

IV-092 - OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE CONCENTRAÇÃO EM SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE REFINARIAS DE PETRÓLEO NO BRASIL

Nilson de Moura Gondim⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela UFBA, Universidade Federal da Bahia. Engenheiro de Petróleo e Engenheiro de Processamento pela Petrobras. Mestrando em Engenharia Ambiental pela Escola Politécnica – POLI/UFRJ.

Lidia Yokoyama

D. SC., Professor Adjunto da Escola de Química, Dep. de Processos Inorgânicos – UFRJ.

Endereço⁽¹⁾: Av. República do Chile, 65 , sala 2102 – Petrobras -Tecnologia do Refino - Centro – Rio de Janeiro –RJ. CEP: 20031-912 – Brasil – Tel.: +55 (21) 3224-6897 – e-mail: nilsonmg@petrobras.com.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é otimizar o ciclo de concentração em torres de resfriamento nas refinarias de petróleo no Brasil, buscando a redução do consumo de água e de efluentes gerados nas refinarias. Por meio da análise estatística dos resultados da qualidade das águas (reposição e recirculação) e das variáveis operacionais (vazão de recirculação, ciclo de concentração e gradiente térmico), foi possível identificar o potencial de redução do consumo de água e efluentes em cada sistema. A análise da viabilidade operacional dos sistemas de resfriamento em relação aos aspectos de corrosão e incrustação foi avaliada através de um software comercial e equações acadêmicas. A motivação do trabalho é de reduzir o consumo de água bruta captada e o volume descartados de efluentes das refinarias, sem a elevação de CAPEX, ou seja, sem custos adicionais com a implementação de novos projetos. Através da otimização dos ciclos das torres de algumas refinarias pode-se obter uma economia de água de reposição (água filtrada) de 6216 m³/d, como também uma redução em mesmo valor da purga das torres de resfriamento (efluentes).

PALAVRAS-CHAVE: Redução do uso de água, Purga de torres de resfriamento, Água de resfriamento, Tratamento de água

INTRODUÇÃO

No Brasil, nas regiões áridas e semi-áridas, a água tornou-se um fator limitante para o desenvolvimento urbano, industrial e agrícola. Porém, o fenômeno da escassez não é, entretanto, atributo exclusivo destas regiões. Muitas regiões com recursos hídricos abundantes, mas insuficientes para atender as demandas excessivamente elevadas, também experimentam conflitos de usos e sofrem restrições de consumo que afetam o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida (BRAGA, 2005). Na Ásia, onde a água sempre foi considerada um recurso abundante, a quantidade disponível para cada pessoa diminuiu entre 40% e 60% entre 1955 e 1990. Seu uso excessivo, aliado a secas, contaminações, problemas climáticos, desvio para o uso industrial ou agrícola e desigualdade no acesso, contribui para a sua escassez (LEONARD, 2011).

Em uma refinaria, além dos processos de produção dos derivados, necessita também de processos auxiliares que supram as necessidades de toda a cadeia de produção, fornecendo insumos, como água, vapor, energia elétrica, hidrogênio, etc.; com foco na redução dos seus impactos ambientais. Entre os insumos, a água tem seu destaque na medida em que os sistemas de resfriamento das refinarias são responsáveis por 40 a 60% do consumo de água de toda a indústria.

No Brasil, já existe restrições para o aumento de outorga de captação de água das Unidades Operacionais do Refino, bem como reduções desta outorga, como no caso da REPLAN em Paulínia. As refinarias são grandes consumidores de água, de fato que, o consumo típico de uma refinaria em todo o mundo é na faixa de 0,5 a 1,5 m³ por m³ de petróleo processado (HWANG, 2011).

Nas refinarias do Brasil, esta relação atualmente encontra-se em média na ordem de 0,83 m³ de água captada por m³ de petróleo processado.

Em geral, as torres de resfriamento funcionam em sistemas semi-abertos, ou seja, sistemas abertos com recirculação de água. No funcionamento de uma torre de resfriamento acontecem perdas por evaporação e respingos que consequentemente, promovem a concentração de sais e sólidos suspensos necessitando da realização da purga (blowdown) para controle da concentração destes componentes. Essas correntes são compensadas com adição de água “tratada”, chamada de água de reposição (make up), contendo menores teores de sais dissolvidos e sólidos suspensos, sendo que, desta demanda de água para reposição, aproximadamente, 10 a 20% são para compensar a purga nas torres.

