12, valor original da solução injetada. Com isso, o processo foi dado como concluído e decidiu-se rinsar com água pura para baixar o pH até a neutralidade. Esse processo todo consumiu uma quantidade de água muito mais elevada do que o previsto, mostrado na Tabela 10.

Tabela 10. Consumo de água de cada etapa da neutralização do trocador E-7417

		Consumo de água (nº de tanques)
Primeira circulação	Enchimento	2,5
	Make-up	2
Segunda circulação	Enchimento	2,5
	Abaixamento do pH	5

Uma vez o pH 7 atingido, novamente foi esvaziado o trocador, com a medição periódica no dreno sendo realizada. Mais uma vez, observou-se o mesmo fenômeno: a partir do momento em que o fluxo se tornava pequeno até ser somente um filete, o pH baixou proporcionalmente até atingir 1, com a coloração característica do ácido. Nessa condição, procurou-se outros problemas que poderiam ser responsáveis por essa situação. Fez-se então uma checagem minuciosa dos bloqueios e raqueteamentos, até chegar na linha do dreno. Esta reunia os drenos de todos os trocadores dali em uma única linha, a qual seguia para destinação. O raqueteamento havia sido feito após a união, no trecho onde era uma única linha. A configuração da linha está apresentado na Figura 17.

Figura 17. Linha de drenagem dos trocadores com o bloqueio realizado (elaboração própria)



Levantou-se então a hipótese de o trecho situado entre as válvulas de dreno na saída do trocador até a válvula anterior à junção das linhas (Trecho A no Figura 17) conter ainda ácido residual, o qual estaria vazando para onde o trocador estava sendo esvaziado e contaminando a saída inferior, onde era realizada a medição de pH durante a drenagem. A válvula A1 então foi aberta e saiu ácido pressurizado, confirmando a suspeita. O mesmo ocorreu ao final da neutralização dos dois trocadores seguintes, confirmando que o problema consistia no raqueteamento mal feito e não na neutralização.

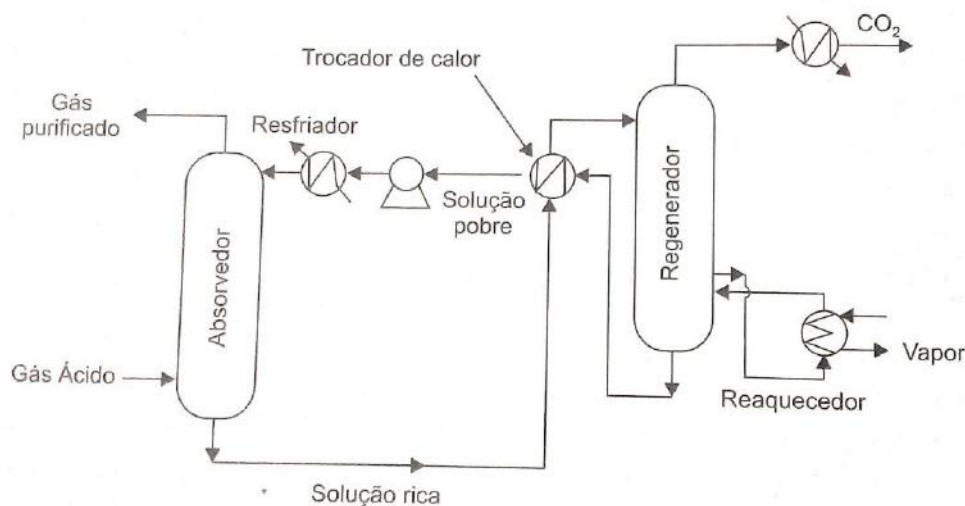
III.3 - Caso 2: Limpeza química online de trocador de calor resfriador de MEA

III.3.1 - Apresentação do caso

Numa indústria geradora de gases, encontra-se a produção de diferentes espécies: gás de síntese, hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e utilidades industriais. No processo de produção do gás hidrogênio, há uma etapa de absorção de CO₂ por uma solução de MEA, a fim de eliminar o CO₂ residual contaminante. Para que essa absorção seja eficiente, a solução de amina deve estar a uma temperatura determinada, tal que possa absorver a quantidade de gás carbônico necessária. A diferença entre absorção e regeneração do solvente se dá por diferença de temperatura: a absorção ocorre a temperaturas menores (27-60°C) enquanto a regeneração a temperaturas maiores (100-140°C) (Souza, 2012). Portanto, de modo a alcançar a temperatura adequada, há um trocador de calor com função de resfriamento antes de a solução escoar para o absorvedor, como mostra a Figura 18. A corrente de gás hidrogênio

com alto teor de CO₂, apontada como gás ácido no esquema, entra no absorvedor, onde a MEA remove boa parte do dióxido de carbono, antes de seguir para o regenerador.

Figura 18. Fluxograma simplificado de um sistema de absorção de CO₂ com MEA (Souza, 2012).



Esse trocador é do tipo casco (MEA) e tubo (água de refrigeração) e possui extrema importância, pois influencia diretamente na eficiência da absorção. No processo da empresa, havia sido estabelecido um limite máximo de 5 ppm de CO₂ que poderia passar para a corrente do produto sem ser absorvido. Ultrapassando esse limite, os processos posteriores eram severamente prejudicados com essa contaminação.

Devido à falta de manutenção, o trocador de calor se encontrava em estado crítico: seus tubos se encontravam parcial ou totalmente obstruídos devido à grande presença de depósitos, de tal maneira que a vazão de água que passava por eles era muito baixa. Este cenário comprometia a tal ponto sua eficiência que, para não permitir que a concentração de gás carbônico ultrapassasse o valor crítico, um *chiller* havia sido instalado à entrada do trocador para complementar a AGR e garantir a troca térmica. Esse procedimento, entretanto, gerava um alto custo adicional e ainda assim era suficiente apenas para manter o nível do contaminante no limite, ainda havendo perda de eficiência no processo.

Devido à sua extrema importância na garantia da eficiência de absorção, não era possível parar o equipamento isoladamente e continuar a produção. Ao mesmo tempo, não havia previsão de parada programada na planta, de modo que, caso continuasse nesse ritmo, seria necessária uma parada não programada, o que iria gerar grandes perdas econômicas para a indústria. Neste contexto, então, foi proposta uma limpeza química com o equipamento em operação, a fim de realizar a manutenção indispensável sem a necessidade de parar a unidade.

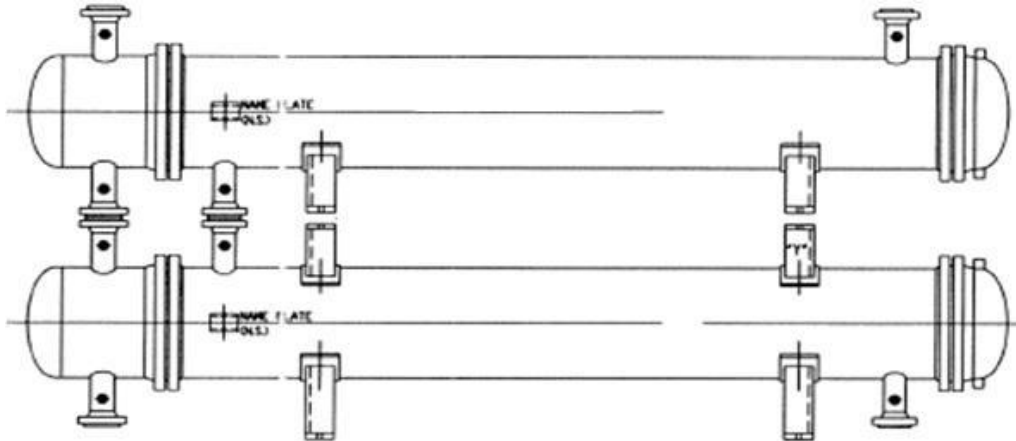
III.3.1.1 - Características

O sistema de refrigeração de MEA é constituído de dois trocadores idênticos em série, E-119 A e B, cada um com dois passes de tubos e um de casco. Na Tabela 11, são apresentados os dados destes equipamentos. Neste trabalho, o conjunto será referido como o equipamento, e não individualmente. O trocador de calor se encontrava na horizontal, com um compartimento diretamente acima do outro, como apresentado na Figura 19.

Tabela 11. Dados técnicos do trocador de calor

Parâmetro	Casco	Tubo
Número de passes	1	2
Material	Aço carbono	Inox
Diâmetro externo (in)	-	3/4
Nº de tubos por passe	-	255
Produto	MEA	Água

Figura 19. Configuração do trocador de calor E-119



III.3.1.2 - Incrustação

Os depósitos no interior dos tubos haviam sido analisados anteriormente. Assim, pôde-se ter uma referência mais precisa da composição dessa incrustação (Tabela 12), permitindo a escolha do produto químico mais eficiente para a limpeza. Os resultados da análise mostram que compostos de cálcio (CaCO_3) e ferro (Fe_2O_3), depósitos facilmente removidos por reagirem com uma ampla gama de ácidos (Awad, 2011; Gentil, 1996), representavam acima de 50% do material, enquanto compostos de sílica (MgSiO_3), de difícil remoção, representavam cerca de 15% da massa total.

Tabela 12. Caracterização da incrustação no trocador. (*Orgânicos voláteis e umidade)

Composto químico	Composição percentual (%)
CaCO_3	30,4
Fe_2O_3	20,9
CO_2	20,6
MgSiO_3	15,0
Compostos de Perda por Ignição ("LOI") *	8,0
FePO_4	2,1
Al_2SiO_5	1,6
Outros	1,0
SiO_2	0,4

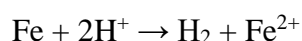
III.3.2 - Metodologia

Por se tratar de um equipamento fundamental para a produção de gases, optou-se por uma estratégia de limpeza em operação para recuperar o trocador sem a necessidade de parada. Este procedimento consiste na injeção de produto químico ácido na linha de água a montante do equipamento, de modo a baixar o pH temporariamente e reagir com os depósitos, enquanto é realizada a medição de determinados parâmetros através de um ponto de amostragem a jusante, com o equipamento em funcionamento normal. A metodologia utilizada é apresentada no fluxograma da Figura 20.

Todos os equipamentos necessários à realização do serviço são acondicionados em dois contêineres: o primeiro um *skid*, onde todos os equipamentos (bomba, tanque, etc) se encontram já conectados entre si, e o segundo um contêiner de utilidades, no qual ficam materiais auxiliares. Esses contêineres são estrategicamente posicionados e o circuito é então montado.

