UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS
QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

PROSPECÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE ÁGUA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EM REFINARIAS

Dissertação de Mestrado

Glauce Vignero Nemitz

Rio de Janeiro
Abril de 2017

Glauce Vignero Nemitz

PROSPECÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE ÁGUAS EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EM REFINARIAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadores:
Lídia Yokoyama, D Sc
Andréa Azevedo Veiga, D Sc

Rio de Janeiro
Abril de 2017

PROSPECÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE ÁGUAS EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EM REFINARIAS

Glauce Vignero Nemitz

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Rio de Janeiro, 07 de abril de 2017.

_____

Profª Dra. Lídia Yokoyama - EQ/UFRJ (Orientadora)

_____

Dra. Andréa Azevedo Veiga–CENPES/ Petrobras (Orientadora)

_____

Dra. Priscilla Lopes Florido- CENPES/ Petrobras

_____

Dr. Luiz Alberto Cesar Teixeira- PUC-Rio

_____

Profª Dra Ofélia de Queiroz F. Araujo- EQ/UFRJ

“*Seja a mudança que você quer ver no mundo*”

(GANDHI, Mahatma)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos diretores Renato Cruz, Fernando Cruz e Fernando Coelho da empresa Baktron pela colaboração, apoio e incentivo para a conclusão deste Estudo.

Às amigas de trabalho Samira Veloso e Flávia Sodré pelo esforço, dedicação e solidariedade nas minhas ausências.

À minha família pela compreensão e incentivo.

Ao meu amigo e companheiro Thiago Pedreti pelo infraestrutura de estudo e pelo apoio emocional.

Ás minhas orientadoras, Lídia Yokoyama e Andrea Veiga pelos esclarecimentos e suporte que possibilitaram uma grande experiência de crescimento profissional e pessoal.

RESUMO

Os sistemas de resfriamento são um dos grandes consumidores de água em refinarias pois grande parte da água resfriada é perdida para o ambiente em forma de vapor. Além disso, devido às perdas por evaporação, sais presentes naturalmente na água aumentam suas concentrações promovendo purgas periódicas e uso contínuo de altas vazões de água de reposição (*make-up*). Face ao fenômeno de escassez hídrica, o objetivo deste trabalho é identificar tecnologias capazes de reduzir o consumo de água em sistemas de resfriamento evaporativo presente em refinarias. Adicionalmente, busca-se apresentar novos estudos, protótipos e simulações em desenvolvimento no cenário mundial que visam à otimização e minimização do consumo de água nesses sistemas. O trabalho envolveu o levantamento de tecnologias que possam ser implementadas externas as torres de resfriamento (Tratamento eletromagnético da água; Utilização de sistemas de filtração e Utilização de sistemas híbridos) e internas as torres de resfriamento (Automação da velocidade de ventiladores; Automação e ajuste do ciclo de concentração; Utilização de venezianas (*louvers*); Melhoria do design dos eliminadores de gotas; Resfriamento híbrido *Wet/dry*; Resfriamento *Dew/point*; Uso de trocador de calor com ventilador auxiliar; Condensação em estruturas porosas - uso de termossifões). Com o intuito de identificar a economia de água gerada em torres de resfriamento com a implementação de algumas das tecnologias abordadas, foi apresentado uma manipulação matemática, utilizando dados de torres de refinarias nacionais, visando propor oportunidades de melhoria e otimização do processo. Os projetos em estudo ou em escala piloto, apresentaram-se como elementos motivadores e inspiradores para os fabricantes de torres de resfriamento. No entanto, recomenda-se que os testes prossigam para simulações em ambientes reais, com proporções similares aos encontrados nas refinarias, que possam representar de maneira fidedigna as contribuições em economia de água nos sistemas de resfriamento atuais.

Palavras chave: Água; minimização do consumo; Torres de resfriamento; Tecnologias; Refinarias.

ABSTRAT

Cooling systems are one of the main consumers of water in refineries because much of the cooled water is lost to the air in the form of vapor. In addition, because to evaporative losses, naturally occurring salts in the water increase their concentrations by promoting periodic purges and continuous use of high make-up water flows. In view of the phenomenon of water scarcity, the objective of this work is to identify technologies capable of reducing the water consumption in evaporative cooling systems present in refineries. In addition, we intend to show new studies, prototypes and simulations under development in the world scenario that aim at the optimization and minimization of water consumption in these systems. The work involved surveying technologies that could be implemented outside of the towers (Electromagnetic Water Treatment, Use of Filtration Systems and Use of Hybrid Systems) and inside of the cooling tower (Fan Speed Automation; Automation and adjustment of the concentration cycle; Use of louvers; Improvement of the design of the drops eliminators; Hybrid cooling Wet / dry; Cooling Dew / point; Use of heat exchanger with auxiliary fan; Condensation in porous structures - use of thermosyphons). In order to identify the water savings generated in cooling towers with the implementation of some of the technologies discussed, a mathematical simulation was presented using data from towers of national refineries, aiming to propose opportunities for improvement and optimization of the process. The projects under study or on a pilot scale were presented as motivating and inspiring elements for the manufacturers of cooling towers. However, it is recommended that the tests continue for simulations in real environments, with ratios similar to those found at refineries, which can reliably represent contributions in water savings in current cooling systems.

Keywords: Water; Minimization of consumption; cooling towers; Technologies; Refineries.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS 11

LISTA DE TABELAS 13

1. INTRODUÇÃO 12

2. OBJETIVO 15

2.1. Objetivos gerais 15

2.2. Objetivos específicos 15

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16

3.1. Sistemas de resfriamento 16

3.2. Torres de Resfriamento 16

3.2.1. Classificação das torres de resfriamento 17

3.2.1.1. Classificação quanto a dissipação de calor da água 17

3.2.1.2 Classificação quanto ao transporte de ar 18

3.2.1.3. Classificação quanto ao fluxo de ar 21

3.2.2. Principais componentes de torres associados a eficiência do processo de resfriamento 23

3.2.2.1. Sistemas de distribuição de água 23

3.2.2.2. Enchimento 25

3.2.2.3. Ventiladores 28

3.2.2.4. Eliminadores de gotas 30

3.2.2.5. Venezianas (*Louvers*) 31

3.2.3. Variáveis associadas aos parâmetros de projeto e eficiência dos processos de resfriamento em torres 31

3.2.4. Perdas de água no processo de resfriamento 32

4. PROSPECÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE ÁGUA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EM REFINARIAS 33

4.1. TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO NO CONSUMO DE ÁGUA EXTERNAS AS TORRES DE RESFRIAMENTO 34
4.1.1. Tratamento eletromagnético da água 34
4.1.2. Utilização de sistemas de filtração 39
4.1.3. Utilização de sistemas híbridos 49
4.2. TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO NO CONSUMO DE ÁGUA INTERNAS AS TORRE DE RESFRIAMENTO 60
4.2.1. Automação da velocidade de ventiladores 60
4.2.2. Automação e otimização do ciclo de concentração 64
4.2.3. Utilização de venezianas (*louvers*) 69
4.2.4. Melhoria do *design* dos eliminadores de gotas 71
4.2.5. Resfriamento híbrido *wet/dry* 73
4.2.6. Resfriamento *dew/point* 77
4.2.7. Uso de trocador de calor com ventilador auxiliar 80
4.2.8. Condensação em estruturas porosas –uso de termossifão 84
5. VISÃO GERAL DAS TECNOLOGIAS UTILIZADAS NA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA DE REPOSIÇÃO (*MAKE-UP*) 91
6. APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO NO CONSUMO DE ÁGUA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EM REFINARIAS 94
6.1. ESTUDO DE CASO- REFINARIA A 95
6.2. ESTUDO DE CASO- REFINARIAS J e K 97
7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES 98
8. REFERÊNCIAS 103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Uso de água em refinarias.....13
Figura 2 - Composição de água de reposição (*make-up*) em refinarias.....14
Figura 3- Exemplo de Torres atmosféricas.....19
Figura 4- Exemplo de Torres hiperbólicas.....19
Figura 5- Torre de tiragem mecênica forçada.....20
Figura 6- Torre de tiragem mecênica induzida.....21
Figura 7- Torre de resfriamento contracorrente.....22
Figura 8 - Torre de resfriamento com fluxo cruzado.....22
Figura 9- Componentes que atuam na eficiência do processo de resfriamento.....23
Figura 10- Sistema de distribuição de água por gravidade.....24
Figura 11- Sistema de distribuição de água por pressão.....25
Figura 12- Enchimento de gotejamento.....26
Figura 13- Enchimento laminar.....27
Figura 14- Ventilador axial.....29
Figura 15- Ventilador centrifugo.....30
Figura 16 - Distribuição de perdas nas torres de resfriamento de refinarias.....32
Figura 17- Diagrama de representação da seção interna e externa às torres de resfriamento.....34
Figura 18 - Tratamento eletromagnético AquaBion da EcoBuild.....36
Figura 19- Tratamento eletromagnético HydroFlow da Ecotep.....37
Figura 20 - Filtração lateral em torres de resfriamento.....40
Figura 21 - Filtração Total em torres de resfriamento.....40
Figura 22 - Filtro bag para instalações em torres de resfriamento.....41
Figura 23- Filtro cesto para instalações em torres de resfriamento.....42
Figura 24 - Filtro cartucho para instalações em torres de resfriamento.....43
Figura 25- Filtro de leito para instalações em torres de resfriamento.....44
Figura 26- Filtro centrífugo para instalações em torres de resfriamento.....46
Figura 27 - Filtro automático para instalações em torres de resfriamento.....48
Figura 28 - Modelo de sistema de resfriamento seco (*dry-cooler*).....50
Figura 29 - Modelo de sistema de resfriamento híbrido.....51
Figura 30 - Incremento de água com implementação de sistemas híbridos.....54

Figura 31- Vista lateral da tecnologia de Termossifão (TSC) desenvolvida pela Jonhson Control. 55
Figura 32- Design básico do TSC 55
Figura 33 - Protótipo de TSC com várias unidades de condensação. 56
Figura 34 - Resfriamento híbrido *dry/wet dephelegmator* 57
Figura 35- Configuração do segundo estágio proposto pela tecnologia HDWD. 58
Figura 36- Esquemática de utilização de inversores de frequência em torres de resfriamento 62
Figura 37 - Variação do consumo de água em uma das torres da refinaria A, em função da temperatura média ambiente. 63
Figura 38 - Ciclo de concentração em sistemas de resfriamento. 66
Figura 39 - Relação entre o ciclo de concentração e a vazão de reposição. 67
Figura 40 - Redução do consumo de água com ajuste do ciclo de concentração para 5. 67
Figura 41 - Utilização de *Louvers* sem torres de resfriamento 70
Figura 42- Modelo de eliminador de gotas. 72
Figura 43 - Torres de resfriamento com tecnologia *wet/dry*. 74
Figura 44 - Tecnologia Eco-WD 75
Figura 45 - Protótipo do Eco-WD instalado na WRC, Georgia. 76
Figura 46- Conceito da tecnologia *dew/point* aplicada a torres de resfriamento. 78
Figura 47 - Modelo de torre de resfriamento de tiragem forçada com trocador de calor. 81
Figura 48- Imagens do protótipo da torre resfriamento desenvolvida e da recuperação do condensado. 82
Figura 49- Esquemática da torre de resfriamento de tiragem mecânica induzida com fluxo cruzado experimental. 84
Figura 50- Protótipo de torre de resfriamento com tiragem mecânica induzida e fluxo cruzado utilizados tubos de condensação com meios porosos. 85
Figura 51- Princípio de funcionamento de um termossifão 86
Figura 52- Análise da conformação de inserção dos tubos com meio poroso. 87
Figura 53- Esquemática de torre de resfriamento assistida pela tecnologia proposta. 87
Figura 54- Tecnologia de linhas de vapor. 88
Figura 55- Diagrama esquemático da bancada experimental. 88
Figura 56- Torre de resfriamento real e em escala reduzida. 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo estimado de água e geração de efluentes nos processos de refino (Fonte: European Commission, 2015) 13
Tabela 2 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água- tratamento com eletromagnetismo 38
Tabela 3 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água- utilização de filtros laterais. 48
Tabela 4 - Consumo de água em sistema de resfriamento nas refinarias. 51
Tabela 5 - Incremento de água de reposição (make-up) com redução de 1ºC no ΔT 52
Tabela 6 - Incremento de água de reposição (make-up) com normalização de ΔT=8 ˚ C. 53
Tabela 7 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água - Sistemas híbridos 59
Tabela 8- Avaliação de tecnologias para redução de consumo de água- por meio de inversor de frequência 64
Tabela 9 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água - Automação e otimização dos ciclos de concentração 68
Tabela 10 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água- utilização de Louvers 70
Tabela 11- Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água - Novos projetos de eliminadores de gotas. 73
Tabela 12 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água - Tecnologia wet/dry. 77
Tabela 13 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água - resfriamento dew/point 79
Tabela 14 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água- Uso de trocador de calor com ventilador auxiliar 83
Tabela 15 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água- Condensação em estruturas porosas- uso de termossifões. 90
Tabela 16- Definição dos níveis de desenvolvimento e/ou prontidão tecnológica (TRL)... 92
Tabela 17- Níveis de desenvolvimento e/ou prontidão tecnológica (TRL) para tecnologias capazes de reduzir o consumo de água em sistemas de resfriamento. 93
Tabela 18- Economia em água de reposição (make-up) na refinaria A com adoção de tecnologias viáveis. 97

Tabela 19- Economia em água de reposição (make-up) nas refinarias J e K com adoção de tecnologias viáveis. 98

1. INTRODUÇÃO

Por décadas o Brasil pouco sofreu com a disponibilidade de água, devido suas proporções continentais e por deter o maior volume hídrico do planeta (11% de toda água doce da superfície). Esta situação privilegiada, de certa forma, foi determinante para o comportamento ambiental de toda a sua população e mais precisamente a atuação das indústrias, quanto ao consumo desordenado e o desperdício alarmante de água. Nos últimos 15 anos, as indústrias, em geral, têm se deparado com um cenário de expansão no consumo de água, o que em longo prazo poderá comprometer sua atividade produtiva. Nas regiões áridas e semiáridas, a água tornou-se um fator limitante para o desenvolvimento urbano, industrial e agrícola. Porém, o fenômeno da escassez não é atributo exclusivo destas regiões; locais com recursos hídricos abundantes, mas insuficientes para atender a demandas excessivamente elevadas, também experimentam conflitos de usos e sofrem restrições de consumo que afetam o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida. No panorama industrial, tornou-se necessário adotar medidas mais efetivas para preservar os corpos d'água, dentre as quais se destacam investimentos em sistemas de tratamento de efluentes mais eficazes e a adoção de programas de reuso de água.

As refinarias de petróleo, em seus processos produtivos, consomem grande quantidade de água. Dispõem de um complexo sistema de captação, tratamento, armazenamento e transporte de água além de apresentarem grande diversidade de uso, abrangendo, utilização de água bruta, água industrial, água potável, água desmineralizada, entre outras. Face ao cenário de estresse hídrico dos rios que abastecem as refinarias brasileiras (vazões menores e contaminação da qualidade da água), além dos usos prioritários e da cobrança pelo direito de uso da água, podem ocorrer situações indesejáveis caso algumas medidas de uso e conservação da água não sejam adotadas. A redução do nível da atividade produtiva, a impossibilidade de expansão da planta industrial e a necessidade de realocação de unidades industriais em bacias com grande oferta hídrica são as principais consequências, caso não haja redução da captação e lançamento de despejos em corpos hídricos que servem os polos industriais (VANELLI, 2004). Os principais sistemas consumidores de água em refinarias são sistemas de resfriamento somados ao processo de geração de vapor (água desmineralizada) (MAGRINI *et al,* 2009). De forma ilustrativa, a Figura 1 apresenta valores típicos de consumos de água em refinarias.

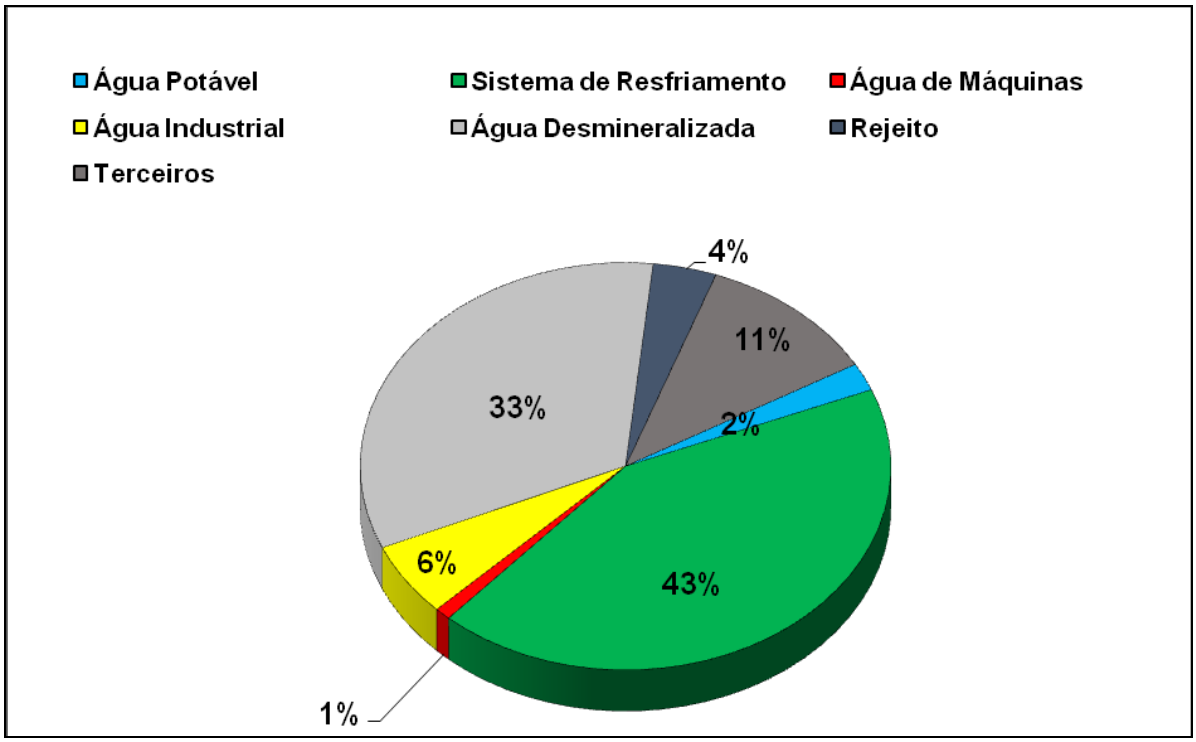

Figura 1 – Uso de água em refinarias

(Fonte: VEIGA, 2015)

Segundo a European Comission (2015), o consumo estimado de água e geração de efluentes de processos de refino pode ser distribuído segundo a *Tabela 1*.

Tabela 1 – Consumo estimado de água e geração de efluentes nos processos de refino

(Fonte: European Commission, 2015)

	Destilação	FCC	UCR	HDTs
Consumo de Água (Kg/t*)	20-60	-	50-60	50-190
Geração de Efluentes (L/t*)	8-75	60-90	140	30-55
Consumo de A.R.(m^3/t*)	3-5	5-20	6-10	2-3

*Consumo/geração por tonelada de carga do processo

Legenda: A.R.- Água de Resfriamento/ FCC- Unidade de Craqueamento Catalítico Fluido/ UCR- Unidade de Coqueamento Retardado/ HDTs- Unidade de Hidrotratamento de Diesel, Querosene, Nafta, Correntes Instáveis para Diesel, Nafta de Coque.

Sendo assim, em uma refinaria padrão a destilação de 180 mil barris de óleo/dia (aproximadamente 30.000 m^3/dia) utiliza cerca de 4500 m^3/h de água de resfriamento, consumindo entre 20 a 70 ton/h de água em seus processos e gerando entre 10 e 80 ton/h de efluentes (ABREU *et* al, 2016).

Os sistemas de resfriamento são grandes consumidores de água nas refinarias, pois grande parte da água resfriada é perdida para o ambiente em forma de vapor. Além disso, devido às perdas por evaporação que ocorrem nas torres, sais presentes naturalmente na água aumentam suas concentrações na água recirculante podendo atingir seus limites de solubilidade promovendo processos de deposição/incrustação que diminuem a eficiência da troca de calor. Desta forma, gastos com tratamento de água, purgas periódicas e uso contínuo de altas vazões de água de reposição (*make-up*) se fazem necessárias. Na maioria das unidades de refino brasileiras, a água utilizada para reposição dos sistemas de resfriamento é clarificada/filtrada, algumas exceções que utilizam água bruta como *make-up* (VEIGA, 2015). Na Figura 2 são dispostos dados gerais de composição de água de reposição em refinarias.

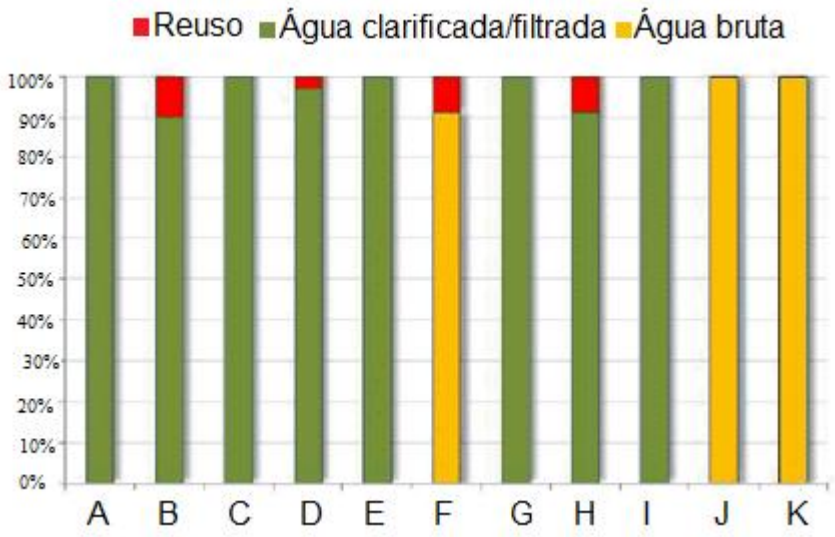

Figura 2 - Composição de água de reposição (*make-up*) em refinarias.

(Fonte: VEIGA, 2015)

Dado o exposto, grandes indústrias e refinarias, junto com centros de pesquisas e universidades, tem concentrado esforços e recursos com o objetivo de propor procedimentos e tecnologias que permitam o uso racional da água em suas refinarias e escritórios (FURTADO, 2013). Uma das grandes propostas de redução de consumo de

águas baseia-se no estudo e desenvolvimento de tecnologias capazes de recuperar, reutilizar e retornar internamente ou para a sociedade, parte da água perdida nos processos de resfriamento.

Neste contexto, a grande motivação para o desenvolvimento deste estudo foi buscar e apresentar alternativas tecnológicas estudadas ou ofertadas no mercado para otimizar e reduzir o consumo de água nas torres de resfriamento, principalmente àquelas adaptáveis em torres já em operação em refinarias. Esta abordagem considera projetos no interior e exterior das torres, além de elucidar inovações tecnológicas em estudos, protótipos e a evolução dos resultados de economia em consumo de água com implementações destas novas técnicas.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivos gerais

Identificar tecnologias capazes de reduzir o consumo de água em sistemas de resfriamento evaporativo presente em refinarias. Além disso, busca-se apresentar novos estudos, protótipos e simulações em desenvolvimento no cenário mundial que visam à otimização e minimização do consumo de água em sistemas de resfriamento.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar tecnologias que otimizem e minimizem o consumo de água no interior e exterior das torres;
- Avaliar a implementação das tecnologias identificadas, e os possíveis ganhos em redução no consumo de água de reposição (*make-up*);
- Avaliar, matematicamente, o ganho em redução no consumo de água em torres com a implementação de algumas tecnologias;
- Propor novas associações de tecnologias, buscando incrementos em redução de consumo de água e melhoria dos processos de resfriamento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico será abordado uma revisão bibliográfica sobre torres de resfriamento, abrangendo a classificação, fatores voltados a eficiência do processo de resfriamento e as perdas de água ocorridas.

3.1. Sistemas de resfriamento

Na grande maioria dos processos industriais há necessidade do resfriamento de fluidos, máquinas e equipamentos que geram ou recebem calor durante sua operação (MIERZWA *et al*, 2005). Um sistema de resfriamento é caracterizado por um conjunto de componentes capazes de promover a remoção de calor de um elemento (por exemplo: água, óleo) e transferi-lo para outro (por exemplo: o ar ambiente) (MANTELLI, 2016). A água é o fluido mais utilizado para fins de remoção de calor na indústria por apresentar elevada condutividade térmica, baixa viscosidade, entre outros fatores atrativos, sendo capaz de absorver grandes quantidades de calor por unidade de volume (GENTIL, 2007).

Se existe água disponível em quantidade suficiente e temperatura adequada, sem problemas econômicos ou ambientais, basta utilizá-la de maneira contínua retirando, por exemplo, de um rio. Se esta solução não for possível ou for inviável economicamente ou ecologicamente, o procedimento mais comum é empregar uma torre de resfriamento que permite através da evaporação de uma pequena quantidade de água, transmitir calor para o ar de forma que água possa ser empregada novamente para resfriamento, devendo-se repor ao circuito apenas a parte de água perdida por evaporação.

3.2. Torres de Resfriamento

As torres de resfriamento são dispositivos capazes de resfriar a água por meio de transferência de massa e calor com o ar ambiente. Para aumentar a área de contato entre ar e água, utiliza dispositivos como enchimentos e sistema de distribuição de água (chuveiros e *spray*) (MANTELLI, 2016). No Brasil temos quase uma dezena de fabricantes, que atendem pedidos que vão desde a torre de resfriamento para refinarias até os pequenos modelos para pronta entrega. O pioneiro das torres de resfriamento foi o engenheiro Hans Joachim Balcke, em 1894 onde fundou sua empresa, a Balcke&Co, e no mesmo ano construiu a primeira torre para resfriamento do tipo “chaminé”, com 12 metros de altura. Dez anos depois em 1904 o invento de Balcke já possuía aproximadamente

1.400 unidades funcionando ao redor do mundo (SAMPAIO, 2013). No Brasil pode-se destacar a construção da maior torre de resfriamento até então produzida com vazão de 33 mil m³/h, pela empresa Alpina em 1986 (SAMPAIO, 2013).

Os projetos de torres de resfriamento são adequados às necessidades e especificações das plantas industriais (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011). As torres podem ser classificadas quanto ao método de fabricação, finalidade, modo de transferência de calor utilizado e o método de circulação de ar (HENSLEY, 2009).

3.2.1. Classificação das torres de resfriamento

Nos próximos tópicos serão abordados as principais formas de classificação de torres de resfriamento: quanto ao sistema dissipação de calor da água, transporte e fluxo de ar.