O consumo de água de reposição em torres de resfriamento é na ordem de 50% do total de água usada na refinaria, seguidos de 20% para água desmineralizada com a finalidade de gerar vapor (Boiler Feed Water), 11 % para água de incêndio e 10% do consumo é utilizada nas unidades de processo (destilação, craqueamento, etc). O consumo de água potável e lavagens totais na estação de tratamento de água consomem cerca de 6% e 5%, respectivamente (HWANG, 2011).

Especialistas prevêem que, em 2025, três quarto da população do planeta irão sofrer por falta de água e à medida que a água se torna cada vez mais escassa, surgem conflitos em torno do seu uso e da forma que o regulariza (LEONARD, 2011).

Uma representação de um esquema típico de um sistema de resfriamento adotado nas refinarias é ilustrada na **Figura 1**. Este sistema é do tipo recirculação evaporativo e, neste caso, a água quente oriunda da operação de resfriamento é resfriada por transferência de calor para o ar ocorrendo a evaporação de parte da água na torre de resfriamento. A evaporação elevada e perdas por respingos que contribuem na concentração de sais na água, traz a necessidade da realização da purga para a alimentação de uma corrente menos salina de forma a desconcentrar o sistema.

A motivação deste trabalho é reduzir o consumo de água bruta captada e o volume de efluentes nas refinarias de petróleo no Brasil, através da otimização do ciclo de concentração das torres de resfriamento. Isto significa em redução da vazão de reposição e purga das torres de resfriamento, sem a elevação de CAPEX, ou seja, sem adicionar custos com implementação de novos projetos.

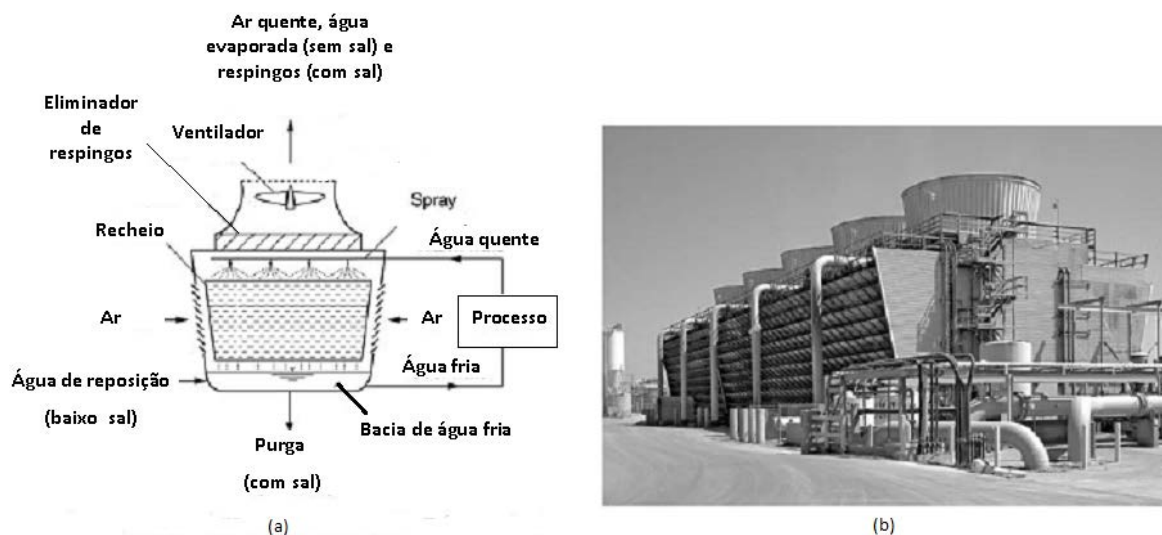


Figura 1. Sistema de água de resfriamento. (a) diagrama simplificado de uma torre de resfriamento e (b) Exemplo de uma Torre de resfriamento com grandes diâmetros das tubulações de água (adaptado de METCALF, 2007).