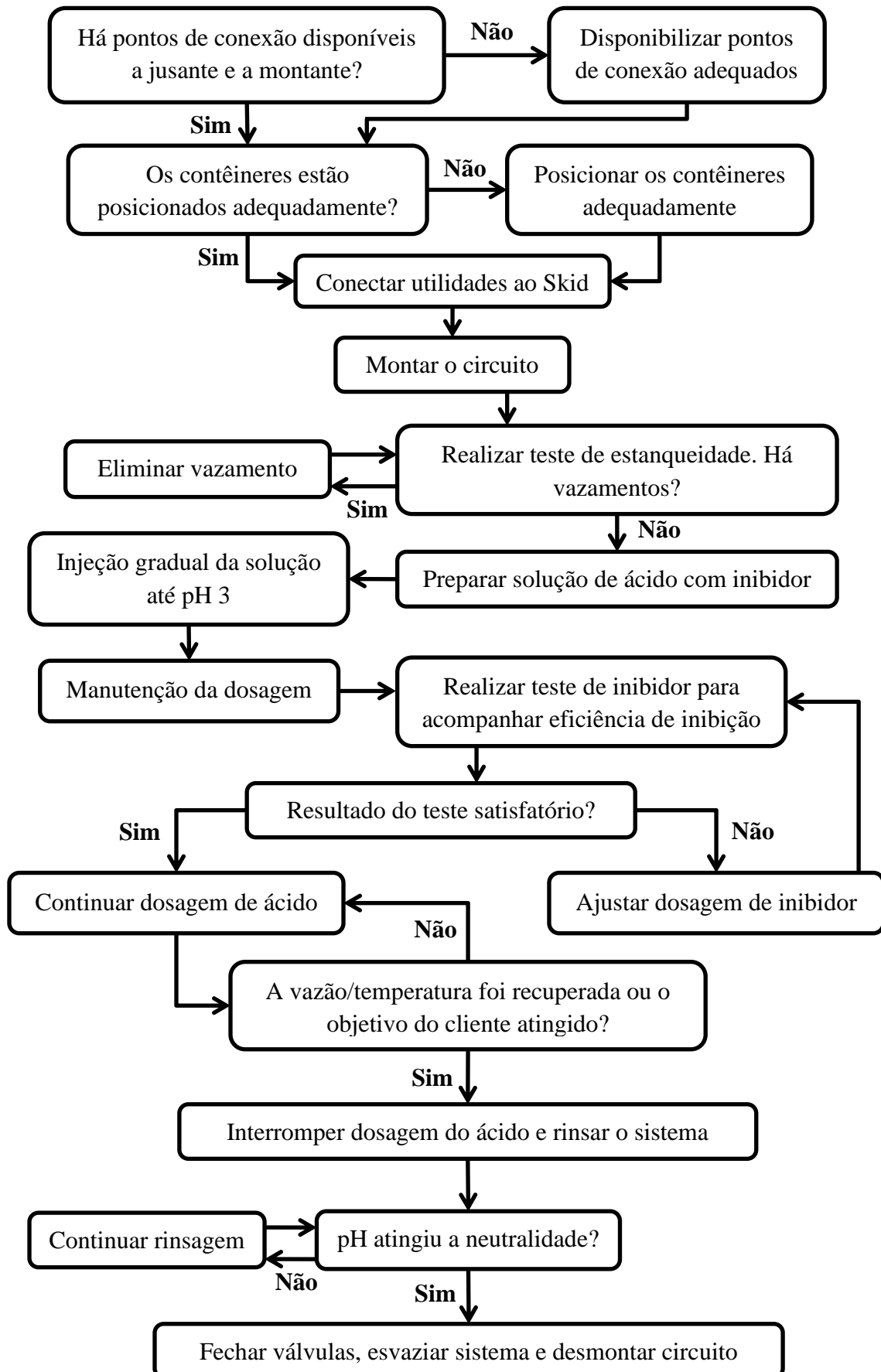
O preparo da solução é feito pela adição de ácido em pó (escolhido a partir das informações de incrustação e material do equipamento) no compartimento apropriado com o uso dos equipamentos de proteção individual (EPI's) adequados. Um inibidor de corrosão também é adicionado para preservar o equipamento. Durante os primeiros minutos do procedimento, ocorre um condicionamento do sistema, etapa na qual o ácido é injetado gradualmente por controle manual, ajustando o pH até chegar em 3. A partir desse momento, a dosagem passa a ser automática, controlada com base nos parâmetros (pH, temperatura, vazão) medidos na linha de amostragem, visando manter o pH nesse valor. A limpeza é considerada concluída quando a temperatura da saída de água é recuperada e o aumento de vazão de água de refrigeração não é mais significativo, ou então quando o objetivo do cliente é atingido, ou seja, a troca térmica do trocador (em outras palavras, temperatura de saída da água, do produto e a vazão de água de refrigeração) alcançadas é satisfatória e suficiente.

A fim de garantir que o equipamento não seja danificado ao longo do processo, faz-se um acompanhamento da ação do inibidor. O teste de inibidor é feito na fase inicial da operação (condicionamento) de 15 em 15 minutos e posteriormente, quando o pH se estabiliza, a cada 30 minutos. O ensaio visa testar a eficiência do inibidor no interior da linha, ou seja, se o ácido está atacando a superfície metálica ou não. Para o teste, é colhida uma amostra em um frasco de 200 ml da linha que sai do contêiner para descarte, a qual contém água proveniente da saída do trocador. Neste recipiente, então, é adicionada uma pequena esfera de palha de aço e aguardado um tempo de 15 minutos. No caso de o inibidor não estar funcionando, o ácido reage com a palha de aço, formando uma grande quantidade de bolhas devido à liberação de gás hidrogênio, fazendo a esfera flutuar. A reação de desprendimento de H₂ é:



Caso contrário, mesmo que haja formação de poucas bolhas (resultado da expulsão do ar presente nas cavidades no interior da palha de aço pelo líquido), se a esfera continuar no fundo é sinal de que não houve reação e, portanto, o inibidor de corrosão está exercendo sua função de maneira satisfatória.

Figura 20. Fluxograma lógico da metodologia proposta (elaboração própria)



III.3.3 - Planejamento

III.3.3.1 - Materiais

Como dito anteriormente, os equipamentos utilizados para a realização do procedimento estão na forma de *skid*, um conjunto onde o sistema já está montado e conectado entre si, sendo necessário somente realizar as conexões externas (utilidades e equipamento a ser limpo). Esse tipo de configuração de equipamento tem a vantagem da compatibilidade, ocupando uma área menor do que se fossem separados, e da facilidade de mobilidade, uma vez que todos os equipamentos são transportados como um. Esse sistema é composto pelas seguintes partes:

i) *Skid*

- Compartimento de adição de ácido (sólido), acoplado a um parafuso sem fim que transporta o produto até o tanque
- Tanque para a produção de solução com volume útil de 500L
- Bomba pneumática com vazão máxima de 2 m³ e pressão máxima de 8 bar
- Bomba dosadora de inibidor de corrosão
- Analisadores de pH, condutividade e temperatura
- Sistema de controle do sistema (IHM)

ii) Auxiliares

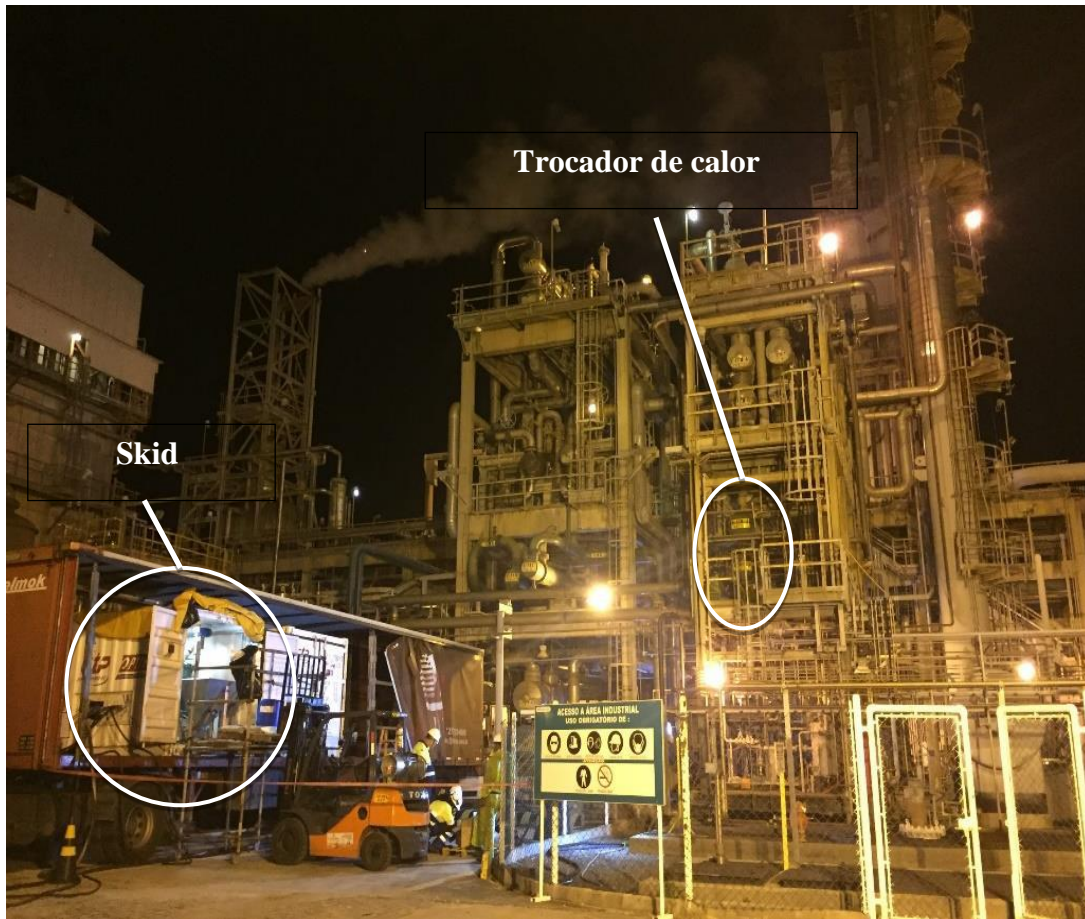
- Mangueiras de utilidades
- Mangueira de injeção de ácido
- Mangueira de amostragem
- Medidor de vazão
- Ácido cítrico
- Ácido sulfâmico
- Inibidor de corrosão (comercial)

A solução ácida escolhida foi uma mistura entre os ácidos sulfâmico e cítrico. A escolha desses ácidos foi resultado da análise tanto da composição da incrustação quanto do material dos trocadores. Dada a presença majoritariamente de carbonato de cálcio e óxido de ferro, foram propostos produtos químicos que fossem compatíveis ao mesmo tempo com esses depósitos para eliminá-los e com o material do trocador, o aço inox, não sendo agressivo a este último. Nesse contexto, uma mistura entre os ácidos sulfâmico e cítrico atende às duas exigências: o primeiro reage bem com carbonato de cálcio e moderadamente com óxido de ferro, enquanto o segundo reage bem com óxidos de ferro (Gentil, 1996).

III.3.3.2 - Localização

O trocador se encontrava numa plataforma a aproximadamente 8 m acima do solo. Os contêineres de *skid* e de utilidades contendo os equipamentos para o serviço foram instalados bem em frente como mostra a Figura 21, já que o trocador ficava na parte mais externa das estruturas, facilitando o acesso.

