

IV-070 - PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE REÚSO DE ÁGUA EM SISTEMAS RESFRIAMENTO

Ewerton Emmanuel da Silva Calixto⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Mestre em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (TPQB/UFRJ). Doutor em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (TPQB/UFRJ). Professor Adjunto do Centro Universitário SENAI CIMATEC.

Fernando Luiz Pellegrini Pessoa

Engenheiro Químico pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ).

Lídia Yokoyama

Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Mestre em Engenharia Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Doutora em Química pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

Sérgio Pagnin

Engenheiro Químico pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Mestre em Engenharia Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

Andréa Azevedo Veiga

Engenheira Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Doutora em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Endereço⁽¹⁾: Av. Orlando Gomes, 1845 - Piatã - Salvador - Ba - CEP: 41650-010 - Brasil - Tel: (71) 3978-5486 - e-mail: ewerton.calixto@fieb.org.br

RESUMO

As refinarias de petróleo utilizam grandes quantidades de água em diversas atividades. Boa parte desta água necessita passar por torres de resfriamento. O desempenho destas torres está relacionado com o desempenho das unidades de tratamento de efluentes, uma vez que, para evitar corrosão, incrustações e crescimento biológico, a água de *make-up* das torres deve apresentar teores baixos de salinidade, material orgânico, sólidos suspensos e microrganismos. Deste modo, tal desempenho pode ser avaliado mediante a simulação do comportamento dos processos de tratamento, tanto na fase de dimensionamento quanto na operação. Os padrões dos parâmetros ambientais a serem alcançados na saída destes processos podem ser obtidos com o menor consumo energético e com aquelas operações que representem o menor custo operacional total. Para tal, torna-se necessário o uso de uma metodologia conhecida como síntese de processos. Com o uso desta técnica é possível gerar cenários de fluxogramas de processo mais apropriados, seja via critério financeiro, energético, de eficiência, etc. Este estudo visa a implementação de um sistema computacional que contemple a simulação e a síntese dos processos de tratamento de efluentes para reúso, principalmente, em sistemas de resfriamento de refinarias de petróleo. Com uma modelagem baseada em eficiências dos equipamentos de tratamento, o *software* desenvolvido conta com um banco de dados de eficiência para cada equipamento, parâmetro e refinaria existente. O setor de petróleo, gás natural e biocombustíveis é plenamente beneficiado com a metodologia da simulação e síntese do processo e com a sua implementação numa ferramenta computacional como a que foi desenvolvida nesta pesquisa. Esta ferramenta contribui para a otimização das rotas de tratamento indicando o melhor processo/tecnologia a ser implementado na planta com, por exemplo, um menor custo global de CAPEX e/ou OPEX, minimização do consumo de água e menor consumo energético. Além disto, o auxílio na tomada de decisões, análise econômica, verificação de possíveis inconsistências nos resultados da planta obtidos por diversos outros meios computacionais, padronização na maneira como os cálculos de balanço de massa são realizados e a presença de um banco de dados são apenas alguns benefícios que esta ferramenta oferece para este setor. Os resultados obtidos mediante aplicação em exemplos reais de planta mostram a simplicidade de uso e ao mesmo tempo robustez do programa.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de Efluentes, Simulação de Equipamentos para Tratamento, Síntese de Equipamentos para Tratamento, Refinaria de Petróleo.

INTRODUÇÃO

Uma refinaria, além dos processos de produção dos derivados, necessita também de processos auxiliares que supram as necessidades do processo produtivo, fornecendo insumos (água, vapor, energia elétrica, hidrogênio etc.) e/ou reduzindo seus impactos ambientais. Dentre tais insumos, a água tem seu destaque, na medida em que os sistemas de resfriamento das refinarias são responsáveis por 60% a 70% (percentual considerável) do consumo de água de toda a indústria.

Entre os equipamentos presentes em sistemas de resfriamento, as torres de resfriamento possuem a maior relevância. Em geral, as torres de resfriamento funcionam em sistemas semiabertos, ou seja, sistemas abertos com recirculação de água. Tal funcionamento acarreta em perdas por evaporação, respingos, operação de drenagem (*blowdown*) para controle de concentração dos sólidos dissolvidos, entre outros. Estas perdas são compensadas com adição de água “tratada”, chamada de água de reposição, com menores teores de sais dissolvidos. Além disso, produtos químicos inibidores de corrosão e incrustação são adicionados ao sistema, e a água de reposição (*make-up*) deve apresentar teores baixos de salinidade, material orgânico, sólidos suspensos e microrganismos (TROVATI, 2004).

A visão antiga da água de *make-up* era a de reposição com água de rio clarificada refletindo em custo associado à outorga do uso da água e do tratamento. O panorama atual e sustentável é voltado para o reúso do efluente industrial tratado. Além disso, o funcionamento de um sistema de resfriamento é bastante complexo, envolvendo controle de aditivos químicos para evitar os problemas já mencionados e minimizar a influência das condições ambientais (temperatura, pressão de vapor, umidade) nos fenômenos das perdas por evaporação, demandando projetos com maior eficiência de troca térmica e menor perda de vapor d’água. Tais parâmetros podem ser ajustados mediante a otimização do sistema de resfriamento. Tal otimização é realizada sob o ponto de vista de redução total dos custos, a partir da avaliação das correntes de purga e *make-up*, do ciclo de concentração e da adição dos produtos químicos inibidores de corrosão e incrustação torna-se vantajosa, na medida em que reduz o custo total do processo, além do consumo de água, energia, etc. Além disso, outros parâmetros também influenciam na otimização, a taxa de evaporação, o ciclo de concentração.

As refinarias de petróleo utilizam grandes quantidades de água em diversas atividades, desde os processos de destilação primária até os tratamentos finais (MARIANO, 2001). Sendo assim, as unidades de processos, os sistemas de geração de vapor, e as torres de resfriamento são exemplos de consumidores de água, como mostra a Figura 1. Logo, uma das principais finalidades da água nas plantas de refino é o resfriamento dos processos geradores de calor residual, o qual deve ser reduzido ou removido (VANELLI, 2004).

Distribuição do consumo de água numa indústria de Petróleo.