3.2.1.1. Classificação quanto a dissipação de calor da água

As torres de resfriamento podem ser projetadas para operar com diferentes sistemas de dissipação de calor da água (LINDAHL *et al*, 2010). São eles:

- Resfriamento evaporativo (*wet cooling towers*);
- Resfriamento não evaporativo (*dry cooling towers*);
- Combinação entre evaporativo e não-evaporativo (*wet-dry cooling towers*).

As torres de resfriamento evaporativas ou úmidas trocam calor primariamente latente, ou seja, o calor é dissipado diretamente para o ambiente por meio de evaporação da água e de aquecimento do ar (DEZIANI *et al*, 2015). A porção de água não evaporada é condensada e reaproveitada no sistema novamente; desta forma, sistemas evaporativos também são utilizados com a finalidade de economizar água através de recirculação. Nas trocas úmidas há o contato direto entre fluidos (sistema aberto). Segundo Mantelli (2016), tipicamente, para cada 7 K de variação da temperatura ambiente, 1% da água é evaporada.

Ao contrário dos sistemas evaporativos, as torres de resfriamento não-evaporativas trocam calor predominantemente sensível (LEITE, 2011). Nos sistemas a seco, o calor é dissipado através de uma superfície fechada sem que haja contato entre o fluido refrigerante e o que será resfriado (sistema fechado) (SAMPAIO, 2013). Apesar do resfriamento não evaporativo apresentar significativa economia de água, pode custar até cinco vezes mais caro do que sistemas evaporativos com recirculação de água. Além

disso, o desempenho do resfriamento a seco é limitado por fatores climáticos como temperatura e umidade ambientes (BUSHART, 2014).

A combinação entre sistemas evaporativos e não-evaporativos é chamada de resfriamento híbrido. Trata-se de sistemas com ambos os elementos de resfriamento, os quais são utilizados individualmente ou em conjunto para alcançar melhor desempenho operacional. Desta forma, explora-se o resfriamento úmido no período mais quente e a capacidade do resfriamento seco de conservação da água durante o resto do ano (ASVAPOOSITKUL *et al,* 2014).

3.2.1.2 Classificação quanto ao transporte de ar

A classificação das torres de resfriamento considerando o transporte do ar é dada por: Torres de tiragem natural e Torres de tiragem mecânica (JAMBO, 2008). Nas Torres de tiragem natural, o movimento da corrente de ar pode ser causado por ventos (torres atmosféricas) ou simplesmente diferenças de densidade do ar (torres hiperbólicas) (LEITE, 2011). Por outro lado, as torres de tiragem mecânica utilizam ventiladores para promover o fluxo de ar (GENTIL, 2007).

As torres de tiragem natural podem ser divididas em duas classes: Torres atmosféricas ou ventilação natural e Torres hiperbólicas ou tiro natural (MIERZWA *et al*, 2005). As atmosféricas são torres de altura elevada e diâmetro reduzido que utilizam correntes de ar da atmosfera. Desta forma, o ar se move de forma horizontal e a água quente percola verticalmente (MOLINA, 2009). As hiperbólicas são torres de maior porte, chegando a mais de 200 metros de altura e 100 metros de diâmetro (SAMPAIO, 2013). Neste caso, O ar é induzido por uma grande chaminé situada sobre o recheio, sendo a diferença de densidades entre o ar úmido/quente, e o ar atmosférico, mais frio, o principal responsável pela circulação de ar através da torre (JAMBO, 2008). Em ambos os casos, as torres de tiragem natural são dependentes das condições climáticas, e devem ser construídas em locais com ventos fortes para maximizar a eficiência do processo de resfriamento. Além disso, devido ao grande porte, necessitam de um amplo espaço para instalação e apresentam altos custos iniciais. Por outro lado, mesmo com menor eficiência de resfriamento, apresentam baixo custo operacional quando comparado com outras torres, devendo ser utilizadas em projetos com grandes demandas de resfriamento

(LEITE, 2010). As Figura 3 e Figura 4 apresentam exemplos de torres atmosféricas e hiperbólicas.

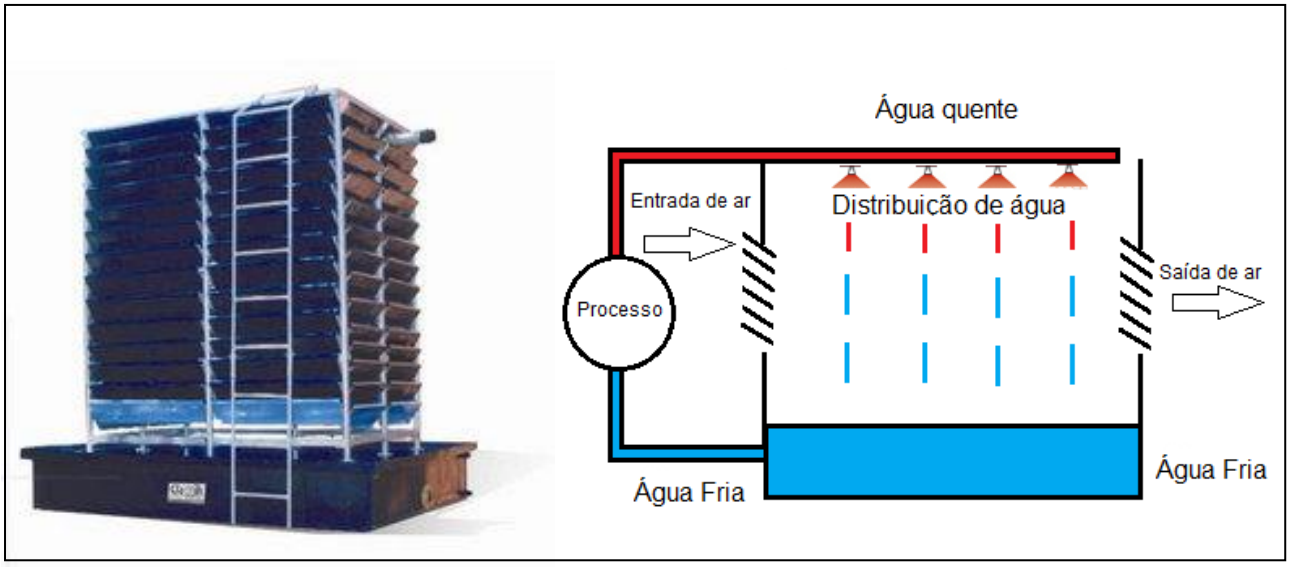

Figura 3- Exemplo de Torres atmosféricas

(Fonte: Adaptado de RAKSHAN COOLING TOWERS, 2016)

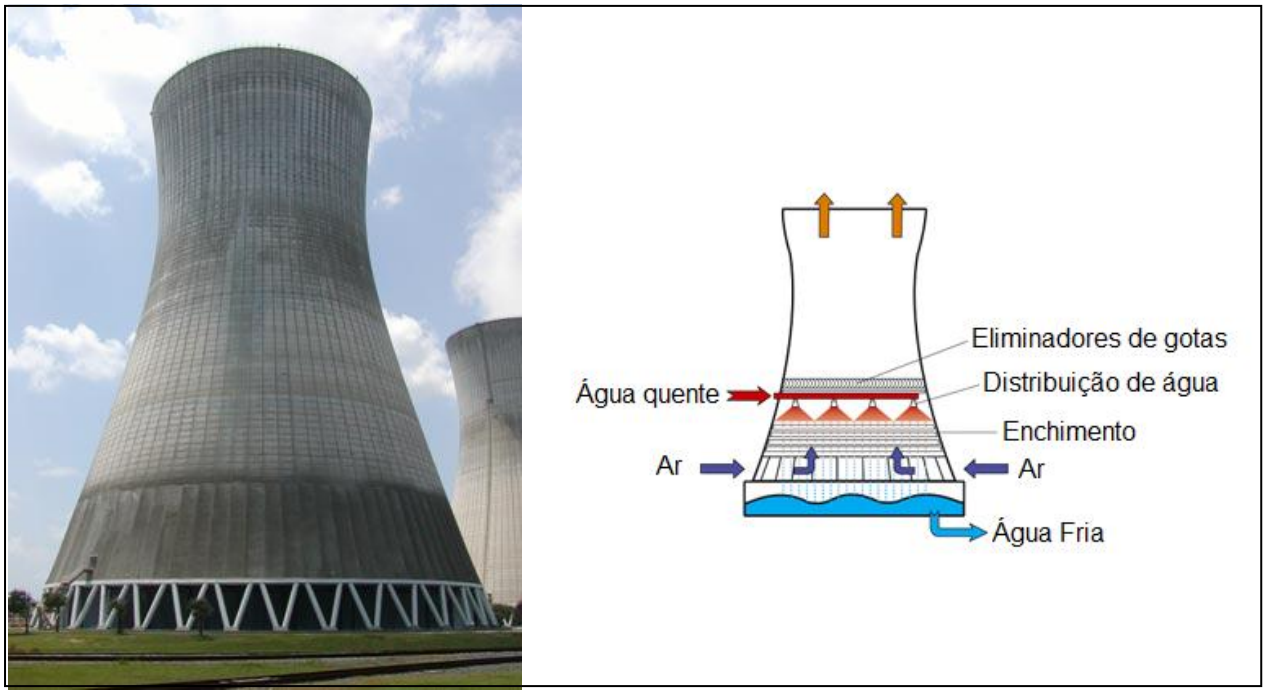

Figura 4- Exemplo de Torres hiperbólicas

(Fonte: Adaptado de PRIORI, 2013)

Em contrapartida, as torres de tiragem mecânica são mais eficientes e compactas, com pequena seção transversal e menor altura de bombeamento de água na parte superior da torre. Além disso, proporcionam controle maior sobre a corrente de ar estabelecida, e da temperatura de saída da água (VEIGA, 2010). No entanto, devido ao uso de ventiladores, apresentam maiores custos energéticos, de manutenção e operação. Adicionalmente, devido as vibrações e ruídos provocados pelo uso de resfriamento mecânico, apresentam restrições quanto a localidade de implementação do projeto (SAMPAIO, 2013). As torres de tiragem mecânica podem ser classificadas em forçada ou induzida; se o ventilador está localizado na entrada do ar, a tiragem é dita forçada, porém, se o ventilador encontra-se na zona de descarga do ar a tiragem é chamada de induzida. Na Figura 5 e Figura 6 apresentam exemplos de torres de tiragem mecânica forçada e induzida.

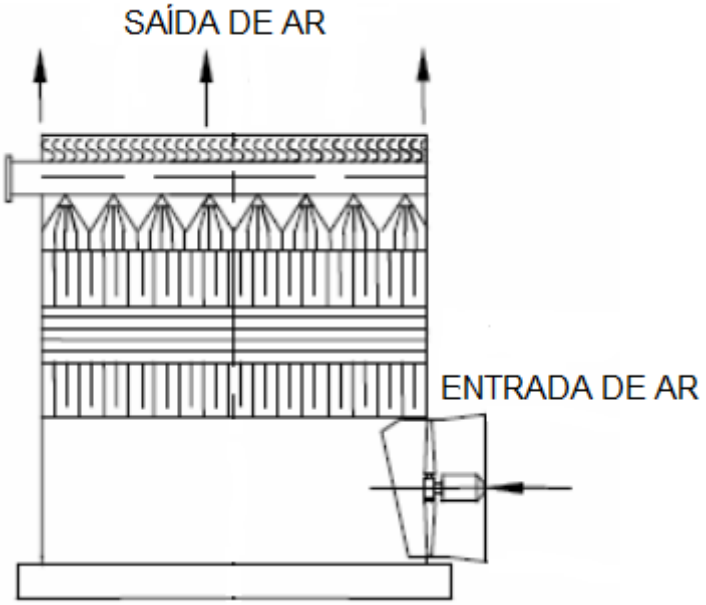

Figura 5- Torre de tiragem mecênica forçada

(Fonte: Adaptado de PIRANI *et al*, 2004)

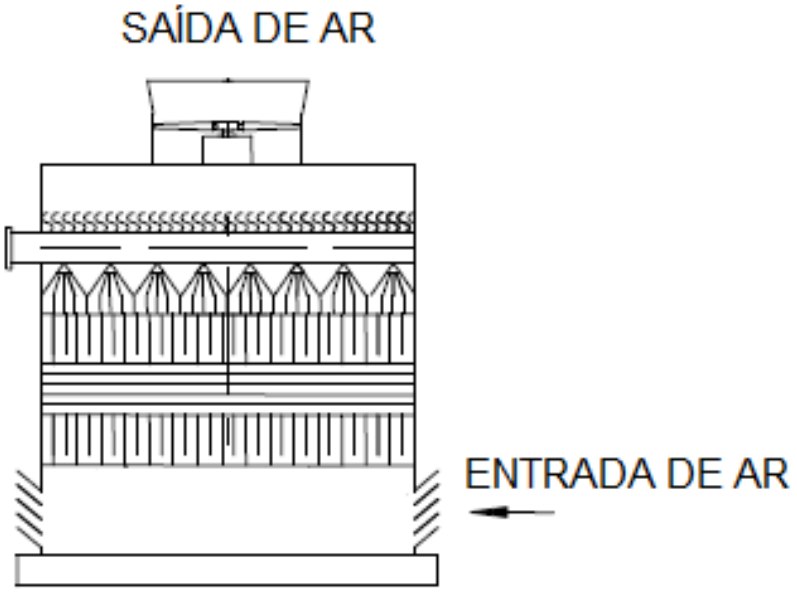

Figura 6- Torre de tiragem mecênica induzida

(Fonte: Adaptado de PIRANI *et al*, 2004)

3.2.1.3. Classificação quanto ao fluxo de ar

Outra forma de classificação das torres de resfriamento é quanto ao fluxo relativo entre as correntes de ar e água. Desta forma, divide-se em dois métodos: Torres de fluxo em contracorrente e Torres de fluxo cruzado (SAMPAIO, 2013).

As torres de resfriamento contracorrente são sistemas em que o ar flui em sentido oposto ao fluxo de água. Com isso, o ar que entra pela parte inferior da torre é impulsionado pelo sistema de ventilação e segue verticalmente para cima, enquanto a água é pulverizada no topo da torre, e recolhida na bacia, em uma região próxima à entrada de ar (FERRAZ, 2008). Estas torres apresentam uma maior eficiência na transferência de calor, porém possuem dificuldades atribuídas aos aspersores, em relação ao controle da vazão da água a ser resfriada, apresentando também altos ruídos (POZZOBON, 2015). A Figura 7 exemplifica uma torre de resfriamento contracorrente.

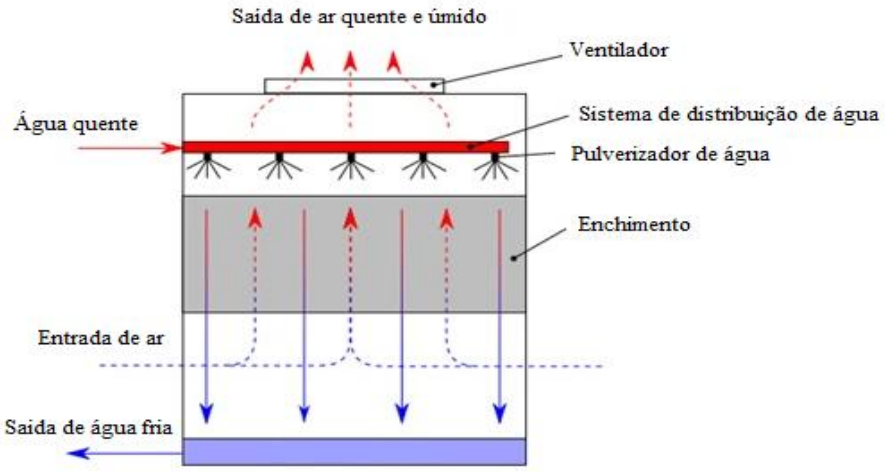

Figura 7- Torre de resfriamento contracorrente.

(Fonte: Adaptado de MEISSNER, 2015)

As torres de fluxo cruzado são projetadas para que o ar entre pelas laterais fazendo com que o mesmo flua perpendicularmente ao fluxo da água, a qual é distribuída por “chuveiros” ou bocais na parte superior, descendo sob ação da gravidade (MANTELLI, 2016). Devido a sua configuração são mais propensas ao acúmulo de particulados e detritos no seu enchimento (HENSLEY, 2009). A Figura 8 exemplifica uma torre de resfriamento com fluxo cruzado.

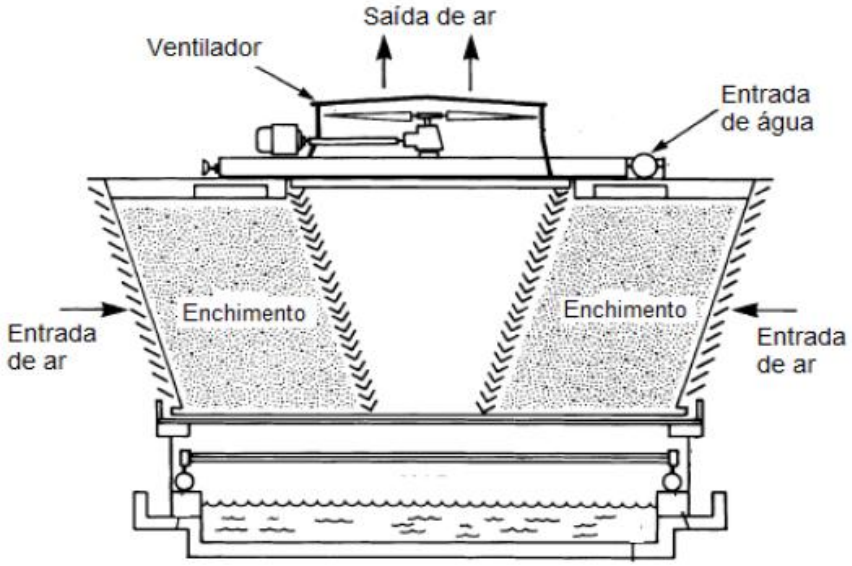

Figura 8 - Torre de resfriamento com fluxo cruzado.

(Fonte: Adaptado de ASHRAE, 2000)

Em geral, as refinarias da brasileiras operam com torres de resfriamento em sistema evaporativo contracorrente. Porém, em alguns poucos casos, utilizam sistemas evaporativos com fluxo cruzado.

3.2.2. Principais componentes de torres associados a eficiência do processo de resfriamento

Durante o processo de resfriamento, cada componente da torre desempenha papel fundamental nas trocas térmicas. Dentre os principais elementos que compõe as torres, associados à eficiência do processo de resfriamento destacam-se: sistema de distribuição de água, enchimento, ventiladores, eliminadores de gotas e venezianas (*louvers*). A Figura 9 exemplifica os elementos que serão abordados neste tópico.

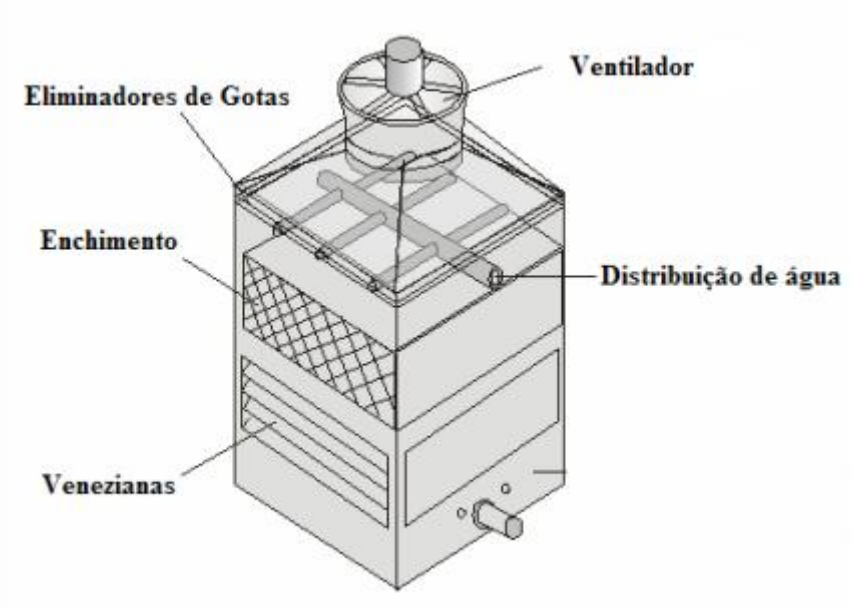

Figura 9- Componentes que atuam na eficiência do processo de resfriamento.

(Fonte: Adaptado de PIRANI *et al*, 2004)

3.2.2.1. Sistemas de distribuição de água

Os sistemas de distribuição de água são peças fundamentais no processo de resfriamento, pois atuam na melhoria das trocas térmicas (VITKOVIC *et al*, 2009). Em geral, podem ser de dois tipos: distribuição por gravidade ou por pressão.

A distribuição de água por gravidade é geralmente utilizada em torres de fluxo cruzado para que a água escoe devagar e, desta forma, tenha mais tempo de contato com a corrente de ar perpendicular a queda d'água (SAMPAIO, 2013). Seu funcionamento consiste em uma bandeja com orifícios por onde a água percola pela atuação da gravidade (ZHAO, *et al*, 2016). Sua principal vantagem consiste na pequena altura de bombeamento de água requerida, a qual conduz a baixos custos de operacionais. Além disso, a regulagem da vazão de água por célula é feita mediante a simples inspeção visual, apesar de ser pouco precisa, torna-se de simples manutenção podendo ser realizada com a torre em operação. Raramente se utiliza este sistema para torres de fluxo contracorrente, devido às dificuldades de projeto e ajuste da distribuição de água, pois ocorre interferência com o fluxo de ar (SAMPAIO, 2013). A Figura 10 exemplifica um sistema de distribuição de água por gravidade.

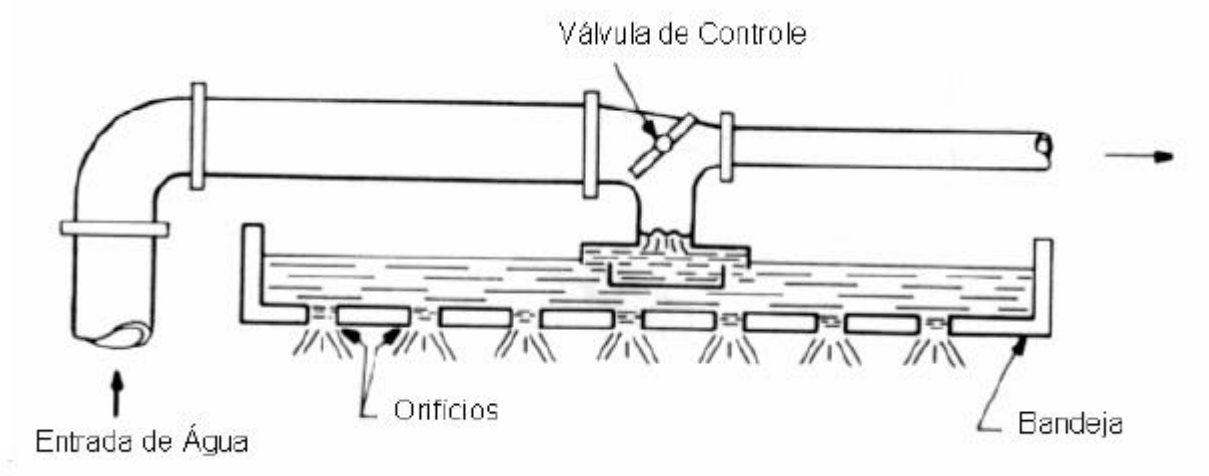

Figura 10- Sistema de distribuição de água por gravidade.

(Fonte: *Disponível em http://sistemas.eel.usp.br*)

A distribuição de água por pressão é geralmente utilizada em torres de fluxo contracorrente e seu funcionamento consiste em pulverização da água através de bicos injetores. Este sistema atua, não só, como distribuidor de água como também contribui diretamente com o rendimento da torre, pois um aumento de pressão acarreta em maiores fluxos de água (LYU *et al*, 2017). Os problemas associados a esse tipo de sistema são principalmente de manutenção e regulagem do fluxo de água. A sujeira acumulada nos ramais e nos pulverizadores é de difícil limpeza. Além disso, encontram-

se posicionados abaixo dos eliminadores de gotas (SAMPAIO, 2013). Existe ainda o problema de se igualar a vazão nas diferentes células, que é um requisito imprescindível para garantir a eficiência do processo de resfriamento da torre. A Figura 11 exemplifica um sistema de distribuição de água por pressão.

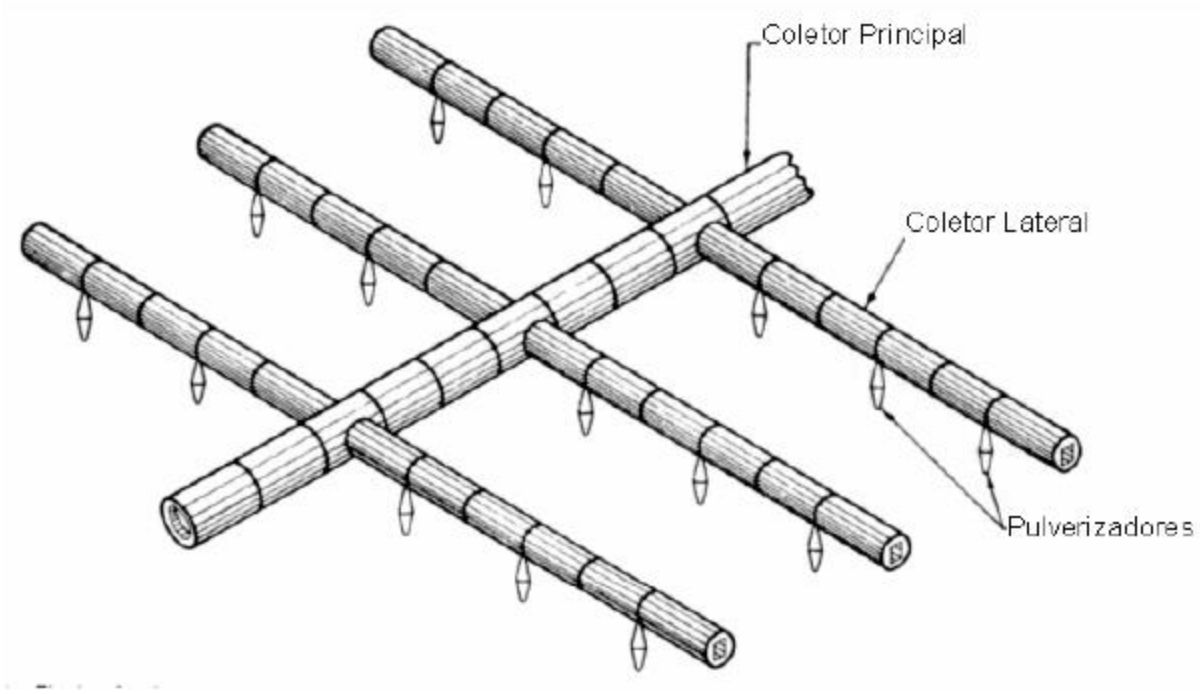

Figura 11- Sistema de distribuição de água por pressão.

