



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP
REPOSITÓRIO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E INTELLECTUAL DA UNICAMP

Versão do arquivo anexado / Version of attached file:

Versão do Editor / Published Version

Mais informações no site da editora / Further information on publisher's website:

nan

DOI: 0

Direitos autorais / Publisher's copyright statement:

©2016 by ABEQ/Associação Brasileira de Engenharia Química. All rights reserved.

DIRETORIA DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

Cidade Universitária Zeferino Vaz Barão Geraldo

CEP 13083-970 – Campinas SP

Fone: (19) 3521-6493

<http://www.repositorio.unicamp.br>

Aplicação de Metodologia de Engenharia de Processos na Melhoria da Eficiência Energética em Unidade Industrial de Evaporação

Autores: Antonio Esio Bresciani¹, Carlos Eduardo Keutenedjian Mady², José Luis Paiva¹, Silvio de Oliveira Filho¹, Roberto Nicolas De Jardim Junior³ e Roberto Guardani¹, *

1. Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da USP

2. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP

3. Unipar Carbochloro

* Av. Luciano Gualberto 380 Tv 3; 05508-000 São Paulo – SP; guardani@usp.br

Resumo

Este artigo mostra a aplicação de metodologia de análise de processo, envolvendo a modelagem matemática e a simulação de processos e a sua aplicação no estudo de otimização energética de uma unidade industrial de evaporação, em uma planta de soda cáustica. Foram desenvolvidos e validados os balanços de massa e de energia que representam o processo de evaporação em múltiplos estágios, e foram simuladas diversas variáveis operacionais. Foi possível identificar as principais causas de perdas energéticas e buscar as condições ótimas de operação, especialmente quanto à pressão de operação, concentração de soda na entrada dos evaporadores e possibilidade de recompressão mecânica de vapor para recuperação de energia. O modelo fenomenológico também possibilitou a simulação de uma alteração no processo (uma retirada de corrente intermediária) e suas consequências na configuração e no consumo energético da planta.

1. Introdução
2. Análise de Processo em planta de evaporação de Indústria de cloro e soda
 - 2.1 Processos de produção de cloro e soda
 - 2.2. Usos de energia na Indústria de cloro e soda
 - 2.3 Etapas do estudo
 - 2.4. Modelo matemático fenomenológico
3. Resultados das simulações
4. Conclusões