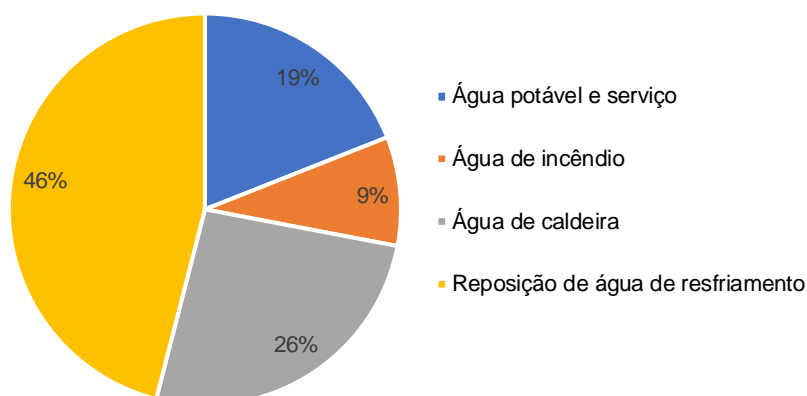


Figura 1: Distribuição do consumo de água em uma empresa de Petróleo. (AMORIM, 2005).

O objetivo dos processos de tratamento de águas residuais é a redução dos contaminantes a um nível compatível com a regulamentação de despejo, ou de cumprir os requisitos de qualidade de água para reutilização em processos industriais. Desse modo, tais processos são um dos componentes da rede de água de uma planta industrial, como se pode observar na Figura 2.

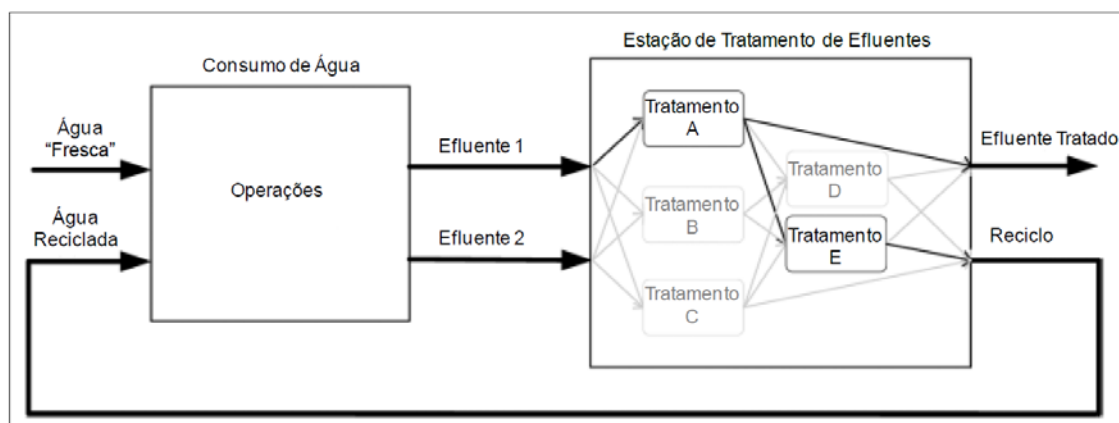


Figura 2: Esquema de projeto de otimização de estação de tratamento de efluentes (QUAGLIA et al., 2013).

Neste sentido, este trabalho apresenta um sistema especialista para o auxílio na seleção, composição e tratamento de água de reposição. A geração automática de fluxogramas com um menor custo total e a possibilidade de simular um processo já existente são alguns dos benefícios que o procedimento e a ferramenta aqui apresentados podem oferecer.

OBJETIVOS

Este trabalho consistiu no desenvolvimento de um sistema especialista para a avaliação e simulação das fontes de água para reposição em sistemas de resfriamento, com capacidade de simular correntes hídricas únicas ou misturas ou prever rotas de tratamento para o condicionamento.

Dentre os objetivos específicos mencionam-se:

- Desenvolver uma modelagem para o balanço de massa para uma estação de tratamento de efluentes;
- Desenvolver um procedimento heurístico para a geração (síntese) do melhor fluxograma com base no critério de maior eficiência;
- Desenvolver um pacote computacional para a automatização dos procedimentos supracitados.

MATERIAIS E MÉTODOS

SIMULAÇÃO DE REDES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

A análise de sistemas de tratamento de efluentes mediante simulações vem sendo realizada em diferentes cenários, tanto no contexto urbano quanto no industrial. Em ambos os contextos, a estratégia mais empregada é a sequencial modular (SCHÜTZE; BUTLER; BECK, 2002).

A Figura 1 mostra uma rede de tratamento de efluentes onde cada equipamento é representado por um módulo. As equações matemáticas encontram-se ordenadas tanto para o dimensionamento quando para a simulação. Este método tem como vantagem o fato das equações serem ordenadas apenas uma vez durante o processo de criação dos módulos. Para cada situação é preciso apenas ordenar os módulos segundo o fluxograma do processo.