Figura 21. Posicionamento dos contêineres (foto própria)

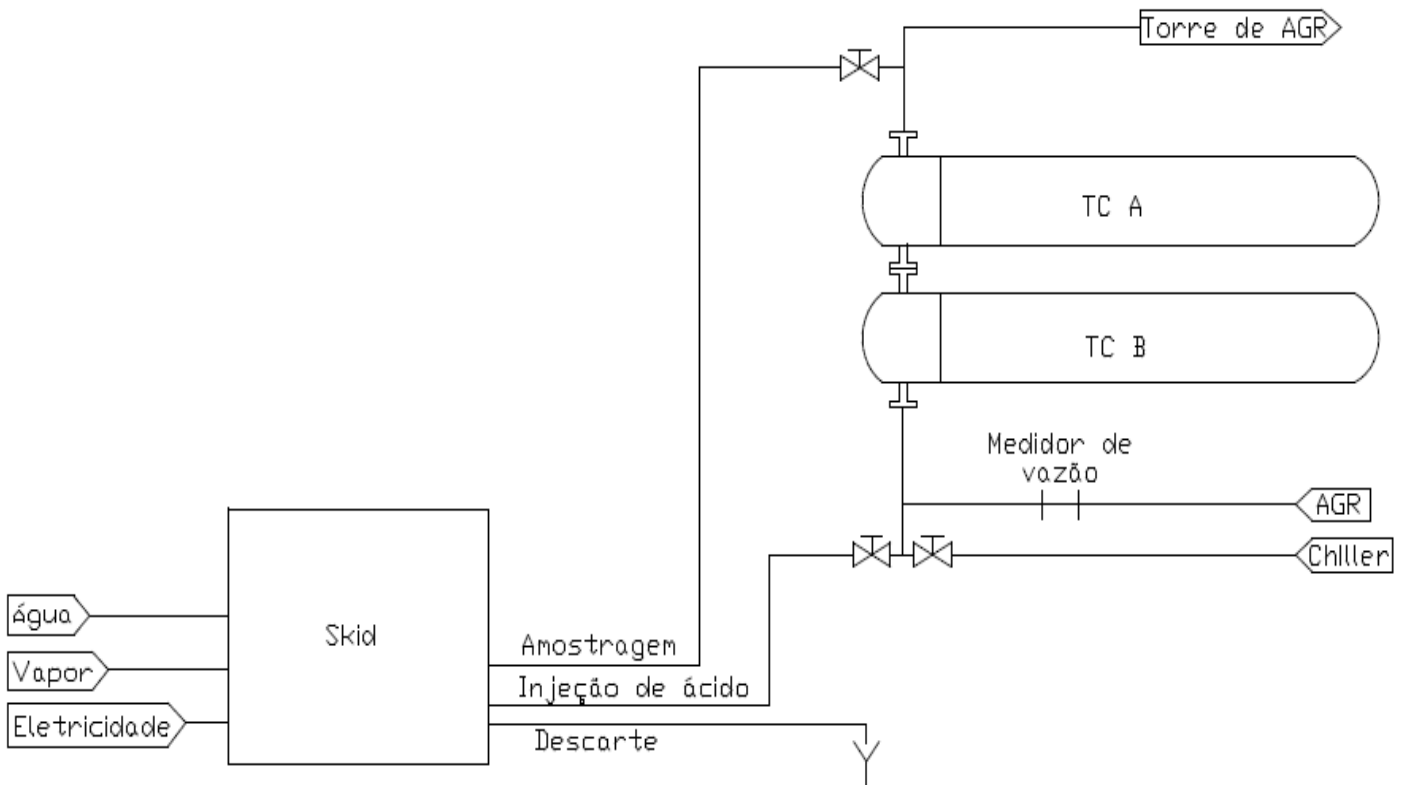


III.3.3.3 - Circuito

Por se tratar de um *skid*, o circuito planejado (Figura 22) é bem simples: o *skid* é conectado às utilidades necessárias e aos pontos na linha de água citados acima. Eletricidade, água e vapor de baixa pressão são conectados ao skid para seu funcionamento: a primeira para energizar o sistema e os demais para a preparação da solução ácida a ser injetada. Para o processo são conectadas duas mangueiras nos pontos disponibilizados na linha de água de refrigeração: à entrada do trocador, a linha de solução de ácido proveniente do *skid*; à saída, uma linha de amostragem que retorna ao sistema para serem realizadas análises de pH, temperatura e condutividade do que sai do equipamento. Por fim, conecta-se uma mangueira de rejeito da água utilizada na linha de amostragem, que segue até o ponto de rejeito do cliente.

Instala-se um medidor de vazão externo a tubulação de entrada ou de saída do TC para medição e acompanhamento do incremento de vazão.

Figura 22. Esquema do circuito de limpeza química com skid (elaboração própria)



III.3.4 - Execução

III.3.4.1 - Montagem e teste de estanqueidade

As conexões foram todas realizadas seguindo o planejamento, graças a adaptações feitas pelo cliente nos pontos de entrada (Figura 23) e saída na linha de AGR.

Figura 23. Ponto de injeção de ácido na linha de água (foto própria)



Um ponto importante a se destacar é a montagem do medidor de vazão. Por se tratar de um medidor ultrassônico, era um equipamento não invasivo e tinha algumas restrições quanto à sua instalação: esta deveria ser realizada num ponto a uma dada distância de acidentes, determinada pelo próprio equipamento, de acordo com as características do sistema (diâmetro da tubulação, material, revestimento etc.). Como nenhum trecho atendia a medida necessária, o medidor foi instalado no local indicado pelo cliente, onde ele próprio costumava medir a vazão com aparelho da mesma marca.

A medição de vazão foi feita de tempos em tempos no visor do aparelho, localizado no ponto de instalação na linha, de forma que os valores para este parâmetro foram menos frequentemente medidos em relação a outros, tomados automaticamente num intervalo de poucos segundos pelo próprio sistema.

O teste de estanqueidade foi realizado, constatando-se alguns pequenos vazamentos nas conexões. Os pontos foram então apertados e então, após um período de 30 minutos de circulação de água sem nenhum outro vazamento, o teste foi dado por concluído e a limpeza propriamente dita foi iniciada.

III.3.4.2 - Limpeza química

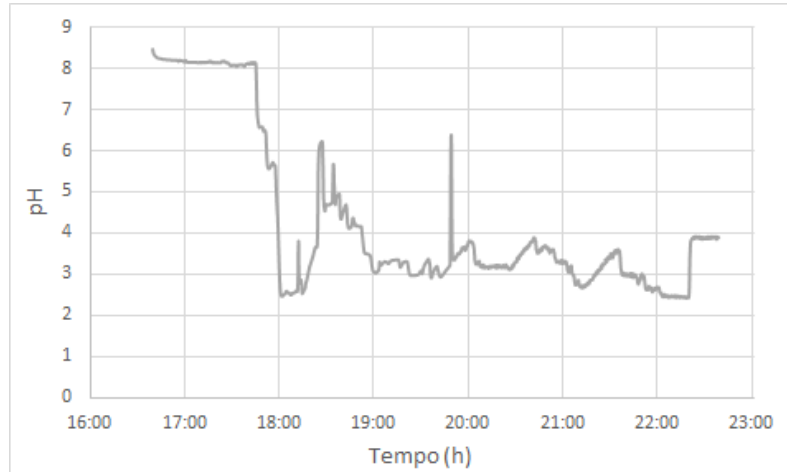
No primeiro momento da limpeza química, ocorre a fase de condicionamento: é quando se dá a diminuição do pH até alcançar o valor de trabalho. É um processo lento, não podendo ser feito de forma abrupta, para que se possa acompanhar a reação do sistema, atentando para variações em parâmetros importantes como pressão e temperatura do sistema. O pH inicial do sistema se encontrava em torno de 8, foi levado até o valor em torno de 2,5 e depois ajustado novamente até se estabilizar em torno de 3, que era o valor planejado. Este processo durou cerca de 1 hora e 15 minutos, como apresentado na Tabela 13.

Tabela 13. Cronologia da atividade.

Atividade	Duração
Montagem do sistema	2h
Teste de estanqueidade	1h
Condicionamento	1h15
Limpeza química	3h40
Rinsagem e desmontagem	1h

Durante a fase de limpeza propriamente dita, foi injetado somente ácido suficiente para manter o pH em torno de 3, como observado na Figura 24. Para ver a eficiência do inibidor de corrosão, foi realizado o teste do inibidor, inicialmente a cada 15 minutos durante a fase de condicionamento, e posteriormente a cada 30 minutos, obtendo resultado satisfatório durante toda a execução do teste.

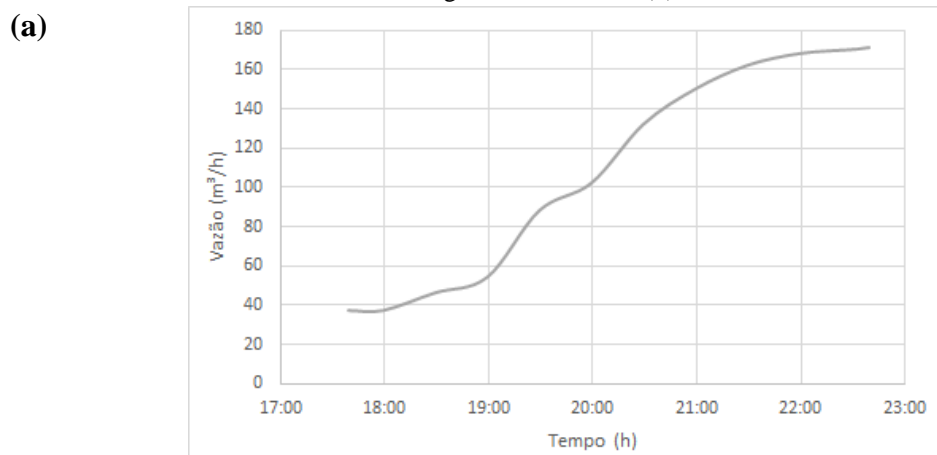
Figura 24. Curva de pH ao longo do procedimento de limpeza.



Os parâmetros de controle do procedimento foram acompanhados para observar o andamento da limpeza e o ponto de finalização. Do lado da equipe que realizava o serviço, o parâmetro principal foi a vazão de água de refrigeração que passava, enquanto, pelo lado do cliente, foi a temperatura de saída do fluido de processo e, conseqüentemente, a concentração de CO₂ não absorvido pelo solvente. O comportamento de ambos os parâmetros é visto na Figura 25.

A curva de vazão é menos clara no que diz respeito a uma evolução mais detalhada do procedimento devido à menor quantidade de medições, como colocado anteriormente, embora ainda seja evidente seu aumento mostrando a eficácia da limpeza. As curvas de temperatura de MEA e concentração de CO₂, porém, são mais detalhadas e percebem-se melhor as nuances do processo. Nelas, percebe-se um ponto de destaque, onde há uma quebra súbita na tendência dos valores, quebra que se percebe também na curva de temperatura de saída de água do trocador (Figura 26). Essa ruptura evidencia o momento no qual o *chiller*, cuja vazão já havia sido reduzida na primeira metade do processo conforme a limpeza vinha surtindo efeito, foi completamente desligado. Nesse momento, a temperatura da água que entrava no trocador aumentou, visto que não havia mais a contribuição de água gelada do equipamento. Entretanto, como se percebe também nos momentos seguintes dos gráficos, os parâmetros retomam a tendência inicial e continuam a diminuir conforme esperado.