MATERIAIS E MÉTODOS

Os resultados analíticos e variáveis operacionais foram obtidos de 9 refinarias da Petrobrás distribuídas em varias regiões do Brasil, totalizando 37 torres de resfriamento. Foram realizados curvas contendo as vazões de reposição e purga das torres de resfriamento em função dos vários ciclos de concentrações em determinadas condições fixas operacionais de vazão de circulação e gradiente térmico.

As determinações das parcelas da evaporação, de reposição e da purga das torres de resfriamento foram realizadas através das **Equações 1 a 6** (NALCO, 2009).

Para determinação da tendência a corrosividade e/ou deposição da água de recirculação foi utilizado o software, French Creek Water Cycle versão 6.00R2 (Langelier) e as **Equações 8 e 9** para determinação do índice de saturação de Rysnar. As simulações foram realizadas sem considerar os produtos químicos aplicados através dos programas de tratamentos. A cor azul e vermelha expressa as condições favoráveis e desfavoráveis, respectivamente.

$$E = f \times R \times \Delta T \times C_p / \lambda \quad \text{ou} \quad E = 0,85 \times R \times \Delta T / 549 \quad \text{Equação (1)}$$

E = evaporação (m³/h)

f = fator de evaporação, devido perda de calor sensível por condução (tubulações), f = 0,85

R = recirculação (m³/h)

ΔT = diferença de temperatura entre a água quente e fria (range, gradiente térmico) (°C)

C_p = calor específico da água (kJ/kg °C) = 4,1868 kJ/kg °C

λ = calor latente de vaporização da água (kJ/kg) = 2300 kJ/kg

$$MU = CR \times E / (CR - 1) \quad \text{Equação (2)}$$

MU = reposição (make up) (m³/h)

CR = ciclo de concentração (concentration ratio)

$$BD = MU / CR \quad \text{Equação (3)}$$

$$BD = E / (CR - 1) \quad \text{Equação (4)}$$

BD = purga (blowdown) (m³/h)

$$BD = BD_c + D + L \quad \text{Equação (5)}$$

BD_c = purga através de válvula (blowdown controler) (m³/h)

D = arraste (drift) = 0,0001 x R D=0,01% em relação a Recirculação

L = vazamento (leakage)

$$MU = E + BD \quad \text{Equação (6)}$$

Para as condições de recirculação (R) e gradiente térmico (ΔT) constantes, na equação 1, a evaporação (E) será também constante. Neste caso, pela equação 6, a variação da água de reposição será igual a variação da purga. A Equação 7 representa esta situação.

$$\Delta MU = \Delta BD \quad \text{para } R = \text{cte e } (\Delta T) = \text{cte} \quad \text{Equação (7)}$$

RESULTADOS OBTIDOS

Observam-se na **Tabela 1** as vazões de recirculação em 3 grupos de refinarias classificadas conforme a carga de petróleo processada.

Tabela 1. Vazões de recirculações por refinaria em cada grupo.

	Grupo I ^a	Grupo II ^b	Grupo III ^c
Número de refinarias	3	4	2
P50 (m ³ /h)	47 052	30 398	8 117
Média Aritmética (m ³ /h)	46 819	30 130	8 104
Mínimo (m ³ /h)	43 257	25 435	6 769
Máximo (m ³ /h)	51 541	32 151	9 289

^aGrupo I: Carga de Petróleo Processada > 40 000 m³/d; ^bGrupo II: entre 20 000 – 40 000 m³/d ; ^cGrupo III: < 20 000 m³/d
P50: Percentil 50%

Nas **Tabelas 2 e 3** estão representados os gradientes térmicos (range) e os ciclos de concentrações encontradas nos 3 grupos de refinarias. Observe que o Grupo III apresenta menores ciclos de concentração, seguido pelo Grupo I. Portanto, têm potencial para elevação deste parâmetro para a redução da purga. O Grupo II apresenta maiores ciclos médio de concentração.