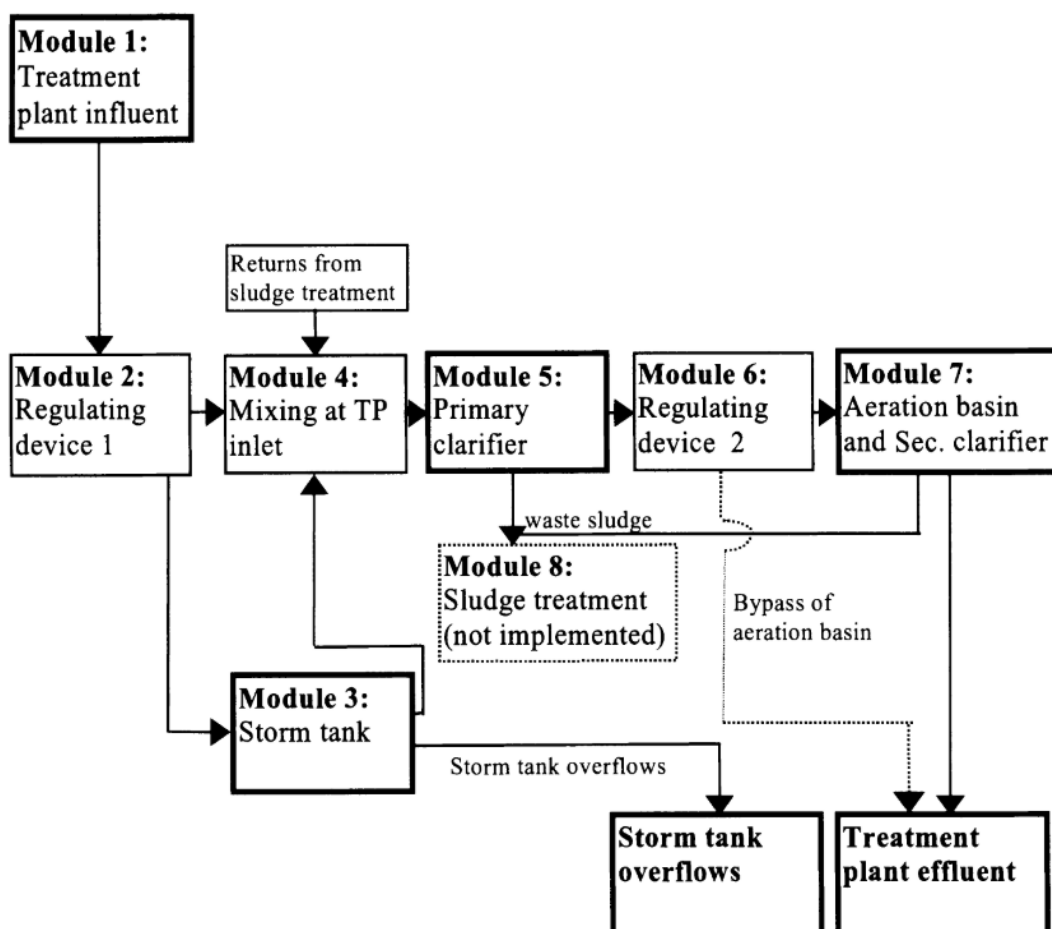


Figura 3: Estrutura sequencial modular de uma planta de tratamento de efluente.

Nos problemas de simulação, equações dos módulos são ordenadas para simulação. Com os valores das variáveis das correntes de entrada e das dimensões do equipamento, o módulo calcula os valores das variáveis das correntes de saída.

Neste trabalho, os módulos são compostos pelas equações de balanço de massa por parâmetro em estado estacionário com base nas eficiências conhecidas de cada parâmetro em cada equipamento.

PARÂMETROS AMBIENTAIS

Foram catalogados 84 parâmetros ambientais típicos de refinarias de petróleo, os quais se encontram listados na Tabela 1 com suas respectivas unidades.

Tabela 1: Parâmetros Ambientais para remoção.

ID	Parâmetro	ID	Parâmetro
1	pH (Calculado)	55	Fósforo Total (mg/L)
2	Turbidez (UNT)	56	Gálio (mg/L)
3	Alcalinidade F (mg/L)	57	Lítio (mg/L)
4	Dureza Total (mg/L)	58	Mercúrio (mg/L)
5	Dureza Cálcica (mg/L)	59	Molibdênio (mg/L)
6	Cloretos (mg/L)	60	Nióbio (mg/L)
7	Sulfeto (mg/L)	61	Paládio (mg/L)
8	DBO (mg/L)	62	Platina (mg/L)
9	DQO/Mn (mg/L)	63	Selênio (mg/L)
10	Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	64	Titânio (mg/L)
11	Sólidos em Suspensão Totais (mg/L)	65	Vanádio (mg/L)
12	Carbono Orgânico Total (COT) (mg/L)	66	Zircônio (mg/L)
13	Óleos e Graxas (mg/L)	67	Cianeto Total (mg/L)
14	Cloro Livre (mg/L)	68	Sólidos Dissolvidos Voláteis (mg/L)
15	Cloro Total (mg/L)	69	Alcalinidade M (mg/L)
16	Contagem Microbiológica - BAHT (UFC/mL)	70	Cloraminas (mg/L)
17	N-NH ₃ (mg/L)	71	Ferro Solúvel (mg/L)
18	Fosfato Total (mg/L PO ₄ ³⁻)	72	Dureza Magnésio (mg/L)
19	Ortofosfato (mg/L PO ₄ ³⁻)	73	Sílica Reativa (mg/L)
20	Silicato (mg/L)	74	Sílica Total (mg/L)
21	Alumínio (mg/L)	75	DQO Dissolvido (mg/L)
22	Ferro Total (mg/L)	76	Carbono Orgânico Dissolvido (COD) (mg/L)
23	Manganês (mg/L)	77	Cianeto Livre (mg/L)
24	Cálcio (mg/L)	78	Carbonato (mg/L)
25	Magnésio (mg/L)	79	Alcalinidade OH ⁻ (mg/L)
26	Bicarbonato (mg/L)	80	Zinco Total (mg/L)
27	Sulfato (mg/L)	81	Zinco Solúvel (mg/L)
28	Condutividade (µs/cm)	82	DQO/Cr (mg/L)
29	Salinidade (mg/L)	83	Cobre Solúvel (mg/L)
30	Benzeno (mg/L)	84	Nitrito (mg/L)
31	Tolueno (mg/L)		
32	Etilbenzeno (mg/L)		
33	Xilenos (mg/L)	-	-
34	Fenóis (mg/L)	-	-
35	Carbono Inorgânico (mg/L)	-	-
36	Boro (mg/L)	-	-
37	Bário (mg/L)	-	-
38	Cádmio (mg/L)	-	-
39	Chumbo (mg/L)	-	-
40	Cobre Total (mg/L)	-	-
41	Cromo (mg/L)	-	-
42	Estanho (mg/L)	-	-
43	Estrôncio (mg/L)	-	-
44	Níquel (mg/L)	-	-
45	Potássio (mg/L)	-	-
46	Prata (mg/L)	-	-
47	Sódio (mg/L)	-	-
48	Zinco (mg/L)	-	-
49	Silício (mg/L)	-	-
50	Nitrogênio Total (mg/L)	-	-
51	Nitrato (mg/L)	-	-
52	Astato (mg/L)	-	-
53	Bismuto (mg/L)	-	-
54	Cobalto (mg/L)	-	-

EQUIPAMENTOS PARA A SIMULAÇÃO DE REDES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Foram catalogados 66 equipamentos de tratamento de efluentes comumente presentes em refinarias de petróleo. A Tabela 2 mostra a relação destes equipamentos.

Tabela 2: Equipamentos para Tratamento.