Figura 25. Curvas de vazão (a) e temperatura de saída da MEA/concentração de CO₂ na corrente de saída de gás do absorvedor (b)



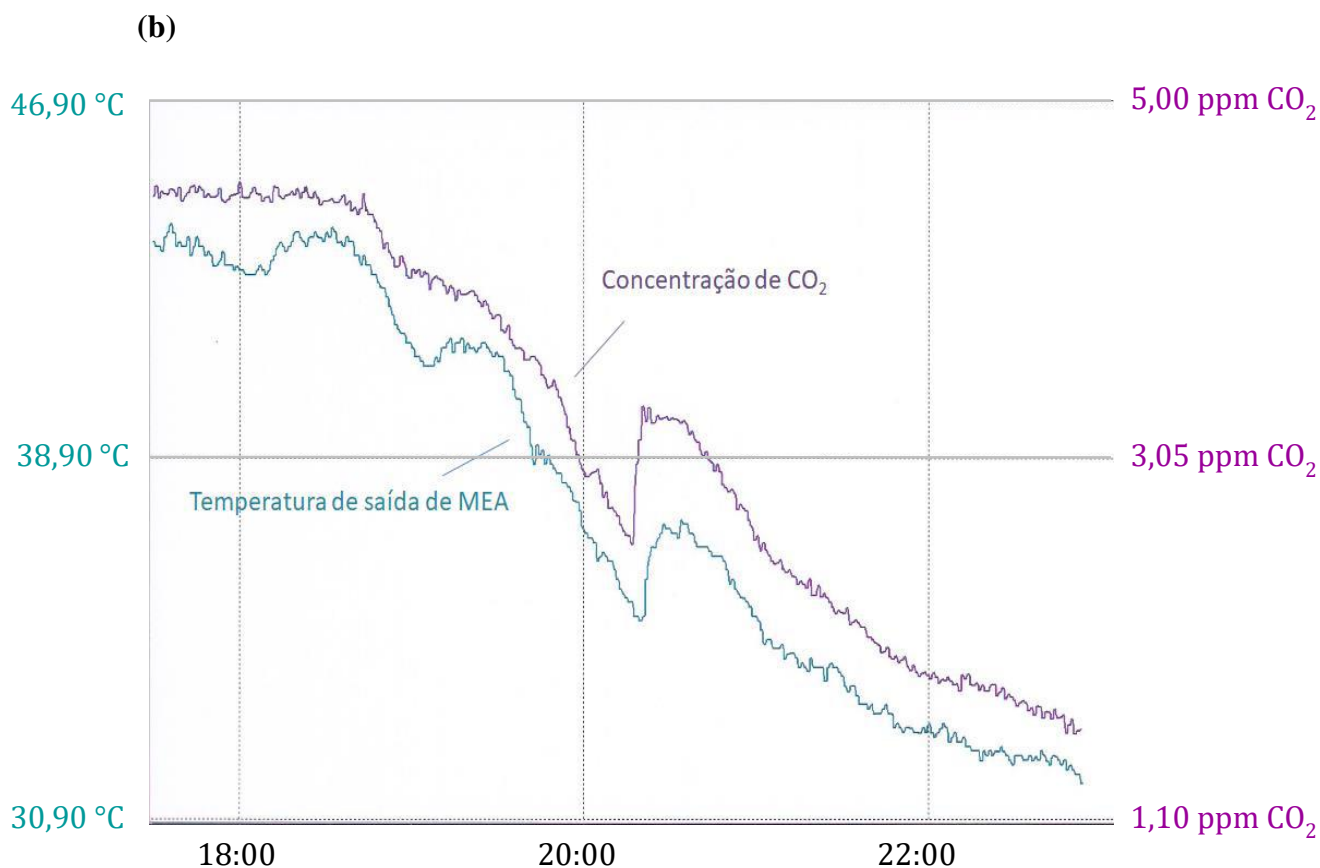
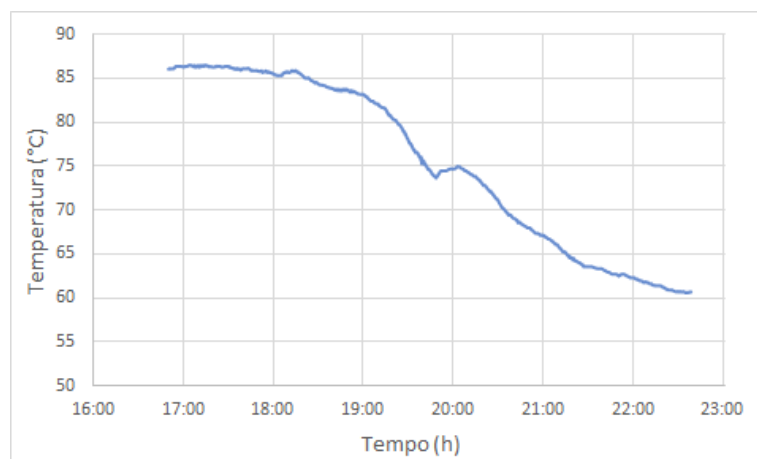


Figura 26. Temperatura de saída da água de refrigeração ao longo do tempo



Calculando a quantidade de calor trocado antes e depois da limpeza com a equação fundamental da calorimetria (Equação 5), foi possível calcular o ganho térmico (η) do procedimento utilizando a Equação 6. Os dados utilizados para os cálculos encontram-se na Tabela 14.

$$Q = m * c * \Delta T \text{ (Equação 5)}$$

Onde Q é a quantidade de calor trocada por hora, m é a vazão mássica de água, c é o calor específico da água e ΔT a diferença das temperaturas de entrada e saída do trocador.

Para os cálculos, considerou-se a densidade da água e o calor específicos constantes, visto que, para uma estimativa que não visava uma precisão tão grande e sim o comportamento dos parâmetros, bem como os valores aproximados, as variações em função da temperatura foram descartadas. Desse modo, para a densidade, que varia de 968 a 998 kg/m³, foi considerado 1000 kg/m³, e para o calor específico, o qual varia de 0,998 a 1,007 kcal/kg°C, considerou-se 1,0 kcal/kg°C .

$$\eta = \frac{\Delta Q}{Q_o} * 100 \text{ (Equação 6)}$$

onde η é o ganho térmico (em %), Q_o é a quantidade de calor trocada antes da limpeza e ΔQ a diferença de quantidade de calor trocada antes e depois da limpeza.

Assim:

$$\eta = \frac{(Q-Q_o)}{Q_o} * 100 = \frac{(5985000-2405000)}{2405000} * 100 = 149\%$$

Tabela 14. Cálculo da quantidade de calor trocada antes e depois da limpeza.

Parâmetros	Antes	Depois
Vazão (m ³ /h)	37	171
Densidade (kg/m ³)	1000	1000
Vazão mássica (kg/h)	37000	171000
Temperatura de entrada (°C)	21	25
Temperatura de saída (°C)	86	60
Calor específico (kcal/kg °C)	1	1
Carga térmica (kcal/h)	2405000	5985000

III.3.5 - Conclusão

Um comparativo entre os parâmetros principais do processo antes e depois da limpeza química foi realizado, como evidenciado na Tabela 15. Percebe-se então que o ganho de carga térmica foi de quase 150% em relação ao valor inicial, resultado acima do esperado inicialmente. Relembrando a escolha dos ácidos e a composição inicial, era esperada a remoção principalmente de carbonato de cálcio e óxido de ferro, responsáveis conjuntamente por 50%. Baseado nessa informação e no fato de que, embora não houvesse o valor da vazão de projeto do trocador, a maior vazão de água medida nos últimos anos que se tinha conhecimento era de 180 m³/h, estimou-se inicialmente uma recuperação de aproximadamente 80-100 m³/h. Com os resultados obtidos e a recuperação final de 134 m³/h, levantou-se a hipótese de que, provavelmente, grande parte dos depósitos que não reagiram diretamente com os ácidos foi

desprendida da parede dos tubos por estarem sustentados em sais ou óxidos que reagiram e se dissolveram, retirando uma maior camada de incrustação do que esperada inicialmente.

Tabela 15. Comparação dos principais parâmetros antes e depois da limpeza química

Resultados	Antes	Depois	Ganho
Concentração de CO ₂ (ppm)	4,5	1,8	2,7
Temperatura de saída do processo (°C)	45	33	12
Vazão de água (m ³ /h)	37	171	134
Temperatura de saída de água (°C)	86	60	26
Carga térmica (kcal/h)	2405000	5985000	3580000

III.4 - Projeto de limpeza

III.4.1 - Apresentação do caso

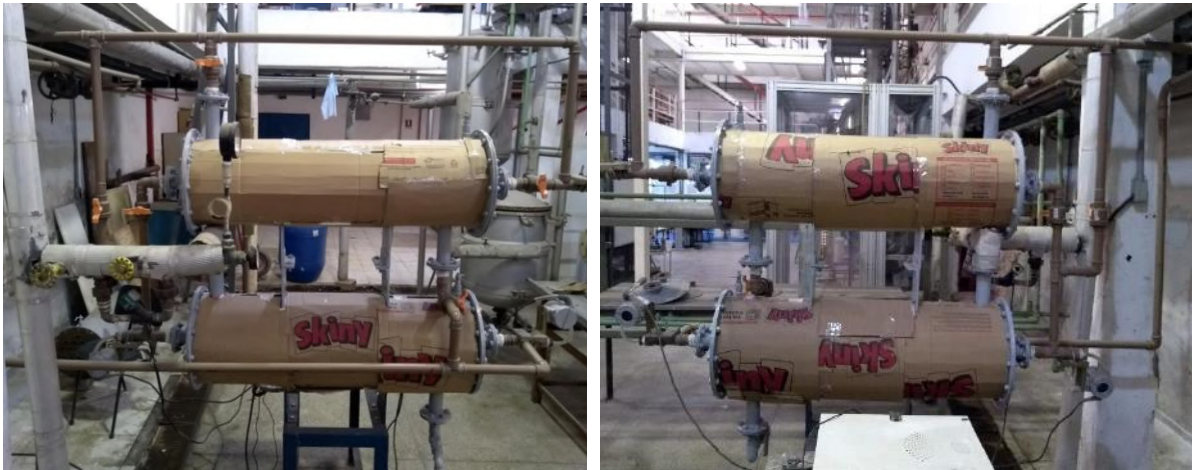
O Laboratório de Engenharia Química (LADEQ) da UFRJ possui dois trocadores de calor, utilizados em aulas da disciplina homônima da Escola de Química. Originalmente eram quatro, porém dois foram condenados por apresentarem vazamentos nos tubos. Um deles foi aberto e fica exposto no laboratório para visualização.