Tabela 2. Gradiente térmico (ΔT)

	Grupo I ^a	Grupo II ^b	Grupo III ^c
Número de refinarias	3	4	2
P50 (°C)	7,1	8,7	9,1
Média Aritmética (°C)	7,1	9,0	9,0
Mínimo (°C)	6,9	6,9	6,3
Máximo (°C)	7,2	12,4	10,3

^aGrupo I: Carga de Petróleo Processada > 40 000 m³/d; ^bGrupo II: entre 20 000 – 40 000 m³/d ; ^cGrupo III: < 20 000 m³/d
P50: Percentil 50%

Tabela 3. Ciclo de concentração (CR)

	Grupo I ^a	Grupo II ^b	Grupo III ^c
Número de refinarias	3	4	2
P50	2,0	3,0	4,0
Média Aritmética	2,5	5,1	5,8
Mínimo	2,5	5,2	5,7
Máximo	2,0	4,0	4,5

^aGrupo I: Carga de Petróleo Processada > 40 000 m³/d; ^bGrupo II: entre 20 000 – 40 000 m³/d ; ^cGrupo III: < 20 000 m³/d
P50: Percentil 50%

Nas **Tabelas 4, 5 e 6**, são apresentadas as características das água de reposição (make up) e de recirculação dos grupos I, II e III, respectivamente.

Tabela 4. Características da água de reposição (makeup) e purga (blowdown) - Grupo I

	Água de reposição			Purga		
	mínimo	máximo	média	mínimo	máximo	média
Turbidez (NTU)	2,7	6,9	4,3	16,6	48,4	29,4
pH @ 25°C	6,5	7,0	6,7	7,4	8,0	7,7
Condutividade (µS/cm)	221,2	306,8	267,0	821,8	104,3	69,7
Alcalinidade Total (mg/L CaCO ₃)	21,1	38,4	30,3	74,5	130,6	95,0
Dureza Total (mg/L CaCO ₃)	41,2	54,1	49,2	205,1	391,8	283,1
Cl ⁻ (mg/L)	37,2	55,7	48,9	171,9	328,9	235,8
Sílica (mg/L SiO ₂)	9,2	13,7	11,5	44,3	80,3	58,3
Fe Total (mg/L)	0,21	0,46	0,27	1,08	4,77	1,77

Tabela 5. Características da água de reposição (makeup) e purga (blowdown) – Grupo II

	Água de reposição			Purga		
	mínimo	máximo	média	mínimo	máximo	média
Turbidez (NTU)	1,0	19,4	2,4	12,7	80,3	27,0
pH @ 25°C	6,4	7,5	7,0	7,2	8,6	8,2
Condutividade (µS/cm)	121,0	176,5	146,3	606,9	1426,4	1008,1
Alcalinidade Total (mg/L CaCO ₃)	21,9	46,3	32,9	72,2	212,8	147,2
Dureza Total (mg/L CaCO ₃)	30,2	47,3	37,0	159,5	377,5	247,9
Cl ⁻ (mg/L)	18,6	34,1	24,0	109,6	251,1	179,2
Sílica (mg/L SiO ₂)	6,8	11,8	9,2	33,2	84,8	60,2
Fe Total (mg/L)	0,06	6,67	1,59	0,56	3,29	1,18

Tabela 6. Características da água de reposição (makeup) e purga (blowdown) - Grupo III

	Água de reposição			Purga		
	mínimo	máximo	média	mínimo	máximo	média
Turbidez (NTU)	1,1	7,0	3,3	16,0	89,0	27,8
pH @ 25°C	5,6	6,4	6,1	7,2	7,2	7,2
Condutividade (µS/cm)	694,8	1499,1	1072,9	1148,4	2134,6	1566,2
Alcalinidade Total (mg/L CaCO ₃)	18,5	31,2	25,0	43,0	116,2	116,2
Dureza Total (mg/L CaCO ₃)	38,4	64,5	50,4	115,3	193,5	151,2
Cl ⁻ (mg/L)	63,1	150,7	94,7	243,9	251,1	179,2
Sílica (mg/L SiO ₂)	9,5	12,6	11,1	33,2	33,2	33,2
Fe Total (mg/L)	0,0	3,0	2,6	0,16	12,46	8,96

Refinarias do Grupo I

Tomando-se as vazões de reposição e de purga (Tabelas 4, 5 e 6) e os ciclos de concentração (Tabela 3) dos grupos de refinaria, foram construídas curvas mostradas na **Figura 2**, para as refinarias do Grupo I. Observa-se que aumentando o ciclo de concentração de 5 para 6, a vazão de reposição reduziria 33 m³/h (792 m³/d) para cada refinaria do referido grupo. Como no Grupo I contém 3 refinarias, a redução do consumo de água de reposição totalizaria em 98 m³/h (2352 m³/d). Aplicando a **Equação 7**, a redução da purga totalizaria também em 98 m³/h.