ID	Equipamento	ID	Equipamento
1	Separador API	50	Lodo Ativado com Flotação (Aeração + Flotador)
2	Separador CPI	51	Lagoa de Estabilização
3	Coagulação-Floculação	52	Filtro Biológico Aeróbio
4	Pact	53	Filtro Biológico Anaeróbio
5	Biodisco	54	Valos de Oxidação
6	MBR (Lodo Ativado com Membrana)	55	Oxidação Química - Dióxido de Cloro
7	Lodo Ativado Convencional (Aeração + Decantador)	56	Oxidação Química - NaClO
8	Filtro Biológico	57	Oxidação Química Avançada - H ₂ O ₂ /UV
9	Nitrificador / Desnitrificador	58	Oxidação Química Avançada - H ₂ O ₂ /O ₃
10	Carvão Ativado	59	Oxidação Química Avançada - H ₂ O ₂ /O ₃ /UV
11	Reator UASB	60	Oxidação Química Avançada - UV
12	Oxidação Química - Cloro	61	Precipitação Química - Na ₂ (CO) ₃
13	Oxidação Química - O ₃	62	Precipitação Química - MgCl ₂
14	Oxidação Química Avançada - Fenton	63	Neutralização - NaOH
15	Oxidação Química Avançada - Fenton-Like	64	Neutralização - Ca(OH) ₂
16	Oxidação Química Avançada - Foto-Fenton	65	Neutralização - Na ₂ CO ₃
17	Oxidação Química - KMnO ₄	66	Torre
18	Oxidação Química - H ₂ O ₂	-	-
19	Oxidação Química Avançada - Fotocatálise (TiO ₂ /UV)	-	-
20	Stripping a Vapor - Uma Coluna	-	-
21	Stripping a Vapor - Duas Colunas	-	-
22	Troca Iônica	-	-
23	Osmose Inversa	-	-
24	Precipitação Química - Mg(OH) ₂	-	-
25	Eletrodialise Reversa	-	-
26	Ultrafiltração	-	-
27	Nanofiltração	-	-
28	Microfiltração	-	-
29	Flotação por Ar Dissolvido (FAD)	-	-
30	Flotação por Ar Induzido (FAI)	-	-
31	Precipitação Química - Ca(OH) ₂	-	-
32	Precipitação Química - NaOH	-	-
33	Precipitação Química - MgO	-	-
34	Precipitação Química - Sulfetos	-	-
35	Misturador Reciclo*	-	-
36	Divisor*	-	-
37	Lagoa Aerada	-	-
38	Lagoa Anaeróbia	-	-
39	Lagoa Facultativa	-	-
40	Filtro de Areia	-	-
41	Filtro de Carvão Ativado Granular	-	-
42	Filtro de Cartucho	-	-
43	Misturador Entrada*	-	-
44	Misturador Saída*	-	-
45	Bioreator de Membranas - MBBR	-	-
46	Divisor de Bypass*	-	-
47	Misturador de Bypass*	-	-
48	Misturador de Intermidiário do Processo*	-	-
49	Decantador Primário	-	-

BALANÇO DE MASSA EM ESTADO ESTACIONÁRIO

As equações do balanço de massa em estado estacionário para cada equipamento foram implementadas em módulos e levaram em conta as eficiências de remoção para cada parâmetro em cada equipamento do processo. Cada equipamento possui um conjunto de parâmetros que são comumente removidos nos mesmos. Tanto estes parâmetros quanto as eficiências de referência ou eficiências-padrão foram especificadas levando em conta as informações e valores obtidos na literatura. Ainda assim é possível cadastrar no software valores de eficiência para cada equipamento de uma dada refinaria. Estes valores serão salvos num banco de dados de eficiências.

CÁLCULO DO CUSTO E CONSUMO ENERGÉTICO

Os cálculos dos custos totais (CAPEX + OPEX) dos processos de tratamento foram realizados com base em informações obtidas na literatura. Foram calculados os custos em dólares por metro cúbico de água (US\$/m³) e dólares por ano (US\$/a).

Os cálculos dos consumos energéticos foram realizados em função da vazão de água em quilowatt-hora por ano (kWh/a).

SIMULAÇÃO EM TORRES DE RESFRIAMENTO

Numa torre de resfriamento operando em estado estacionário e sem acúmulo de matéria, tem-se o seguinte balanço global:

$$R + F = E + A + D + I \quad 1$$

Em que R indica a vazão de água de reposição (m³/h), F representa as outras fontes de alimentação (ex: condensadores de contato ou água de chuva), E representa a vazão de evaporação (m³/h), A é a vazão de perdas em virtude de arraste de gotículas (m³/h), D é a vazão de descargas (purgas) (m³/h) e I indica as perdas intermediárias pelas quais vazamentos, transbordamentos, infiltrações, drenos abertos, ou outros usos para a água de recirculação, por exemplo. Não havendo outras fontes de alimentação e outros tipos de perdas (F = 0 e I = 0), a expressão se reduz a:

$$R = E + A + D \quad 2$$

A concentração de sais minerais dissolvidos na torre durante a evaporação está relacionada com o ciclo de concentração (CC). Supondo a existência de apenas de evaporação de água pura, o ciclo de concentração será calculado pelas seguintes equações:

$$CC = \frac{E + A + D}{A + D} \quad 3$$

$$CC = \frac{R}{A + D} \quad 4$$

$$CC = \frac{E}{A + D} + 1 \quad 5$$

A Equação 5 mostra que quanto maior for a evaporação da água, maior será o ciclo de concentração. Por outro lado, o aumento das descargas resulta em uma diminuição no ciclo, uma vez que as purgas são utilizadas para ajustar o nível de concentração de sais na água de resfriamento dentro da necessidade operacional (limites aceitáveis).

A partir da quantidade evaporada e do ciclo de concentração do sistema pode-se obter a quantidade de água de reposição, através da Equação 6:

$$R = E \frac{CC}{CC - 1}$$

6

SÍNTESE DE REDES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Diferentes abordagens podem ser utilizadas para a realização da síntese de um sistema de tratamento de efluentes aquosos. As mais comuns são a programação matemática e o uso de regras heurísticas que apesar de não possuírem dedução matemática a partir de princípios físicos, possuem comprovação/validação pelo seu uso.

O método heurístico consiste em aplicar, em cada sistema, a regra heurística que se mostra mais apropriada para tal sistema, resultando em apenas um fluxograma. A solução obtida não é necessariamente a ótima, mas pode se aproximar bastante da ótima a depender da qualidade das regras utilizadas. Este método tem como grande vantagem a sua rapidez, não requerendo qualquer avaliação intermediária, apenas a da solução final. A desvantagem é que não produz, necessariamente, a solução ótima. Contudo, a solução obtida é um bom ponto de partida para a busca de uma solução melhor.