Tabela 16. Características dos trocadores de calor do LADEQ

Características	TC 1	TC 2
Classificação	Casco e tubo	Casco e tubo
Subclassificação	Espelho fixo	Espelho fixo
Escoamento	Contracorrente	Contracorrente
Passes no tubo	1	1
Passes no casco	1	1
Chicanas	Não	Não
Mudança de fase	Condensador	Fase única

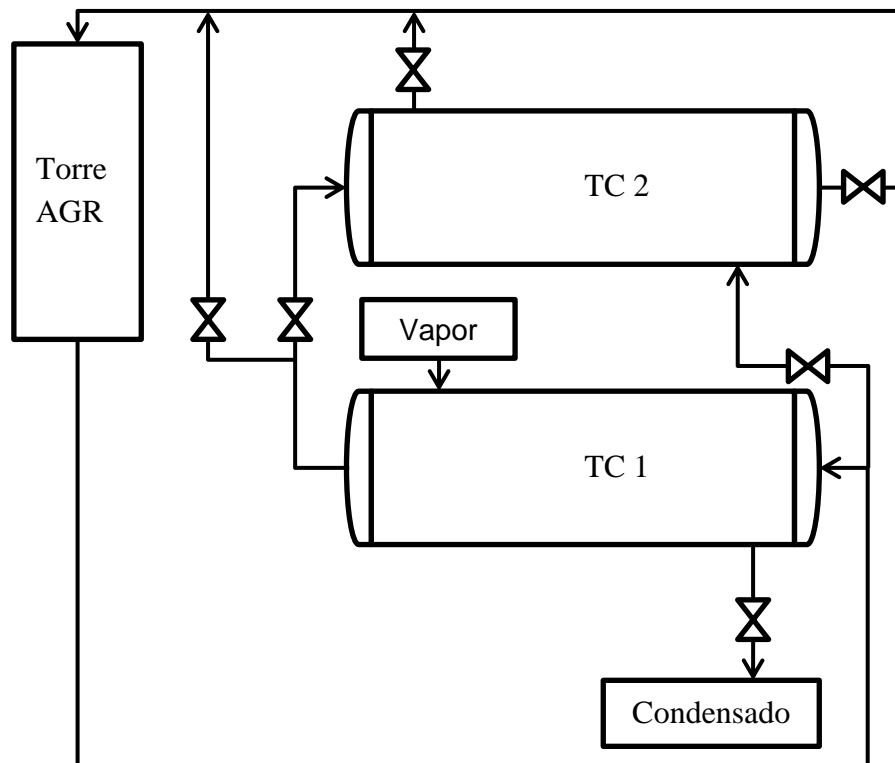
As características dos dois trocadores estudados estão na Tabela 16. Ambos estão na posição horizontal e foram posicionados um acima do outro (Figura 27). Neste trabalho, os equipamentos também serão referidos como primeiro e segundo, correspondendo ao inferior e superior, respectivamente, tendo relação com a ordem que o fluido percorre no circuito.

Figura 27. Bateria de trocadores de calor do LADEQ (foto própria)



O circuito foi projetado de tal modo que pode operar com os dois permutadores em série ou somente com o primeiro (o inferior), bypassando o segundo. Essa versatilidade foi possível devido a um jogo de válvulas que permite isolar o trocador superior, visíveis na Figura 28: uma à entrada inferior do casco, uma na entrada dos tubos e uma na linha de bypass que permite que a água saia do equipamento de baixo e siga direto para a torre de resfriamento.

Figura 28. Esquema simplificado do circuito de refrigeração (elaboração própria)



As duas correntes que alimentam o sistema chegam de origens diferentes: uma provém da torre de resfriamento (água no estado líquido), enquanto a segunda é proveniente da caldeira (vapor). Esta última alimenta o casco do primeiro trocador, condensa e sai pela saída de fundo do casco, para um sistema aberto, podendo, portanto, ser usado para amostragem e descarte. O

circuito realizado pela AGR nos permutadores dependerá se o sistema está configurado no modo de operação com um ou dois trocadores. No primeiro caso, a água entra nos tubos do primeiro trocador, é aquecida pelo vapor e, ao sair, retorna para a linha da torre de refrigeração; no segundo caso, a mesma água que entra nos tubos do primeiro equipamento entra no casco do segundo, pela entrada inferior. A água aquecida que sai do primeiro trocador segue para o segundo trocador, também pelos tubos, é resfriada e prossegue para a linha de resfriamento, juntamente com a água do casco.

Em novembro de 2016, esses trocadores, bem como os outros dois que à época faziam parte do sistema, passaram por manutenção. A equipe do EQ Hands On realizou, dentre outras intervenções, a limpeza mecânica do interior dos tubos de ambos os trocadores (Tomaz e Silva, 2016). O lado interno dos tubos foi recuperado com essa intervenção. Entretanto, não foi possível ter acesso ao lado externo dos tubos, visto que os trocadores são do tipo espelho fixo, ou seja, o casco é soldado aos espelhos.

No trocador de calor que fica exposto no LADEQ, pode-se ver no lado externo dos tubos uma significativa camada de material depositado (Figura 29). Supondo que os quatro permutadores apresentavam depósitos muito similares por serem constituídos do mesmo material e receberem os mesmos fluidos (água no estado líquido e/ou vapor), é de se esperar que os trocadores restantes no sistema atual se encontrem numa circunstância similar. Nestas condições, uma limpeza química teria capacidade de alcançar essas áreas e remover essa incrustação, viabilizando um aumento na troca térmica dos equipamentos.

III.4.2 - Análises realizadas

Conforme visto anteriormente, Bott (1995) afirma que algumas informações são de extrema importância de se tomar conhecimento antes da realização de uma limpeza química. Para o primeiro passo do projeto, isto é, a escolha do produto químico a ser utilizado na limpeza, buscou-se informações que dizem respeito à incrustação encontrada no trocador, à água utilizada e às características do equipamento (material e configuração) e tubulação e equipamentos associados. Tendo conhecimento desses aspectos, pode-se dar sequência para as etapas subsequentes do projeto.

III.4.2.1 - Incrustação

A caracterização da incrustação presente no equipamento permite identificar o tipo de depósito que se forma de acordo com as condições de operação, material do trocador e fluido que ali escoam. Essa informação possibilita a escolha do produto químico ideal para realizar a limpeza, aquele com o qual a incrustação terá uma maior interação para ser dissolvida e fragilizada.

III.4.2.1.1 - Recolhimento da amostra

A amostragem da incrustação, idealmente, deve ser feita no equipamento no qual se deseja limpar, a fim de saber exatamente a composição do depósito e escolher corretamente o produto químico. Entretanto, não foi possível fazê-lo nesse caso, pois não havia possibilidade de abrir os equipamentos, como visto acima. Havia, porém, dois equipamentos, idênticos àqueles no circuito, fora de uso, de modo que a amostra foi recolhida de um desses trocadores, no qual

fora aberta uma janela no casco que possibilitava ter acesso tanto ao lado interno quanto externo dos tubos, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29. Foto do trocador fora de uso com o casco aberto (foto própria)



Os depósitos recolhidos da parte externa do tubo foram retirados de três pontos distintos, cada um deles configurando uma amostra separada: Casco 1, Casco 2 e Casco 3. Esses três pontos estão apontados nas Figuras 30.a-d.

Figura III30. (a) Exterior do feixe dos tubos indicando os pontos de amostragem; (b)(c)(d) Da esquerda para direita: pontos de amostragem Casco 1, Casco 2 e Casco 3 em evidência (fotos próprias)

(a)



(b)



(c)

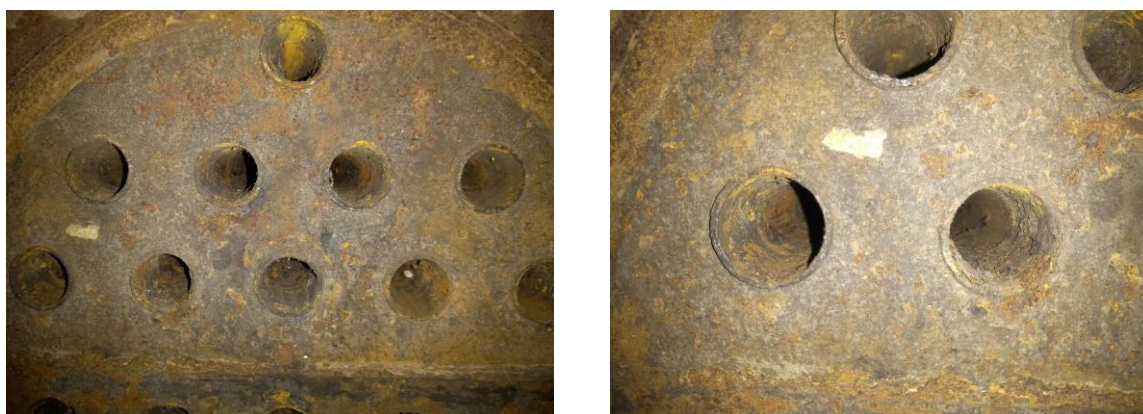


(d)



Quanto à parte interna do tubo, não foi possível recolher amostras de pontos separados, pois a quantidade de depósito não seria suficiente para fazer as análises. Isto se deve à já mencionada limpeza realizada pela equipe da EQ Hands On. Portanto, foi recolhido material de diversos tubos (Figura 31), configurando uma amostra única denominada Tubo.

Figura 31. Interior de alguns tubos do trocador exposto (fotos próprias)



III.4.2.1.2 - Análises realizadas

São duas as características importantes de um depósito que trazem informações relevantes no estudo das incrustações: sua mineralogia e sua composição química. Para o primeiro, foi proposta a realização do método da Difração de Raio X (DRX), como uma forma de perceber de que forma a incrustação se estruturava, identificando as estruturas cristalinas presentes e, conseqüentemente, os compostos. Para o segundo, foi planejada a realização da análise por Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (FRX), com a finalidade de determinar a composição daquela incrustação presente no equipamento bem como quantificar esses compostos. Com a complementaridade dessas duas técnicas, é possível obter a informação sobre a natureza dos depósitos. Entretanto, o equipamento de FRX se encontrava fora de operação durante o período do projeto, não tendo sido possível a realização desta análise.

As amostras foram maceradas com um almofariz e pistilo e em seguida peneiradas com uma peneira de 80 mesh, e então foram analisadas no DRX. Entretanto, os resultados obtidos não foram conclusivos, pois não se sabia a composição das amostras, informação normalmente obtida através da espectroscopia de raios X. Sendo assim, a incrustação não foi caracterizada.

III.4.2.2 - Água

Sem a informação da natureza do material acumulado, buscou-se analisar a água de refrigeração que passa pelos trocadores visando obter indícios do tipo de incrustação que se forma nas superfícies de troca térmica. Foram analisados parâmetros relacionados às fontes mais comuns de depósitos nos sistemas de resfriamento, dentre eles dureza, turbidez (relacionada aos sólidos suspensos), pH, condutividade, ferro total e ferro II.

III.4.2.2.1 - Recolhimento da amostra

O circuito de refrigeração é do tipo aberto com recirculação de acordo com Gentil (1996), composto por uma torre de resfriamento, com entrada para água de *make up* (ou reposição ou

compensação), uma bomba de circulação e um conjunto de dois trocadores de calor, que pode ser configurado para a utilização de ambos ou apenas um trocador. O sistema não fica em circulação normalmente, somente quando há aula prática da disciplina Laboratório de Engenharia Química específica do assunto; no restante do tempo permanece parado, porém cheio.