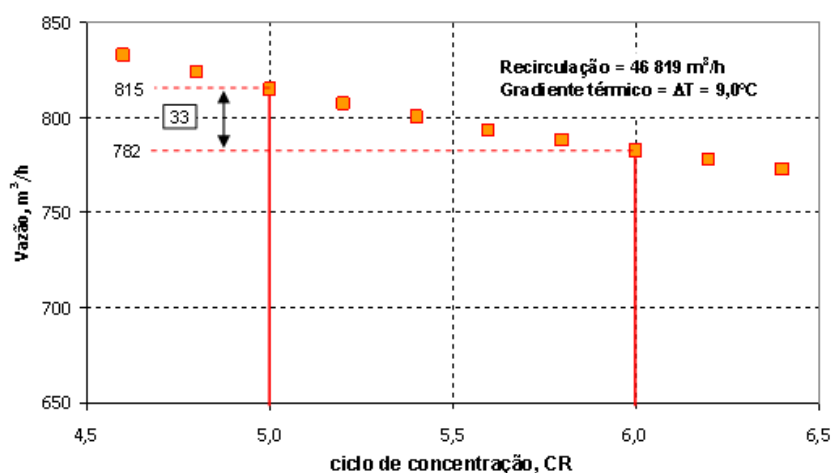


Figura 2 – Vazões de reposição típicas em função do ciclo de concentração das refinarias que compõem o Grupo I

Sob o ponto de vista da tendência dos efeitos de corrosão e de formação de depósitos no sistema de resfriamento, pode-se obter através do índice de saturação de Langelier da água de reposição isenta de tratamento, em que condições do ciclo de concentração e pH, o sistema pode operar. Estes aspectos relacionados com as refinarias do Grupo I, estão representados na **Figura 3**. Observa-se que se pode alcançar ciclo de concentração igual a 6 em condições de pH até 7,5 sem que haja tendência de deposição (incrustação). Nilson, você deve citar na legenda da Figura de Índice de Langelier, o que representa cada cor

Langelier Saturation Index

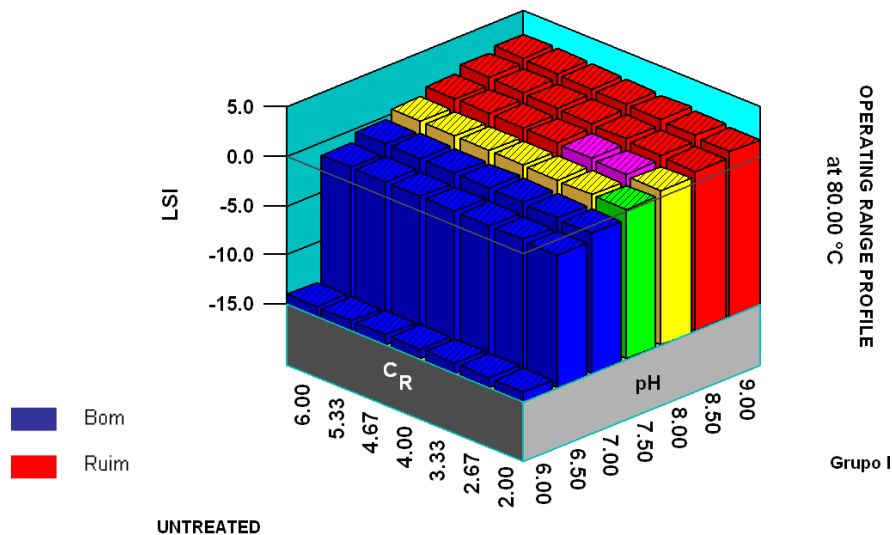


Figura 3 – Índice de Langelier das refinarias do Grupo I em função do ciclo de concentração e pH

Para o caso da refinaria “G” pertencente ao Grupo I, aumentando o ciclo de concentração de 3,4 para 6,0, reduzirá a vazão de reposição em 140 m³/h (912-772). Isto representa uma diminuição de 15% (140/912) na vazão de reposição. Nestas mesmas condições, a purga também será reduzida em 140 m³/h, conforme mostrado na **Figura 4**. As condições de tendência a incrustação somente ocorrerá em pH superior a 8, conforme apresentado na **Figura 5**.