O presente trabalho visa o uso de regras heurísticas, usando como parâmetros as técnicas existentes para o tratamento de efluentes de refinarias de petróleo e os contaminantes presentes. Para isso, usará como base, as regras heurísticas gerais mais comumente empregadas em processos de separação de acordo com Seider et al. (2003), Perlingeiro (2005) e Delgado (2008), hierarquizando-as e aplicando-as em tratamentos de efluentes aquosos.

No sistema de tratamento de efluentes líquidos de refinarias, o produto que se deseja obter e recuperar é a água. Através dos tratamentos, busca-se adequá-la aos padrões requeridos de acordo com seu destino (seja padrões ambientais, quando destinada ao despejo, seja aos padrões para reúso quando destinada ao reúso internamente).

Sendo assim, as seguintes regras heurísticas foram escolhidas:

1. Se houver mais de uma fase presente no efluente, separá-las;
2. Se houver contaminantes que forem corrosivos, perigosos, reativos quimicamente ou instáveis termicamente, removê-los;
3. Remover em ordem os contaminantes presentes em maior quantidade; se houver componentes em quantidades equivalentes, efetuar primeiro a separação mais fácil (neste caso, considerar dificuldade proporcional ao custo)
4. Selecionar técnica de tratamento do contaminante definido anteriormente, dando preferência aos tratamentos que tenham o menor custo. Evitar separações que exijam a adição de outros componentes. No caso de seu uso, removê-lo assim que possível;
5. Verificar a concentração máxima de entrada nos tratamentos e a presença de contaminantes interferentes na técnica de tratamento selecionada. Se necessário realizar pré-tratamento para remoção do interferente.

O procedimento de síntese seguirá:

1ª Regra Heurística: quando houver mais de uma fase presente no efluente, as mesmas deverão ser separadas; efluentes de refinarias normalmente apresentam alto teor de óleos e graxas (O&G) que configuram uma “segunda” fase líquida no efluente.

2ª Regra Heurística: quando necessário, outra separação/remoção que deve ser realizada no início do sistema de tratamento é a de contaminantes que forem ou estiverem em concentração: corrosiva, perigosa, instável termicamente ou reativa quimicamente, pois dependendo da natureza e/ou concentração do composto, o mesmo pode causar danos às instalações ou comprometer a eficiência e segurança do processo do sistema de tratamento.

3ª Regra Heurística: remoção em ordem preferencial envolvendo contaminantes presentes em maior quantidade; em casos de quantidade equivalente, deve-se remover o contaminante cuja separação apresente menor custo operacional.

4ª Regra Heurística: uma vez determinado qual contaminante será removido em uma dada etapa, deve-se selecionar a técnica que será empregada para a remoção do mesmo. Seleciona-se a técnica de tratamento analisando qual dos tratamentos disponíveis apresenta o menor custo operacional; deve-se evitar os tratamentos que requeiram a adição de solventes, como por exemplo, para remoção de hidrocarbonetos, pois posteriormente será necessário a remoção de mais um contaminante presente no efluente.

5ª Regra Heurística: deve-se verificar se algum contaminante presente na corrente que será submetida a um determinado tratamento é ou está presente em concentração interferente ao tratamento proposto. Caso haja interferente, este deve ser removido em um pré-tratamento.

RESULTADOS

SOFTWARE PARA A SIMULAÇÃO E SÍNTESE DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

O software a ser apresentado nesta seção foi desenvolvido para a simulação e síntese de redes de tratamento de efluentes, incluído a torre de resfriamento. O desenvolvimento foi completamente elaborado em linguagem VBA dentro da ferramenta Microsoft Excel™. A interface principal do software é mostrada na Figura 4.

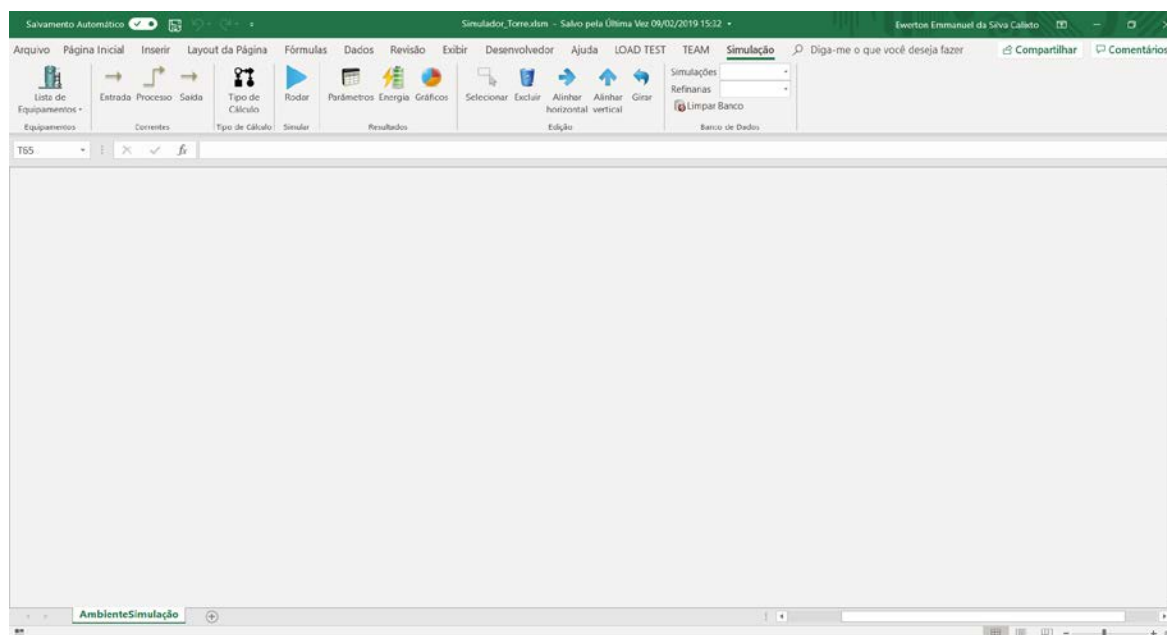


Figura 4: Interface Principal do Software.

O acesso ao programa é feito por uma nova aba criada no Microsoft Excel™ chamada “Simulação”. Esta é composta por uma série de botões com diferentes funcionalidades. A figura a seguir mostra esta barra em maior destaque.