(Fonte: *Disponível em http://sistemas.eel.usp.br*)

3.2.2.2. Enchimento

O enchimento é o material que constitui a superfície trocadora de calor da torre, sobre a qual a água é distribuída (TÜRETGEN, 2015). São essenciais no processo de resfriamento e tem como objetivo promover a aceleração da troca de calor entre a água e o ar, aumentando a superfície de contato entre eles e mantendo uma distribuição de água uniforme (SAMPAIO, 2013). Os enchimentos, por compor grande parte da torre de resfriamento, devem ser construídos com material de baixo custo, bom transmissor de calor, resistente ao tempo de vida útil da torre, fácil instalação, e que promova pouca resistência ao escoamento do ar.

Há basicamente dois tipos de enchimentos: gotejamento ou respingo (*splashfill*) e de película ou laminar (*filmfill*). O Enchimento de gotejamento consiste em gerar pequenas gotas de água para aumentar a superfície de contato com o fluxo de ar, facilitando o processo de troca térmica. Apesar de existirem diversas conformações, em geral, este enchimento é composto por uma série de barras em diferentes posições e camadas, que garantem o efeito de quebra da água em gotas cada vez menores (LUCAS *et al*, 2013). Um dos requerimentos mais importantes desse tipo de enchimento é o correto nivelamento das barras, pois quando dispostas de maneira incorreta, desequilibra a distribuição da cortina de água e prejudica o rendimento das trocas térmicas. É importante ressaltar que a altura do enchimento é superior a requerida pelos sistemas laminares e o arraste de gotas são importantes, necessitando da utilização de eliminadores de gota de alto rendimento. A Figura 12 exemplifica a esquemática de um enchimento de gotejamento.

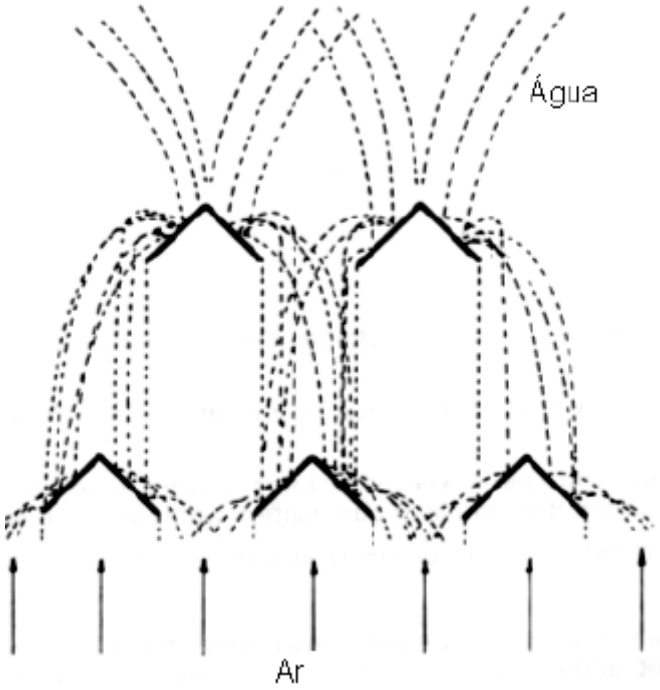

Figura 12- Enchimento de gotejamento.

(Fonte: *Disponível em http://sistemas.eel.usp.br*)

O enchimento laminar tem como objetivo escoar a água em finas películas ao longo de grandes superfícies, proporcionando uma maior exposição da água à corrente de ar (REIS, 2016). Por não haver formação de gotas, mostra-se mais eficiente em relação as

trocas térmicas quando comparado ao enchimento de gotejamento. Desta forma, o ar pode percolar com velocidades maiores, proporcionando maior capacidade de resfriamento, para um mesmo espaço ocupado (REIS, 2016). Adicionalmente, as perdas por arraste das gotas diminuem drasticamente, o que torna um fator preponderante para economia de água no processo. Entretanto, o principal inconveniente dos enchimentos laminares é a sua tendência em acumular depósitos e sujeiras entre as placas paralelas que os constituem. Este fenômeno conduz a obstruções parciais e a formação de canais preferenciais por onde escoa a água, rompendo a homogeneidade da película (GROBBELAAR, 2013). Além disso, este tipo de enchimento é mais sensível as irregularidades de vazão de ar e a distribuição de água necessitando que o desenho da torre possa garantir sua uniformidade através de todo o enchimento (TÜRETGEN, 2015). A Figura 13 exemplifica a esquemática de um enchimento laminar.

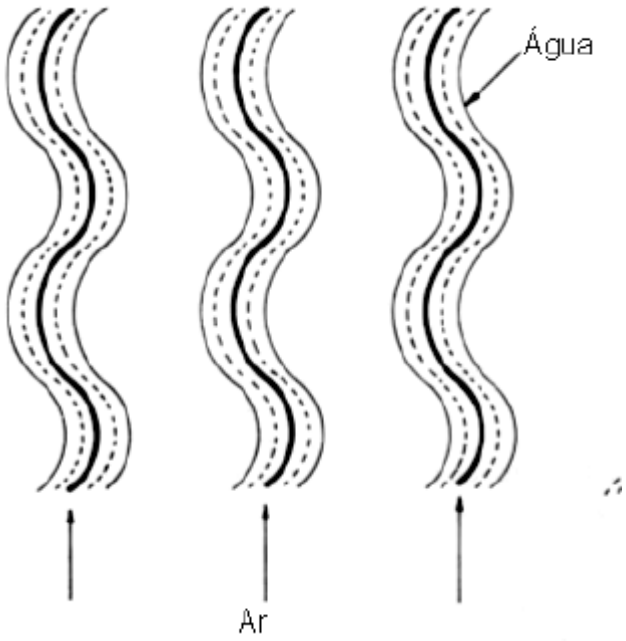

Figura 13- Enchimento laminar.

(Fonte: *Disponível em http://sistemas.eel.usp.br*)

Os enchimentos podem ser fabricados com os mais variados materiais. A escolha do material adequado vincula-se ao tempo de vida do enchimento e ao tipo de enchimento. A madeira é o material mais tradicional dos sistemas de gotejamento. A vida média, apesar

do progresso nos métodos de tratamento, não supera em geral 20 anos de operação o que coloca em decadência a sua utilização (OLIVEIRA, 2009). Os enchimentos de metal tem sido utilizados em casos especiais em que se deseja uma alta relação entre área de contato e volume. Em condições normais não são competitivos devido ao alto custo. O fibrocimento é utilizado principalmente nos enchimentos laminares de torres industriais, especialmente as de tiragem natural, apresenta boa resistência e não é atacado por matéria orgânica. Entre seus inconvenientes, podem ser citados seu elevado peso em relação ao volume e sua elevada sensibilidade as águas ácidas e aos íons sulfato (TERBLANCHE *et al*, 2009). Atualmente a utilização dos enchimentos plásticos tem se estendido cada vez mais. Apresentam um alto tempo de vida e são especialmente apropriados para enchimentos laminares em pequenas torres produzidas em série e para enchimentos mistos (SAMPAIO, 2013)

3.2.2.3. Ventiladores

Os ventiladores desempenham papel de propulsor do ar ambiente para o interior das torres de tiragem mecânica. Desta forma, são fundamentais para a eficiência do processo de resfriamento, além de desempenhar papel importante em economia de água e energia nas torres. Basicamente, existem dois tipos de ventiladores: axiais e centrífugos. No primeiro caso, o ar mantém a direção do eixo antes e após sua passagem pelo rotor. Já os centrífugos, o ar é descarregado na direção normal a direção de entrada (PEREZ, 2014)

Os ventiladores axiais são apropriados para movimentar grandes volumes de ar com um aumento de pressão pequeno, por este motivo apresentam seu uso bastante difundido em instalações industriais. Tem como principais vantagens baixo custo e flexibilidade de instalação em torres de qualquer tamanho (*Disponível em http://sistemas.eel.usp.br*). A Figura 14 exemplifica um modelo de ventilador axial.

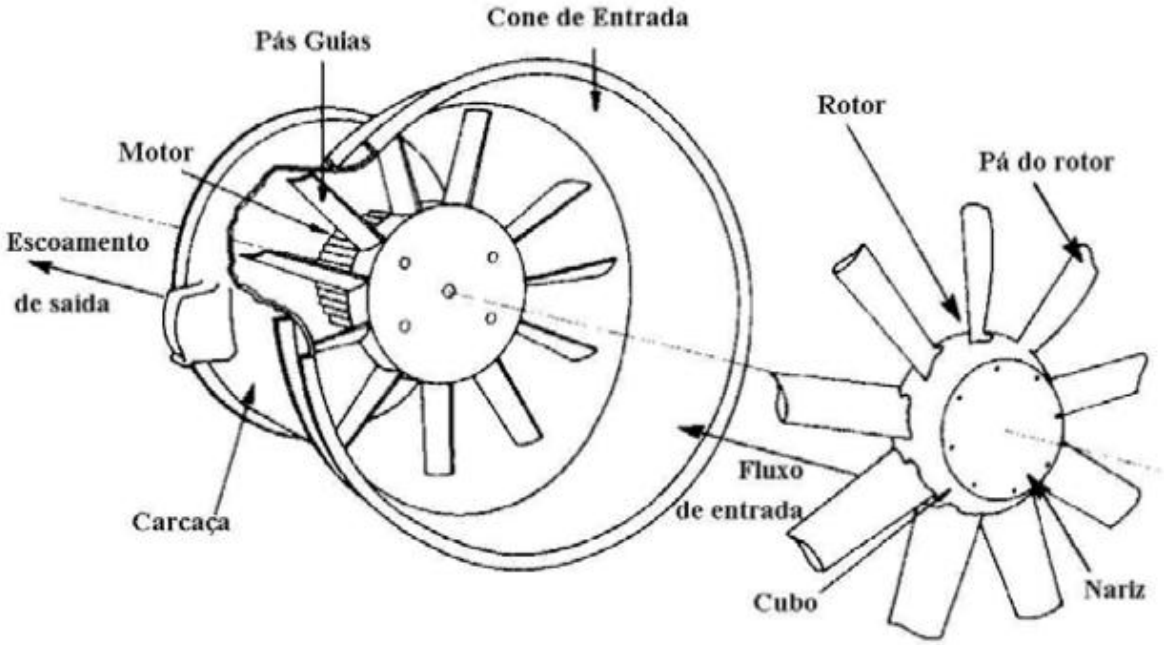

Figura 14- Ventilador axial.

(Fonte: PEREZ, 2014)

Os ventiladores centrífugos consistem em um rotor que gira em alta rotação no interior de uma carcaça em formato espiral. Desta forma, o ar entra no ventilador na direção axial ao eixo de rotação e, então é movido do centro para a periferia do rotor por ação da força centrífuga, saindo perpendicular ao mesmo eixo (PEREZ, 2014). São particularmente adequados para fornecer pequenas vazões e pressões maiores que os ventiladores axiais. Dentre os modelos de ventiladores centrífugos o mais utilizado em torres de resfriamento são os de pás curvadas. Devido à alta velocidade do ar que abandona o rotor, este pode trabalhar com uma menor rotação e, consequentemente, redução no nível de ruído. Além disso, para um dado serviço, são de menores dimensões e, portanto mais econômicos (*Disponível em http://sistemas.eel.usp.br*). A Figura 15 exemplifica um modelo de ventilador centrífugo.

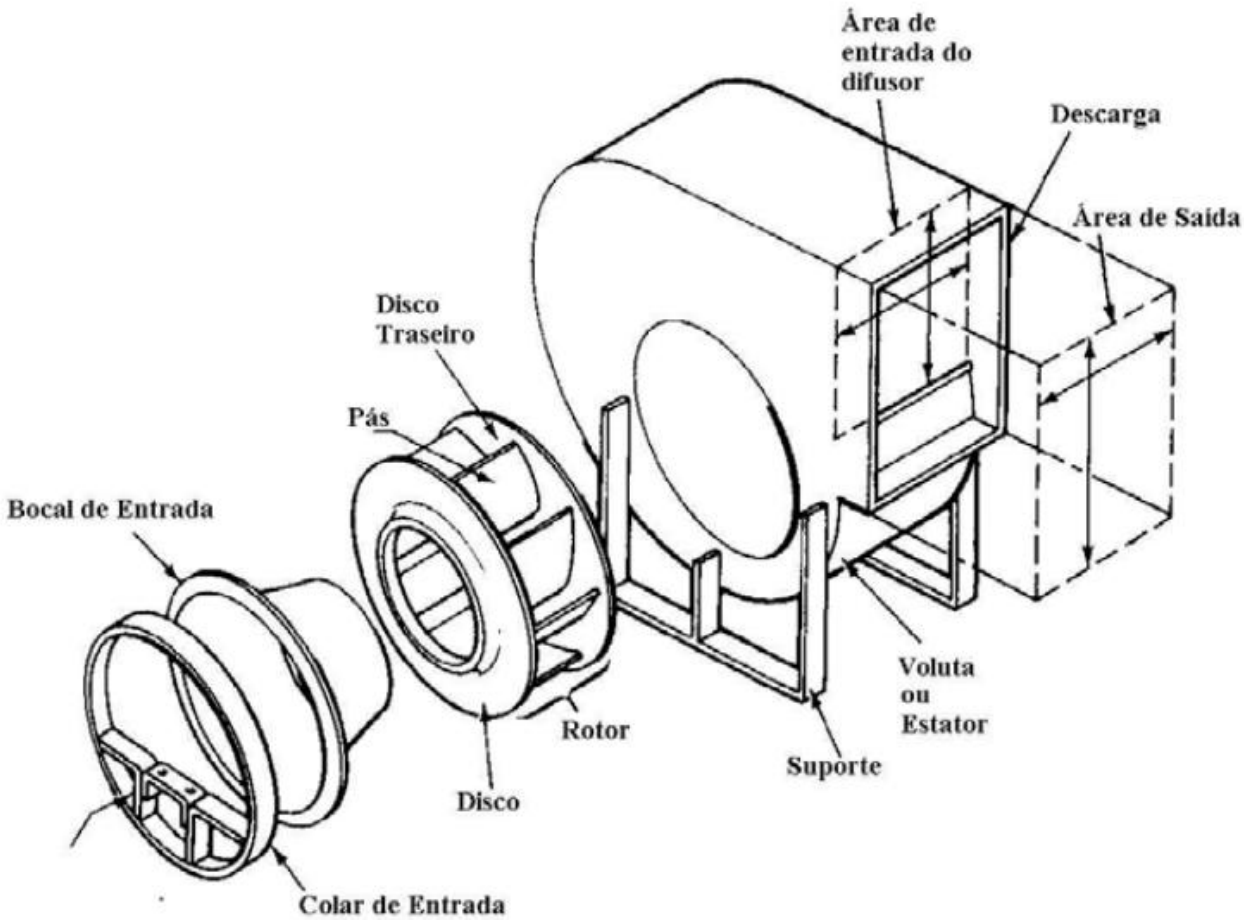

Figura 15- Ventilador centrifugo.

(Fonte: PEREZ, 2014)

3.2.2.4. Eliminadores de gotas

A função principal deste componente é a retenção de pequenas gotas arrastadas pela corrente de ar gerada pelos ventiladores. O enchimento utilizado na torre também pode influenciar na escolha do eliminador de gotas adequado. As torres de resfriamento que possuem enchimentos tipo gotejamento devem ter bons eliminadores de gotas, pois este enchimento é propício para a criação de gotículas, que são mais facilmente arrastadas pelas correntes de ar (GODIM, 2014). Em geral, a atuação do eliminador de gotas proporciona três efeitos positivos: diminui as perdas de água, evita possíveis danos aos equipamentos adjacentes a torre e limita a formação de névoa (SAMPAIO, 2010). Além disso, diminui a exposição de pessoas que trabalham no entorno à produtos químicos presentes na água e a bactéria *Legionella* que tende a proliferar na temperatura de água

frequentemente encontradas nos processos de resfriamento por torres (LUCAS *et al*, 2013). Dentre os problemas causados pela exposição á *Legionella* destaca-se a pneumonia específica, conhecida como Doença dos Legionários (WHO, 2013). Outra forma possível e mais leve de manifestação é a febre de *Pontiac* que apresenta sintomas gripais (WALSER *et al*, 2014). Apesar da notificação obrigatória de “legionelose” em vários países, o número real de casos é provavelmente subestimado (WALSER *et al*, 2014).

3.2.2.5. Venezianas (*Louvers*)

As venezianas são grelhas de entrada de ar projetadas para minimizar as perdas de água por respingos (efeito *splash out*) e para eficiente condução da corrente de ar para o interior da torre. Além disso, impedem entrada de luz na bacia da torre, propiciando menor crescimento microbiano, evitando problemas de corrosão e incrustação que reduzem a eficiência do processo de trocas térmicas (PINHEIRO, 2016).

3.2.3. Variáveis associadas aos parâmetros de projeto e eficiência dos processos de resfriamento em torres

Dentre as variáveis associadas aos parâmetros de projeto e eficiência dos processos de resfriamento em torres destacam-se:

• *Range*: diferença entre a temperatura da água quente (alimentação da torre) e a temperatura da água fria (saída da torre). O range de uma torre varia conforme as condições climáticas e a vazão da água de resfriamento na torre (GENTIL, 2007).

• *Approach*: diferença entre a temperatura da água fria (saída da torre de resfriamento) e a temperatura de bulbo úmido do ar na entrada da torre (UNEP, 2006).

• Temperatura de bulbo seco (BS): É a temperatura atingida em regime permanente por uma pequena porção de água em contato com uma corrente contínua de ar (CORTINOVIS &SONG, 2005).

• Temperatura de bulbo úmido (BU): É a menor temperatura em que a água em circulação na torre de resfriamento pode atingir (UNEP, 2006). Na prática, a temperatura de bulbo úmido é menor ou no máximo igual à temperatura de bulbo seco.

• Ciclo de concentração: O ciclo de concentração é a relação entre as concentrações de uma dada espécie na água de circulação e na água de reposição. Esta relação é

determinada a partir de um elemento que não se decomponha, volatilize ou precipite, como por exemplo, o íon cloreto (GHISLIERI, 2017).

3.2.4. Perdas de água no processo de resfriamento

O consumo de água em torres de resfriamento de refinarias é bastante expressivo, o que torna essencial medidas que priorizem o consumo racional de água. Nas torres de resfriamento evaporativo, em ambas conformações de fluxo de ar, a água quente retorna do trocador de calor para a torre, é resfriada por meio de evaporação da água e de aquecimento do ar. Devido às perdas durante o processo de evaporação, novas porções de água são repostas ao sistema (água de *make-up*) prevenindo acúmulos de sais e sedimentos na água de recirculação. Além das perdas de água por evaporação existem duas outras formas menos expressivas de consumo de água em sistemas evaporativos; as perdas por arraste mecânico (*Drift*) e purgas para o controle do ciclo de concentração de sais, sólidos suspensos e particulados/detritos na água (*blowdown*). Segundo Pozzobon (2015) e Deziani *et al* (2015), cerca de 2 a 3% da água resfriada é perdida para o ambiente em forma de vapor; o arraste mecânico de gotas pode representar de 0,002-0,2% da vazão de circulação de água e a purga, geralmente, 20% da vazão de evaporação. A Figura 16 apresenta a distribuição percentual média de perdas de água em sistemas de resfriamento, no ano de 2015, em refinarias nacionais.

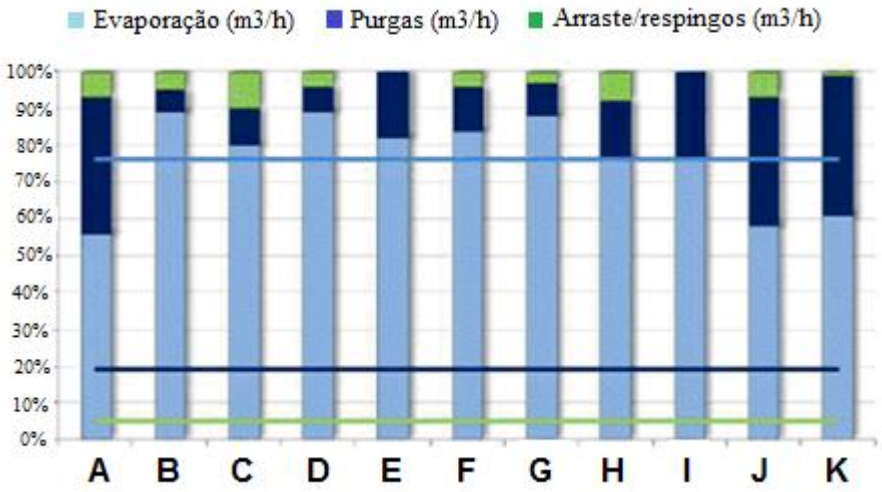

Figura 16 - Distribuição de perdas nas torres de resfriamento de refinarias

(Fonte: VEIGA, 2015)

Observa-se que a refinaria A apresentou pouca eficiência em consumo de água apesar da baixa taxa de evaporação (56%); este dado percentual justifica-se pelas altas vazões de *make-up* utilizadas para suprir as necessidades de reposição por conta das grandes perdas líquidas por purgas periódicas. Em geral, a evaporação em refinarias brasileiras apresentaram médias globais de 76%, com máxima em 89% na refinaria B, D e G. Este percentual, significativamente mais alto, reflete maior eficiência operacional do sistema de resfriamento, pois trabalha-se com maiores ciclos de concentração e consequentemente menores taxas de *make-up* (VEIGA, 2015). Além disso, pequenas perdas também podem ser registradas por vazamentos em conexões e transbordamento da bacia da torre (PEREIRA, 2007).

Dentro do panorama de racionalização do uso da água, serão apresentados no decorrer do trabalho, tecnologias capazes de reduzir o incremento de água em torres de resfriamento evaporativo, e a viabilidade de implementação em refinarias.

4. PROSPECÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE ÁGUA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EM REFINARIAS

Neste tópico serão abordadas as tecnologias capazes de reduzir o consumo de água em torres de resfriamento através de duas perspectivas: tecnologias implementadas externas às torres e tecnologias implementadas internas as torres de resfriamento. Serão consideradas externas, as tecnologias que não possuem intervenção direta na torre de resfriamento; em contrapartida, serão consideradas internas as tecnologias com intervenção direta no equipamento (Figura 17).

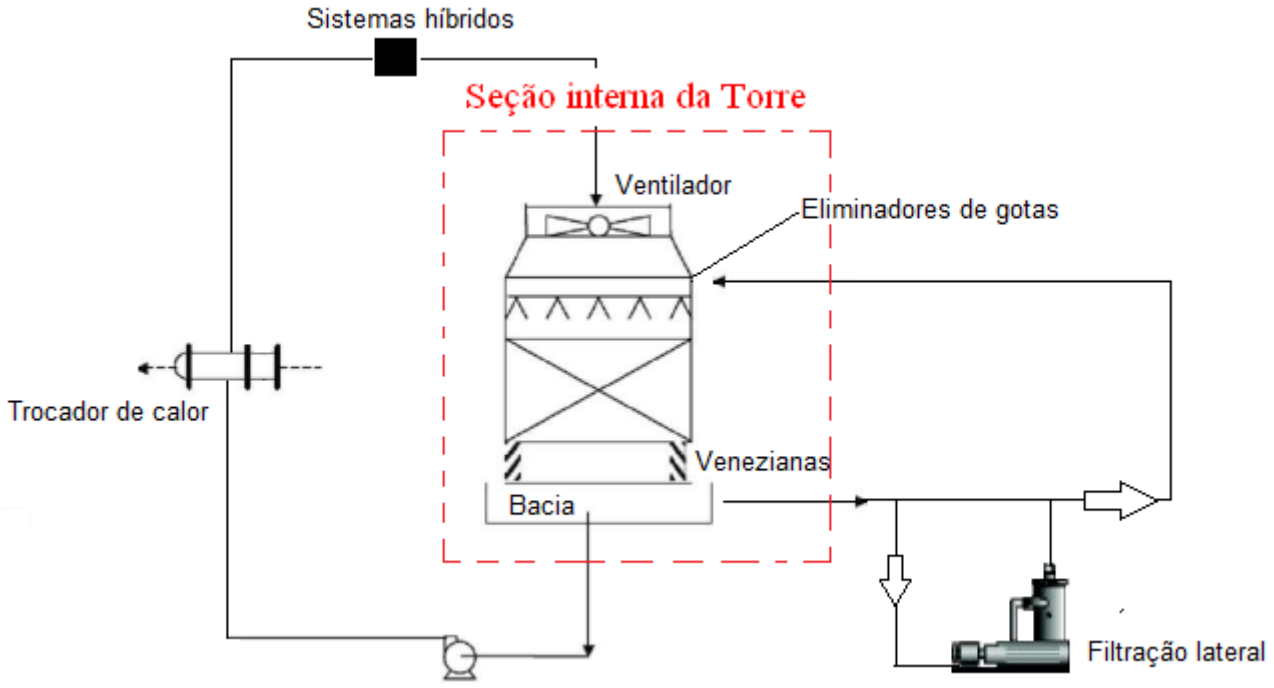

Figura 17- Diagrama de representação da seção interna e externa às torres de resfriamento

(Fonte: Adaptado de VEIGA, 2010)

4.1. TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO NO CONSUMO DE ÁGUA EXTERNAS AS TORRES DE RESFRIAMENTO

As áreas-chave para obter maiores oportunidades de economia no consumo de água com tecnologias externas às torres de resfriamento são:

• Tratamento eletromagnético da água;
• Utilização de sistemas de filtração;
• Utilização de sistemas híbridos.

4.1.1. Tratamento eletromagnético da água

Um dos grandes problemas encontrado em sistemas de resfriamento são os processos de corrosão e incrustação, ocasionados pela presença de elevada concentração de sais e microrganismos na água de recirculação. Este fato, acarreta em maior consumo de água de *make-up*, pois aumentam as purgas e diminui o Ciclo de

Concentração (CC). A água geralmente contém muito sais dissolvidos, incluindo carbonatos, sais de ferro e silicatos. Na medida em que há perda de água por evaporação, a concentração dos sais dissolvidos aumenta até se tornar supersaturada precipitando-os. Uma vez que os sais têm carga elétrica natural, eles são atraídos para as superfícies metálicas dos equipamentos e formam a incrustação nas paredes do sistema, ocasionando a diminuição da eficiência de troca térmica, além de consumir quantidades elevadas de produtos químicos e exigir paradas periódicas para manutenção. (NALCO CAMPANY OPERATION, boletim B-34).