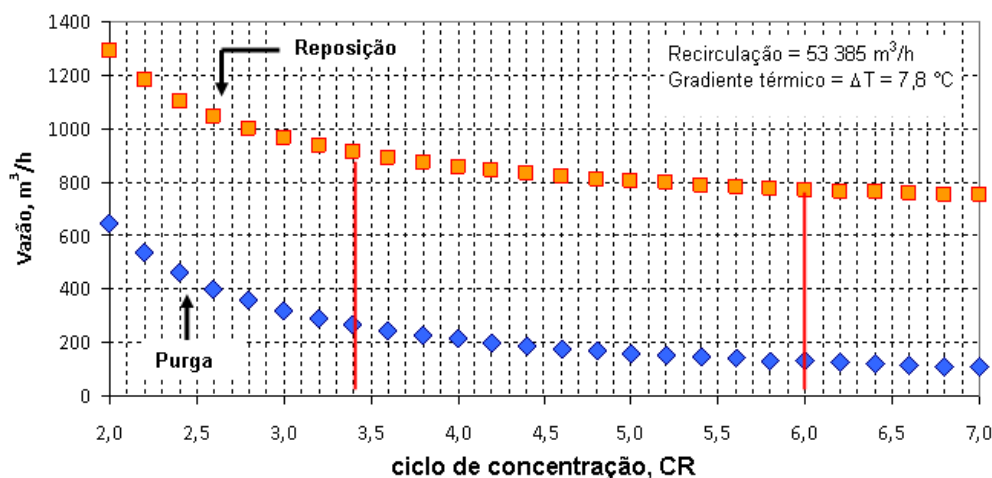


Figura 4. Vazões de reposição e purga em função do ciclo de concentração das refinarias G pertencentes ao Grupo I.

Langelier Saturation Index

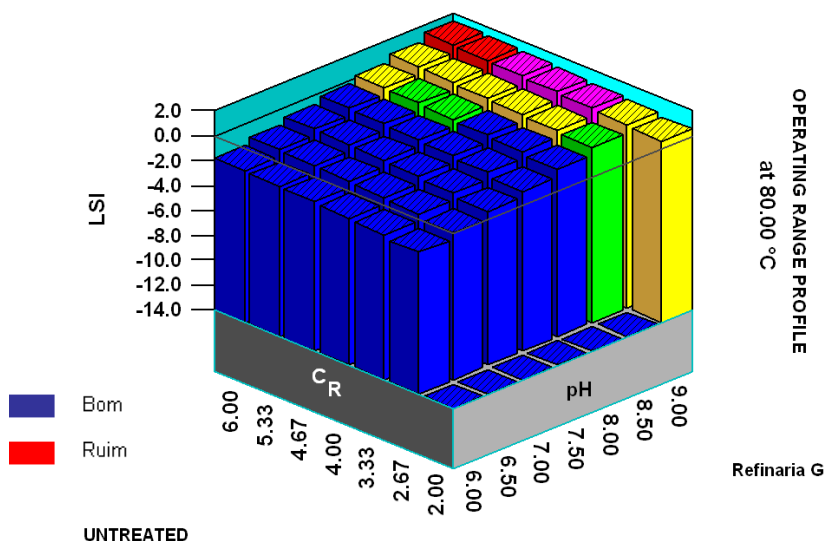


Figura 5 – Índice de Langelier das refinaria G do Grupo I em função do ciclo de concentração e pH

Refinarias do Grupo II e III

Seguindo a mesma metodologia aplicada para o caso do Grupo I, as refinarias do Grupo II (4 refinarias) apresentarão ciclos mais otimizados, com média de 5,7. Porém, o valor mínimo do referido grupo foi de 4,5 (refinaria D). Neste caso, ao passar do ciclo 4,5 para 6, reduzirá a vazão de reposição em 43 m³/h, representando também, uma redução da purga em 43 m³/h.