Inicialmente, a amostragem havia sido planejada para ser realizada com a água presente na torre de resfriamento. Porém, quando a coleta foi ser feita, a torre estava praticamente vazia, de maneira que o nível de água insuficiente impossibilitou o recolhimento de qualquer amostra dali. Desse modo, foi recolhida a água utilizada para *make up*, proveniente da caixa d'água do laboratório, por sua vez alimentada de água proveniente da CEDAE. Foram recolhidos aproximadamente 500 ml de água desse ponto como amostra.

III.4.2.2.2 - Análises realizadas

Para a determinação do potencial incrustante da água, foram realizadas análises que dessem essas indicações, tanto em relação às propriedades da água quanto à composição da mesma. No que diz respeito às propriedades, foram medidas a condutividade, o pH, a turbidez e o potencial zeta. Para a composição, procurou-se por elementos e compostos comumente responsáveis pela formação de incrustações em equipamentos de troca térmica, analisando-se a dureza da água e a concentração de ferro.

A condutividade foi medida utilizando-se o medidor de condutividade bancada mCA - 150 da MS TECNOPON Instrumentação, calibrado com uma solução padrão de 146,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O pH foi medido com o medidor de pH bancada mPA - 210 também da MS TECNOPON Instrumentação, calibrado com soluções tampão 4 e 7, e com confirmação através de fita de pH. Com o turbidímetro Ap2000 da PoliControl Instrumentos Analíticos, calibrado com as soluções padrões de 20, 100 e 800 NTU, foi realizada a medição de turbidez. O potencial zeta foi obtido através do Analisador de Potencial Zeta, com o programa "Bic Particle Solution".

A concentração de ferro foi obtida empregando o método colorimétrico, utilizando-se o Espectrofotômetro DR2800 da marca Hach. Foi medida a concentração de ferro total, com o programa 265 e agente colorimétrico FerroVer[®], e ferro II, com o programa 255 e reagente para ferro ferroso, ambos reagentes da PERMACHEM[®]. A dureza da água foi medida por titulação, com solução de EDTA 0,02 N como titulante, pH ajustado para $10 \pm 0,1$ com tampão de amônio e preto de eriocromo T como indicador.

III.4.2.2.3 - Resultados

Os resultados dos parâmetros medidos estão apresentados na Tabela 17, com exceção do potencial zeta, expresso na Tabela 18 e Figura 32.

Comparado com valores típicos de uma água de sistema de refrigeração (Bott, 1995), os valores exibidos são consideravelmente brandos e não apresentam propensão a formação de deposição intensa. Com o pH próximo à neutralidade levemente alcalino, não ocorre corrosão ácida, porém, em presença de oxigênio, pode ocorrer oxidação do metal base, dependendo de sua reatividade entre ambos. Para aços e ferro, por exemplo, a taxa de corrosão nessa faixa de pH é bem baixa, conforme se vê na Figura 33.

Tabela 17. Resultados dos parâmetros analisados

Parâmetro	Valor
pH	7,45
Condutividade	97,34 $\mu\text{S/cm}$
Turbidez	4,38 NTU
Ferro total	0,13 ppm
Ferro II	0,03 ppm
Dureza	48 mg/L

Tabela 18. Valores de potencial zeta medidos da amostra

Tipo	ID da amostra	Potential Zeta (mV)
ELS	ÁGUA DE RESFRIAMENTO - 1	-24,10
ELS	ÁGUA DE RESFRIAMENTO - 2	-30,01
ELS	ÁGUA DE RESFRIAMENTO - 3	-25,60
Média:		-26,57

Figura 32. Potencial zeta da amostra.

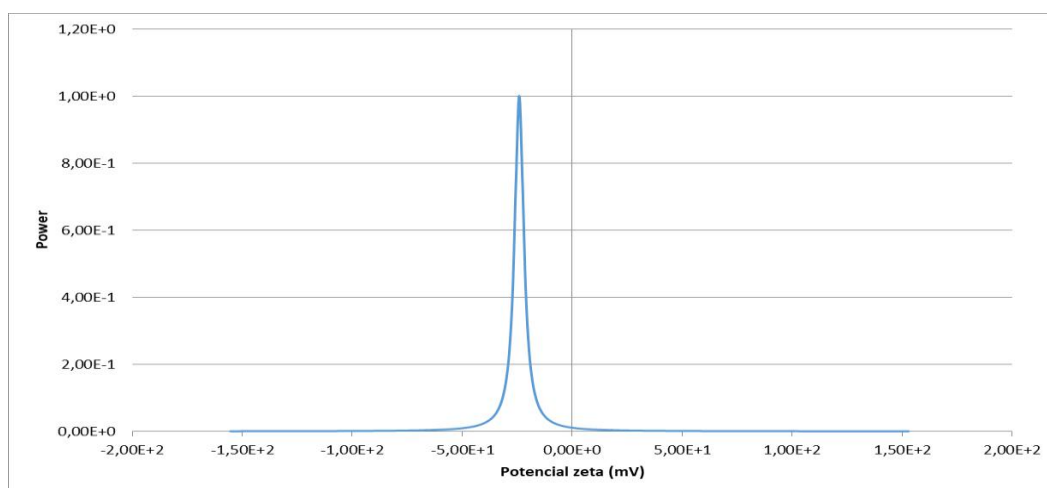
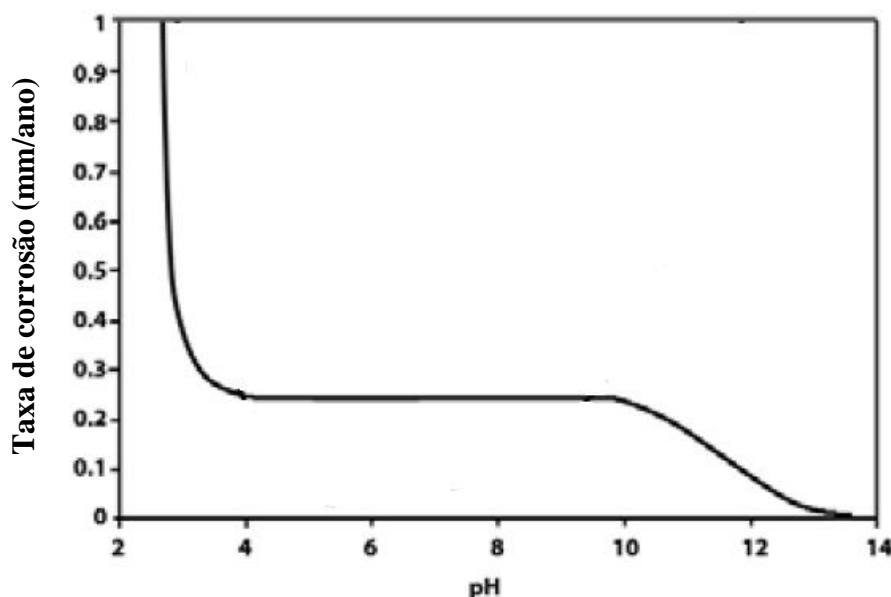


Figura III33. Taxa de corrosão do aço carbono para diferentes pH no ferro e aço (AFSA - Aluminium Federation Of South Africa, 2011) (adaptado)



Os baixos valores de condutividade e turbidez são atribuídos a uma baixa presença de sais dissolvidos e partículas em suspensão, respectivamente, sugerindo que a deposição por cristalização e de particulados não são mecanismos esperados com intensidade elevada. O valor medido de ferro foi quase desprezível enquanto o de dureza já foi mais elevado, embora ainda abaixo do comum de um sistema de refrigeração.

O único parâmetro cujo valor medido representa uma tendência a formação de depósitos foi o potencial zeta. Ele retrata a estabilidade das partículas coloidais na solução, as quais normalmente apresentam cargas superficiais. Quando as forças de repulsão entre essas partículas são maiores que as forças de atração, elas tendem a se manter afastadas umas das outras e se mantêm dispersas na solução, a qual é então considerada estável. Caso contrário, quando as forças de atração são mais significativas que as de repulsão, as partículas se aglomeram e tendem a sedimentar, condição na qual a solução é considerada instável. No potencial zeta, esse limite de instabilidade é dado em termos de potencial elétrico: quando este se encontra entre -30 mV e +30 mV, a solução é considerada instável; fora desse intervalo, estável (Fonseca e Borges, 2017). Conforme exposto na Tabela 18, o potencial zeta medido se encontra nesse intervalo, o que significa que a solução é considerada instável, sendo propícia à precipitação dos sólidos coloidais nela presentes.

É válido ressaltar que esses parâmetros não provieram diretamente da água presente no sistema de refrigeração, mas sim da água de compensação. Isso significa que é possível que as concentrações desses parâmetros sejam maiores na água dentro do sistema, pois, de fato, tende a haver uma concentração de sais e compostos de acordo com a circulação da água em sistemas de recirculação (Sung, Suh e Kim, 2008). Isto ocorre porque uma parcela da água quente, ao passar na torre de resfriamento, tende a evaporar, diminuindo assim a temperatura da água. Nesse processo, o vapor arrasta partículas de água, acarretando uma perda de água nesse processo e, conseqüentemente, uma diminuição no volume total em circulação. Com uma mesma quantidade de sais na água em um volume menor, a concentração destes aumenta. Esse processo é denominado de ciclo de concentração (Gentil, 1996). Dessa forma, a concentração

dos parâmetros medidos no interior do circuito tende a ser tão elevada quanto o número de ciclos de concentração ocorridos, sem adição de água de compensação, podendo ter significância real maior do que as apontadas por esses resultados.

Além disso, os trocadores de calor operaram pelo menos 40 anos sem manutenção, fator que foi decisivo para a ocorrência das incrustações.

III.4.2.3 - Dados do trocador de calor e do circuito

A escolha do produto químico a ser utilizado para a limpeza de um equipamento não depende somente da compatibilidade com a incrustação presente. Deve-se levar em conta, também, que o equipamento não deve ser avariado e, portanto, o produto deve ser igualmente compatível com o material do equipamento. Nesse caso, ainda deve-se considerar o material da tubulação e da bomba do circuito que serão utilizados na limpeza química de acordo com o que for definido no projeto, seja usando a linha que já existe ou outra a ser adaptada nos trocadores.

III.4.2.3.1 - Material

Segundo Bott (1995), uma das informações necessárias de se ter conhecimento antes de qualquer tentativa de limpeza química é o material de construção do trocador de calor, bem como da canalização e equipamentos associados, de modo que o ataque ácido ao metal possa ser evitado.

A fim de descobrir-se o material do equipamento, buscaram-se os desenhos originais do trocador, nos quais deveria constar a informação desejada. No entanto, para os trocadores do LADEQ, devido ao seu longo tempo de existência, não foram encontrados os documentos com os dados necessários, assim como também não foi possível retirar um pedaço de tubo para análise. Logo, não se teve acesso à informação de qual seria o metal constituinte do permutador.