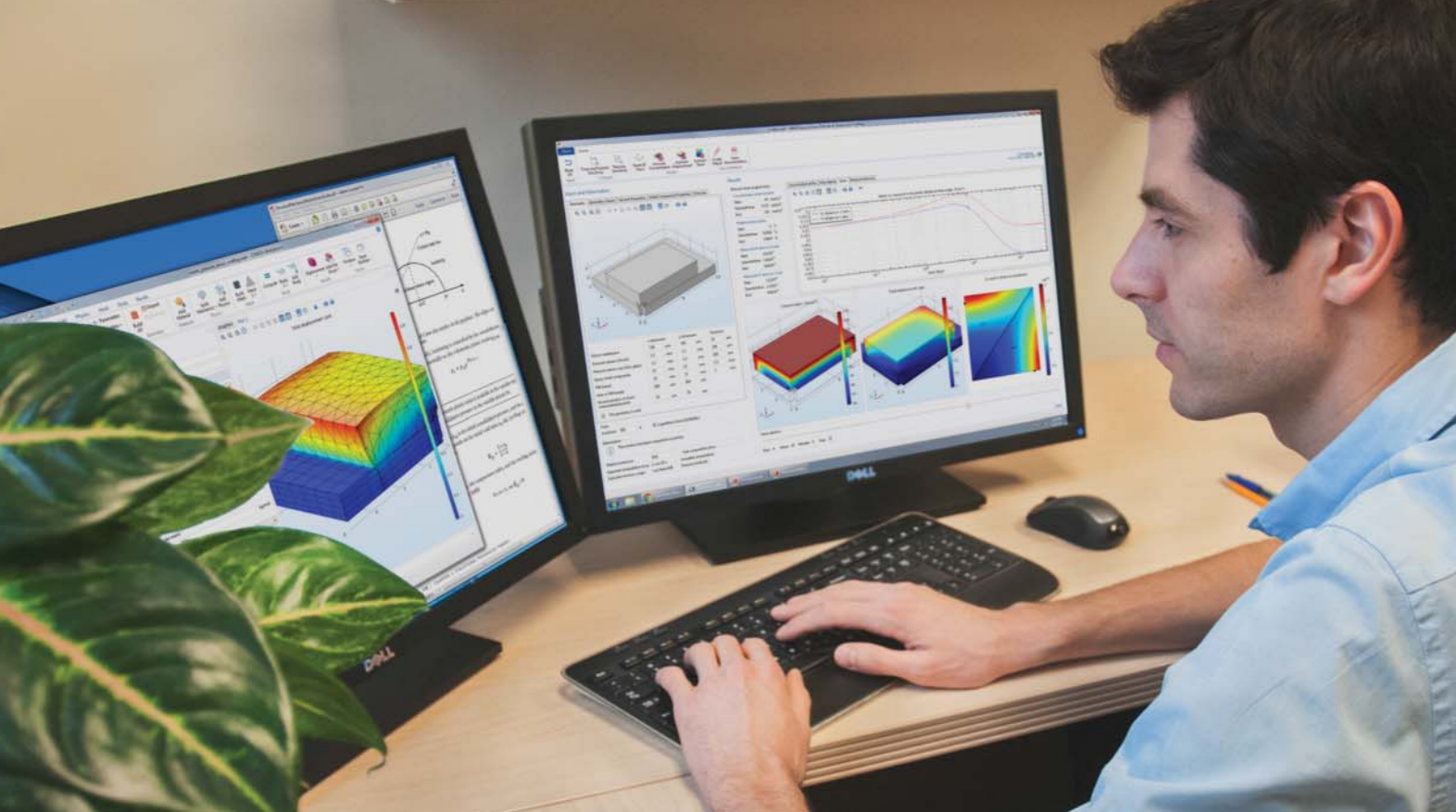
1. Introdução

Em muitas indústrias químicas, a alteração do cenário econômico tem motivado a aplicação de metodologias de análise de processos, visando o ajuste das condições de operação para aumento de eficiência. Nesses casos, é feita uma avaliação das variáveis operacionais de processo, buscando o seu ajuste para a otimização das condições de operação. Os objetivos podem ser o aumento da produção, a redução de custos de produção, a redução de consumo de energia, redução de emissões de efluentes, ou a

melhoria da qualidade de produtos.

Um procedimento usual em unidades industriais é a realização de testes de operação para avaliar alguma proposta de mudança nas variáveis operacionais. Esses testes de operação, além de custosos, trazem perturbações na produção e, na maior parte das situações, conduzem a resultados não conclusivos, pois não é possível ajustar todas as variáveis que afetam o resultado final.

Ferramentas de engenharia, como a Análise de Processos, que é baseada no estabelecimento de modelos matemáticos que representam o processo completo a ser estudado, possibilitam a simulação de diferentes situações operacionais sem a necessidade de perturbar a operação da planta. Esses modelos, quando baseados em propriedades físico químicas precisas, se aproximam muito da realidade operacional da planta e possibilitam prever como a alteração em uma variável afeta todas as outras e, assim, também o desem-



MULTIFÍSICA PARA TODOS

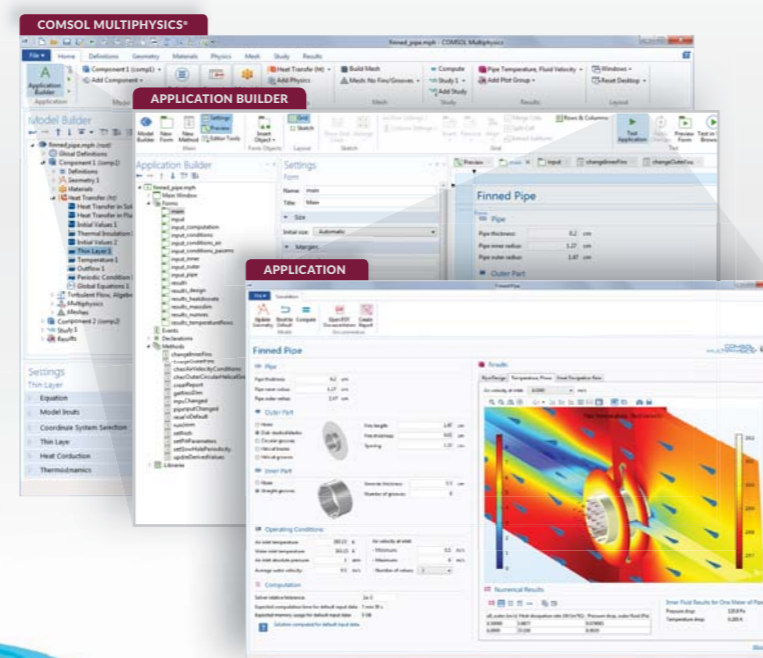
A evolução das ferramentas computacionais para simulação numérica de sistemas físicos atingiu um marco importante.

Agora, especialistas em simulação multifísica estão usando o Application Builder no COMSOL Multiphysics® para desenvolver seus aplicativos customizados.

Com uma instalação local do COMSOL Server™, os aplicativos podem ser distribuídos para toda a organização e acessados em todo o mundo.

Faça com que sua empresa se beneficie do poder da simulação multifísica.

br.comsol.com/application-builder



penho do processo.

Os modelos matemáticos podem ser fenomenológicos ou empíricos. Os modelos fenomenológicos são desenvolvidos com base nos balanços de massa e de energia, nas propriedades físico químicas e nas equações que descrevem os fenômenos envolvidos em cada etapa do processo. Geralmente o sistema de equações é grande e se usam softwares especializadas para facilitar a sua solução. O modelo deve ser validado para condições conhecidas do processo e pode ser aplicado para faixas definidas das variáveis. Os modelos fenomenológicos permitem que sejam incorporadas alterações virtuais, ou “fictícias”, no processo e que sejam simulados os resultados dessas propostas de alteração.