O Grupo III, apresentou menor ciclo de concentração (2,5), mesmo com a menor vazão de recirculação por refinaria entre os 3 grupos. Elevando-se o ciclo de 2,5 para 6, representaria uma redução do consumo de água de reposição de 84 m³/h (2016 m³/d), conquanto o pH seja mantido até o valor de 7,5 para evitar problemas de corrosão ou de incrustação. Para o caso da refinaria “B”, pertencente a este grupo, aumentar o ciclo de 3 para 5 representaria reduzir a reposição em 21 m³/h e a purga em 21 m³/h. Neste caso deverá ter um programa adequado de tratamento para poder atingir o ciclo 6, pois, a água de reposição tem uma tendência natural bastante incrustante.

Na **Tabela 7** estão representados os resultados referentes a economia de água das refinarias que apresentam maiores possibilidades ou potencias para redução de água de reposição e descarte da purga para rede de efluentes em função da elevação do ciclo de concentração. Com as ações de proposta de elevação do ciclo de concentração das refinarias citadas, haverá uma redução no consumo de água (reposição) de 259 m³/h (6216 m³/d). Isto significa também a redução da purga na mesma ordem de grandeza.

Tabela 7. Reduções de reposição (consumo de água) e purga (efluentes) nas refinarias				
Refinaria	B	D	G	I
Aumento do ciclo de concentração	3 para 5	4,6 para 6	3,4 para 6	4 para 6
Redução de água de reposição (m ³ /h)	21	43	140	55
Redução da purga (m ³ /h)	21	43	140	55

Corrosão e Deposição

A tendência natural de incrustação e corrosividade da água está apresentada na **Figura 6** através dos índices de saturação de Rysnar (RSI). Os RSI foram simulados em 3 níveis de ciclos de concentração sejam, 4, 5 e 6, nas temperaturas de 45 °C (retorno de condensado) e 80°C (temperatura de película). Os cálculos dos RSI foram realizados utilizando as **Equação 8** e **9** (FRAYNE, 1999; PISHNAMAZI, 2005, NACE, 2007).

Observa-se que a maioria das refinarias apresentam águas com tendência corrosiva (RSI>6), exceto as refinarias E e I que apresentam tendências à deposição (RSI<6).

$$pH_s = 12,3 - (\log_{10}Ca + \log_{10}TA + 0,025T - 0,011TDS^{1/2}) \dots\dots\dots \text{Equação 8}$$

Onde: Ca = Dureza Cálcio (ppm CaCO₃) TA = Alcalinidade Total (ppm CaCO₃)

T = Temperatura em °C TDS = Sólidos Totais Dissolvidos (ppm)