Quanto ao circuito, a tubulação do sistema de refrigeração, que era de ferro fundido, foi trocada durante a última manutenção realizada pelo EQ Hands On em 2016 e atualmente é constituída de tubos de PVC, como visto nas Figuras 34. É importante ressaltar que a linha de vapor não foi substituída por PVC devido às grandes exigências térmicas, continuando a ser constituída por ferro fundido. Não foi encontrada a informação sobre o material da bomba de circulação do sistema.

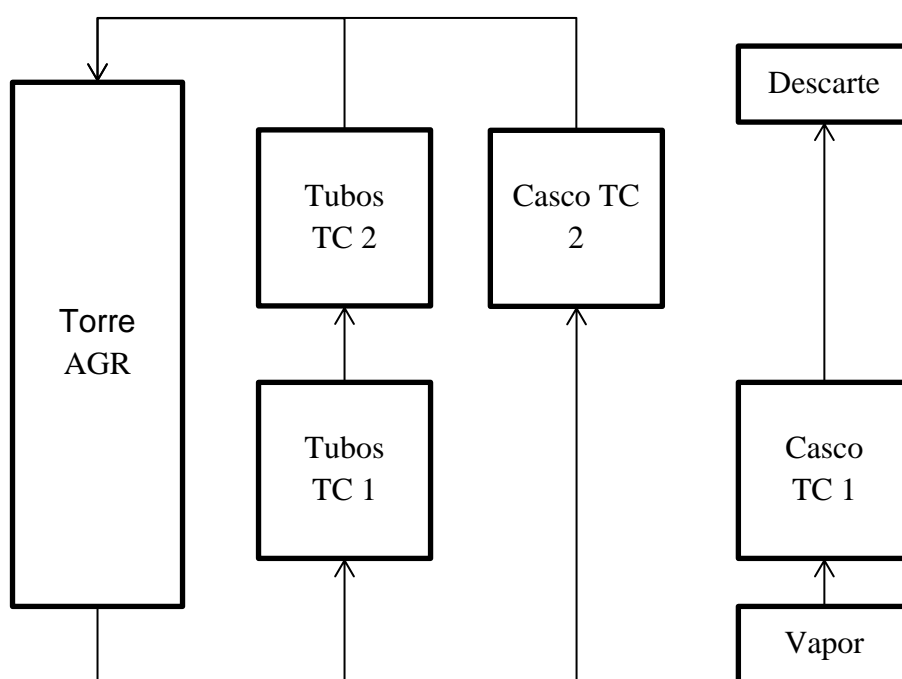
Figura 34. Partes do circuito atual do sistema de refrigeração, constituído de PVC (fotos próprias)



III.4.2.3.2 - Configuração

Para a elaboração do projeto, é importante também compreender o trajeto que os fluidos percorrem no circuito dos trocadores. Da parte interna do trocador, no lado do casco, ele não apresenta chicanas nem é um trocador aletado, não havendo perdas de carga além da causada pelos tubos. O caminho que o fluido percorre é representado na Figura 35. Através dela, percebe-se que uma das correntes percorre os tubos tanto do primeiro trocador quanto do segundo, enquanto outra somente o casco do segundo. O casco do primeiro é preenchido por vapor. Isso significa que, se no projeto de limpeza for decidido utilizar a atual rede de água de refrigeração, somente o interior dos tubos de ambos trocadores e o lado do casco do segundo trocador serão limpos, enquanto o lado do casco do primeiro trocador permanecerá inalterado.

Figura 35. Esquema do caminho percorrido pelos fluidos (elaboração própria)



III.4.3 - Roteiro de projeto de limpeza

Por questões de segurança e operacionais, o procedimento de limpeza química deve ser planejado e implementado cuidadosamente, visto que frequentemente se trabalha com químicos perigosos e pode gerar produtos igualmente perigosos. Além disso, esses produtos também podem danificar o equipamento caso não seja estudada a interação química entre os diferentes compostos. Diante disso, e dada as circunstâncias da ausência de informações importantes, este projeto foi realizado com o intuito de tangenciar cada ponto relevante e necessário para que uma limpeza química possa ser futuramente desenvolvida com êxito. Foram divididas em quatro blocos: escolha do produto, escolha do inibidor, parâmetros e controle operacionais e procedimento de limpeza.

III.4.3.1 - Escolha do produto

As primeiras das informações requeridas para se realizar uma limpeza química são: a natureza do depósito e o material do permutador (Bott, 1995). Ambas informações ou não se tem conhecimento ou estão incompletas. Logo, a primeira etapa a ser realizada é a caracterização completa da incrustação, através de Espectroscopia de Fluorescência de Raios X. Esta irá complementar os resultados do DRX, descobrindo-se então a natureza do depósito ali presente. É aconselhável, ainda, que se realize uma nova análise dos parâmetros medidos, porém na água efetivamente do sistema de refrigeração, pois esta pode ainda indicar tendências a incrustações que podem se fazer presente nos trocadores em operação, porém não se apresentam no trocador exposto no LADEQ. Além dessas análises, pode-se também avaliar o Índice de Saturação de Langelier e o Índice de Estabilidade de Ryznar para determinar a tendência corrosiva /incrustante do meio (Cavazzana *et al.*, 2012).

Quanto ao material, para se determinar qual tipo de metal se trata, a melhor maneira seria retirar uma parte de um tubo e realizar análises de *spot test*. Assim a informação seria precisa levando a uma escolha de ácido adequada.

A literatura é vasta quando se trata de apresentar os diversos tipos de ácido compatíveis com diferentes metais (Awad, 2011; Bott, 1995; Gentil, 1996; Kazi, 2012). Ao se obter ambas as informações, pode-se identificar no material disponível para leitura o produto ideal. O ácido clorídrico é muito utilizado dado sua versatilidade tanto em relação à incrustação quanto ao metal. É eficiente na remoção dos depósitos mais comuns da rede de refrigeração (óxidos de ferro e produtos de dureza) e pode ser inibido até temperaturas de aproximadamente 80 °C (Kazi, 2012). Nos casos de aço inoxidável, o uso de HCl é contraindicado, mesmo com inibidor, caso no qual usa-se normalmente um ácido mais fraco, como o sulfâmico, também inibido.

III.4.3.2 - Escolha do inibidor

Na maioria dos casos de limpeza química, um inibidor de corrosão é empregado juntamente com o ácido para garantir a proteção da metalurgia. A escolha desse produto é também baseada na literatura, de acordo com o ácido e o metal, bem como a concentração ideal. Os inibidores mais comuns são tioureia de seus derivados.

Selecionados inibidor e ácido, realizam-se testes de corrosão com cupons de prova de material semelhante ao do metal base do equipamento. Diferentes concentrações de ácido e inibidor podem ser testadas a fim de aperfeiçoar o sistema e estabelecer a relação ideal.

A eficiência do inibidor pode ser determinada pela expressão (Gentil, 1996):

$$E_f = \frac{(T_s - T_c)}{T_s} * 100 \quad (\text{Eq. III.5})$$

onde E_f é a eficiência em porcentagem e T_s e T_c são as taxas de corrosão sem e com inibidor, respectivamente.

III.4.3.3 - Parâmetros e controle operacionais

Com os químicos selecionados, a limpeza propriamente dita pode ser planejada. Os parâmetros principais desse procedimento são a concentração de produto químico, temperatura

e velocidade do fluido. Para a otimização destes, a montagem de um sistema de bancada pode ser de grande utilidade. Se estiverem disponíveis amostras das tubulações incrustadas do trocador em exposição, pode-se simular circulação em laboratório, alterando os parâmetros de velocidade e temperatura a fim de achar valores ótimos. Condições operacionais mais usuais de ácido clorídrico e ácido sulfâmico são apresentados por Gentil (1996) na Tabela 19.

Tabela 19. Condições operacionais em limpeza química com ácidos clorídrico e sulfâmico

Substâncias	Concentração (peso/volume)	Temperatura (°C)	Tempo (horas)
HCl	5%	60	24-72
NH ₂ HSO ₃	3-5%	60	24-72

Durante a operação, tanto no teste de bancada quanto durante a limpeza, é vantajoso controlar alguns parâmetros. A concentração do agente químico, pois este tende a ser consumido conforme vai reagindo com os depósitos. A dureza e o ferro total, dependendo da composição da incrustação, são indicadores do avanço da limpeza, pois, conforme vão sendo retirados na superfície metálica, entram em solução, sendo então percebidos, chegando até uma concentração máxima referente ao momento em que a incrustação foi toda ou quase toda removida. Outro componente importante de se acompanhar é o Ferro III. Ele possui ação corrosiva para o próprio ferro metálico, portanto sua presença deve ser monitorada. A fim de evitar esse problema, é recomendada a adição de estanho, o qual atua sequestrando os íons de Ferro III em solução.

Por fim, é de extrema importância se certificar da eficiência do inibidor durante a operação. Para isso, um teste de inibidor pode ser realizado periodicamente (no início de forma mais frequente) para garantir que a superfície esteja inibida. O teste é realizado segundo o protocolo apresentado na metodologia do Caso 2, no item III.3.2 deste trabalho.