Os modelos empíricos são desenvolvidos com base no conjunto de dados relativos às variáveis operacionais coletados e armazenados por sistemas como, por exemplo, PI, normalmente disponíveis nas unidades industriais. A grande quantidade de dados disponíveis, após remoção de dados errados e anômalos (tais como erros de leitura de instrumentos, períodos fora de estado estacionário etc), pode ser utilizada no ajuste de modelos estatísticos multivariados, como, por exemplo, redes neurais, que associam de forma não linear um conjunto de variáveis de processo selecionadas (normalmente pressões, temperaturas, composições e vazões na entrada do processo), que constituem as entradas do modelo, com as

variáveis de saída (por exemplo, vazões e composições de produtos, consumo de energia etc). Os modelos matemáticos empíricos são adequados quando o processo é muito complexo e há dificuldade para a obtenção de todas as propriedades físico químicas ou para estabelecer as equações que descrevem os fenômenos em todas as etapas do processo.

Os modelos possibilitam a simulação de diferentes condições operacionais e a busca da otimização dos resultados da planta. A confirmação da condição ótima pode ser obtida com a realização de testes de validação para o conjunto de valores das variáveis de processo identificado nas simulações.

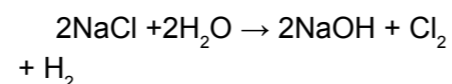
Este artigo descreve a aplicação de ferramentas de análise de processos em uma unidade industrial de evaporação que integra um complexo industrial de produção de cloro e soda, atualmente em operação, considerando-se a modelagem e simulação fenomenológica. O estudo teve o objetivo geral de melhorar a eficiência energética da unidade, motivado pelo cenário atual de aumento gradual e sistemático dos custos de energia.

2. Análise de Processo em uma Unidade Industrial de Evaporação na Produção de Cloro e Soda

2.1 Processos de Produção de Cloro e Soda

A indústria de cloro e soda apresenta um setor de importância básica para a economia do país. No primeiro bimestre de 2015 a sua produção mensal foi de 113,8 mil toneladas de soda e 103,1 mil toneladas de cloro segundo a Associação Brasileira da Indústria de Álcalis, Cloro e Derivados (ABICLOR, 2015). Houve ainda importação mensal de 85,7 mil toneladas. Os produtos diretos do processo são normalmente a soda cáustica, cloro e hidrogênio, sendo este normalmente consumido por outras unidades no mesmo complexo industrial. Além dos produtos diretos, a ABICLOR mostra mais de uma centena de produtos derivados de cloro e soda, entre os quais estão o ácido clorídrico, hipoclorito de sódio e dicloroetano, que são usados como produto de consumo final ou como insumo em outras linhas de produção.

O processo de produção baseia-se na reação química entre cloreto de sódio e água, via eletrólise, com ΔH da reação de + 224 kJ/mol, sendo essa energia fornecida na forma de energia elétrica:



Os processos de produção utilizados em escala industrial consistem das seguintes etapas:

- 1) preparação da salmoura, pela dissolução de NaCl em água;
- 2) eletrólise, envolvendo as reações principais do processo;
- 3) processamento dos produtos: o cloro e o hidrogênio, separados na forma gasosa, são utilizados em outros processos; a

solução contendo soda e NaCl é concentrada para atingir as especificações para uso em diferentes aplicações.

Para a etapa de eletrólise, há três alternativas de processo utilizadas pelas indústrias de cloro e soda em todo o mundo. O primeiro processo utilizado em escala industrial baseia-se no uso de mercúrio. O cloreto de sódio, ionizado em solução aquosa, gera gás cloro na reação do anodo em um primeiro tanque. O íon Na^+ forma o amálgama NaHg que escoar por gravidade para um segundo tanque onde está o catodo. No catodo ocorre a eletrólise da água. O íon OH^- reage com o NaHg formando NaOH, e o H^+ forma o gás hidrogênio. O Hg é reciclado para a região do anodo e a soda é produzida na concentração de 50%, adequada para as demais etapas de produção, controlando-se a adição de água. Esse processo está sendo gradativamente descontinuado no mundo devido a restrições relacionadas ao uso do mercúrio.

No processo de diafragma, o anodo e o catodo são separados por um diafragma que envolve o catodo. Esse diafragma funciona como uma membrana que permite a passagem do íon Na^+ para o catodo. No entanto, como a seletividade do diafragma é baixa, são permeados também água e o íon Cl^- . Dessa forma, a geração do NaOH é acompanhada da geração de NaCl. Além disso, ocorrem reações secundárias, resultando na produção de uma solução

Energia kWh/t de soda	Mercúrio	Diafragma	Membrana
Eletricidade	2800-3200	2500-2600	2300-2500
Vapor	0	700-900	90-180
Total	2800-3200	3200-3500	2390-2680

Tabela 1. Consumo energético dos processos. (Fonte: Ullmann's, 1993).