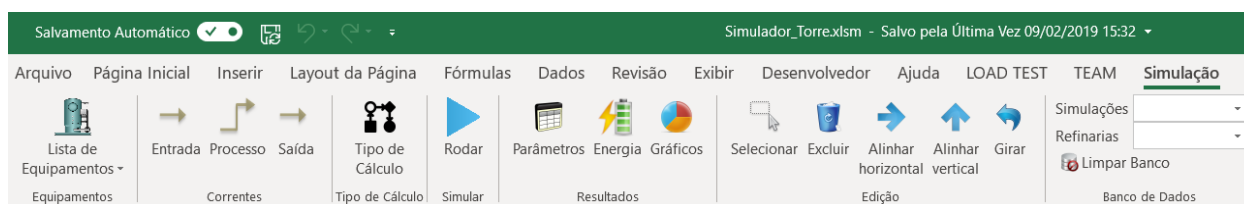


Figura 5: Barra de Ferramentas do Simulador.

São sete as principais funcionalidades presentes no software:

1. **Equipamentos:** para a inclusão dos equipamentos;
2. **Correntes:** para a inclusão de correntes no processo;
3. **Tipo de Cálculo:** para a escolha do tipo e cálculo;
4. **Simular:** para iniciar a realização dos cálculos;
5. **Resultados:** para a visualização dos resultados dos cálculos;
6. **Edição:** para o ajuste dos objetos presentes na janela de simulação/síntese;
7. **Banco de dados:** para a escolha do banco de dados de simulação, refinaria ou limpeza de do banco.

EQUIPAMENTOS: LISTA DE EQUIPAMENTOS

O usuário que deseja realizar uma simulação deve acessar esta opção para a escolha dos equipamentos que farão parte do fluxograma a ser elaborado. A lista com os equipamentos é a mesma apresentada na Tabela 2. A Figura 6 mostra uma lista parcial dos equipamentos a serem inseridos no ambiente de simulação.

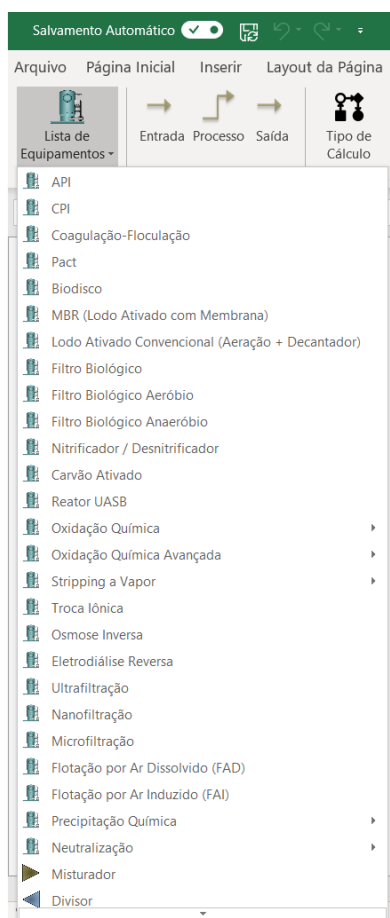


Figura 6: Lista de equipamentos para a simulação.

É importante lembrar que a inclusão de equipamentos apenas faz sentido se o tipo de cálculo escolhido for “Simulação”. Caso seja síntese a elaboração do fluxograma na janela é automática. A seguir será exibida a janela para a escolha do tipo de cálculo.

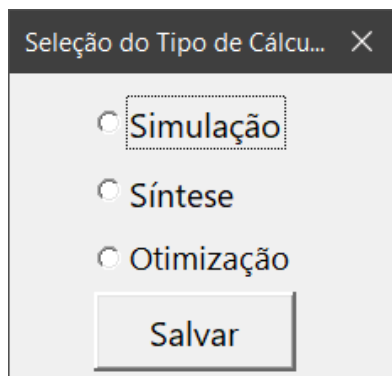


Figura 7: Escolha do Tipo de Cálculo.

Antes da realização de qualquer cálculo, o usuário deve escolher o tipo de cálculo a ser realizado. A opção de otimização não está habilitada para o escopo deste projeto.

BANCO DE DADOS

As simulações realizadas são cadastradas num banco de dados que é exibido numa lista da barra de ferramentas. É possível também escolher o banco de dados correspondente às eficiências de cada equipamento para cada refinaria de uma empresa de petróleo.

EXEMPLO 1

Neste estudo de caso, é adotada como base a caracterização clássica de efluentes de refinarias (POMBO; MAGRINI; SZKLO, 2013). A Tabela 3 apresenta os valores consolidados das concentrações dos contaminantes antes dos tratamentos do efluente, ou seja, na entrada da Estação de Tratamento de Efluentes Industriais (ETDI) e os valores estabelecidos pelas regulamentações para lançamento de tal efluente, como concentrações especificadas para reúso.

Tabela 3: Caracterização do efluente do estudo de caso na entrada da EDTI e os respectivos padrões de lançamento (POMBO; MAGRINI; SZKLO, 2013).

Parâmetros	Entrada EDTI	Padrão de Lançamento
pH	6,2 - 10,6	6 - 9
DBO (mg/L)	280	28
DQO(mg/L)	3340	13,86
Sulfetos (mg/L S)	38	1
Dureza como CaCO ₃ (mg/L)	510	NF
Óleo (mg/L)	200	20 mg/L
Fósforo (mg/L P)	97	10mg/L P
N amoniacal (mg/L N)	98,82	10 mg/L N
Cloretos (mg/L Cl)	1080	5mg/L
Sulfatos (mg/L SO ₄)	182	NF

NF: Valor não fixado

A seguir é mostrado o fluxograma gerado pelo software no modo de síntese.

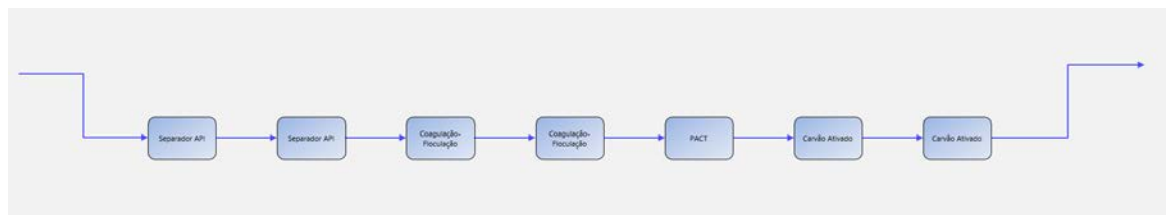


Figura 8: Fluxograma gerado pelo software. Modo de síntese.