Em geral, o carbonato de cálcio precipita e incrustam mais cedo do que a maioria dos outros sais. A incrustação pode ser controlada através das purgas periódicas, controle do pH e com a adição de dispersantes (SCHALY *et al*, 2014). O processo corrosivo em torres de resfriamento é favorecido pela boa condutividade elétrica da água, alto teor de oxigênio dissolvido e pH ajustado próximo a neutralidade (SCHALY, 2015). A corrosão pode ser combatida com tratamento de superfície e inibidores químicos específicos (SCHALY, 2015). As contaminações por microrganismos em sistemas de resfriamento são favorecidas, pois locais quentes e úmidos são ambientes favoráveis para a proliferação microbiana (bactérias, bolores, limo e outros organismos). Se não forem devidamente controlados, podem obstruir o fluxo de ar nas torres, criar depósitos sobre a superfície dos trocadores de calor diminuindo as taxas de transferência (*biofouling*), entupir bombas, válvulas, bicos aspersores e filtros podendo reduzir a eficiência do processo, restringir a vazão, além de provocar a biocorrosão. O controle de contaminação pode ser feito através do uso de produtos químicos (biocidas, algicidas, biodispersantes) e limpeza manual. O cloro é muitas vezes utilizado, pois apresenta baixo custo, mas, no entanto, é muito corrosivo tanto para os componentes internos da torre como para a tubulação exposta ao vapor (INFRA AKTIF SDN BHD COMPANY, boletim 64).

Em virtude dos problemas apresentados, uma solução inovadora, sem adição de produtos químicos e aumento do consumo energético é o tratamento da água de recirculação por eletromagnetismo. O princípio de funcionamento do processo é baseado na aplicação de campo eletromagnético na água recirculante (água rica em carbonatos); o campo propicia que a energia eletromagnética variável "agrupe" os sais iônicos em vez de depositá-los nas superfícies do equipamento. No caso de carbonato de cálcio, que incrustam prioritariamente, a aplicação do campo eletromagnético propicia a formação de sais com geometria de pequenos cristais, como se fossem sementes que vão crescendo ao longo do tempo no interior do líquido (PANDOLFO, 2003). Esses pequenos grãos dão

origem ao cristal na forma de aragonita, cuja dureza é menor do que a calcita. A forma de cristal calcita é a que se adere à superfície dos equipamentos. Sem a aplicação do campo magnético, haveria, preferencialmente, a ocorrência do precipitado na forma de calcita, cujo cristal é considerado aderente (XING, 2008). Segundo Cho *et al* (2005) e de Pandolfo (2003) é possível dizer que o tratamento magnético favorece a precipitação do carbonato de cálcio na fase bulk, diminuindo a disponibilidade dos íons para formar a incrustação nas paredes das tubulações. Além disso, a utilização de eletromagnetismo pode atuar no controle da população microbiana. O microorganismo ao ser submetido ao campo eletromagnético, tem sua carga (positiva ou negativa) intensificada, fazendo com que seja formada uma camada de hidratação em torno da célula.
A água é impulsionada para seu interior, criando uma pressão osmótica que rompe a membrana celular (INFRA AKTIF SDN BHD COMPANY, boletim 64). Desta forma, em alguns modelos, o eletromagnetismo pode intervir na capacidade de reprodução dos microrganismos, ou na morte prematura dos mesmos, atuando como verdadeiros biocidas. A Figura 18 e Figura 19 mostram modelos de equipamentos para tratamento eletromagnético em águas para torres de resfriamento.

Figura 18 - Tratamento eletromagnético AquaBion da EcoBuild

(Fonte: *disponível em* www.ecobuild.eco.br)

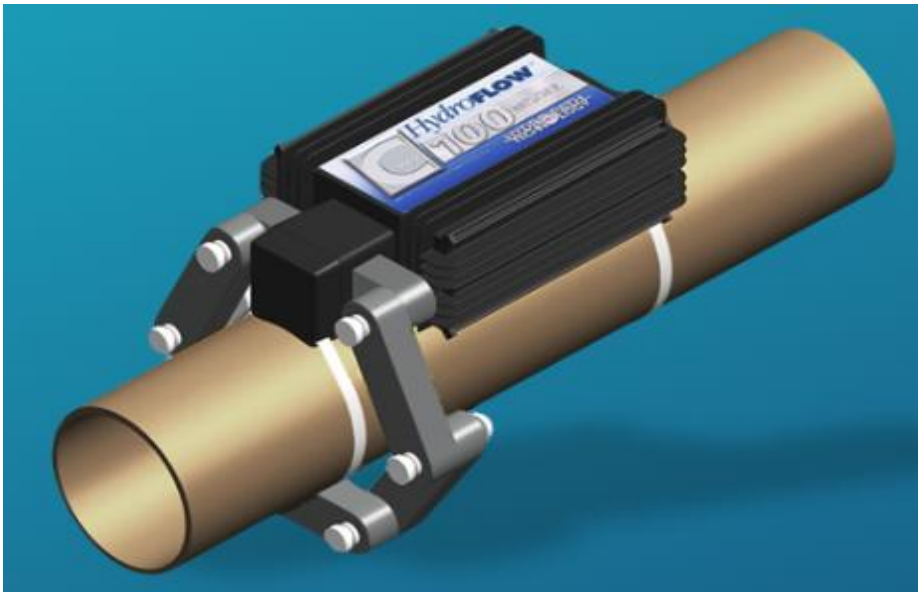

Figura 19- Tratamento eletromagnético HydroFlow da Ecotep

(Fonte: *disponível em* http://www.ecotep.com.br/home)

O tratamento com campo eletromagnético pode ser muito vantajoso, principalmente sob a ótica ambiental; além de proporcionar grandes economias de consumo de água de *make-up*, através da diminuição das purgas, não utiliza produtos químicos para o tratamento, eliminando os impactos ambientais gerados no descarte da água da bacia. Segundo a Ecotep Gerenciamento Ambiental, a implementação do tratamento eletromagnético HydroFlow pode gerar uma redução no consumo de água de até 50%. No site da empresa estão disponíveis os resultados encontrados nos empreendimentos que implementaram a tecnologia em seu sistema de resfriamento; a planta de alumínio VMetais em São Paulo, obteve 3,5% de redução de purgas; o Shopping center Vila Olímpica shopping em São Paulo obteve 2,7% de redução de purgas; os prédios comercias Líneo Machado de Paula e Edifício Santos Dumond no Rio de Janeiro obtiveram 2,5% e 1,1% de redução em purgas respectivamente. Plantas industriais internacionais também experimentam o uso desta tecnologia para tratamento de água, tais como indústrias siderúrgicas na China, a Boise Paper nos Estados Unidos, UHE Jordan River em Israel, a UTE de Barnaul na Rússia entre outras, porém ainda não foram concretizados os dados de economia de água (disponível em www.ecotep.com.br). Na Tabela 2 estão dispostos os critérios e a avaliação da implementação desta tecnologia em torres de resfriamento associados aos fatores de economia de água de reposição (*make-up*).

Tabela 2 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água- tratamento com eletromagnetismo

Critérios	***Avaliação***
Economia de água de reposição (*make-up*)	*Até 50% (constatado pela tecnologia HydroFlow)
Desvantagens	* Não existem dados concretos de economia de água aplicados a refinarias; *Custo de implementação
Vantagens	* Grande economia de água; *Economia de energia elétrica; *Implantação extremamente fácil, em alguns modelos, não necessita de intervenção no sistema; *Aplicável a qualquer modelo de torre de resfriamento; *Aumento do número de ciclos de concentração; *Redução de manutenção e troca de peças periódicas; *Redução dos impactos ambientais gerados na purga; *Não utiliza produtos químicos; *Alongamento da vida útil de todo sistema (tubulações, conexões, válvulas e equipamentos); * Melhora da eficiência térmica; *Pode desincrustar tubulações antigas; *Evitar novas incrustações. *Neutralizar a corrosão no interior das tubulações *Pode controlar crescimento microbiano.

4.1.2. Utilização de sistemas de filtração

A filtração em torres de resfriamento é utilizada para melhoria da qualidade da água de recirculação, através da remoção de sólidos suspensos. Dentre os sólidos que causam problemas em um circuito de resfriamento e que podem ser removidos através de filtração, destacam-se: partículas metálicas e incrustações desprendidas dos equipamentos e das tubulações; poeira que é levada para o interior da torre através do fluxo de ar gerado pelos seus ventiladores; minerais precipitados pelo uso de produtos químicos ou de condicionadores magnéticos; material particulado inorgânico contidos na água de *make-up* (LEGNER, 2014). A remoção destes sólidos pode trazer diversos ganhos econômicos, tais como (*Disponível em:www.termoparts.com.br* e GODIM, 2014):

- Redução nos custos de manutenção (menos paradas para limpeza na bacia da torre, nos trocadores de calor, e outros equipamentos do sistema de resfriamento);
- Proteção dos equipamentos de troca térmica e bicos spray, reduzindo a abrasão e corrosão;
- Melhor eficiência na troca térmica (menor incidência de incrustações e corrosões que diminuem a eficiência dos trocadores de calor);
- Redução no consumo de produtos químicos;
- Grande redução no consumo de água (redução na purga e na reposição (*make-up*), pois a água permanecerá com a qualidade de recirculação por mais tempo).

Para o controle dos sólidos suspensos, em geral, os operadores nas indústrias têm como prática aumentar as taxas de purga e/ou adicionar dispersantes químicos na água recirculante dos sistemas de resfriamento. Entretanto, ambos os métodos promovem a elevação do consumo de água e dos custos com tratamento químico (GODIM, 2014). Os sistemas de filtração promovem a remoção continua de uma percentagem dos sólidos suspensos através da utilização de filtros que captam água fria da bacia da torre, retornando-a filtrada novamente para a bacia, sem gastos adicionais de água e consumíveis de tratamento.

A filtração em uma torre de resfriamento pode ser feita na vazão total da torre (*fullstream*) ou apenas em uma parcela da vazão, a filtração parcial ou lateral (*sidestream*). Devido ao tamanho, custo de manutenção, e principalmente custo inicial de instalação de filtros para grandes vazões, prioriza-se o uso da filtração lateral ao invés da filtração total. Segundo Seneviratne (2007) destina-se para o filtro lateral 1 a 20% da vazão de recirculação; em geral, a taxa de 5% da vazão total da torre é utilizada como

ideal para o dimensionamento de um sistema de filtração lateral, compilando os dados de qualidade da água e custos de implementação e manutenção dos filtros (HARSTON, 2004). Na Figura 20 e Figura 21 são apresentados os esquemas de filtração lateral e total em torres de resfriamento.

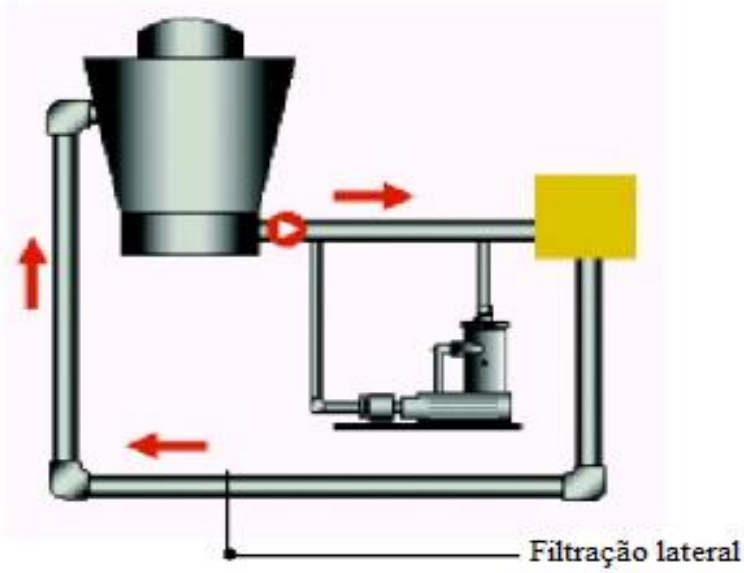

Figura 20 - Filtração lateral em torres de resfriamento.

(Fonte: Revista TAE, 2010)

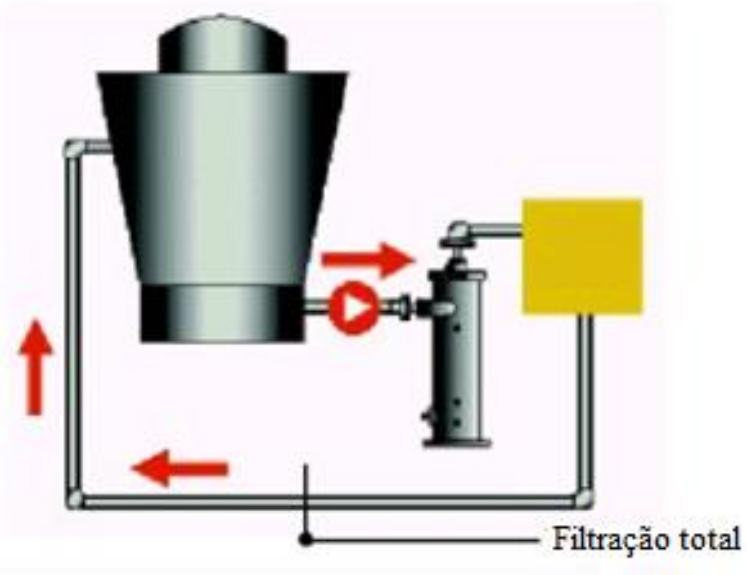

Figura 21 - Filtração Total em torres de resfriamento.

(Fonte: Revista TAE, 2010)

Existem diversos tipos de filtros e cada um é indicado para determinado tipo de

torre de resfriamento e objetivos da indústria. Os mais comuns são os filtros *bag* (bolsa), cesto (*strainer*), cartucho, filtros de leito ou areia, separador centrífugo e filtros automáticos (FARRUGIA, 2012). Os primeiros tipos de filtro utilizados foram os bag, cartucho e de areia. Segundo Farrugia (2012), até 2012, os mais modernos e tecnológicos existentes no mercado eram os de tipo separador centrífugo ou filtros automáticos (FARRUGIA, 2012).

O filtro *bag* é um método econômico de filtração formado por três componentes principais: o vaso de pressão, o cesto suporte e a bolsa; a água a ser filtrada é introduzida de forma pressurizada na parte superior da bolsa suportada pelo cesto, assegurando uma distribuição completa e uniforme do líquido pela superfície interna da bolsa. Os resíduos sólidos ficam retidos na bolsa filtrante e o líquido limpo flui pela saída da carcaça (FARRUGIA, 2012). Segundo Legner (2014) entre as vantagens desse tipo de filtro está a maior capacidade de acúmulo de resíduos e a retenção dos mesmos no interior da bolsa; uma vedação positiva de 360º na bolsa; um baixo custo operacional; manutenção e a troca do elemento filtrante rápido e prático. Por outro lado, Legner (2014) complementa que as manutenções e trocas devem ser periódicas para o bom funcionamento do sistema. A Figura 22 apresenta um modelo de filtro bag para instalações em torres de resfriamento.

Figura 22 - Filtro bag para instalações em torres de resfriamento.

(Fonte: *Disponível em:* www.laffi.com.br)

Filtros alternativos são os filtros cestos os quais são constituídos, basicamente, por um corpo com conexões alinhadas e o elemento filtrante em forma de cesto para retenção de sólidos diversos (*Disponível em*: www.laffi.com.br/strainer_principio.htm). Segundo Legner (2014), esse tipo de filtro tem ampla aplicação nas indústrias, visto que apresenta simplicidade, alta qualidade de filtração e facilidade de operação, além de requerer espaço reduzido para instalação. Entretanto, e de forma análoga aos filtros bags, necessitam de manutenção periódica. A Figura 23 apresenta um modelo de filtro cesto indicado para instalações em torres de resfriamento.

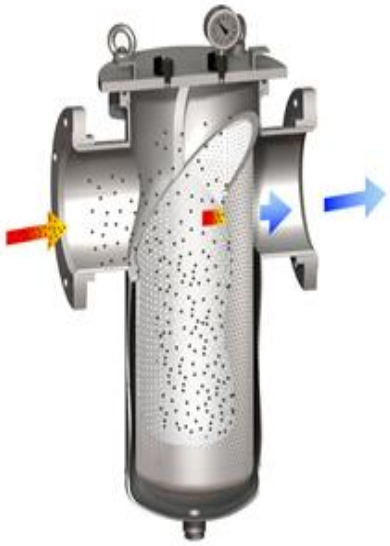

Figura 23- Filtro cesto para instalações em torres de resfriamento.

(Fonte: *Disponível em:* www.laffi.com.br)

A filtração por cartucho é uma técnica utilizada mundialmente e bastante versátil, pois pode ser dimensionada para diferentes vazões e elementos filtrantes; os elementos filtrantes podem ser fibras puras de polipropileno, algodão e poliéster (FARRUGIA,2012). O procedimento operacional é baseado com entrada lateral de água, que é distribuída uniformemente ao redor da superfície externa dos cartuchos o que confere a retenção das partículas sólidas. A principal vantagem desse sistema é a qualidade do filtrado, mas em contrapartida exige manutenção dos elementos filtrantes (FARRUGIA, 2012). A Figura 24 apresenta um modelo de filtro cartucho para instalações em torres de resfriamento.

Figura 24 - Filtro cartucho para instalações em torres de resfriamento.

(Fonte: *Disponível em:* www.laffi.com.br)

Os filtros de leito têm como princípio de funcionamento a entrada da água pela tubulação superior que atravessa o leito filtrante no sentido descendente, onde são retidas as impurezas da água (LEGNER, 2014). Podem ter como meio filtrante areia, antracito, zeólita ou carvão ativado. Segundo Farrugia (2012) as principais vantagens desses sistemas são distribuidores e coletores internos de alta eficiência, baixa perda de carga e possibilidade de operação manual ou automatizada. Porém, trata-se, também, de um sistema que necessita de trocas do leito filtrante e retro lavagens periódicas. A Figura 25 apresenta um modelo de filtro de leito para instalações em torres de resfriamento.

Figura 25- Filtro de leito para instalações em torres de resfriamento.

(Fonte: *Disponível em:* www.laffi.com.br)

Devido aos problemas de manutenção e trocas periódicas dos sistemas de filtração supracitados, foram desenvolvidas novas tecnologias capazes de minimizar o consumo de água em torres de resfriamento, com menores dispêndios financeiros. Atualmente, o mercado dispõe de métodos de filtração mais modernos e aplicáveis ao setor industrial, em especial às refinarias; tratam-se de filtros separador centrífugo e filtros automáticos. O filtro separador centrífugo remove sólidos sedimentáveis por meio da ação centrífuga, gerada pelo simples bombeamento da água, aplicando o princípio da velocidade e gravidade para obtenção de seu desempenho; a recirculação contínua de líquidos através dos filtros separadores centrífugos aumenta consideravelmente a remoção de sólidos, principalmente os mais pesados (LEGNER, 2014). Além disso, apresenta vantagens significativas de implementação, tais como (Disponível em http://www.laffi.com.br/turbimaxx_informacoes.ht):

• Não utiliza elementos filtrantes;
• Sem partes ou peças móveis para reposição;
• Dispensa retro lavagem;
• Sem paradas improdutivas para limpeza ou manutenção;
• Não necessita de equipamentos reserva;

• Perda de carga e vazão constantes;
• Fácil automatização para operação;
•Porte compacto, requerendo pequenos espaços para instalação;
• Sistema de recolhimento de sólidos que garantem recuperação de líquidos;
• Disponibilidade de acessórios e dispositivos para concentração de sólidos para posterior descarte;
• A manutenção e a limpeza feitas através de sistemas de purga ou recuperação, com opção manual e automática, projetada para a remoção completa de sólidos e para o despejo na condição desejada pela indústria;
• Efetiva transferência dos sólidos separados com perdas de líquidos virtualmente zero.

Os filtros centrífugos permitem recirculação de água de melhor qualidade atuando a uma taxa de filtração entre 5% e 20%. Porém, equiparando custo benefício, mesmo em vazão total são mais econômicos que os filtros convencionais de barreira citados anteriormente (LEGNER, 2014). Segundo Farrugia (2012), considerando a implementação desse sistema de filtração às torres de resfriamento, há redução entre 60% a 90%nos custos de manutenção, economia de energia pela melhoria da eficiência em trocas térmicas de 5% a 10% de, cerca de 5 a 15% de redução nos consumos de insumos químicos e sensível redução no consumo de água clarificada, podendo chegar entre 5 a 10% de economia. Em virtude dos benefícios econômicos e ambientais, os filtros centrífugos têm sido amplamente utilizados para filtração de água em torres de resfriamento, estando instalados em grandes grupos mundiais, tais como: IBM, American Airlines, Hilton Hotel, Nestlé, Chrysler, Monsanto, GM, Califórnia Steel, Corea Power Plant, Guardian,etc. No Brasil, este sistema já vem sendo utilizado por empresas como Pirelli, White Martins (Praxair), Belgo Mineira, Ford, Pneus Michelan, Basf, entre outras (Disponível em: www.termoparts.com.br). A Figura 26 apresenta um modelo de filtro centrífugo utilizado/instalado em torres de resfriamento.

Figura 26- Filtro centrífugo para instalações em torres de resfriamento.

(Fonte: *Disponível em:* www.laffi.com.br)

Diferente dos filtros centrífugos, os filtros automáticos possuem elemento filtrante responsável pela remoção dos sólidos suspensos. No entanto, estes filtros são filtros autossuficientes operando de maneira automatizada com poucas exigências de intervenções por operadores, assim como de paradas periódicas para limpezas e manutenções (DALAVIA, 2010). Dessa forma, o fluido passa pela pré-tela e segue para o elemento filtrante principal onde ocorre o processo de filtração. O material em suspensão, com dimensões maiores que o meio de filtração, é retido de forma absoluta, promovendo a formação de um filme na parte interna do elemento filtrante que acarreta em um aumento gradual do diferencial de pressão ao longo do filtro. Este diferencial de pressão é monitorado e pré-ajustado, e, quando atingido, promove o acionamento do painel de comando, iniciando assim o ciclo da limpeza total sem que haja interrupção do processo contínuo de filtração (*Disponível em*: www.*hidroambiental.com.br*). O ciclo de limpeza se inicia com o acionamento do motor elétrico ou hidráulico, que gira o *scanner* interno e seus Bocais Rotativos de Sucção (BRS) de forma espiral ao longo de toda a área interna do elemento filtrante. A abertura da válvula de limpeza permite criar uma grande força de sucção nos bocais, expulsando o filme para fora do filtro e promovendo a limpeza do elemento filtrante. Durante este processo, que, em função do fabricante, pode durar cerca de 25 segundos, o processo de filtração de água permanece inalterado (*Disponível em*: www.*hidroambiental.com.br*).

Segundo Dalavia (2010), esse tipo de equipamento possui um custo maior em

comparação aos demais processos de filtração, porém, por operar de maneira ininterrupta, em longo prazo, pode tronar-se vantajoso já que dispensa limpezas manuais, troca de peças e manutenção. Adicionalmente, o modelo de filtros automáticos com BRS apresenta como principais vantagens (*Disponível em: www.hidroambiental.com.br*):

• Inexistência da necessidade de troca do elemento filtrante, gerando economia operacional em comparação aos filtros convencionais;
• Baixa vazão de limpeza;
• Abastecimento contínuo do líquido filtrado ao sistema, mesmo quando o ciclo da limpeza é acionado;
• Não há uso de processo de retro lavagem evitando assim limpeza parcial do elemento filtrante e consumo de água;
• Baixo custo operacional;
• Instalação na posição horizontal ou vertical, em espaço compacto (*small footprint*);
• Manutenção simples e reduzida;
• Rápido retorno dos investimentos;
• Economia em consumo de água de reposição (*make-up*).

A Figura 27 apresenta um modelo detalhado de filtro automático para instalações em torres de resfriamento, definido as partes integrantes do processo de filtração:

1- Entrada do filtro;
2- Pré-tela;
3- Elemento filtrante principal;
4- Monitoramento do diferencial de pressão;
5- Motor elétrico ou hidráulico;
6- Scanner interno;
7- BRS;
8- Válvula de limpeza;
9- Saída do filtro.

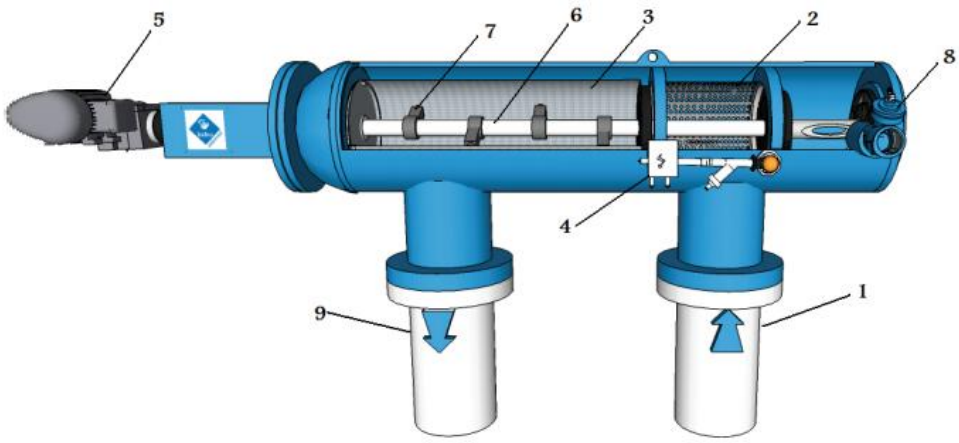

Figura 27 - Filtro automático para instalações em torres de resfriamento.

(Fonte: *Disponível em:* www.hidroambiental.com.br)

Na Tabela 3 estão dispostos os critérios e a avaliação da implementação de filtros laterais em torres de resfriamento, associado aos fatores de economia de água de *make-up*. Não foram encontrados simulações ou dados na Literatura que evidenciassem o percentual de economia de água de *make-up* para todos os tipos de filtros citados.

Tabela 3 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água- utilização de filtros laterais.

Critérios	Avaliação
Economia de água de reposição (*make-up*)	* Entre 5 e 10%, utilizando-se filtros centrífugos.
Desvantagens	* Custos de manutenção e operação do equipamento; *Custos com elementos filtrantes para alguns modelos de filtros; * Não há simulações que evidenciem os ganhos nominais em economia de água para todos os filtros; *Gasto energético para operação de mais um sistema (bombas e painéis);

Vantagens	* Grande redução no consumo de água (redução na purga e n reposição (*make-up*), pois a água permanecerá com a qualidade de recirculação por mais tempo). *Redução nos custos de manutenção da torre (menos paradas para limpeza na bacia da torre, nos trocadores de calor, e outros equipamentos do sistema de resfriamento); *Proteção dos equipamentos de troca térmica e bicos *spray*, reduzindo a abrasão e corrosão; *Melhor eficiência na troca térmica (menor incidência de incrustações e corrosões que diminuem a eficiência dos trocadores de calor); *Redução no consumo de produtos químicos.