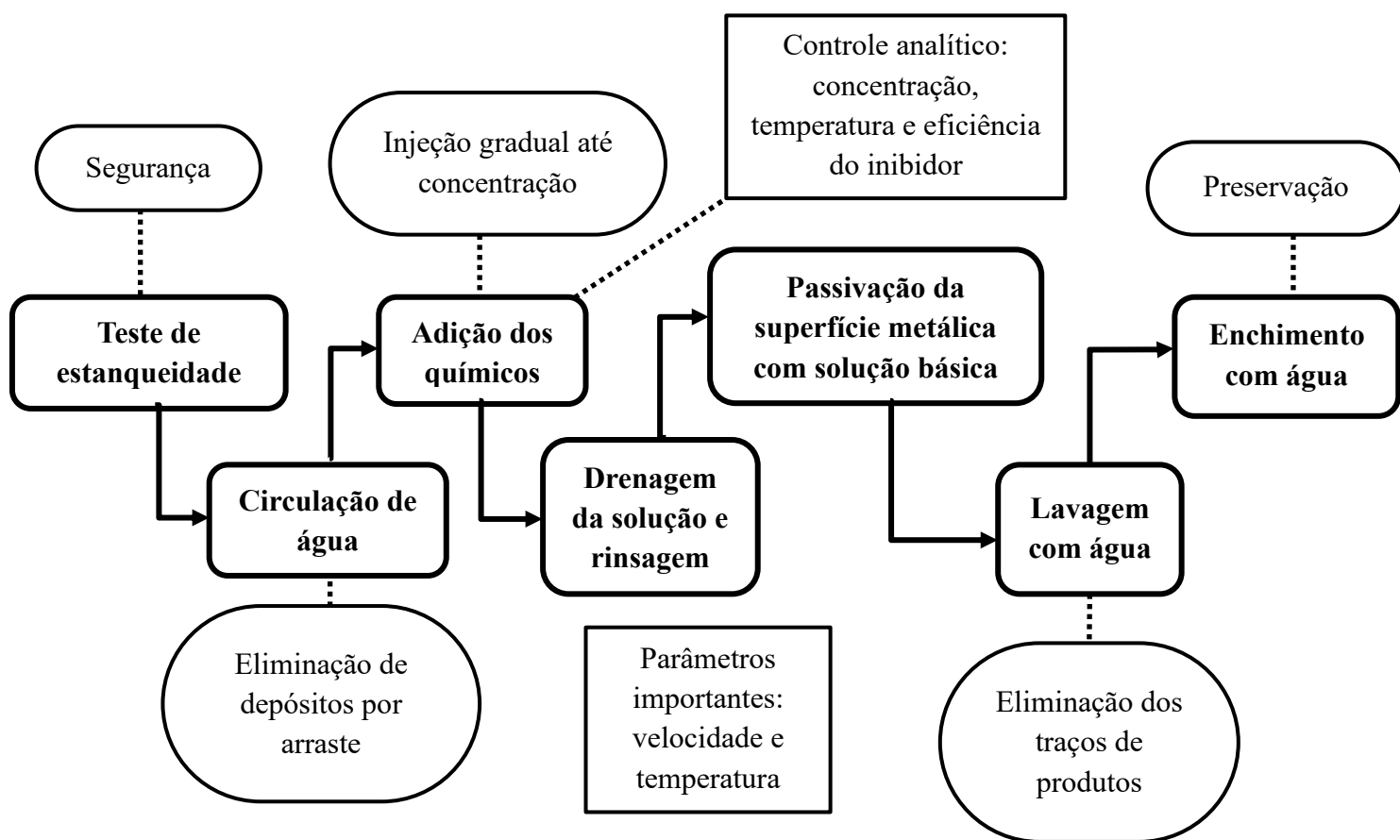
Neste caso, o inibidor não está desempenhando seu papel. É importante ressaltar que não é incomum o surgimento de algumas bolhas quando o ácido está inibido, porém estas são provenientes de bolhas de ar que estavam retidas no interior da lã de aço, as quais são expulsas ao ser imersa na solução. A quantidade de bolhas também é muito menor, não sendo capaz de fazer a lã flutuar, fenômeno comum que ocorre quando há reação. Um teste com ácido puro e ácido mais inibidor pode ser realizado previamente para perceber a diferença.

III.4.3.4 - Procedimento de limpeza

De acordo com as informações das quais se tem ciência e que foram obtidas até o momento da elaboração deste trabalho, o procedimento de limpeza sugerido é composto das etapas apresentadas no diagrama da Figura 36.

Num primeiro momento, por uma questão de segurança, com a finalidade de atestar a capacidade de retenção de fluido, sem vazamentos, nos equipamentos, tubulações e suas conexões, realiza-se um teste de estanqueidade (Ministério do Trabalho do Brasil, 2018). Para tal, enche-se o circuito com água e circula-se por tempo suficiente para conferir se o sistema está estanque, principalmente nas zonas mais propícias a vazamentos, como conexões e

Figura 36. Etapas do procedimento de limpeza sugerido (elaboração própria)



válvulas. Garantindo esse estado, a água é aquecida e circulada com a intenção de eliminar os depósitos de fácil remoção por arraste, e em seguida então os produtos químicos são adicionados gradualmente até atingir a concentração previamente estipulada. Passado o tempo previsto, a solução deve ser descartada e o sistema enxaguado. A neutralização do sistema é recomendada como etapa seguinte, visando também a passivação da superfície metálica recém-limpa. Pode ser realizada com hidróxido de sódio (Gentil, 1996). Por fim, um enxágue é feito até a remoção dos traços de químico e o sistema é cheio com água para deixá-lo menos exposto à corrosão.

Uma vez que os parâmetros de operação tenham sido definidos através dos resultados de laboratório e a limpeza for implementada na prática, alguns pontos devem ser estudados atentamente. Primeiramente, o material de todos os equipamentos e tubulações deve ser compatível química e termicamente com o projeto de maneira a não haver degradação de nenhuma parte no circuito, arriscando ainda causar vazamentos de produtos químicos. Em segundo, o planejamento da montagem do circuito deve ser realizado cuidadosamente: por se tratar de produtos químicos, não pode haver vazamentos; além disso, o sistema estará aquecido e pode liberar gases decorrentes de reações inesperadas, portanto é aconselhada a adição gradual do ácido, sempre atento às reações do sistema e com acompanhamento analítico. O circuito deve idealmente estar isolado e numa área apropriada.

É recomendável seguir os requisitos de segurança e ambientais da Norma Petrobrás N-2511. Para este caso, aplicam-se principalmente a utilização de equipamentos de proteção

individual (EPI) e a consideração dos aspectos de riscos e impactos ambientais causados por essa atividade (PETROBRAS, 2013).

O manuseamento de produtos químicos requer imprescindivelmente o uso de equipamentos de proteção individual (EPI) adequados. Para esse tipo de operação, óculos de proteção, luvas próprias para produtos químicos (nitrílicas, por exemplo), jaleco de manga comprida, calça jeans e calçado fechado (preferencialmente próprios para produtos químicos, como botas de PVC) compõem o vestuário indicado.

Por fim, deve ser considerado o descarte do efluente gerado. Durante todo o procedimento, a variação do tipo de efluente gerado é grande. Efluentes de pH fortemente ácidos a fortemente básicos, podendo ser das mais diversas naturezas: compostos clorados, sulfurados, nitrogenados, orgânicos, entre outros, dependendo dos agentes selecionados. Por conseguinte, o último passo do planejamento é o gerenciamento dos efluentes gerados para minimizar ao máximo o impacto ambiental.

Capítulo IV - Considerações Finais

A aplicação de produtos químicos na manutenção de equipamentos de troca térmica é vastamente utilizada devido às suas muitas vantagens. Esses produtos são muito usados em limpezas, dada a capacidade de remover materiais das mais variadas naturezas através de diferentes metodologias, sendo possível, em certos casos, fazer a limpeza sem interromper a operação, conforme visto no Capítulo III.3. No entanto, esses produtos também podem ser utilizados para outras finalidades, como a passivação e neutralização de superfícies, esta vista no Capítulo III.2.

A intervenção química é um procedimento complexo que depende de uma avaliação prévia do estado no qual se encontra o equipamento, seguida de um levantamento dos dados pertinentes sobre ele e por fim um estudo sobre a melhor maneira de implantação do procedimento. Essas etapas foram apresentadas nas metodologias 1 e 2. Com as informações obtidas nestas metodologias, elaborou-se um roteiro de projeto de limpeza para o trocador do LADEQ. A execução da limpeza em si não foi possível devido à falta de informações essenciais.

Apesar disso, trabalhos futuros podem se desenvolver a partir deste, dando continuidade à elaboração de um projeto completo e até a implantação da limpeza. Como apresentado no Capítulo III.4, a sequência deste trabalho deverá primeiramente buscar as informações complementares às existentes para a escolha do ácido adequado, realizando os testes de laboratório e definindo as condições operacionais ideais. Para o projeto de campo, os casos apresentados podem servir de base para a escolha de equipamentos, montagem dos circuitos e posicionamento do material. Por fim, a destinação e o possível tratamento do(s) efluente(s) gerado(s) mais resíduos sólidos devem ser estudados a fim de se realizar o descarte correto, uma vez que se trata de produtos químicos tóxicos ao meio ambiente.

Referências bibliográficas

AFSA - ALUMINIUM FEDERATION OF SOUTH AFRICA. **Pocket Guide 3 Corrosion Resistance of Aluminium and Protective Measures Where Appropriate**. 1^a ed. [s.l.] AFSA, 2011.

ARANHA, H. **O benzotriazol (BTAH) como inibidor de corrosão do aço inoxidável tipo 304 imerso em banhos de decapagem ácidos**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 1994.

AWAD, M. M. Fouling of Heat Transfer Surfaces. *In*: BELMILOUDI, A. (Ed.). **Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems**. [s.l.: s.n.]. .

BELL, K. J.; MUELLER, A. C. **Engineering Data Book II**. [s.l.] Wolverine Tube, Inc, 2001.

BOTT, T. R. **Fouling of Heat Exchangers**. [s.l.] Elsevier Science & Technology Books, 1995.

CAVAZZANA, G. H.; LASTORIA, G.; GABAS, S. G.; BEZERRA, C. M. P. Análise De Corrosividade E Incrustação Das Águas Subterrâneas Na Região Urbana De Campo Grande – Ms. **Águas Subterrâneas**, v. 26, n. 1, p. 83–97, 2012.

EPSTEIN, N. Fouling in Heat Exchangers. *In*: **Heat Exchangers - 1978**. [s.l.] Hemisphere Pub. Corp., 1978. .

EPSTEIN, N. Thinking about heat transfer fouling: A 5×5 matrix. **Heat Transfer Engineering**, v. 4, n. 1, p. 43–56, 1983.

FONSECA, F. V.; BORGES, C. P. **Condicionamento Industrial de Águas**, 2017.

GENTIL, V. **Corrosão**. 2. ed. [s.l.] LTC, 1983.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3^a ed. [s.l.] LTC, 1996.

HEWITT, G. F.; SHIRES, G. L.; BOTT, T. R. **Process Heat Transfer**. [s.l.] CRC Press, 1994.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. [s.l.: s.n.].

KAKAÇ, S.; BERGLES, A. E.; MAYINGER, F. **Heat Exchangers: thermal-hydraulic fundamentals and design**. [s.l.] Hemisphere Pub. Corp., 1981.

KAKAÇ, S.; LIU, H.; PRAMUANJAROENKIJ, A. **Heat exchangers - Selection, Rating and Thermal Design**. 3. ed. [s.l.: s.n.].

KAZI, S. N. Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces. *In*: **Heat Exchangers - Basics Design Applications**. [s.l.: s.n.]. p. 586.

KNUDSON, J. G. Fouling of heat exchangers: are we solving the problem? **Chemical Engineering Progress**, v. 80, n. 7–12, 1984.

MINISTÉRIO DO TRABALHO DO BRASIL. **NR-13 CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, TUBULAÇÕES E TANQUES METÁLICOS DE ARMAZENAMENTO**Brasil, 2018.

PETROBRAS. **N-2511 Inspeção em Serviço de Trocadores de Calor**Brasil, 2013.

SHAH, R. K.; SEKULIC, D. P. **Fundamentals of Heat Exchanger Design**. [s.l: s.n.].

SOUZA, M. DE M. V. M. **Processos Inorgânicos**. [s.l.] Editora Synergia, 2012.

SUNG, S. K.; SUH, S. H.; KIM, D. W. Characteristics of cooling water fouling in a heat exchange system. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 22, n. 8, p. 1568–1575, 2008.

TAHER, F. N.; MOVASSAG, S. Z.; RAZMI, K.; AZAR, R. Baffle space impact on the performance of helical baffle shell and tube heat exchangers. **Applied Thermal Engineering**, v. 44, p. 143–149, [s.d.].

TOMAZ, J. P. P.; SILVA, R. P. F. **Relatório Técnico N° 02/2016**. [s.l: s.n.].