Consumo específico relativo de energia	Mercúrio	Diafragma	Membrana
Eletricidade	1,19	1	0,90
Vapor	0	1	0,14
Total	0,62	1	0,54

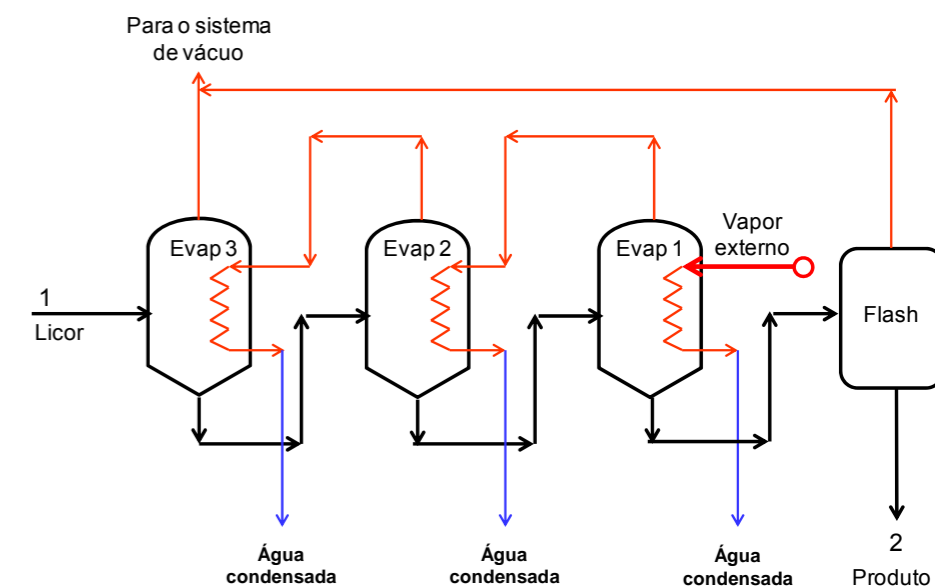


Figura 1. Fluxograma simplificado do processo de evaporação para concentração de soda, abordado no estudo.

com baixa concentração de soda (valor típico de 10 a 12% em massa) e alta concentração de NaCl, além de outros contaminantes como o clorato de sódio. Por isso, é necessário concentrar essa solução até o valor especificado de 50% em massa de NaOH. Isso é realizado em um sistema de evaporação em múltiplos estágios, incluindo sistemas de hidro ciclones e centrífugas para a remoção de cristais de NaCl, cuja concentração limite especificada no produto é de 1% em massa.

No processo de membrana, há uma membrana seletiva que separa as regiões do anodo e do catodo, e que permite a permeação seletiva somente do íon Na⁺ para o catodo. Dessa forma, não há presença de NaCl no licor e a concentração de NaOH na solução produzida é da ordem de 32 a 36% em massa. Ainda assim, é necessário ter um sistema de evaporação para elevar a concentração da soda para 50%.

A utilização de energia na indústria de cloro e soda é muito intensa, atingindo até 45% dos custos totais de produção. Grande parte da energia consumida no processo é inerente às transformações químicas envolvidas, especialmente a eletrólise da água e corresponde à variação de entalpia do sistema reacional. No entanto, outros itens de consumo de energia, como a energia térmica para a vaporização da água e ajuste da concentração da soda, podem ser otimizados, justificando estudos para a redução de seu consumo.

2.2. Usos de Energia na Indústria de Cloro e Soda

Além da energia para as reações eletrolíticas principais, é necessário fornecer mais energia para o aquecimento da massa reacional, para reações secundárias (que também são endotérmicas), e para suprir perdas elétricas e outras perdas. Também é necessário fornecer energia térmica na etapa de evaporação para ajuste da concentração da soda para a sua comercialização.

Como mostrado na Tabela 1, os processos de produção de cloro e soda são consumidores intensivos de energia, principalmente energia elétrica. O consumo efetivo por processo depende de detalhes de cada tecnologia e do estado de conservação de cada planta.

O processo de membrana é o mais eficiente do ponto de vista de consumo específico de energia, pois não há consumo de energia para reações eletroquímicas secundárias e a solução gerada nas células tem concentração entre 32 e 36% em soda, o que implica menor consumo de vapor na etapa de concentração. O processo de diafragma é o que apresenta maior consumo específico de vapor, utilizado na etapa de concentração da solução de produto. Por essa razão, é o foco deste estudo.

A Tabela 2 mostra consumos específicos típicos para as tecnologias existentes, adotando-se como base o processo de diafragma. O maior consumo de energia na forma de vapor no processo de diafragma

deve-se à menor concentração da soda na solução alimentada aos evaporadores, embora dependa do número de estágios de evaporadores em cada unidade industrial. O maior consumo de energia elétrica no processo com mercúrio deve-se à reação de formação do amálgama de mercúrio.

Devido a essa situação, em relatório recente a organização europeia das indústrias de cloro e soda "Euro Chlor" estabeleceu a meta de reduzir o consumo total de energia em 5% no período 2001 a 2010 e obteve a redução de 8%, atingindo o consumo médio de 3358 kWh/t de cloro (2980 kWh/t de soda) (Euro Chlor, 2012). Esse programa continua destacando a importância de redução do consumo energético nessas plantas, ressaltando a contribuição para a redução do consumo de recursos naturais e da emissão de gases de efeito estufa. Além disso, o custo da energia elétrica consumida representa grande parte do custo total do produto, uma vez que, na média mundial, a energia elétrica representa cerca de 40 a 50% do custo total de produção de soda.