4.1.3. Utilização de sistemas híbridos

Sistemas de resfriamento híbridos referem-se a processos com elementos de resfriamento úmido e seco que podem funcionar individualmente ou em conjunto para alcançar melhor eficiência e ganhos no consumo de água. Os sistemas secos (*dry-cooler*) utilizam condensadores resfriados a ar, apresentando significativa economia de água quando comparado aos sistemas úmidos (BUSHART, 2014). No entanto, esta técnica apresenta custos de implementação até cinco vezes mais elevados, quando comparado ao resfriamento via recirculação de água, além de, em lugares que apresentam clima mais quente, podem não atingir a eficiência de troca térmica necessária (ASVAPOOSITKUL *et al,* 2014). A Figura 28 exemplifica um modelo de sistema de resfriamento seco.

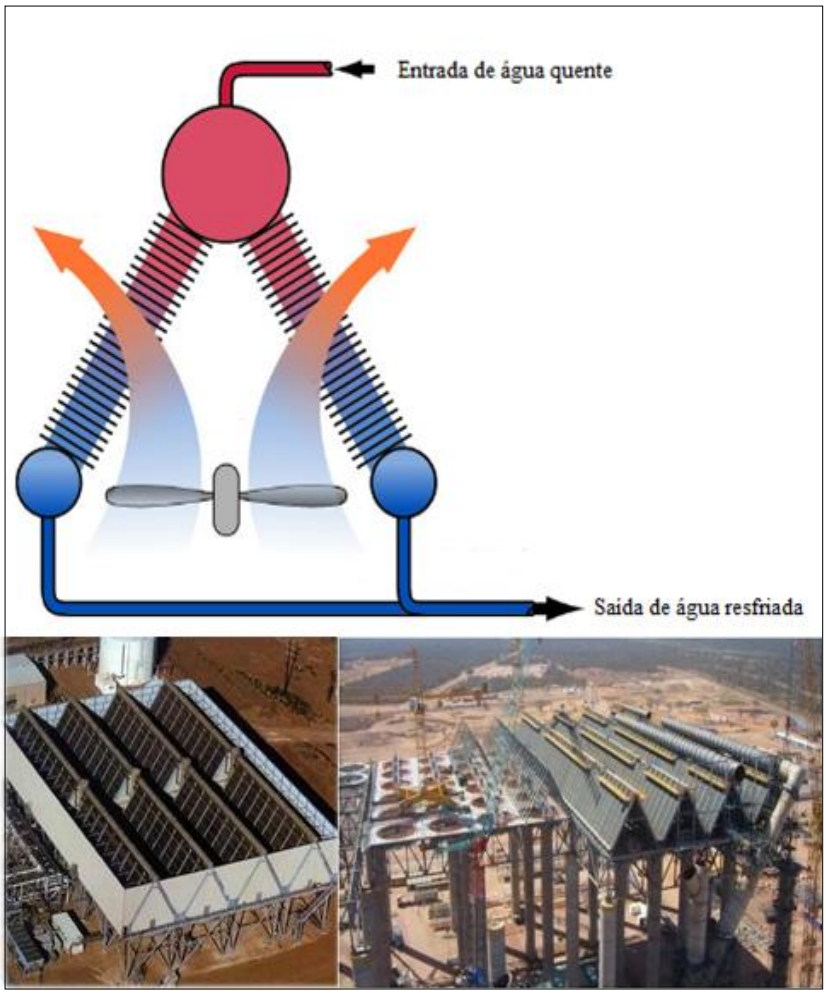

Figura 28 - Modelo de sistema de resfriamento seco (*dry-cooler*)

(Fonte: Adaptado de OWEN, 2013 e BUSHART, 2014)

Para contornar a baixa eficiência de sistemas secos em períodos e/ou lugares mais quentes, e paralelamente buscar ganhos em consumo de água de reposição (*make-up*), utiliza-se sistemas híbridos em linha, ou em paralelo, aproveitando-se as melhores características de cada sistema; isto é, em dias mais quentes pode-se utilizar resfriamento seco e úmido em paralelo, ou apenas sistemas úmidos quando se busca redução no consumo energético; em dias mais frios e secos, utiliza-se a capacidade de resfriamento seco promovendo-se a conservação da água. Segundo Bushart (2014) sistemas híbridos apresentam um potencial de economia de água superior a 50% em relação a torres de resfriamento com recirculação de água. A Figura 29 exemplifica um sistema híbrido de resfriamento em paralelo.

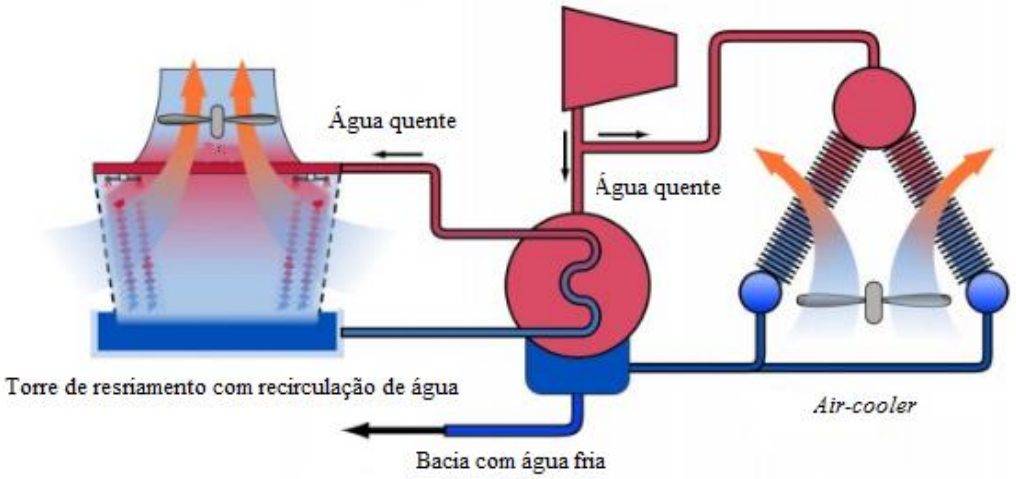

Figura 29 - Modelo de sistema de resfriamento híbrido

(Fonte: Adaptado de BUSHART, 2014)

Em estudos simulados em 2015 com as refinarias nacionais, foi avaliada a introdução de sistemas secos em linha (*air-coolers*) com as torres úmidas. O estudo buscou calcular o incremento de água de reposição (*make-up*), obtido através da minimização da evaporação ao se utilizar um pré-resfriamento a seco para redução da carga térmica de entrada na torre de recirculação de água. Para esta avaliação, foram selecionadas as torres de resfriamento que apresentam um ΔT > 10˚ C (*range*) e altas vazões de recirculação. Na Tabela 4, são expressos dados reais de consumo de água, vazão de recirculação (Q rec.), *range* (ΔT real) e vazão de água de reposição (*make-up*) de torres das refinarias enquadradas nos critérios de seleção para o estudo.

Tabela 4 - Consumo de água em sistema de resfriamento nas refinarias.

(Fonte: VEIGA, 2015)

Refinarias	**Água clarificada total (m^3/h)**	**Torres**	**Q rec. (m^3/h)**	**ΔT real (˚C)**	***Make-up* real (m^3/h)**
A	3.873	U-1363/4	34456	9,8	891
B	1.816	TR 6121/22	43503	13,5	946
C	1.274	TR 003	16000	7	331
D	1.537	TR 5902	11200	10	239
E	1.397	K-2801	13000	12	256
G	1.274	TR 51501	17500	13	383
X	713	T-5301	11515	10	181

As simulações de incremento de água de reposição (*make-up*) com a associação de *air-cooler* a torres úmidas foram realizadas em dois perfis: Projeção para *air-coolers* reduzirem 1ºC o ΔT e projeção para *air-coolers* reduzirem o ΔT para 8ºC em todas as torres. A viabilidade econômica da implementação de unidades secas para alcançar essas reduções de temperatura não foi avaliada. A Tabela 5 evidencia o ganho de água de reposição (*make-up*) com a redução da carga térmica de entrada na torre úmida em 1ºC (redução de 1ºC no ΔT).

Tabela 5 - Incremento de água de reposição (*make-up*) com redução de 1ºC no ΔT

(Fonte: VEIGA, 2015)

Refinarias	**Menos 1 ˚C no ΔT (˚C)**	***Make-up* calculado (m^3/h)**	**Ganho *Make-up* (m^3/h)**	**Ganho de Vazão de *Make-up* (%)**	**Ganho de Vazão de água clarificada (%)**
A	9	796	94	10,6	2,4
B	12,5	846	70	7,4	3,9
C	11	303	28	8,3	2,2
D	9	215	24	10,0	1,6
E	11	235	21	8,3	1,5
G	12	354	29	7,5	2,3
X	9	163	18	10,0	2,5

A Tabela 6 apresenta os resultados de incremento de água de reposição (*make-up*) se os ΔT forem reduzidos para 8ºC em todas as torres estudadas/simuladas.

Tabela 6 - Incremento de água de reposição (*make-up*) com normalização de ΔT=8 ˚ C

(Fonte: VEIGA, 2015)

Refinarias	**ΔT= 8 (˚C)**	***Make-up* calculado (m^3/h)**	**Ganho *Make-up* (m^3/h)**	**Ganho de Vazão de *Make-up* (%)**	**Ganho de Vazão de água clarificada (%)**
A	8	721	170	19,1	4,4
B	8	561	385	40,7	21,2
C	8	221	110	33,3	8,7
D	8	191	48	20,0	3,1
E	8	171	85	33,3	6,1
G	8	231	152	39,7	11,9
X	8	145	36	20,0	5,1

Analisando os dados simulados da Tabela 5 e Tabela 6, percebe-se que utilização de *air-coolers* pode ser muito vantajosa, e em especial, para as refinarias que enfrentam escassez hídrica. Além disso, no caso da refinaria A, pode-se obter um ganho considerável de eficiência no processo, visto que a queda na evaporação, propiciada pela redução da carga térmica de entrada na torre, diminuirá a sistemática de purgas frequentes promovidas pela refinaria (Figura 16). A Figura 30 mostra o panorama geral do potencial de economia de água de reposição (*make-up*) e o ganho percentual associado de água clarificada, por refinaria, com a implementação de sistemas híbridos. É importante ressaltar, apesar dos ganhos significativos de economia de água com a utilização de sistemas híbridos de resfriamento, estes apresentam custos mais elevados em comparação as torres de resfriamento com recirculação de água tradicionais. Além disso, a incorporação de um equipamento adicional ao sistema tradicional está sujeita a diversos limitadores operacionais, tais como: consumo energético, manutenções periódicas, reposição de peças, combate a incrustações e corrosões, entre outros.

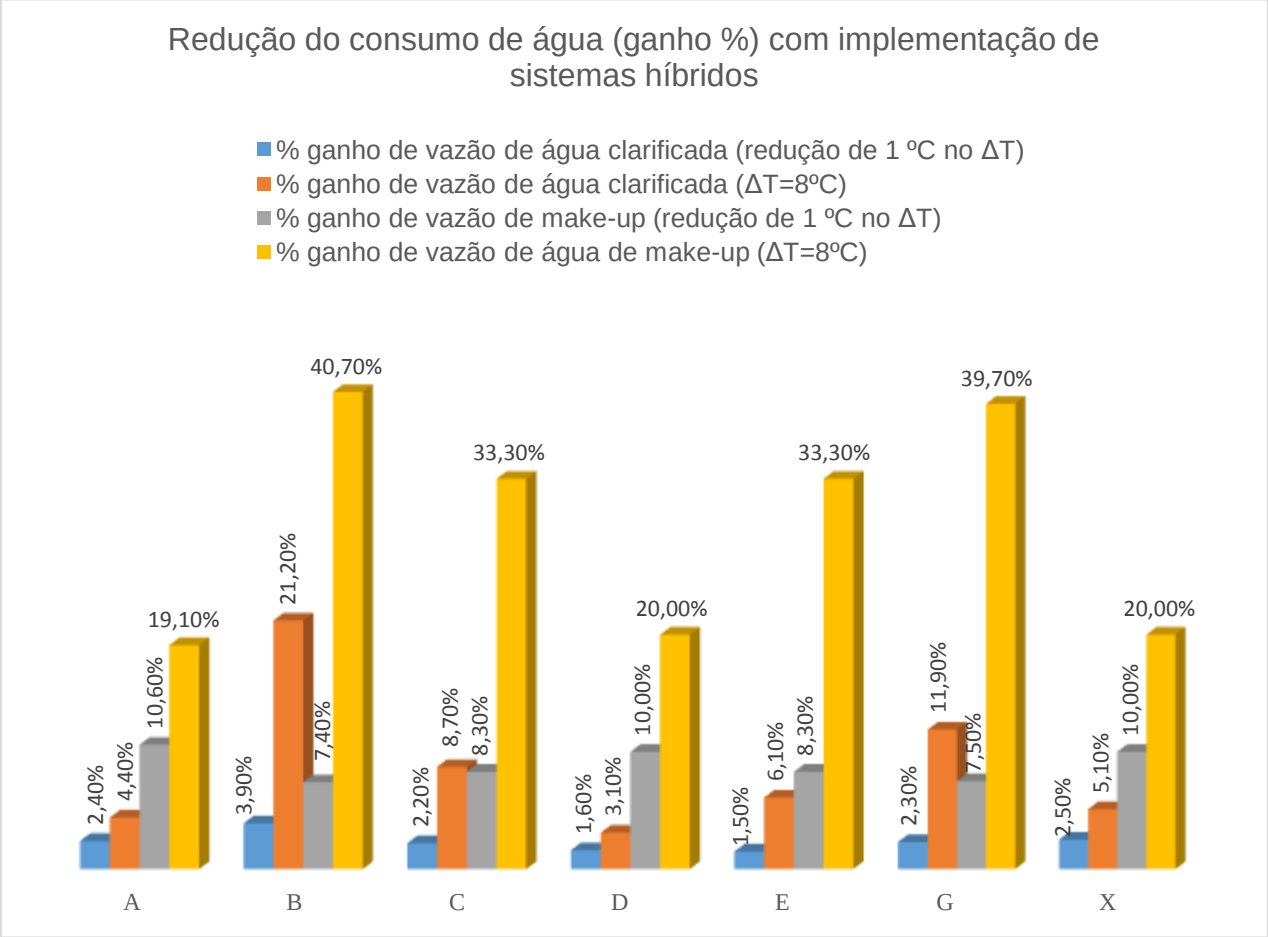

Figura 30 - Incremento de água com implementação de sistemas híbridos

(Fonte: VEIGA, 2015)

Dentro desta mesma vertente, um novo conceito de hibridização foi desenvolvido pela Johnson Controls, chamado resfriamento por termossifão (TSC). Trata-se de um sistema basicamente composto de um evaporador, um condensador resfriado a ar e controles capazes de pré-resfriar, de maneira “inteligente” a água quente, antes da entrada na torre de resfriamento úmida (BENN *et al*, 2016). A concepção do TSC permite que a água seja resfriada diretamente pelo evaporador; a separação da transferência de calor ocorrida no evaporador (da água para o refrigerante) da ocorrida no condensador (refrigerante para o ar) permite que o projeto seja otimizado para sua finalidade específica, economia no consumo de água (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI), 2012). A Figura 31 e Figura 32 mostram o sistema de resfriamento por termossifões desenvolvido pela Johnson Controls.

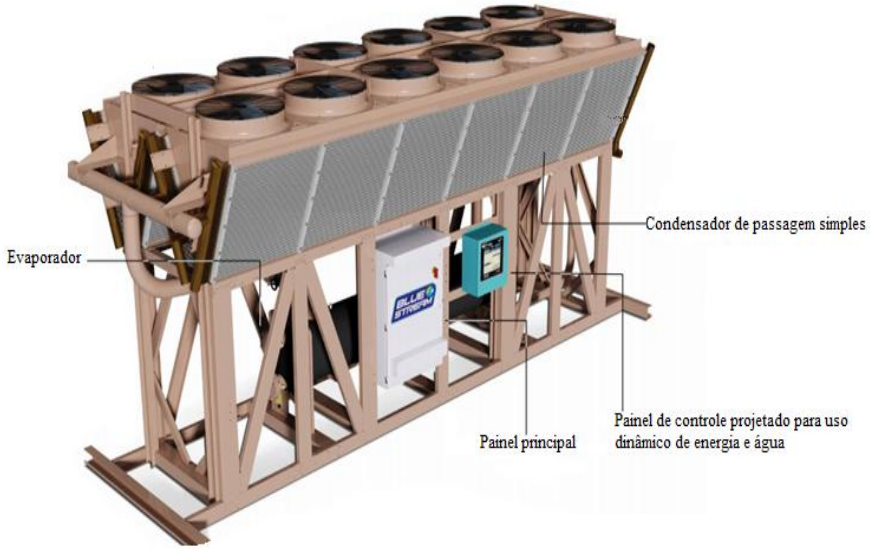

Figura 31- Vista lateral da tecnologia de Termossifão (TSC) desenvolvida pela Jonhson Control.

(Fonte: Adaptado de Manual de Operação do Sistema Híbrido de Resfriamento TSC- Jonhson Control, *disponível em:* www.johnsoncontrols.com)

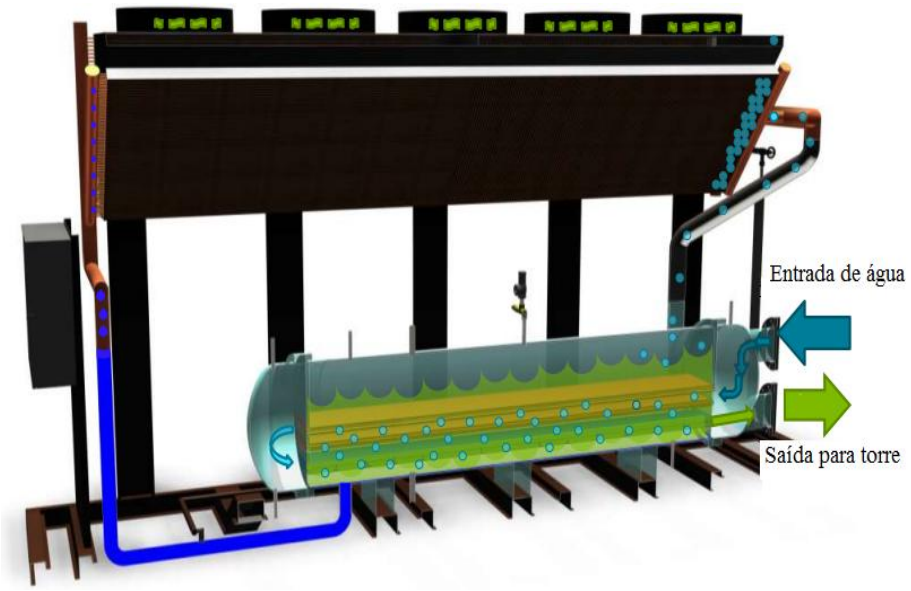

Figura 32- Design básico do TSC

(Fonte: Adaptado de CARTER, 2014)

Ao reduzir a carga térmica na torre de resfriamento, os sistemas híbridos TSC apresentam o potencial de reduzir as perdas anuais por evaporação, as necessidades de água de reposição (*make-up*), e volumes de purgas, em até 75% sem comprometer a

potência elétrica nos dias mais quentes de verão (BUSHART, 2014). Em relação a outras opções de resfriamento seco, a tecnologia TSC promete ser integrada aos sistemas úmidos de forma mais simples e flexível, com menores custos de implementação, aproveitando o *design* do termossifão e de forma a não necessitar de bombas para o fluido refrigerante. Além disso, podem ser instaladas em sistemas de resfriamento já existentes, exigindo mínimas paradas de operação, e possibilitando a instalação de várias unidades de TSC se economias de água adicionais forem necessárias (JONHSON CONTROL INC., Manual de Operação do Sistema Híbrido de Resfriamento TSC). A Figura 33 apresenta um protótipo de TSC com várias unidades de condensação.

Figura 33 - Protótipo de TSC com várias unidades de condensação.

(Fonte: SHI *et al*, 2014)

Um sistema em escala piloto que incorpora uma unidade TSC equivalente a 1 MW em uma torre de resfriamento úmida piloto está também em teste no Water Research Center (WRC) em colaboração com o Electric Power Research Institute (EPRI) na Georgia, Estados Unidos. Esse projeto visa determinar a quantidade de água que é passível de ser economizada ao se operar uma unidade TSC em série com uma torre de resfriamento úmida convencional. Nestes estudos, serão também determinados os gastos energéticos da implementação do TSC e os meios mais eficazes para aumento da escala (SHI *et al*, 2014).

Outro conceito de hibridização patrocinado pela EPRI em colaboração com a Universidade de Stellenbosch, na África do Sul, é o resfriamento *dry/wet Dephlegmator*

(HDWD). A pesquisa busca desenvolver um segundo estágio de resfriamento para condensadores secos convencionais (BUSHART, 2014). Desta forma, a tecnologia HDWD propõe um novo híbrido composto de dois estágios: o primeiro estágio é seco (*air cooler*), similar à configuração de tubos inclinados aletados convencional, e a segunda fase seca e úmida, com um com um trocador de calor (seco e úmido) apresentando pequena inclinação ("quase na horizontal") (Figura 34).

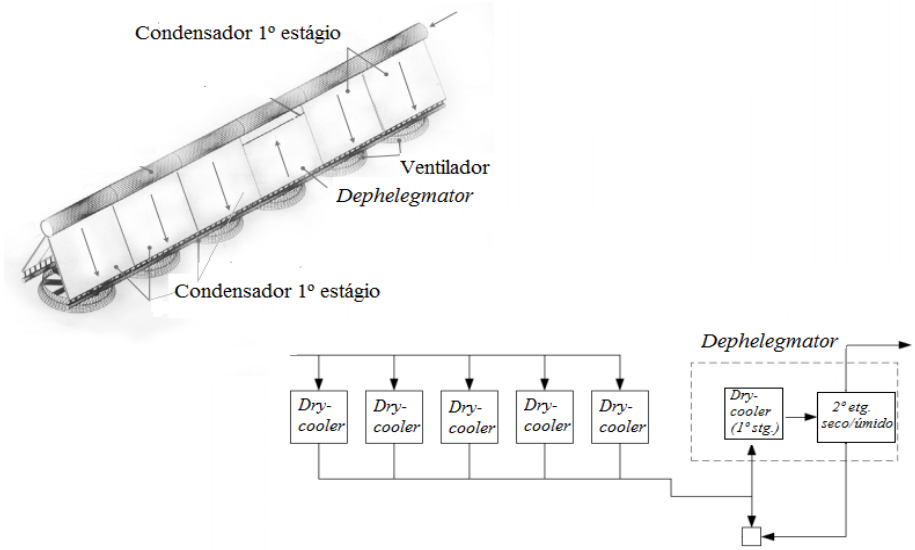

Figura 34 - Resfriamento híbrido *dry/wet dephelegmator*

(Fonte: REUTER *et al*, 2013)

O modo de funcionamento do segundo estágio pode ser controlado em resposta as alterações das condições ambientais. Durante períodos de baixa temperatura ambiente, quando o resfriamento do ar é suficiente, o segundo estágio é operado a seco; durante períodos mais quentes, água fria é pulverizada sobre os tubos lisos e o segundo estágio é operado como um condensador evaporativo (SHI *et al*, 2014). De forma ilustrativa, a Figura 35 apresenta a configuração do segundo estágio proposto pela tecnologia HDWD.

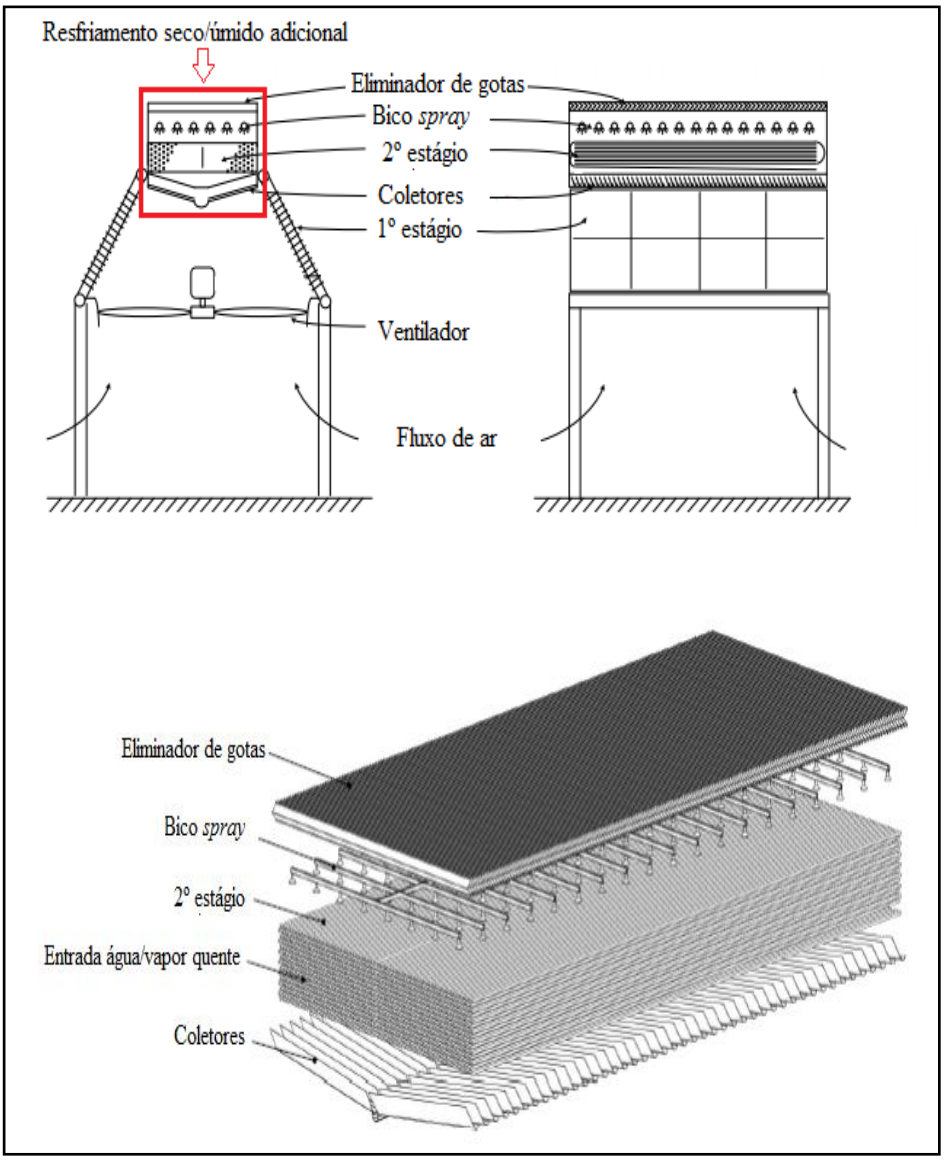

Figura 35- Configuração do segundo estágio proposto pela tecnologia HDWD.