$$RSI = 2pH_s - pH$$

$$\dots\dots\dots \text{Equação 9}$$

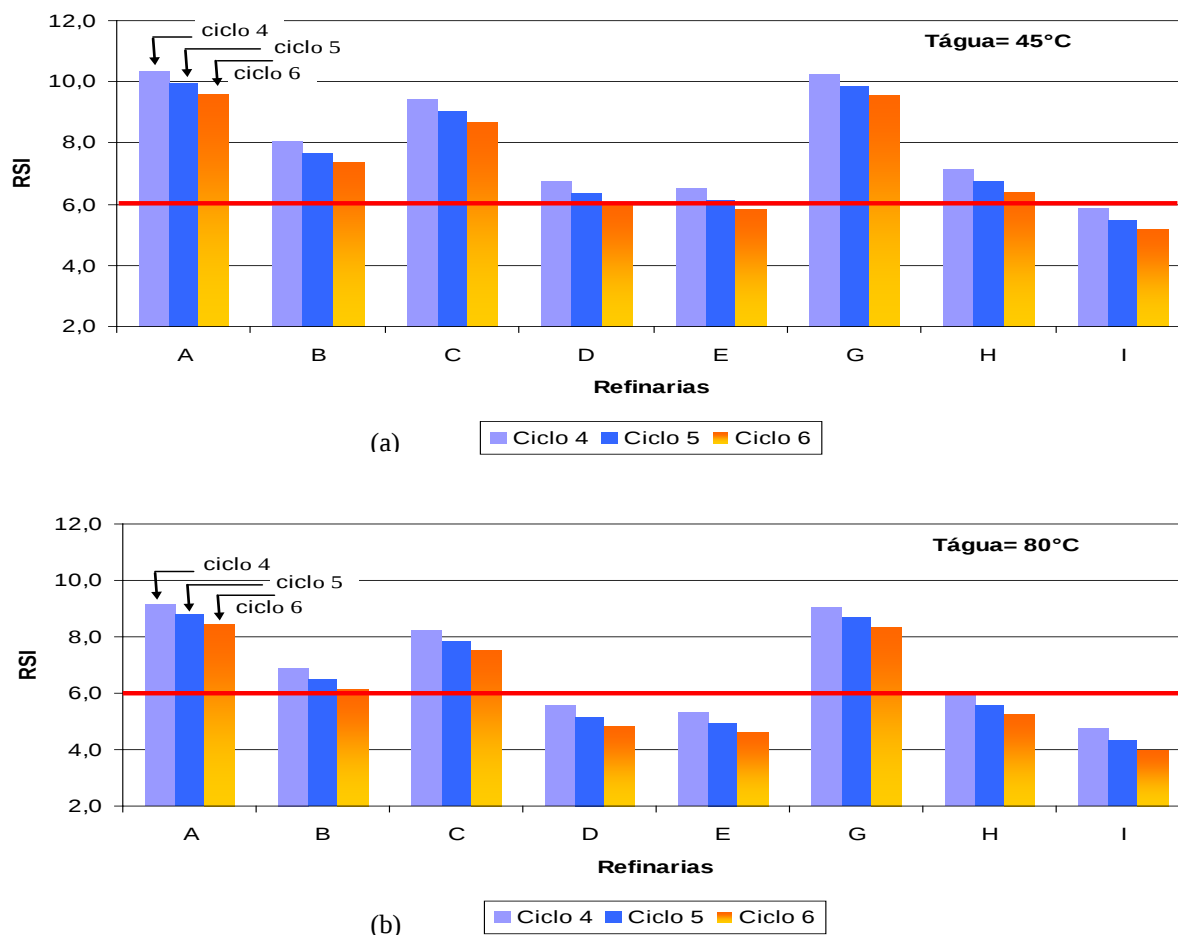


Figura 6 – Índice de Saturação de Rysnar: (a) temp. de 45°C , (b) temp. de 80°C

CONCLUSÕES

Através da avaliação das variáveis operacionais e qualidade da água de reposição e observando as condições de corrosividade e deposição (incrustação), em função do ciclo de concentração e do pH da água, pode-se otimizar o ciclo de concentração das torres de água de resfriamento das refinarias.

Elevando-se o ciclo de concentração, pode-se obter redução no consumo de água de reposição, sendo mais representativo quanto menor for ciclo de origem. Isto implica na redução do consumo de água bruta captada por carga de petróleo processado nas refinarias. Além do mais, a redução no consumo de água de reposição traduz na diminuição da purga das torres de resfriamento e por sua vez, reduz os efluentes gerados e os impactos ambientais promovidos por estes descartes.

Através da otimização dos ciclos das torres de algumas refinarias destacadas por apresentarem maior potencial para redução de consumo de água (B, D, G e I), pode-se obter uma economia de água de reposição (água filtrada) de 6 216 m³/d (259 m³/h), como também uma redução em mesmo valor da purga das torres de resfriamento (efluentes). Portanto, representando uma redução nos custos anuais na ordem de R\$ 1,7 MM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J.G.L.; MIERZWA, J.C.; BARROS, M.T.L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S., Introdução à engenharia ambiental, 2ª ed, Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2005.
2. FRAYNE, C. Cooling water treatment, principles and practice. Chemical publishing CO.,INC. New York. 1999.
3. HWANG, S; MOORE, I. Water network synthesis in refinery. Korean. J. Chem. Eng., 28 (10), 1975-1985, 2011.
4. LEONARD, A. A história das coisas. Zahar. 302p. 2011.
5. METCALF, L.; EDDY, H. P. Water reuse: Issues, technology and applications 1.ed., New York: McGraw-Hill, 1570 p. 2007.
6. NACE International publication 46107. Control of corrosion, deposition, and microbiological growth in recirculating water systems in buildings. September 2007.
7. NALCO COMPANY, The nalco water handbook, 3 ed, McGraw-Hill, 2009.
8. PISHNAMAZI, S.A. Water corrosion control in industry, Arkan publication, Esfahan, Iran. 2005.