As inovações tecnológicas mencionadas em trabalhos científicos recentes (Andrade, 2006 e Moraes, 2011) referem-se à modificação na reação no catodo, empregando catodo de difusão gasosa (de oxigênio), que reduz o potencial eletroquímico necessário, consumindo menor quantidade de energia elétrica. A reação eletrolítica no catodo é alterada com a presença de oxigênio dissolvido.

$$\sum (m_{licor,i} c_{sal,i})_{entrada} = \sum (m_{licor,i} c_{sal,i})_{saida} \quad (8)$$

$$\sum (m_{licor,i} c_{soda,i})_{entrada} = \sum (m_{licor,i} c_{soda,i})_{saida} \quad (9)$$

$$\sum m_{licor,entrada} + \sum m_{cristal,entrada} = \sum m_{licor,saida} + \sum m_{cristal,saida} + m_{vapor} \quad (10)$$

$$\sum H_{licor,entrada} + \sum H_{cristal,entrada} + \dot{Q} = \sum H_{licor,saida} + \sum H_{cristal,saida} + H_{vapor} \quad (11)$$

2.3 Etapas do Estudo

O estudo aqui descrito foi realizado em uma planta industrial da Unipar Carbocloro, envolvendo a unidade de evaporação de um processo de produção de soda utilizando tecnologia de diafragma, com o objetivo de gerar propostas para melhoria da eficiência energética da unidade.

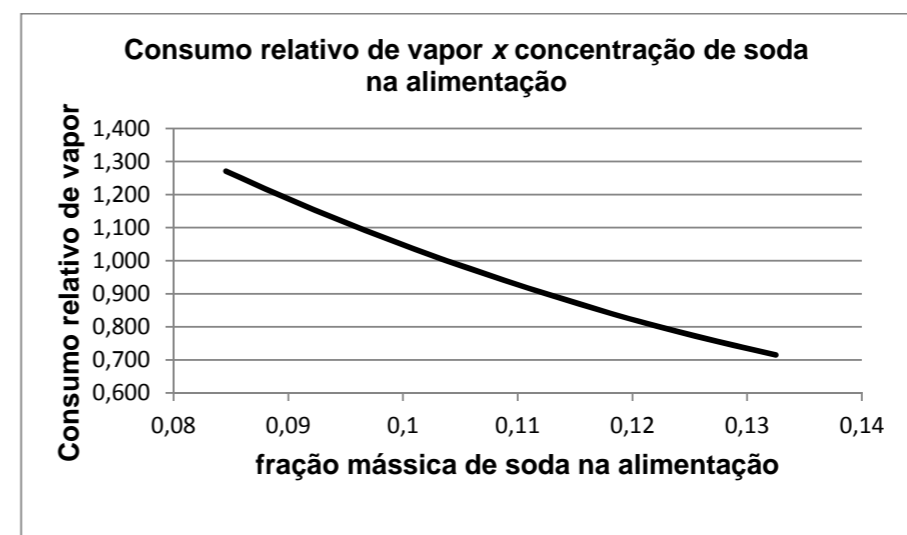


Figura 2. Consumo específico de vapor em relação ao valor nominal, em função da concentração de soda na solução de alimentação à unidade de evaporação.

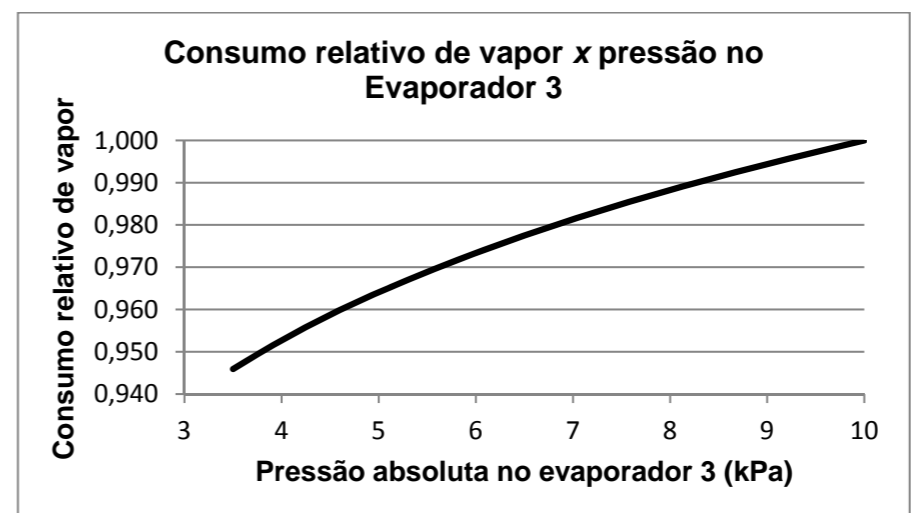


Figura 3. Consumo específico de vapor em relação ao valor nominal, em função da pressão no efeito 3 da unidade de evaporação.