(Fonte: REUTER *et al*, 2013)

Segundo o Electric Power Research Institute (2016), e visando melhorar o desempenho térmico de sistemas de resfriamento a seco, esta tecnologia apresenta o potencial de incrementos superiores a 10% no desempenho dos *air-coolers* convencionais durante períodos de temperatura elevada, consumindo menos água do que outros métodos alternativos. Além disso, segundo as pesquisas, consomem significativamente menos água do que outros sistemas de resfriamento evaporativo. Do ponto de vista em análise, torna-se uma tecnologia interessante com fins de pré-resfriar a água quente de entrada de sistemas de resfriamento evaporativo, obtendo-se a minimização do consumo de água de reposição (*make-up*) através da minimização da evaporação. Por outro lado, por operar,

eventualmente, com sistema de água fria para resfriamento evaporativo, apresenta gastos energéticos adicionais e possíveis custos extras de manutenção de bombas e peças operacionais.

Em março de 2016, a EPRI, em nota, divulgou que a equipe do projeto HDWD realizou um estudo abrangente na literatura e pesquisa de patentes, onde desenvolveram um modelo de desempenho, realizando análises detalhadas do projeto teórico. Os mapas de desempenho do HDWD foram produzidos e apresentados onde se propôs três configurações diferentes. Os experimentos foram conduzidos e novos projetos foram apresentados e descritos, juntamente com uma análise econômica. Com isso, o próximo passo é levar o conceito estudado e desenvolvido para o campo de atuação, onde possa ser projetado por empresas especializadas, mostrando que o projeto apresenta viabilidade econômica (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI), 2016).

Em busca de conceitos tecnológicos avançados com potencial redução de consumo de água em refinarias, os sistemas híbridos apresentam-se como alternativa bastante atrativa, principalmente em lugares com escassez hídrica. Na Tabela 7 estão dispostos os critérios e a avaliação da implementação de sistemas híbridos para resfriamento associado aos fatores de economia de água de reposição (*make-up*).

Tabela 7 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água - Sistemas híbridos

Critérios	Avaliação
Economia de água de reposição (*make-up*)	* até 75% com uso de termossifões; * até 41% com utilização de *air-coolers*
Desvantagens	* Custos adicionais de manutenção e operação do equipamento; *Aumento do consumo energético; *Altos custos de implementação.

Vantagens	* Grande redução no consumo de água de reposição (*make-up*)*;* *Vapor d'água menos visível, devido à redução da evaporação (ao longo de rodovias, aeroportos e, próximo a áreas residenciais, há restrições à presença de "fumaça"); *Podem ser integrados a sistemas de resfriamento já existentes; * Podem ser instaladas várias unidades se economias de água adicionais forem necessárias.

4.2. TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO NO CONSUMO DE ÁGUA INTERNAS AS TORRE DE RESFRIAMENTO

As áreas-chave para obtenção de maiores oportunidades de economia no consumo de água com tecnologias internas as torres de resfriamento são:

• Automação da velocidade de ventiladores;
• Automação e ajuste do ciclo de concentração;
• Utilização de venezianas (*louvers*);
• Melhoria do *design* dos eliminadores de gotas;
• Resfriamento híbrido *Wet/dry*;
• Resfriamento *Dew/point*;
• Uso de trocador de calor com ventilador auxiliar;
• Condensação em estruturas porosas- uso de termossifões.

4.2.1. Automação da velocidade de ventiladores

Na concepção do projeto das torres de resfriamento, as refinarias compilam os dados de variação de temperatura e umidade do ar da região de instalação, para que possam fornecer água suficientemente fria para as unidades de processo, mesmo nos dias mais quentes do ano. Os ventiladores apresentam como função garantir o fluxo de ar

através da torre de resfriamento maximizando a troca térmica. São eles os responsáveis pela movimentação do ar que irá resfriar as células de evaporação de água da torre. Os itens a serem observados na especificação do ventilador em um projeto de torre de resfriamento são: vazão de ar, pressão estática, consumo de energia, nível de ruído e materiais resistentes a umidade e corrosão (PINHEIRO, 2016).

É comum que torres forneçam água mais fria do que o necessário para os processos de resfriamento de fluidos, gerando gastos desnecessários de energia e de água para tal. Além disso, projetos superdimensionados submetem a torre a resfriar água além do necessário, podendo provocar variações no processo e comprometer a produtividade. Neste sentido, a instalação de sensores de temperatura no ponto de saída de água da bacia da torre associado a um inversor de frequência (malha de controle) nos rotores dos ventiladores das torres têm resultado em grandes reduções de consumo de água e energia. Os inversores de frequência variam a rotação dos ventiladores de forma a obter-se o melhor ponto de operação da torre de resfriamento. De forma automatizada, regula-se a velocidade do ventilador da torre, controlando-se a principal variável de todo o processo: a temperatura de saída da água. Sendo assim, por meio de programação, permite-se que o ventilador use o mínimo da energia necessária para que a água aquecida do retorno dos processos saia da bacia da torre resfriada a uma temperatura máxima desejada, restringindo-se a troca de calor àquela estritamente necessária aos processos nos trocadores à jusante. Com isso, os inversores de frequência assumem papel fundamental para a economia de energia e água e em torres de resfriamento, visto que os processos de evaporação são otimizados. Além disso, são de fácil instalação e adaptação em projetos que se encontram em operação. Através do sensor de temperatura instalado na saída de água resfriada da torre é possível programar a temperatura desejada da água de condensação conforme projeto e em função das variações da temperatura de bulbo úmido externa durante o ano (dias um pouco mais frios, período noturno e principalmente no inverno), reduzindo a rotação dos ventiladores da torre. Por trabalharem em função da temperatura do bulbo úmido, utilizam menores rotações nos períodos noturnos e de inverno (mais secos e frios) proporcionando ao restante do ano sobra de capacidade. De acordo com Emerson Vier (2016) coordenador de vendas da Danfoss, em entrevista, relatou que com inversores de frequência é possível ter um controle de forma gradual, “pois sem eles o sistema fica ligado direto, mesmo quando não é necessário fazer o resfriamento da água controlando a velocidade dos motores elétricos. Consequentemente, tem-se o controle da vazão dos ventiladores e,

assim, um sistema equilibrado e sem gastos desnecessários". Adicionalmente, Tiago Eorendjian (2016), engenheiro e superintendente técnico da Körper, complementou dizendo "com o inversor é possível alcançar menor consumo de energia, menor nível de ruído e menor consumo de água. Durante a noite, com a temperatura mais amena, pode-se proporcionar às torres menor velocidade, menor consumo energético e menor nível de ruído", explica Eorendjian.

Segundo Caio Cesar Benvenuto de Carvalho (2016), do departamento de vendas automação HVAC da WEG, além da diminuição do consumo de energia, a tecnologia dos inversores de frequência, apresenta grande economia de água, podendo-se obter uma redução de 15% a 30% no consumo (PINHEIRO, 2016). Para alcançar porcentagens elevadas de economia dessas variáveis e otimizar com a melhora de rendimento do processo, o motor que atua em conjunto com o inversor, também deve ser diferente dos modelos padrões de mercado, por possuir um rendimento mais elevado. A correta combinação de motor e inversor de frequência apropriados para tal aplicação, certamente irá gerar resultados satisfatórios. Sendo assim, com a implementação do inversor de frequência e reconhecimento destas variáveis, o sistema ajusta o conjunto motor/ventilador para fornecer ao processo somente o exigido para a aplicação, resultando na redução do consumo de energia elétrica, aumento da vida útil do motor e expressiva diminuição de água de evaporação (REVIMAQ, 2015). Na Figura 36 é apresentado um esquema de utilização de inversores de frequência em torres de resfriamento.

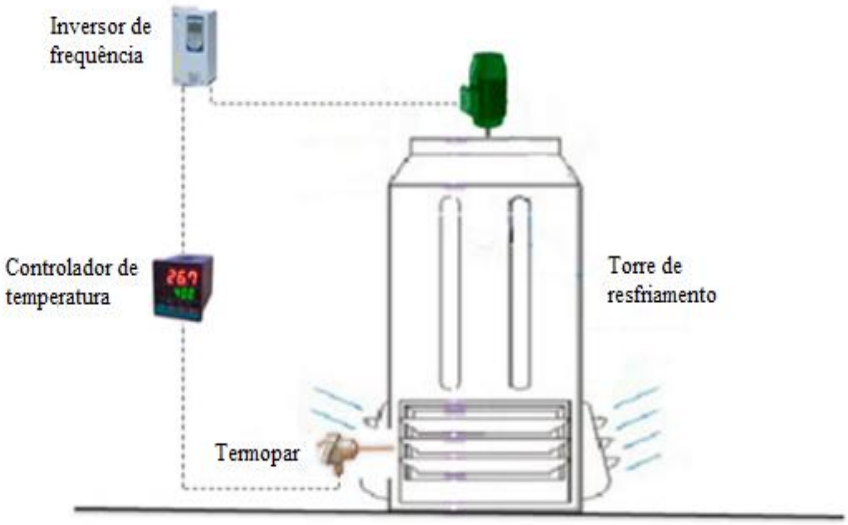

Figura 36- Esquemática de utilização de inversores de frequência em torres de resfriamento. (Fonte: Adaptado de REVIMAQ, 2015)

A exemplo da refinaria A supracitada nas figuras 2, 16 e 30, estudos simulados em 2015 avaliaram o perfil climático do local onde fica instalada a maior torre desta refinaria. Na simulação ficou evidente que variações de perfis climáticos registradas ao longo do dia e em diferentes estações do ano propiciam oportunidades de redução no consumo de água de reposição (*make-up*) pela diminuição da evaporação (Figura 37). Desta forma, ao explorar as diferentes temperaturas ambientes e umidades relativas dos perfis anuais podem trazer um incremento médio comparativo de consumo de água na torre estudada de cerca de 15% (114 m^3/h). Neste caso, a automação da regulagem dos ventiladores, ou a redução do uso de células (ventiladores) poderiam promover a redução no consumo de água em percentuais semelhantes em situações identificadas de menor temperatura ambiente e/ou de maior umidade do ar e sem impactos as demandas de carga térmica do processo de resfriamento (VEIGA, 2016). Estudos específicos para identificação de cenário semelhante ao descrito anteriormente deve ser conduzido para cada torre das diferentes refinarias.

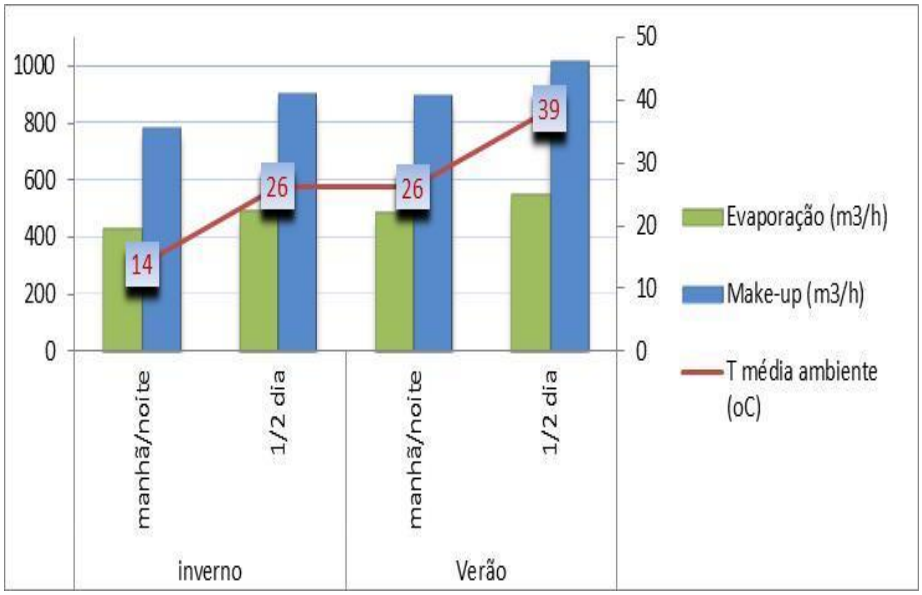

Figura 37 - Variação do consumo de água em uma das torres da refinaria A, em função da temperatura média ambiente.

(Fonte: VEIGA, 2016)

Os inversores de frequência proporcionam vários benefícios e vantagens ao usuário. Na Tabela 8 estão dispostos os critérios e a avaliação da implementação desta metodologia de controle em torres de resfriamento associado aos fatores de economia de água de reposição (*make-up*).

Tabela 8- Avaliação de tecnologias para redução de consumo de água- por meio de inversor de frequência

Critérios	**Avaliação**
Economia de água de reposição (*make-up*)	15% a 30%
Desvantagens	* Custos de manutenção
Vantagens	*Economia de água; *Economia de energia elétrica; * Implantação extremamente fácil; *Baixo custo de implementação; *Rápido retorno do investimento; *Aplicável a qualquer modelo de torre de resfriamento que use ventiladores em sua constituição; *Mantêm processo uniforme, com possíveis ganhos de qualidade e manutenção.

4.2.2. Automação e otimização do ciclo de concentração

Como mencionado anteriormente, uma porção de água é descartada do sistema de resfriamento, para o controle de sedimentos e sais presentes na água de recirculação. Este *blowdown* também conhecido como purga da torre é utilizado para controle da concentração de sais que ocasionam incrustações, depósitos e corrosões ao longo dos trocadores de calor, interferindo na eficiência do sistema de resfriamento. Por segurança e comodidade, as torres operam muitas vezes com ciclos de concentração menores que os permitidos para o sistema de resfriamento em uso, consumindo um volume de água de reposição muito superior ao necessário. Além disso, existem outros fatores que complementam o desperdício de água por purgas excessivas, tais como: a configuração incorreta dos analisadores dos parâmetros de monitoramento dos ciclos de concentração; a desassociação do tratamento de água da estação com o programa de tratamento de água para resfriamento e a inadequada operação e deficiência de práticas de manutenção (descontrole do nível de água na bacia ocasionando transbordamento, problema no

controle da abertura da válvula da purga) (SENEVIRATNE, 2007). Para a melhoria do controle da purga, e consequentemente redução no consumo de água de reposição (*make-up*), utiliza-se a automação e operação em modo contínuo do sistema.

A instalação de medidores de vazão da água de reposição e purga, como também analisadores *online* dos parâmetros de monitoramento do ciclo de concentração (condutividade, cloretos entre outros), permitirá que o operador acompanhe o volume de água que está sendo consumido pelo sistema de resfriamento, além de verificar se o ciclo de concentração está adequado ao ponto ótimo pré-determinado (GODIN, 2013). Todos os três sinais (vazão de reposição, vazão da purga e concentração de monitoramento da purga) precisam ser alimentados para um ponto de dados central, de modo que os operadores possam verificar remotamente o desempenho do sistema (SENEVIRATNE, 2007). Adicionalmente, utiliza-se a operação da purga em modo contínuo. Em geral, torres que possuem controles automáticos de condutividade ou outros sais na água de resfriamento, tipicamente descartam água sempre que este parâmetro atinge um valor especificado, o que conduz a grandes flutuações nas concentrações, resultando em desperdício de água (GODIN, 2013). O melhor método para operar em modo de purga contínua é manter o parâmetro de monitoramento até um limite de controle superior. Para isto, utiliza-se um *software* estatístico de controle de processo (fornecido pelas empresas tratadoras de água de resfriamento), permitindo alcançar maior precisão. Os limites de controle superior e inferior são divididos em um, dois e três desvios padrão. O objetivo é controlar o processo com um desvio padrão, ou seja, com menor oscilação e consequentemente economia e equilíbrio no consumo de água de reposição (*make-up*) (SENEVIRATNE, 2007).

Com intuito de identificar a oportunidade de economia de água com a determinação do ponto ótimo do ciclo de concentração em refinarias, foram simulados estudos com 11 refinarias nacionais. Os dados iniciais de ciclos de concentração das torres das refinarias estão definidos na Figura 38.

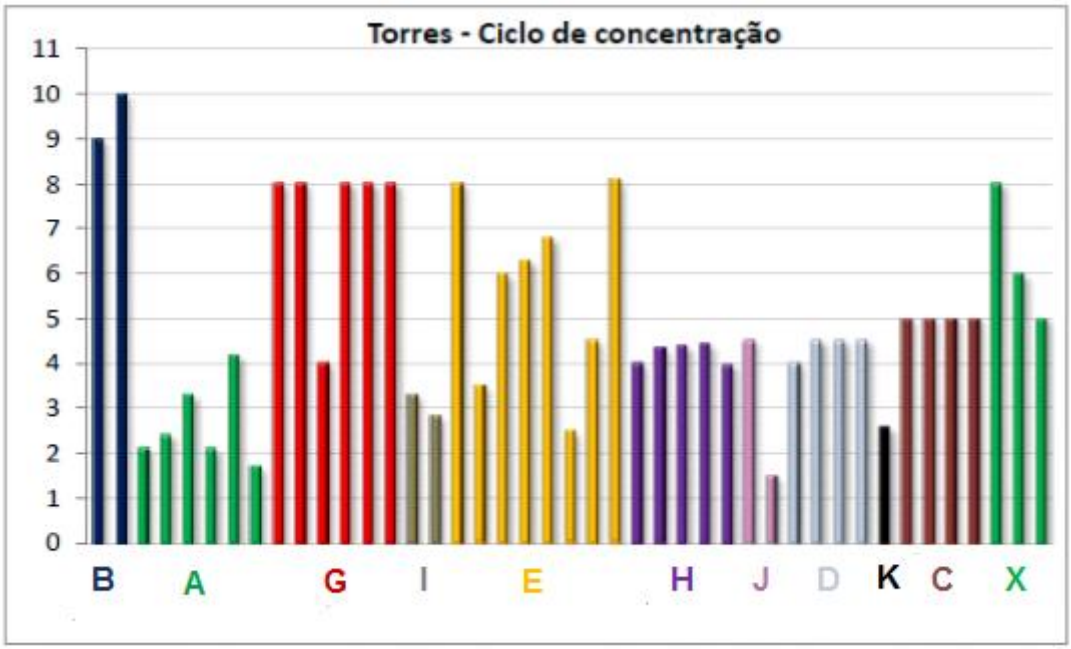

Figura 38 - Ciclo de concentração em sistemas de resfriamento.

(Fonte: VEIGA, 2016)

Os estudos foram conduzidos considerando como base de cálculo o ciclo de concentração 5. Este ciclo é considerado como ponto ótimo em virtude das operações em ciclos de concentração superiores apresentarem pouca redução de consumo de água de reposição (*make-up*), justificando a operação em ciclos maiores apenas em lugares com grande escassez hídrica, e/ou quando a qualidade da água de reposição é elevada (VEIGA, 2016). A Figura 39 mostra a relação da vazão de reposição *versus* ciclo de concentração. Observa-se que para ciclos de concentração maiores do que 5, o ganho na redução da vazão de reposição é pouco relevante. Desta forma, o ciclo de concentração 5 é considerado um ciclo economicamente viável.

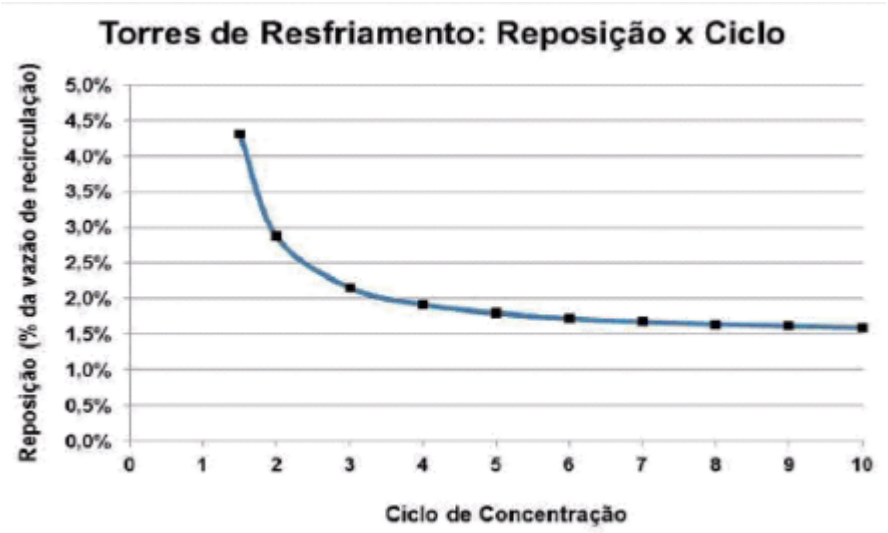

Figura 39 - Relação entre o ciclo de concentração e a vazão de reposição.

(Fonte: VEIGA, 2016)

Para as refinarias que operam em ciclos inferiores a 5, o ajuste associado a automação do ciclo de concentração confere um grande potencial em economia de água de reposição. Os dados do estudo realizado simulando o aumento do ciclo de concentração para 5 das refinarias encontram-se dispostos na Figura 40.

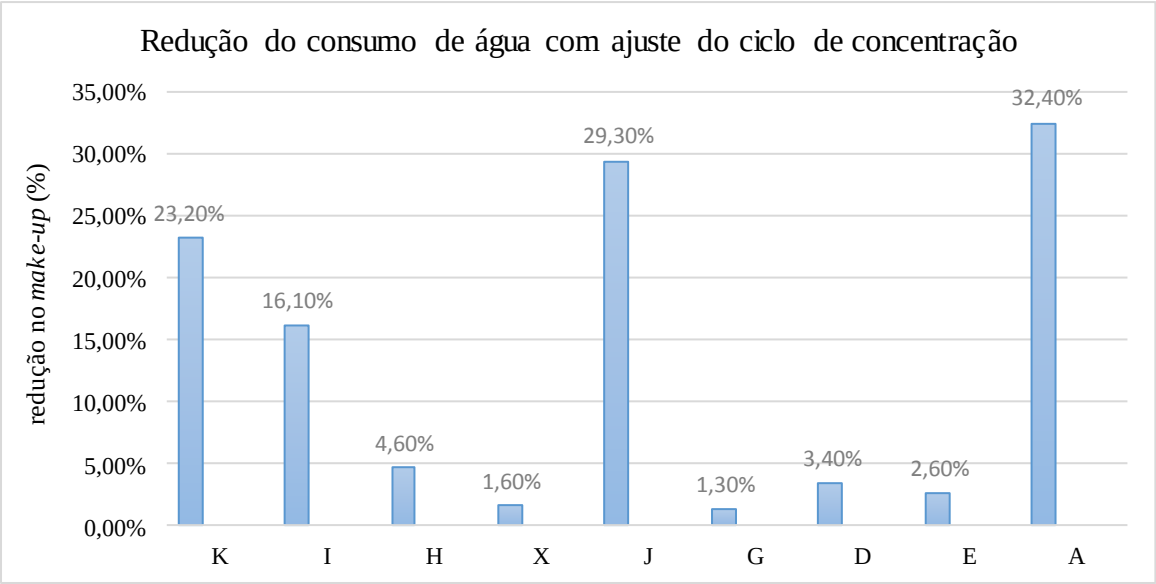

Figura 40 - Redução do consumo de água com ajuste do ciclo de concentração para 5.

(Fonte: Adaptado de VEIGA, 2016)

As maiores oportunidades de redução de consumo de água de reposição foram identificadas para as refinarias A, J, K, e J, somente pela alteração do ciclo de concentração. No caso da refinaria A, a otimização do ciclo de concentração pode representar ganhos expressivos de água de reposição, podendo chegar a 33 % da demanda atual; considerando o reajuste para ciclo 5 das refinarias que operam em ciclos inferiores, acarretaria em uma economia de cerca de 630 m^3/h de água de reposição (de 6.651 m3/h para 6.021 m3/h). Este resultado representa uma redução no consumo de água de 10% da demanda da vazão global de água nas refinarias (VEIGA, 2016).

Desta forma, fica evidente o potencial de economia de água de reposição (*make-up*) com a implementação da automação e otimização dos ciclos de concentração. Na Tabela 9 estão dispostos os critérios e a avaliação da implementação desta tecnologia em torres de resfriamento.

Tabela 9 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água - Automação e otimização dos ciclos de concentração

Critérios	**Avaliação**
Economia de água de reposição (*make-up*)	*Até 33% (podendo variar em cada estudo de caso)
Desvantagens	* Tempo de implementação do *software*; * Manutenção das sondas de monitoramento; * Não existem dados genéricos de implementação, devendo realizar um estudo prévio para adequação das variáveis (Ciclo de concentração, parâmetro de monitoramento, qualidade da água, entre outros)

Vantagens	
	*Podem obter expressiva economia de água de reposição (*make-up*); *Automação do sistema, evitando purgas excessivas e desperdício de produtos tratadores de água; * Economia de mão de obra; *Aplicável a qualquer modelo de torre de resfriamento; *Mantem processo uniforme, com ganhos de qualidade e manutenção.

4.2.3. Utilização de venezianas (*louvers*)

Outra alternativa para economia de água em processos de resfriamento é a utilização de grelhas de entrada de ar (*louvers*). Os *Louvers* são venezianas que eliminam o respingo de água para fora da torre (efeito *splash-out*) além de impedir a entrada da luz solar na bacia proporcionando a diminuição da proliferação de microrganismos. Segundo Pinheiro (2016) as utilizações de venezianas especiais na entrada do ar tratam-se de tendências europeias e americanas já muito utilizadas no Brasil. Estes *louvers* eliminam 100% da perda por *splash-out*, bloqueiam 100% da luz solar e controlam a entrada de sólidos dispersos no ar, eliminando a proliferação de microrganismos e acúmulo de sais que propiciam incrustações, corrosões e, consequentemente, queda na eficiência de troca térmica e desequilíbrio no tratamento e manutenção de águas nas bacias das torres de resfriamento. Essa diminuição de algas e sais dissolvidos reduz a água descartada através de purgas, consome menor quantidade de produtos químicos e biocidas para o tratamento da água, além de exigirem menores intervenções para limpezas e manutenções nas torres (PINHEIRO, 2016).

Com foco em eficiência energética e economia de água em projetos de torres de resfriamento, o Departamento Nacional de Projetistas e Consultores (DPCN) da Abrava (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento) participou da 6º edição da *Greenbuilding* Brasil levando para o congresso a palestra “Otimização em sistemas com torres de resfriamento de água” em agosto de 2015. O presidente do DNPC, o Eng.º Ricardo Gibrail, discutiu a importância do foco em sistemas que reduzam o consumo de água em torres de resfriamento destacando, dentre as alternativas de economia apresentadas, a utilização dos *louvers* (MARTINS, 2015). A

Figura 41 mostra o uso das venezianas em torres de resfriamento.