Em termos de custo e energia tem-se os seguintes resultados:

Equipamentos	Energia (kW.h/a)	Custos (\$/a)	Custos (\$/m³)
API	96.985,00	0,02	89.250,00
API	96.985,00	0,02	89.250,00
Coagulação-Floculação	0,00	0,26	1.561,88
Coagulação-Floculação	0,00	0,26	1.561,88
Pact	3.350,45	0,11	654,50
Carvão Ativado	6.126,72	0,10	595,00
Carvão Ativado	6.126,72	0,10	595,00
Total	209.573,88	0,87	183.468,25

Figura 9: Resultados de custo e energia fornecidos pelo software.

Para atender ao padrão exibido na Tabela 3 o software gerou uma sequência de 2 APIs, seguido de 2 processos de coagulação-floculação, 1 PACT e 2 processos de carvão ativado. A Figura 10 **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** mostra os resultados dos efluentes calculados pelo balanço de massa.

Parâmetro	API	API	Coagulação-Floculação	Coagulação-Floculação	Pact	Carvão Ativado	Carvão Ativado
pH	6,70	6,70	6,70	6,70	6,70	6,70	6,70
Turbidez (UNT)	50,00	50,00	10,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Alcalinidade F (mg/L)	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00
Dureza Total (mg/L)	650,00	650,00	650,00	650,00	650,00	650,00	650,00
Dureza Cálcica (mg/L)	324,50	324,50	324,50	324,50	324,50	324,50	324,50
Cloretos (mg/L)	1.080,00	1.080,00	1.080,00	1.080,00	1.080,00	21,60	0,43
Sulfeto (mg/L)	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00
DBO (mg/L)	194,60	135,25	67,62	33,81	0,34	0,06	0,01
DQO/Mn (mg/L)	2.321,30	1.613,30	80,67	4,03	0,21	0,04	0,01
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
Sólidos em Suspensão Totais (mg/L)	117,15	64,43	32,22	16,11	1,29	0,32	0,08
Carbono Orgânico Total (COT) (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,23	0,05
Óleos e Graxas (mg/L)	58,20	16,94	8,47	4,23	0,21	0,03	0,00
Cloro Livre (mg/L)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	0,10	0,00
Cloro Total (mg/L)	148,50	148,50	148,50	148,50	148,50	148,50	148,50
Contagem Microbiológica - BAHT (UFC/mL)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
N-NH3 (mg/L)	98,20	98,20	73,65	55,24	3,87	1,55	0,62
Fosfato Total (mg/L PO4 ³⁻)	48,50	48,50	1,94	0,08	0,08	0,04	0,02
Ortofosfato (mg/L PO4 ³⁻)	48,50	48,50	1,94	0,08	0,08	0,04	0,02
Silicato (mg/L)	48,50	48,50	1,94	0,08	0,08	0,04	0,02
Alumínio (mg/L)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Ferro Total (mg/L)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Manganês (mg/L)	0,50	0,50	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Cálcio (mg/L)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0,13
Magnésio (mg/L)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Bicarbonato (mg/L)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Sulfato (mg/L)	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
Condutividade (µs/cm)	200,00	200,00	133,40	88,98	88,98	88,98	88,98
Salinidade (mg/L)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Benzeno (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Tolueno (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	0,01	0,00	0,00
Etilbenzeno (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	0,01	0,00	0,00
Xilenos (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fenóis (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Carbono Inorgânico (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	0,01	0,00	0,00
Boro (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Bário (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Cádmio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Chumbo (mg/L)	1,00	1,00	0,50	0,25	0,25	0,19	0,14
Cobre Total (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,25
Cromo (mg/L)	1,00	1,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Estanho (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,25
Estrôncio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Níquel (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Potássio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Prata (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Sódio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Zinco (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Silício (mg/L)	1,00	1,00	0,50	0,25	0,25	0,13	0,06
Nitrogênio Total(mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Nitrato (mg/L)	1,00	1,00	0,75	0,56	0,04	0,02	0,01
Astato (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Bismuto (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Cobalto (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fósforo Total (mg/L)	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00
Gálio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,25
Lítio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Mercurio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Molibdênio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Niôbio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Paládio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Platina (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Selênio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Titânio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vanádio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Zircônio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Cianeto Total (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Sólidos Dissolvidos Voláteis (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	0,04	0,04	0,04
Alcalinidade M (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Cloraminas (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Ferro Solúvel (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Dureza Magnésio (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Silica Reativa (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Silica Total (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
DQO Dissolvido (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Carbono Orgânico Dissolvido (COD) (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Cianeto Livre (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Carbonato (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Alcalinidade OH- (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Zinco Total (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Zinco Solúvel (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
DQO/Cr (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Cobre Solúvel (mg/L)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Temperatura (°C)	31,50	31,50	31,50	31,50	31,50	31,50	31,50
Vazão (m³/h)	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00

Figura 10. Resultados dos parâmetros calculados pelo software.

É importante destacar que não se dispõem de todos os valores para os custos e energia. Por este motivo é possível verificar o valor dos custos e/ou energia com o valor igual a zero para o equipamento Coagulação-Floculação.

EXEMPLO 2

Este exemplo mostra como um cálculo pode ser realizado para a torre de resfriamento no software desenvolvido. O efluente da torre é calculado com base no CC obtido.

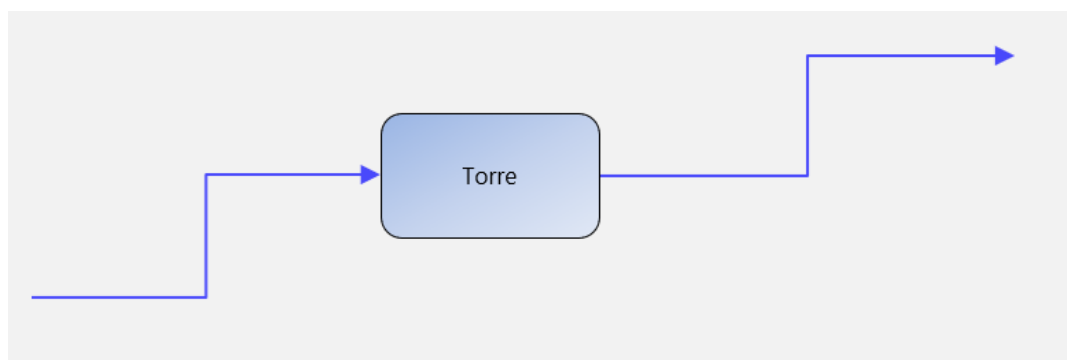


Figura 11: Fluxograma desenhado no software. Modo de simulação.