O presente texto descreve a abordagem sistemática adotada no estudo, a qual pode ser aplicada a um grande número de instalações industriais existentes, as quais atualmente convivem com o aumento do custo das fontes de energia, aumento esse que já vem sendo observado desde o fim do século passado. O estudo foi desenvolvido em três etapas descritas a seguir.

Na primeira etapa do estudo, foram verificadas as condições físicas da instalação quanto à integridade, isolamentos térmicos, sistema de geração de vácuo etc, com base em inspeções na planta industrial e estudo da documentação técnica, tendo sido gerados relatórios com as recomendações pertinentes.

Na segunda etapa, foram verificadas as características de projeto da instalação que usa o processo de diafragma. A planta possui um sistema de evaporação de múltiplo efeito, constituído de 3 evaporadores mais um flash, que operam em contracorrente, com uso de vapor externo para aquecimento no último evaporador (Efeito 1) e com uso da energia do vapor gerado nos efeitos anteriores, como mostra o fluxograma simplificado, na Figura 1. O vapor externo aquece o licor no Efeito 1, evaporando água. As correntes de vapor geradas nos Efeitos 1 e 2 são utilizadas como fluido de aquecimento dos Efeitos 2 e 3 respectivamente. Nos trocadores de calor ocorre a condensação de vapor, gerando água, que é utilizada em outras partes da unidade industrial. Após os Efeitos

tos 3 e 2 as correntes de saída de licor são encaminhadas para hidrociclones e centrífugas para a remoção de NaCl cristalizado (não mostrados no diagrama). O licor que sai do Efeito 1 é alimentado ao flash, último estágio de concentração. O vapor retirado deste estágio é encaminhado ao sistema de vácuo, junto com o vapor retirado do Efeito 3.

Para sistemas com essa configuração, a demanda por vapor externo é aproximadamente inversamente proporcional ao número de estágios de evaporação dispostos em sequência e pode ser calculada como:

(1)

$$m_{\text{vext}} = (m_{\text{evt}} \Delta H_{\text{ev}} / \Delta H_{\text{vext}}) / n$$

Em que m_{vext} é a vazão de vapor externo necessária, m_{evt} é a vazão de água a ser evaporada para elevar a concentração mássica da soda de 12% até 50%, ΔH_{ev} é a entalpia de evaporação da água da solução nas condições de pressão e temperatura do processo, ΔH_{vext} é a entalpia de condensação do vapor externo utilizado e n é o número de estágios de evaporação. Numa abordagem inicial, a razão $\Delta H_{\text{ev}} / \Delta H_{\text{vext}}$ pode ser considerada aproximadamente igual a 1 e, dessa forma, se a planta em estudo tivesse 4 evaporadores em vez dos 3 existentes, seu consumo de vapor seria reduzido em cerca de 25%.

Na terceira etapa do estudo foi elaborado o modelo matemático fenomenológico da planta, o qual possibilita simular e selecionar

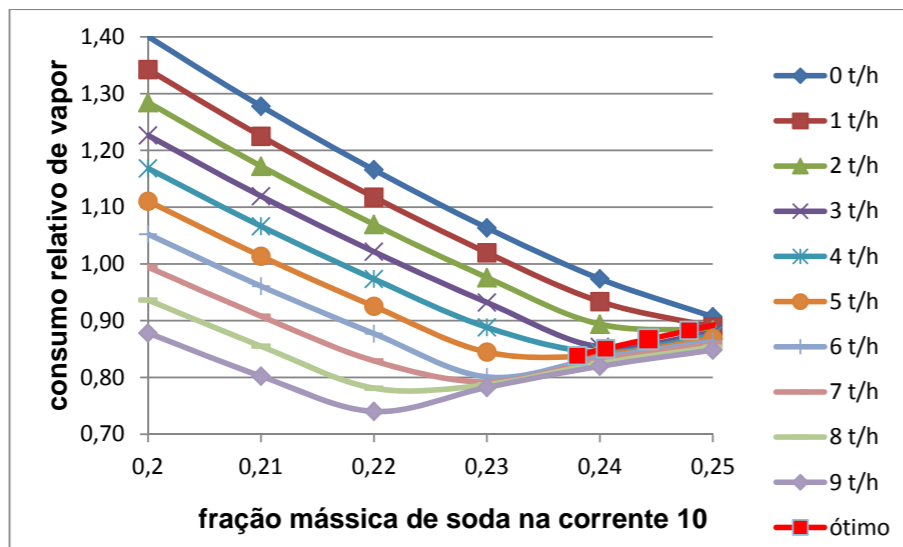


Figura 4. Consumo específico de vapor em relação ao valor nominal, em função da concentração de soda na corrente de retirada intermediária da solução de soda (corrente 10).

as condições operacionais nas quais se obtém menor consumo de vapor externo.