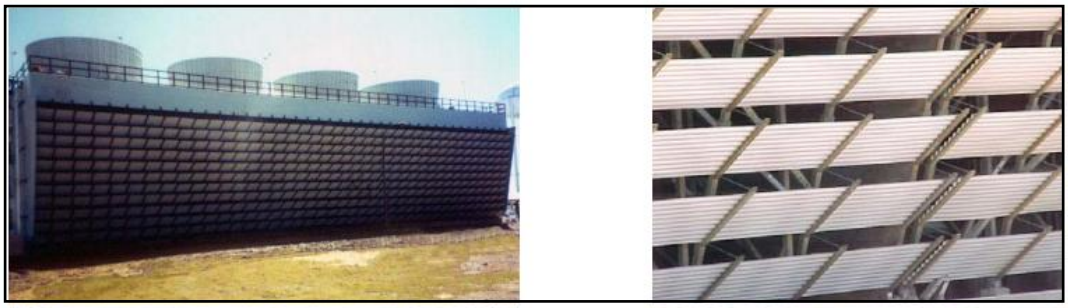

Figura 41 - Utilização de *Louvers* sem torres de resfriamento

(Fonte: Adaptado de *www.coolingtowerdepot.com*)

Na Tabela 10 estão dispostos os critérios e a avaliação da implementação de louvers em torres de resfriamento; não foram encontrados simulações ou dados na Literatura que evidenciassem o percentual de economia de água de reposição (*make-up*) com a implementação desta tecnologia.

Tabela 10 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água- utilização de *Louvers*

Critérios	**Avaliação**
Economia de água de reposição (*make-up*)	*Não referenciado
Desvantagens	* Custos de manutenção; * Barreira física para fluxo de ar; *Não há simulações que evidenciem os ganhos nominais em economia de água.

Vantagens	* Economia de água, com minimização de 100% do efeito *splash-out*; *Economia de água através da diminuição das purgas por aparecimento de algas; *Menores gastos com produtos químicos e biocidas para tratamento de água; *Menores intervenções para limpezas e manutenções nas torres; * Fácil implementação; *Aplicável a qualquer modelo de torre de resfriamento úmida.

4.2.4. Melhoria do *design* dos eliminadores de gotas

Os eliminadores de gotas são dispositivos que visam minimizar o arraste de gotas de água para o exterior da torre de resfriamento. Tanto nas torres de contracorrente quanto nas de correntes cruzadas, o fluxo de ar que atravessa o enchimento arrasta água na forma de gotículas (*drift*). Este arraste, propicia perda adicional de água junto com uma parcela dos produtos químicos utilizados no condicionamento da água circulante, além de causar uma chuva nas imediações da torre (GODIM, 2014). Os eliminadores de gotas são utilizados justapostos ao enchimento e ao lado da saída do ar das torres de resfriamento; seu funcionamento baseia-se na mudança de direção do escoamento do ar, onde a força centrípeta resultante separa as gotas de água do ar, depositando-as na superfície do eliminador. A água acumulada, forma um filme na superfície do eliminador que escorre de volta para a bacia da torre de resfriamento (SAMPAIO, 2010). Os eliminadores de gotas têm, ainda, uma função secundária que é a uniformização do escoamento de ar através do enchimento da torre; este provoca uma resistência à passagem do ar o que ocasiona uma pressão uniforme no espaço entre o eliminador e o ventilador. Esta uniformização da pressão produz um escoamento de ar regular através do enchimento da torre (SAMPAIO, 2010). A Figura 42 apresenta um modelo de eliminador de gotas utilizado em torres de resfriamento.

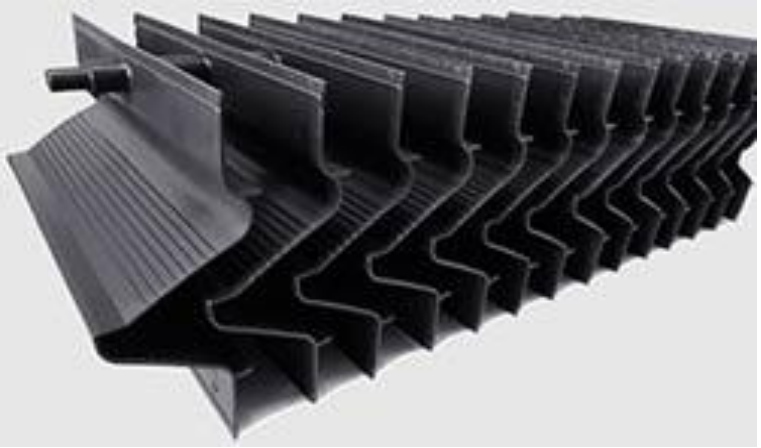

Figura 42- Modelo de eliminador de gotas.

(Fonte: *disponível em www.termoparts.com.br*)

Os eliminadores de gotas, quando não utilizados, podem acarretar em perdas por arraste na ordem de 2% a 3% de água de recirculação; estas perdas podem atribuir ao sistema maiores gastos com produtos químicos, maior incidência de incrustações e corrosões acarretando em periódicas manutenções e limpeza nos equipamentos, além de propiciar menor eficiência de troca térmica e maior consumo de água de reposição (*make-up*). Os eliminadores de gotas não são capazes de recuperar toda água de arraste. Contudo, se bem projetados conseguem perdas de água inferiores a 0,02% da água de recirculação (SAMPAIO, 2010). Nos últimos anos, visando menor consumo de água em torres de resfriamento, os fabricantes de eliminadores de gotas investiram em desenvolvimento tecnológico e aprimoraram a concepção dos projetos. Segundo Pinheiro (2016), as evoluções no *design* dos eliminadores de gotas, resultaram em reduções por arraste que normalmente eram da ordem de 0,1% da vazão de água circulante, e hoje podem chegar a 0,01% da mesma vazão. Em complemento, Ashrae (2008) acrescenta que um eficiente projeto de eliminador de respingos pode reduzir as perdas por arraste para faixa de 0,001 a 0,005% da água de recirculação. Na Tabela 11 estão dispostos os critérios e a avaliação da implementação de novos projetos de eliminadores de gotas em torres de resfriamento associado aos fatores de economia de água de reposição (*make-up*).

Tabela 11- Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água - Novos projetos de eliminadores de gotas.

Critérios	Avaliação
Economia de água de reposição (*make-up*)	* Pode reduzir as perdas por arraste para faixa de 0,001 a 0,005% da água de recirculação.
Desvantagens	* Custos de manutenção e operação do equipamento; *Pode haver perda de carga devido à resistência do fluxo de ar contra o fluxo de água, exigindo uma maior potência dos ventiladores; * Devido ao local de colocação (justaposto ao enchimento da torre) o sistema de distribuição de água não é acessível para manutenção durante a operação.
Vantagens	*Redução no consumo de água de reposição (*make-up*); *Equilíbrio do tratamento da água clarificada, pois há menores perdas de produtos químicos e bactericidas; *Melhoria do ambiente ao redor da torre, por não haver respingos excessivos.

4.2.5. Resfriamento híbrido *wet/dry*

A tecnologia *wet/dry* é uma torre de resfriamento evaporativa combinada com um trocador de calor seco interno localizado acima dos eliminadores de gotas. A presença do trocador de calor a seco traz como principais vantagens, a recuperação da água perdida por evaporação, e consequentemente, grande economia no consumo de água de reposição (*make-up*), além de não serem observados pluma de vapor d´água, o que torna-se bastante atraente em locais com restrições da presença de nuvem de vapor d'água (ao longo de rodovias, aeroportos e próximo a áreas residenciais) (ASVAPOOSITKUL *et al,* 2014). A Figura 43 exemplifica uma torre de resfriamento com tecnologia *wet/dry*.

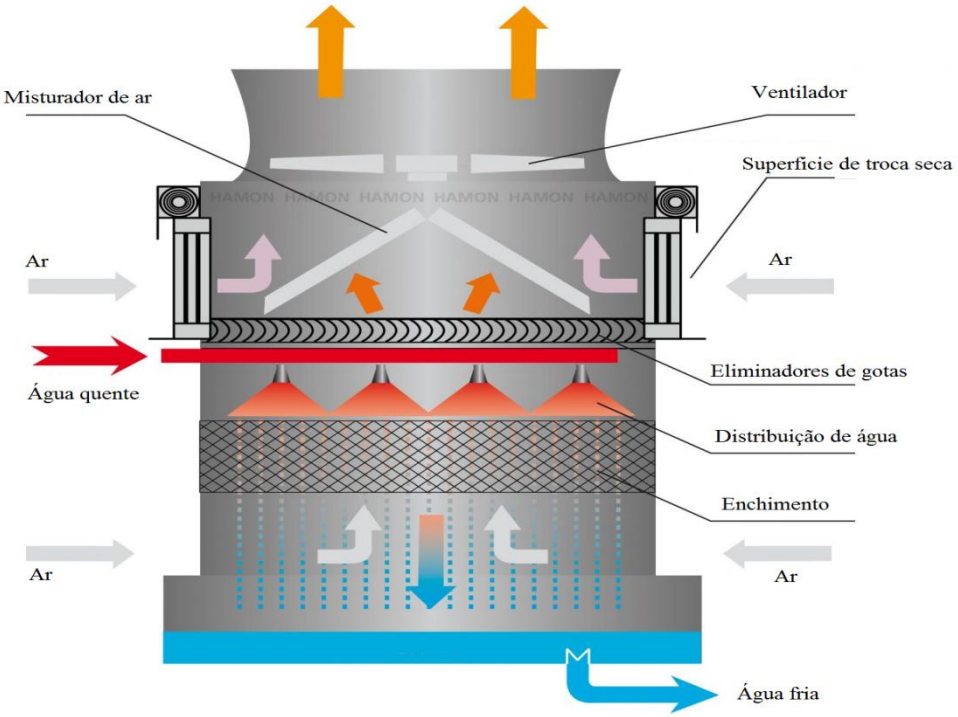

Figura 43 - Torres de resfriamento com tecnologia wet/dry.

(Fonte: Adaptado de *www.hamon.com.br*)

Dentro deste cenário a Evapco (2014) desenvolveu o modelo inovador de resfriamento *wet/dry*, o Eco-WD. Diferente do sistema *wet/dry* apresentado na Figura 43, no Eco-WD os sistemas secos podem funcionar de maneira autônoma, mostrando expressivos ganhos energéticos, operacionais e principalmente, no consumo de água. Desta forma, o Eco-WD funciona em modo úmido e seco durante os meses mais quentes, e no modo seco em dias mais frescos. No modo úmido e seco, água quente é inicialmente resfriada por meio de trocadores de calor a ar e posteriormente resfriada através de feixes de trocadores de calor pulverizados com água tratada. No modo seco, o sistema de pulverização é desligado, e o sistema não utiliza água para resfriamento evaporativo (BUSHART, 2014). A Figura 44 apresenta a tecnologia Eco WD desenvolvida pela Evapco.

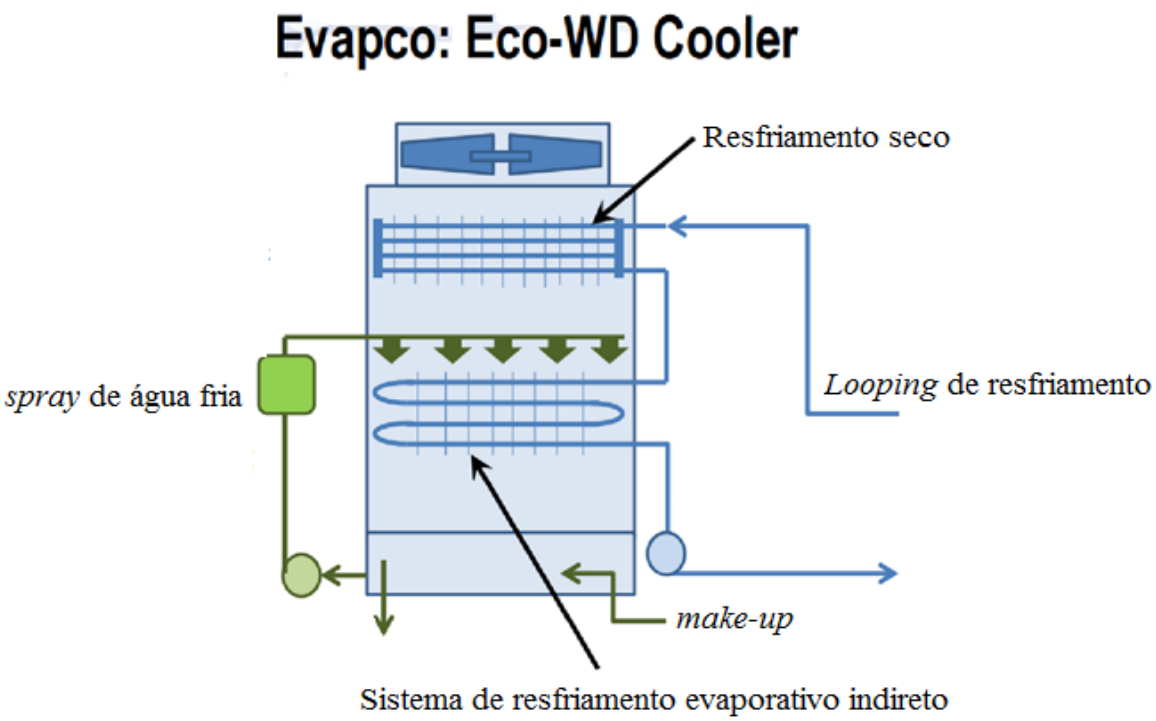

Figura 44 - Tecnologia Eco-WD

(Fonte: Adaptado de NOBLE *et al*, 2014)

Com o intuito de investigar tecnologias capazes de trazer economias expressivas em consumo de água, o Water Research Centre (WRC) em colaboração com o Electric Power Research Institute (EPRI) instalou em sua planta na Georgia, uma unidade piloto do Eco-WD. A investigação contou com dados de desempenho e operação sob cargas variáveis e condições climáticas durante todo o ano, avaliando a capacidade do sistema de resfriamento em conservar água, energia e reduzir a visibilidade da pluma de vapor d´água (BUSHART, 2014). O programa de testes durou nove meses e os dados coletados no WRC revelaram que o Eco-WD conseguiu economias de água significativas (média de 38,1%, ± 16,0%), mesmo em temperaturas ambiente acima de 27°C (Electric Power Research Institute (EPRI), 2015). Os resultados dos testes de velocidade do ventilador indicaram que a economia de água aumentou quando a temperatura do bulbo seco ambiente diminuiu. Isto porque a diferença entre a temperatura de bulbo seco ambiente e a da água de entrada do Eco-WD aumentou. A diferença nestas temperaturas conduz o processo, ou seja, é mais fácil transferir calor das serpentinas de resfriamento para o ar ambiente quando esta diferença de temperatura é elevada. A unidade piloto também mostrou funcionar com êxito em modo seco em várias ocasiões sob diferentes condições.

Durante esta operação, o consumo de água foi zero (nenhuma água foi evaporada). A Figura 45 apresenta o módulo piloto do Eco-WD instalado na WRC.

Figura 45 - Protótipo do Eco-WD instalado na WRC, Georgia.

(Fonte: Adaptado de NOBLE *et al*, 2014)

Dentro da perspectiva de inovações tecnológicas capazes de reduzir o consumo de água em torres de resfriamento em refinarias, os desafios propostos para a tecnologia *wet/dry* é a investigação da instalação de sistemas secos no interior de torres úmidas existentes. Desta forma, a evaporação que representa o maior percentual de perda de água no processo de resfriamento seria compensada. Para as novas instalações, o híbrido *wet/dry* torna-se uma opção valiosa para implementação, em especial, nas localidades com escassez hídrica e com restrições quanto ao aparecimento de pluma de vapor d´água. Adicionalmente, apresenta-se como equipamento compacto, podendo ser instalados várias unidades de acordo com a potência de resfriamento exigido, além de poder atuar em sistemas híbridos, pré-resfriando a água quente de entrada na torre úmida, com menor consumo de água quando comparado ao sistema úmido convencional (item 4.1.3). A Tabela 12 dispõe os critérios e avaliação da utilização da tecnologia wet/dry em torres de resfriamento associado aos fatores de economia de água de reposição (*make-up*).

Tabela 12 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água - Tecnologia *wet/dry*.

Critérios	Avaliação
Economia de água de reposição (*make-up*)	* Média de 38,1%, ± 16,0% com o sistema Eco-WD
Desvantagens	* Não existem estudos com a introdução de sistemas secos em torres úmidas já existentes; *Não existem simulações do Eco-WD com dados reais e operacionais de refinarias.
Vantagens	*Redução no consumo de água de reposição (*make-up*); *Redução do consumo energético (Tecnologia Eco-WD); *Nenhuma, ou pouquíssima, pluma visível; *Equilíbrio do tratamento da água clarificada, pois a evaporação é minimizada; *Ganhos com manutenção de equipamentos (menores incrustações e corrosões); * Sistemas compactos; * Eficiência em troca térmica, pois apresenta todos os meios de troca de calor.

4.2.6. Resfriamento *dew/point*

A maioria das torres de resfriamento instaladas no mundo usam tecnologia de resfriamento evaporativo direto onde a corrente de água é resfriada a uma temperatura próxima da temperatura de bulbo úmido ambiente (Electric Power Research Institute (EPRI, 2013). Para abordar esta questão, o EPRI, em colaboração com o Gas Technology Institute (GTI) está investigando um conceito chamado de resfriamento *dew/point*; o objetivo desta tecnologia é tentar reduzir ainda mais a temperatura fria de retorno da água, explorando resfriamento evaporativo direto e indireto (BUSHART, 2014). Desta forma, a proposta para a tecnologia dew/point é a construção de canais secos entre os canais úmidos no enchimento da torre. Para isso, utiliza-se um material de enchimento de

paredes finas, explorando o resfriamento evaporativo no lado úmido do enchimento para resfriar o ar ambiente que passa no lado seco. Este ar “pré-resfriado”, é então utilizado para o resfriamento evaporativo por contato direto com a água (SHI *et al*, 2014). Este conceito, foi desenvolvido pelo Dr. Valeriy Maisotsenko, e é chamado de ciclo de Maisotsenko ou ciclo-M (M-*cycle*). O M-Cycle permite, através de um trocador de calor (enchimento) integrado, proporcionar o pré-resfriamento do ar no mesmo processo de resfriamento da água, sem necessidade de células de resfriamento externas (Electric Power Research Institute (EPRI, 2013)). O objetivo do projeto proposto pelo GTI e EPRI é utilizar o conceito do M-cycle para desenvolver um enchimento com pré-resfriamento integrado projetado para capturar até 20% da perda por evaporação em torres de fluxo cruzado e contracorrente (Electric Power Research Institute (EPRI), 2013). A Figura 46 apresenta o conceito da tecnologia dew/point aplicada a torres de resfriamento.

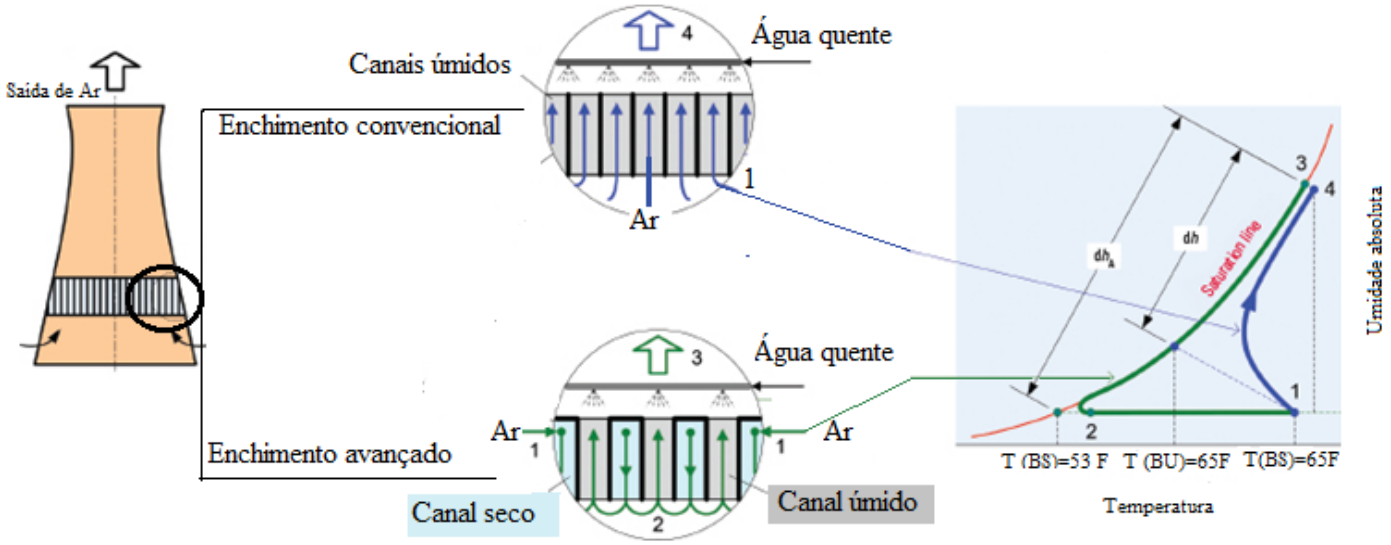

Figura 46- Conceito da tecnologia dew/point aplicada a torres de resfriamento.

(Fonte: Adaptado de SHI *et al*, 2014)

O diagrama apresentado na Figura 46 ilustra as diferenças teóricas na temperatura da água resfriada pelo processo convencional (linha azul 1-4) e pelo processo *dew/point* (linha verde 1-3). Observa-se que a temperatura da água fria produzida num ciclo convencional é limitada à temperatura do bulbo úmido do ar exterior, diferente do evidenciado para a tecnologia dew/point obtendo-se temperaturas menores (SHI *et al*, 2014).

Face ao exposto, a tecnologia *dew/point* oferece grande potencial para melhoria da

eficiência global das centrais térmicas das torres de resfriamento, através da diminuição da temperatura da água resfriada. As avaliações preliminares da tecnologia, indicaram que a utilização de enchimentos que permitem o pré-resfriamento do ar ambiente poderiam reduzir significativamente as perdas por evaporação e necessidades de água de reposição (*make-up*). Em 2012 foram iniciados o desenvolvimento do *desing*, modelagem e concepção da configuração do enchimento otimizado para maximizar o pré-resfriamento do ar de entrada em canais secos e, consequentemente, reduzir as perdas por evaporação. Em 2013, o EPRI realizou estudos experimentais em uma seção de torre de resfriamento com a concepção de enchimento proposta pelo GTI, objetivando quantificar as possíveis economias de água geradas com introdução da tecnologia *dew/point* (Electric Power Research Institute (EPRI), 2013). Foram avaliados os impactos gerados em consumo de água e energia com diferentes condições climáticas, além de investigar problemas de integração de sistemas e comparar custos e desempenho em relação a uma torre de resfriamento convencional tanto para aplicações de *retrofit* (adaptação a torres já existentes) quanto para novas construções. Em 2014, uma torre de resfriamento com seção de enchimento *dew/point* foi projetada para fornecer 0,1 MW de resfriamento e está submetida a testes em uma instalação certificada pela indústria (SHI *et al*,2014). Os dados do estudo ainda não foram divulgados pela GTI e EPRI.

Na Tabela 13 estão dispostos os critérios e avaliação da tecnologia dew/point em torres de resfriamento.

Tabela 13 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água - resfriamento dew/point

Critérios	Avaliação
Economia de água de reposição (*make-up*)	* Os testes não foram concluídos.
Desvantagens	*Os testes não foram concluídos para avaliar a viabilidade de implementação em torres de resfriamento.

Vantagens	*Espera-se redução no consumo de água de reposição (*make-up*), por meio da redução da evaporação; *Melhoria da eficiência do processo de troca térmica (água de recirculação mais fria); * Projeto destinado a adaptar a tecnologia em torres já existentes e novas construções; * Não utiliza equipamento extra para pré-resfriar o ar.

4.2.7. Uso de trocador de calor com ventilador auxiliar

O uso de ventilação auxiliar associado a um trocador de calor na parte superior de torres de resfriamento evaporativos é um projeto desenvolvido pela Shahid Beheshti University em colaboração com a Sh. Mofatteh Power plant no Iran (DEZIANI *et al*, 2015). A planta Sh. Mofatteh fica em Hamedan cuja unidade visa a geração e venda de energia. No período de 2004 a 2014, Hamedan passou pela pior crise hídrica da história onde teve a geração de energia reduzida para 50% da capacidade produtiva. Desta forma, a Shahid Beheshti University buscou estratégias para reduzir o consumo de água na Sh. Mofatteh Power plant, e os sistemas de resfriamento foram o foco do trabalho. O estudo experimental buscou projetar e simular condições de fluxo em torre de resfriamento de tiragem forçada (ventilador situado na entrada do ar) com trocador de calor e ventilador auxiliar. As variáveis de projeto foram os mesmos dados operacionais utilizados nos sistemas de resfriamento da usina Sh. Mofatteh:

- Temperatura da água na torre de resfriamento: 38,2 ° C.
- Temperatura da água de saída da torre de resfriamento: 27,8 ° C.
- A proporção da taxa de fluxo de água para a taxa de fluxo de ar: 1,692 (kg).
- Diferença de temperatura entre a entrada e saída de fluxo de água: 10,4 ° C.
- Temperatura de bulbo seco: 34 ° C.
- Temperatura de bulbo úmido: 22 ° C.
- Taxa de fluxo de massa de água: 28.500 m3 / h.

Na Figura 47 encontra-se um modelo de torre de resfriamento de tiragem forçada com trocador de calor.