As informações necessárias para o cálculo dos principais parâmetros da torre são acessadas ao clicar no equipamento. A seguinte janela será aberta para a entrada da umidade relativa (%), temperatura de resfriamento (°C) e a temperatura do ar (°C).

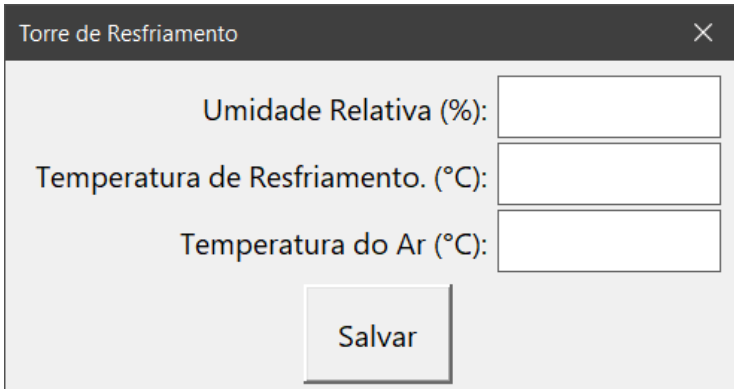


Figura 12: Dados de entrada da torre.

Após isto, ao clicar no botão rodar e acessar os resultados a seguinte tabela será exibida com os valores de arraste (m³/h), purga (m³/h), água de reposição (m³/h) e ciclo de concentração.

Arraste (m³/h)	Purga (m³/h)	Reposição (m³/h)	Evaporação (m³/h)	Ciclo de Concentração
692,10232	0	700	7,89768	1,011411145
685,10232	7			
678,10232	14			
671,10232	21			
664,10232	28			
657,10232	35			
650,10232	42			
643,10232	49			
636,10232	56			
629,10232	63			
622,10232	70			
615,10232	77			
608,10232	84			
601,10232	91			
594,10232	98			
587,10232	105			
580,10232	112			
573,10232	119			
566,10232	126			
559,10232	133			
552,10232	140			
545,10232	147			
538,10232	154			
531,10232	161			
524,10232	168			
517,10232	175			
510,10232	182			
503,10232	189			
496,10232	196			
489,10232	203			
482,10232	210			
475,10232	217			
468,10232	224			
461,10232	231			
454,10232	238			
447,10232	245			
440,10232	252			
433,10232	259			
426,10232	266			
419,10232	273			
412,10232	280			
405,10232	287			
398,10232	294			
391,10232	301			
384,10232	308			
377,10232	315			
370,10232	322			
363,10232	329			
356,10232	336			
349,10232	343			
342,10232	350			
335,10232	357			
328,10232	364			
321,10232	371			
314,10232	378			
307,10232	385			
300,10232	392			
293,10232	399			
286,10232	406			
279,10232	413			
272,10232	420			
265,10232	427			
258,10232	434			
251,10232	441			
244,10232	448			
237,10232	455			
230,10232	462			
223,10232	469			
216,10232	476			
209,10232	483			
202,10232	490			
195,10232	497			
188,10232	504			
181,10232	511			
174,10232	518			
167,10232	525			
160,10232	532			
153,10232	539			
146,10232	546			
139,10232	553			
132,10232	560			
125,10232	567			
118,10232	574			
111,10232	581			
104,10232	588			
97,10232	595			
90,10232	602			
83,10232	609			
76,10232	616			
69,10232	623			
62,10232	630			
55,10232	637			
48,10232	644			
41,10232	651			
34,10232	658			
27,10232	665			
20,10232	672			
13,10232	679			
6,10232	686			
-0,89768	693			
-7,89768	700			

Figura 13: Parâmetros da Torre de Resfriamento.

CONCLUSÕES

O objetivo principal deste projeto foi atingido, uma vez que se dispõe de uma ferramenta capaz de realizar tanto a simulação quanto a geração automática (síntese) de redes/fluxogramas de estações de tratamento de efluentes incluindo as torres de resfriamento. É importante destacar que a heurística inclusa neste pacote computacional atende aos requisitos da sequência lógica para os diferentes tipos de tratamento (primário, secundário e terciário), nesta ordem.

Diversos estudos ainda podem ser realizados no âmbito desta ferramenta, assim como diversas melhorias podem ser implementadas com os recursos e tempo necessários. A otimização do sistema de tratamento de efluentes, da torre de resfriamento e da distribuição de água são alguns exemplos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMORIM, R. DA S. **Abastecimento de Água de uma Refinaria de Petróleo: Caso REPLAN**. 193 f.—Niterói, Brazil: Dissertação (Mestrado em Sistema de Gestão), Universidade Federal Fluminense, 2005.
2. DELGADO, B. E. P. DA C. **Síntese de Sistemas de Regeneração e Tratamento Final de Efluentes**. 451 f.—Rio de Janeiro, Brasil: Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
3. MARIANO, J. B. **Impactos Ambientais do Refino de Petróleo**. 216 f.—Rio de Janeiro, Brazil: Dissertação (Programa de Pós-Graduação de Engenharia - COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.
4. PERLINGEIRO, C. A. G. **Engenharia de processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
5. POMBO, F. R.; MAGRINI, A.; SZKLO, A. An analysis of water management in Brazilian petroleum refineries using rationalization techniques. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 73, p. 172–179, abr. 2013.
6. QUAGLIA, A. et al. Design of a generic and flexible data structure for efficient formulation of large scale network problems. In: **Computer Aided Chemical Engineering**. [s.l.] Elsevier, 2013. v. 32p. 661–666.
7. SEIDER, W. D.; SEADER, J. D.; LEWIN, D. R. **Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation**. 2a. ed. [s.l.] Wiley International, 2003.
8. TROVATI, J. **Tratamento de água de resfriamento** Curso On-Line. Araraquara-SP: [s.n.]. Disponível em: <file:///C:/Users/Ewerton/OneDrive/@Entrada/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf>.
9. VANELLI, C. A. **Conservação De Água Em Refinaria De Petróleo: O Caso Da Revap**. 151 f.—Itajubá, Brazil: Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.