Ainda na terceira etapa, foi verificado que a maior perda de energia na unidade corresponde à entalpia da corrente de vapor efluente do estágio 3, que é condensado com uso de água de resfriamento. Foi estudada a possibilidade de recompressão deste vapor da pressão de saída do estágio 3, de 9,9 kPa, até 98,1 kPa, de modo a poder ser utilizado como vapor de aquecimento no estágio 1, substituindo parte do vapor externo utilizado. Este estudo mostrou ser possível reduzir o consumo de vapor para até 2% daquele original, sendo que o consumo de energia para o compressor seria de cerca de 45% em relação ao total consumido no processo. Assim, seria possível reduzir o consumo total de energia da planta em 53%.

2.4. Modelo matemático fenomenológico

No modelo matemático fenomenológico são escritas as equações de conservação de massa e de energia, de transporte e de equilíbrio que representam cada etapa do processo. Neste caso, foram escritas as equações de balanços de massa e de energia para cada evaporador e para os sistemas auxiliares na condição de regime permanente. Foram também estabelecidas correlações para as propriedades físico químicas e de equilíbrio líquido-vapor e líquido-sólido, a partir de dados tabelados contidos na documentação do processo.

2.4.1 Propriedades termodinâmicas e físico químicas da solução

A literatura apresenta tabelas de propriedades termodinâmicas e físico químicas da solução aquosa de soda (NaOH) e sal (NaCl) em condições de equilíbrio. A entalpia da solução é apresentada como função da temperatura, da concentração de soda e da concentração de

sal. A concentração de sal de equilíbrio é apresentada como função da temperatura e da concentração de soda, como mostram as equações 2 e 3.

(2)

$$H_{\text{licor}} = f_1(T, c_{\text{soda}}, c_{\text{sal}})$$

(3)

$$c_{\text{sal}} = f_2(T, c_{\text{soda}})$$

Assim, a partir do ajuste aos dados tabelados por regressão, pode-se estabelecer uma equação para a entalpia da solução em função somente da temperatura e da concentração de soda na forma da equação 4.

(4)

$$H_{\text{licor}} = f_3(T, c_{\text{soda}})$$

A equação 5 representa o melhor ajuste obtido. Trata-se de uma forma polinomial, em que os termos a_i , b_i , c_i e d_i são constantes e S é o produto $100c_{\text{soda}}$, sendo c_{soda} a fração em massa de soda na solução.

(5)

$$H_{\text{licor}}(c_{\text{soda}}, T) = (a_1 S^3 + b_1 S^2 + c_1 S + d_1) T^2 + (a_2 S^3 + b_2 S^2 + c_2 S + d_2) T + (a_3 S^3 + b_3 S^2 + c_3 S + d_3)$$

As equações 6 e 7, obtidas pelo mesmo procedimento, relacionam outras propriedades necessárias para o desenvolvimento dos balanços. O EPE (elevação do ponto de ebulição) é o aumento de temperatura de ebulição causado pela presença da soda e do sal na água; H_{crist} é a entalpia do sal cristalizado separado nos hidrociclones e centrífugas.

(6)

$$EPE = f_4(T, c_{\text{soda}}) = (k_1 S^5 + k_2 S^4 + k_3 S^3 + k_4 S^2 + k_5 S + k_6) (T - 30) + (k_8 S^2 + k_9 S + k_{10})$$

(7)

$$H_{\text{crist}} = f_5(T)$$

2.4.2 Equações de balanços

Para cada evaporador e para cada etapa de separação de sal foram desenvolvidas as equações para o balanço de massa do sal (NaCl), de soda (NaOH), além dos balanços de massa total e de energia, apresentados nas equações 8 a 11, na página a seguir.

Em que as somas se aplicam a todas as correntes de entrada ou de saída em cada unidade de processamento. O termo corresponde

à taxa de troca de calor no condensador de cada estágio de evaporação.

Aplicando as equações acima para cada evaporador, para cada sistema de remoção de sal e para o aquecedor com vapor externo obteve-se o modelo completo com 153 equações não lineares. O sistema foi implementado em uma plataforma computacional (EES®, Klein, 2015) para a sua solução e para as simulações.

3. Resultados das simulações

O modelo fenomenológico foi validado em relação a condições reais de operação da planta, resultando em desvios médios de cerca de 1%. Foi então verificado, por simulações, o efeito das principais variáveis que afetam o consumo de vapor da unidade de evaporação. Dentre estas, têm importância especial a concentração de NaOH na corrente de entrada da unidade e a pressão de operação do Evaporador 3, a qual depende do ajuste do sistema de vácuo.

A figura 2 mostra os resultados da simulação para o consumo específico de vapor em relação valor nominal, especificado no projeto, em função da concentração de soda na corrente de alimentação. Observa-se que a redução de 13 para 10% na concentração de NaOH na solução alimentada à planta de evaporação leva a um aumento no consumo de vapor de cerca de 50%. A redução na concentração da solução alimentada à planta pode ser causada pela

operação inadequada das células de eletrólise a diafragma ou por injeções inadequadas de água no sistema, devidas a lavagens periódicas de bombas ou centrífugas.

A figura 3 mostra o consumo de vapor em relação ao valor nominal de projeto, em função da pressão no Evaporador 3, a qual depende das condições de operação do sistema de vácuo. Os resultados mostram que é possível obter redução de consumo específico de vapor da ordem de 4% quando se reduz a pressão absoluta de 10 para 5 kPa.

O modelo fenomenológico também possibilitou simular os efeitos de uma alteração na configuração da unidade de evaporação, a qual consiste em uma retirada intermediária de solução de soda com concentração de 22%, instalando-se um divisor na corrente que conecta os Evaporadores 2 e 1, na entrada do Evaporador 1.

Os resultados dessa simulação mostram que há um limite superior para a vazão dessa corrente intermediária, denominada corrente 10, acima do qual a taxa de evaporação no Evaporador 1 não é suficiente para suprir energia para aquecimento nos Evaporadores 2 e 3. Essa limitação é expressa por limites de vazão máxima e de concentração mínima da corrente a ser retirada. As simulações mostraram que a concentração mínima de soda na corrente 10 a ser retirada é de 23,8%. Para valores menores da concentração de soda nessa corrente, passa a ser necessário

instalar um trocador de calor com vapor externo no Evaporador 2 para complementar a necessidade de calor para a vaporização nos Evaporadores 2 e 3. Em algumas situações as simulações mostraram a necessidade de remoção de calor neste trocador, o que evidencia uma condição inadequada em termos de consumo de energia.

Foram calculadas as condições de mínimo consumo de vapor para cada vazão de retirada, obtendo-se a concentração ótima de soda em termos de consumo específico de vapor. A figura 4 mostra o consumo específico de vapor em relação ao valor nominal, de projeto, em função da concentração de soda na corrente 10, para diferentes valores da vazão de retirada dessa corrente. Há uma região considerada inadequada energeticamente, que apresenta consumos específicos teóricos de vapor menores, em que há necessidade de remoção de calor no efeito 2, o que foi considerado não aplicável na realidade da planta. As condições ótimas de retirada da corrente 10 são indicadas na figura 4, respeitando-se a restrição de concentração mínima de 23,8% de soda na corrente 10. Essas condições representam consumo de vapor abaixo do valor de projeto. Isto ocorre porque, na configuração do projeto, toda a soda deixa a unidade na concentração de 50%. Porém, na situação de retirada da corrente 10, parte da soda deixa a unidade em concentração menor que 50%.

4. Conclusões

A partir dos resultados apresentados, as principais conclusões do estudo são:

O consumo energético é muito dependente da concentração da soda na corrente de alimentação da planta de evaporação. Portanto, o desempenho operacional das células eletrolíticas do processo de diafragma deve ser o foco de estudos específicos.

A pressão de operação do Efeito 3 tem significativa influência no consumo energético da planta. Portanto, devem ser direcionados investimentos visando a redução da pressão, com a instalação de sistemas de vácuo adequados a essa meta.

O modelo fenomenológico possibilitou estabelecer as restrições e a condição ótima para a retirada de uma corrente de soda com concentração intermediária de soda, adequada ao uso em outras unidades do complexo industrial.

Além desses resultados, o estudo indicou também que a maior perda de energia ocorre no vapor efluente do Efeito 3. O aproveitamento da energia contida nessa corrente pode ser feito pela instalação de sistema de recompressão desse vapor para uso como fluido de aquecimento no Efeito 1. As simulações indicaram que essa alteração possibilita a redução de 53% no consumo total de energia na planta de evaporação.

A metodologia adotada no presente estudo tem grande potencial de ser aplicada a muitas unidades industriais que operam atualmente no mercado, como forma de melhorar a eficiência energética. A abordagem aqui proposta é baseada nas três etapas mencionadas: Etapa 1: verificação das condições físicas da instalação; etapa 2: verificação das condições de projeto da unidade, para estimativas de itens que representam maiores perdas de energia; Etapa 3: estudo do comportamento da planta em diversas condições, baseada em simulações usando um modelo matemático da unidade. Essa abordagem mostrou-se altamente eficiente na identificação e proposição de alterações que representam ganhos significativos de eficiência na planta.

A aplicação da abordagem proposta possibilita realizar os estudos de forma sistemática e abrangente, sem a necessidade de testes de operação, os quais trazem dificuldades operacionais, têm altos custos e não possibilitam variar todas as condições de interesse para o estudo.

O atual cenário de aumento dos custos das fontes de energia para as indústrias químicas certamente é um motivo forte para a realização de estudos como o aqui descrito, em muitas unidades industriais operando no país. ●

5. Referências bibliográficas

Abiclor - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ÁLCALIS, CLORO E DERIVADOS, www.abiclor.com.br, consulta em 22/06/2015.

Andrade, M.H.S., Estudo e otimização da fluidodinâmica do anólito de celas de cloro – soda com tecnologia de diafragma. Tese de Doutorado, UFCG, 2006.

Euro Chlor. “The Euro Chlor Sustainability Programme”, Euro Chlor, Bruxelas, 2012.

Klein, S. A. Engineering Equation Solver (EES). F-Chart Software, 2015.

Moraes, J.P., Eletrólise de Salmoura para a Geração de Cloro Empregando Catodos de Difusão Gasosa de Oxigênio Modificados com Ferro, Dissertação de Mestrado, Unicamp, 2011.

Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Sodium Hydroxide, VCH Publishers Inc, VolA24, 1993.