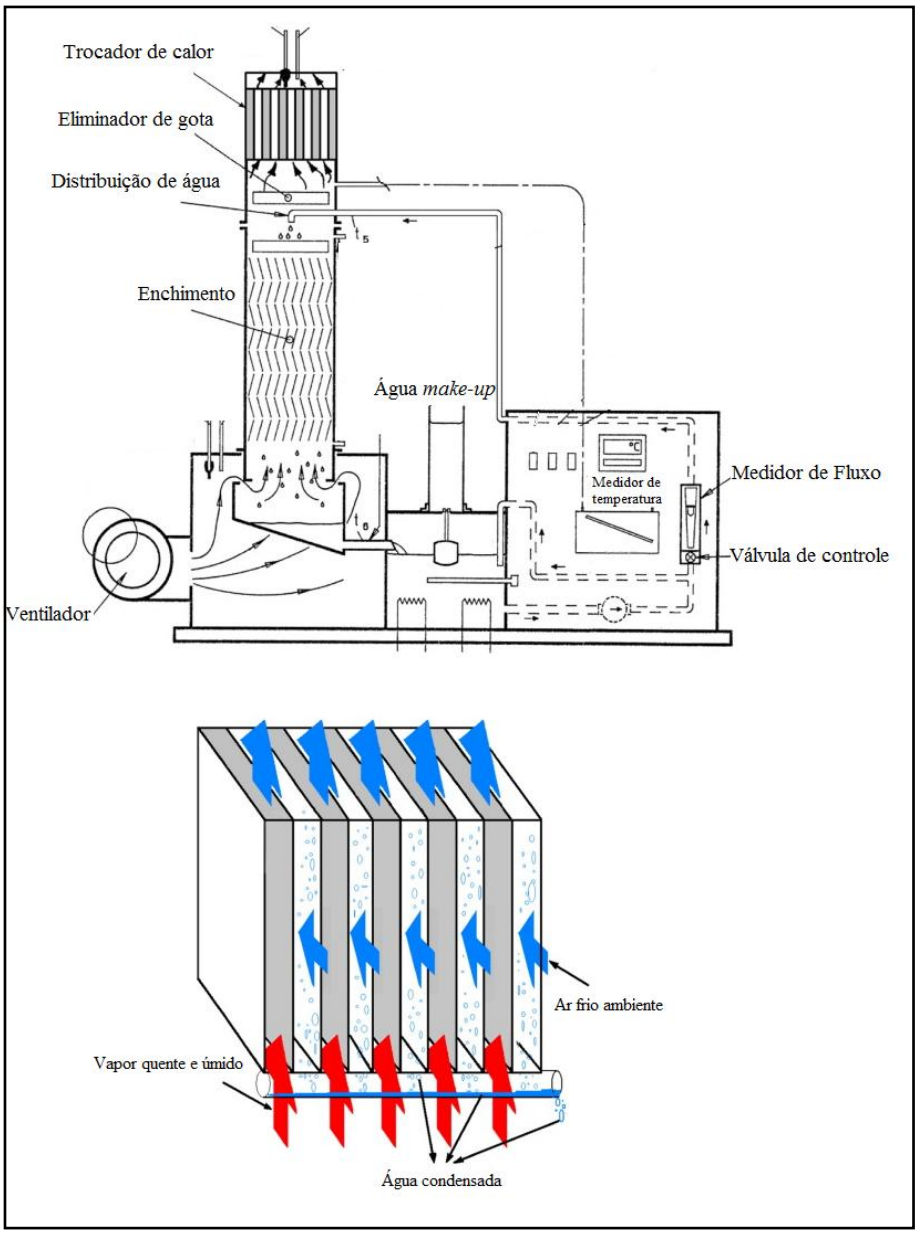

Figura 47 - Modelo de torre de resfriamento de tiragem forçada com trocador de calor.

(Fonte: Adaptado de Deziani *et al*, 2015)

Os estudos foram conduzidos com ventilação auxiliar localizada na posição lateral do trocador de calor. Este fenômeno propiciou uma superfície fria necessária para a condensação da água evaporada. Imagens do protótipo da torre resfriamento e da recuperação do condensado, encontram-se na Figura 48. Segundo Diziani *et al* (2015) ao utilizar ventilador auxiliar, a diferença mínima de temperatura de bulbo seco entre o ar ambiente e o ar quente úmido, para a recuperação de água evaporada, foi reduzido para

3°C. Com isso, de acordo com os dados experimentais, a taxa de recuperação de água evaporada com a implementação de trocador de calor associado a ventilador auxiliar é, tipicamente, cerca de 35%, dependendo das condições do ar ambiente (DEZIANI *et al*, 2015; POZOBOM, 2015). Considerando que o processo de evaporação corresponde a cerca 80% da vazão de água de reposição, pode-se obter incrementos em água de reposição (*make-up*) de aproximadamente 28% (VEIGA, 2010).

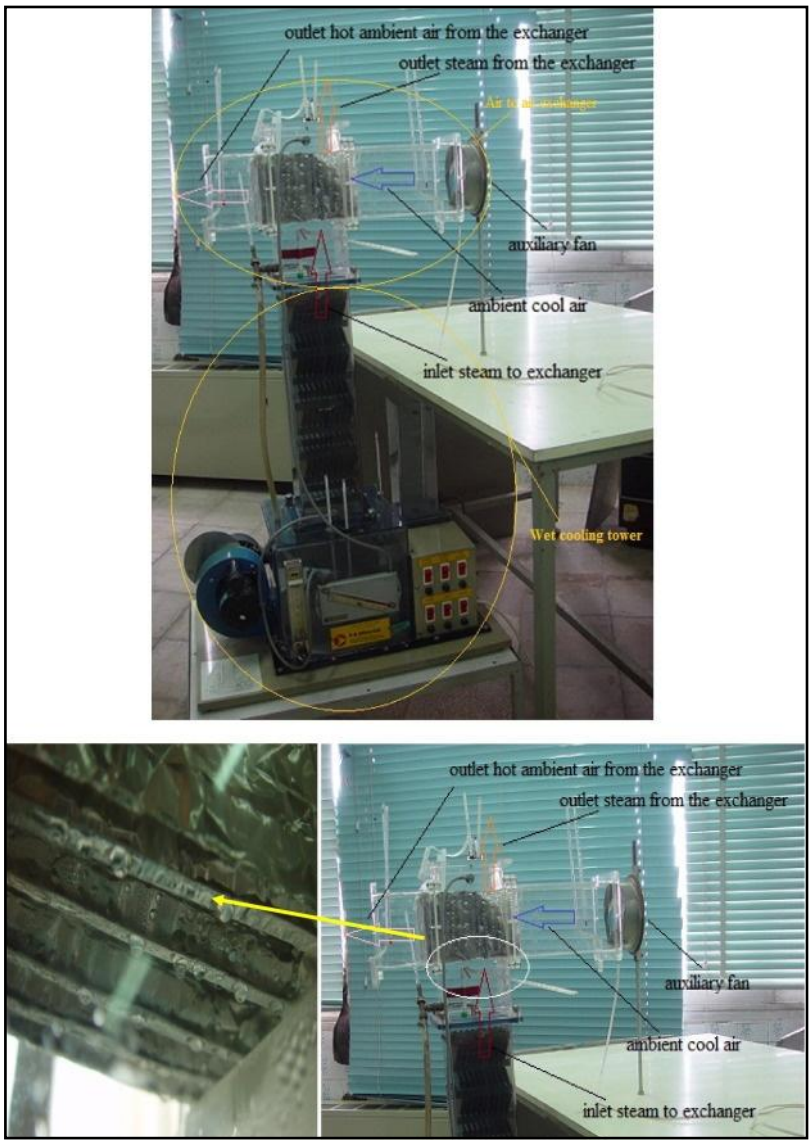

Figura 48- Imagens do protótipo da torre resfriamento desenvolvida e da recuperação do condensado.

(Fonte: Deziani *et al*, 2015)

É importante ressaltar que tratam-se de simulações em ambientes controlados (laboratório) que podem não representar de maneira fiel as variações climáticas ocorridas

ao longo do ano em plantas reais. Além disso, o protótipo utilizado apresenta proporções muito inferiores ao de um projeto real, o que pode super-dimensionar os ganhos em água de evaporação. Adicionalmente, a utilização de um ventilador auxiliar em sistemas de resfriamento ocasiona gastos energéticos extras, além de acarretar em todos os custos operacionais e manutenções periódicas de um equipamento a mais. Por outro lado, protótipos apresentam-se como motivação para estudos de caso específicos, como o da usina de Sh. Mofatteh. A tecnologia apresentada, aponta tendência favorável para recuperação de água de evaporação com a instalação de trocador de calor associado a um ventilador auxiliar. Novos projetos podem ser desenvolvidos considerando novos formatos de torres, trocadores de calor e variáveis de processo, que traz grande contribuição para o cenário de inovação, preservação e uso racional de água. Na Tabela 14 estão dispostos os critérios e avaliação da tecnologia de trocadores de calor associado a ventiladores auxiliares. Os dados de economia de água de *make-up* são os obtidos pelos ensaios experimentais.

Tabela 14 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água- Uso de trocador de calor com ventilador auxiliar

Critérios	Avaliação
Economia de água de reposição (*make-up*)	* 28% (dados experimentais)
Desvantagens	*Não foi implementado em plantas indústrias, apenas simulações me laboratório; *Uso de equipamento adicional, agregando custo energético, operacional e manutenções periódicas; *Estudo direcionado a um modelo de torre de resfriamento.
Vantagens	*Redução no consumo de água; *Motivador para estudos de caso em torres de refinarias; *Inovação tecnológica que agrega os conceitos de uso racional da água.

4.2.8. Condensação em estruturas porosas –uso de termossifão

Com o objetivo de recuperar parte da água evaporada pelo processo de resfriamento, o Laboratório de Tubos de Calor (Labtucal), localizado na Universidade Federal de Santa Catarina, em parceria com a Petrobrás desenvolveu uma estrutura porosa metálica, a ser resfriada por termossifões e localizada no interior de torres de resfriamento. Dentro do projeto Desenvolvimento de Processos e Equipamentos para a Conservação de Recuperação de Recursos Hídricos (Hidriter), buscou-se estudar uma estrutura capaz de resfriar, condensar e recolher parte do vapor de água produzido pela torre e liberado para a atmosfera (POZZOBON, 2015). A tecnologia foi testada em um protótipo de escala reduzida montado em laboratório, simulando uma torre de resfriamento de tiragem mecânica induzida com fluxo cruzado (com dupla entrada de ar). Um desenho esquemático da torre de resfriamento experimental é apresentado na Figura 49, cujo os componentes são: (1) ventilador, (2) sistema de distribuição de água fria do tipo *manifold*, (3) tanque chuveiro para água aquecida, (4) enchimento; (5) separador de gotas; (6) porta tubos refrigeradores, (7) bandeja de passagem, (8) bandeja de recolhimento da água condensada, (9) bandeja de circulação da água quente (POZZOBON, 2015).

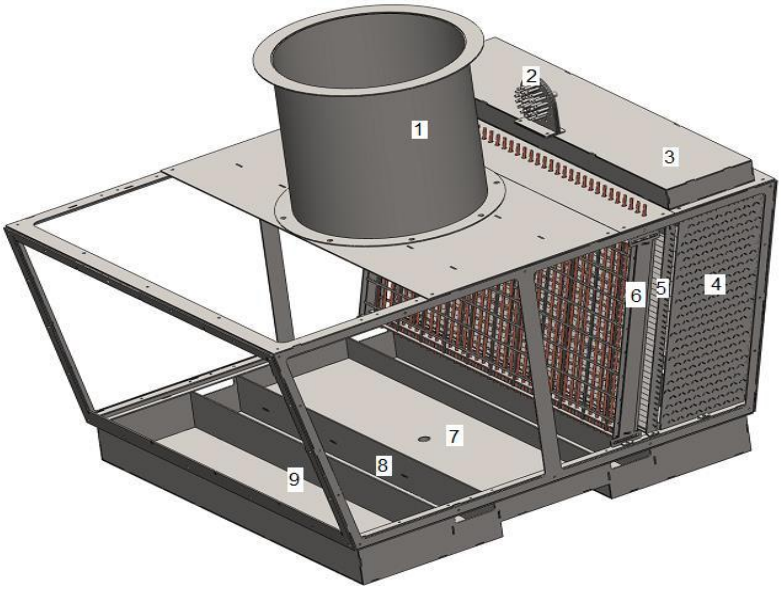

Figura 49- Esquemática da torre de resfriamento de tiragem mecânica induzida com fluxo cruzado experimental.

(Fonte: POZZOBON, 2015)

Para a condensação da água evaporada, foram utilizados tubos de cobre envoltos em meio poroso e resfriados através de um circuito de água fria; esse conjunto de tubos simula o comportamento de termossifões e é inserido no interior do protótipo da torre em contato com o ar úmido e quente na porção inferior e em contato com o ar ambiente na porção superior (POZZOBON, 2015). A Figura 50 apresenta o protótipo utilizado para a realização do estudo.

Figura 50- Protótipo de torre de resfriamento com tiragem mecânica induzida e fluxo cruzado utilizados tubos de condensação com meios porosos.

(Fonte: Adaptado de POZZOBON, 2015)

Dentre os vários tipos de dispositivos projetados para a troca de calor, foi escolhido o modelo de termossifões por serem dispositivos altamente eficazes e sem consumo energético. Eles consistem basicamente de um tubo metálico oco, onde é inserido um determinado fluido de trabalho. São divididos em três regiões: evaporador, condensador e seção adiabática, sendo que esta última pode haver ou não (MANTELLI, 2012). A seção do evaporador é responsável por receber o calor na parte externa do tubo e transferi-lo para o seu interior, fazendo com que o fluido de trabalho, localizado nesta região, se vaporize. Devido a diferença de pressão do vapor entre o evaporador e o condensador, o vapor se desloca no sentido do condensador, onde se encontram as regiões mais frias do termossifão. No condensador o calor é rejeitado, e o vapor saturado presente nesta região

se condensa. O líquido formado é então, pela ação da gravidade, deslocado para a região do evaporador (POZZOBON, 2015). A Figura 51 ilustra o princípio de funcionamento de um termossifão.

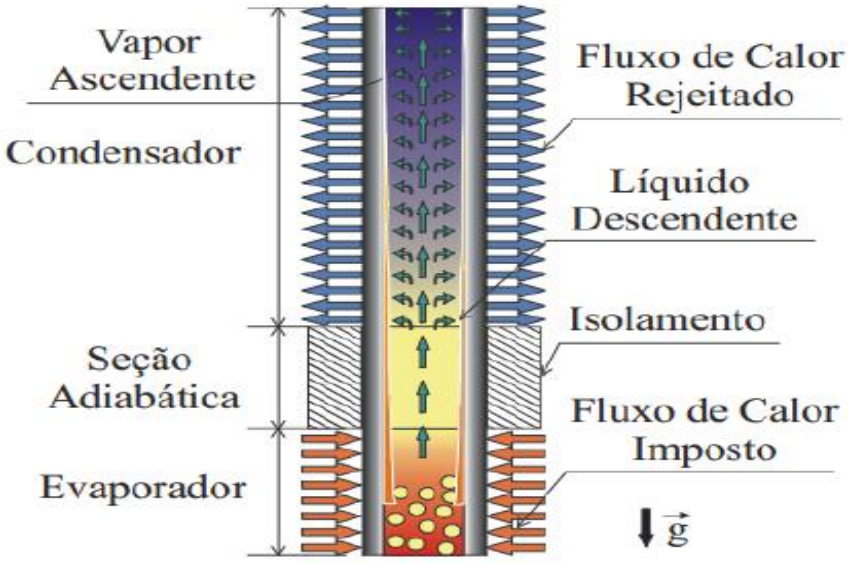

Figura 51- Princípio de funcionamento de um termossifão

(Fonte: MANTELI, 2012)

Para o cálculo do número dos tubos a serem utilizados nas estruturas de condensação um código computacional desenvolvido em linguagem de programação *Engineering Equation Solver* TM (EESTM), baseado no modelo de *Nusselt* foi utilizado (MANTELLI, 2016). Além disso, para determinação da melhor geometria e localização para a inserção dos tubos com meios porosos nas torres foram consideradas três hipóteses: os tubos serem inseridos acima do ventilador, como um “chapéu”; um único tubo horizontal abaixo do ventilador; duas paredes de geometria retangular localizado ao lado do enchimento da torre. A Figura 52 apresenta as conformações supracitadas (MANTELLI,2016).

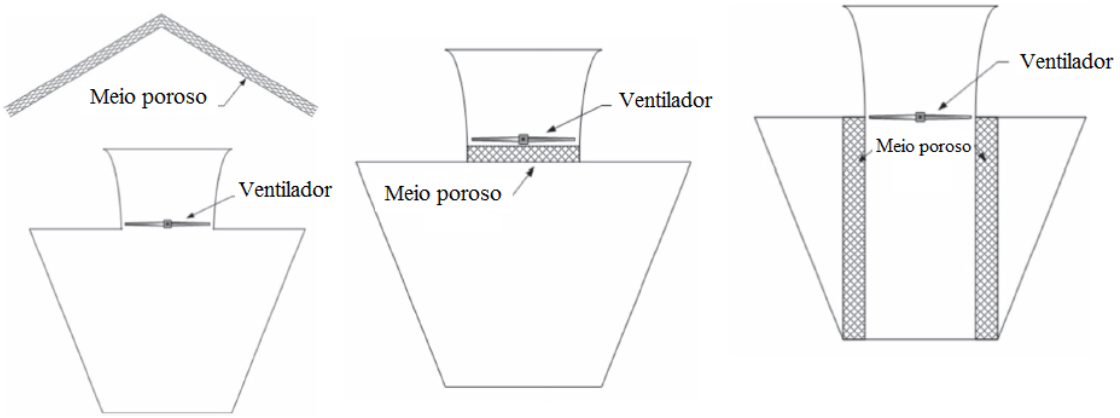

Figura 52- Análise da conformação de inserção dos tubos com meio poroso.

(Fonte: MANTELLI, 2016)

Para análise das possíveis conformações, foi utilizado um *software* onde as simulações numéricas apontaram como melhor projeto os meios porosos instalados próximos à vertical, localizados ao lado do enchimento da torre, em regiões o mais distante possível do ventilador (Figura 53), onde as perturbações nas linhas de corrente e as quedas de pressão resultantes são menos impactantes (MANTELLI, 2016). A Figura 54 ilustra a tecnologia de linhas de vapor utilizadas para a determinação da melhor posição de inserção dos termossifões. A concepção final do modelo foi patenteada em 2014 e a Petrobras é co-proprietária (MANTELLI, 2014).

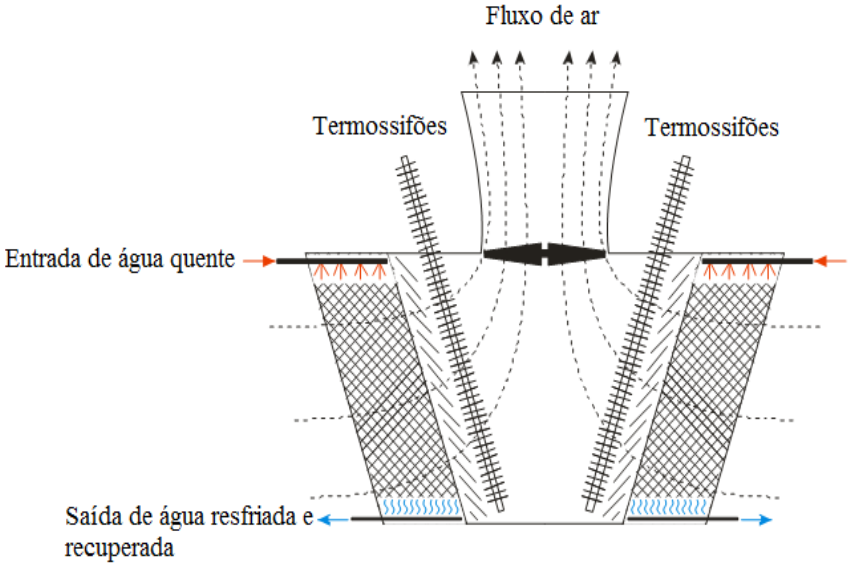

Figura 53- Esquemática de torre de resfriamento assistida pela tecnologia proposta.

(Fonte: Adaptado de MANTELLI, 2016)

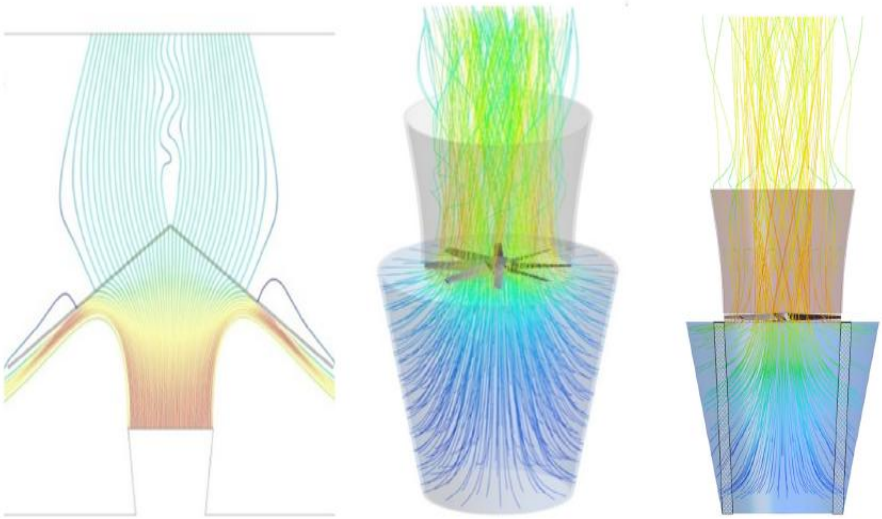

Figura 54- Tecnologia de linhas de vapor.

(Fonte: MANTELLI, 2016)

De uma forma simplificada, o processo monitorado na torre de resfriamento com termossifões envoltos em meio poroso consistiu no escoamento de ar ambiente pelas laterais da torre passando pelo enchimento, e depois de umidificado o ar percola através do meio poroso (com recirculação de água fria), o que permite a condensação de parte do vapor contido no ar úmido. Este condensado é, por efeito da gravidade, conduzido até bandejas de recolhimento localizadas na região inferior da torre sendo o seu volume medido (Figura 55).

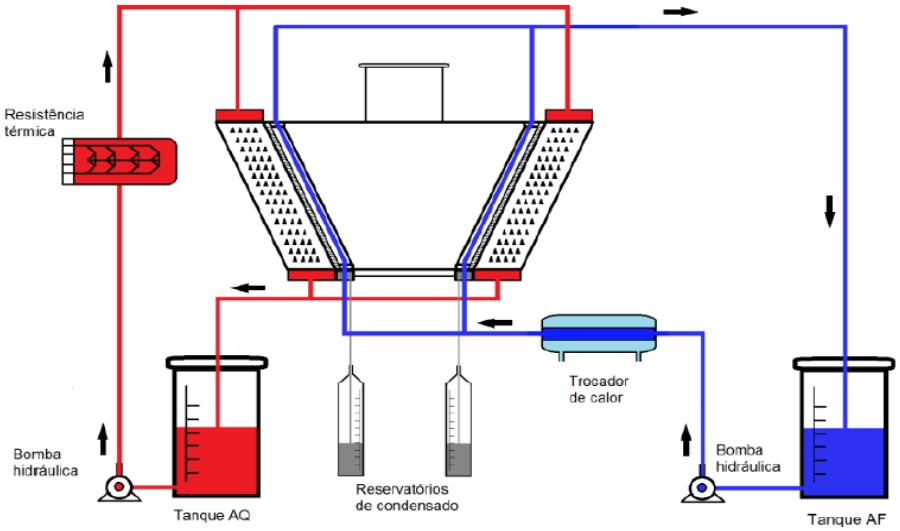

Figura 55- Diagrama esquemático da bancada experimental.

(Fonte: POZZOBON, 2015)

Os dados operacionais utilizados para o estudo buscaram simular a torre de resfriamento de tiragem mecânica induzida com fluxo cruzado, instalada na Refinaria de Paulínia (REPLAN). A torre montada para o projeto foi 20 vezes menor que a real, porém sua vazão foi 400 vezes menor que a original para preservar os níveis de velocidades de ar praticados nas torres da refinaria, devido à redução de área (POZZOBON, 2015). De forma ilustrativa, a Figura 56 apresenta as dimensões reais da torre da REPLAN comparada com a montada no Labtucal.

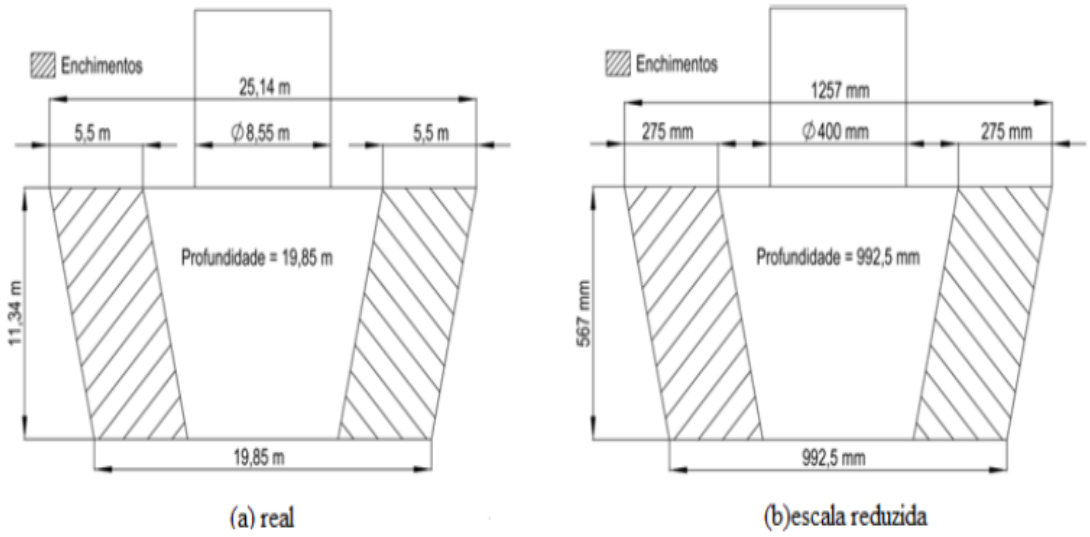

Figura 56- Torre de resfriamento real e em escala reduzida.

(Fonte: POZZOBON, 2015)

Após os ensaios foi constatado que as estruturas de condensação porosas assistidas por termossifões obtiveram uma recuperação de água condensada máxima de 11,6%. Outros estudos com condensação em meios porosos permitem antever um potencial de 35% de recuperação de água evaporada, apresentando-se como uma tecnologia promissora e favorável. Além disso, os termossifões apresentam várias vantagens: são passivos (não necessitam de gastos energéticos), podem ser adaptadas em torres de resfriamento existentes, apresentam baixo custo de fabricação, fácil manutenção, são tão eficientes quanto os equipamentos mais sofisticados empregados, e principalmente atuam na economia de água do processo trazendo como impacto positivo a redução de plumas sobre a torre de resfriamento. Por outro lado, é importante enfatizar que trata-se de simulações em ambientes controlados (laboratório) que podem não representar de maneira fidedigna as variações climáticas ocorridas ao longo do ano nas

regiões onde as refinarias estão localizadas. Além disso, nos experimentos realizados, os termossifões foram simulados por tubos de cobre refrigerados por uma corrente de água fria; logo, o conceito de termossifões não foi utilizado na sua integridade. Adicionalmente, deve-se estruturar a implementação dos tubos de condensação em outras conformações de torres de resfriamento. Na Tabela 15 estão dispostos os critérios e avaliação do uso de condensação em meios porosos para a recuperação de água evaporada. Os dados de economia de água de reposição (*make-up*) foram calculados considerando que o processo de evaporação corresponde a cerca 80% da vazão de água de reposição e a recuperação máxima de água evaporada obtida de 11,6% (VEIGA, 2010).

Tabela 15 - Avaliação de tecnologias para redução no consumo de água- Condensação em estruturas porosas- uso de termossifões.

Critérios	**Avaliação**
Economia de água de reposição (*make-up*)	* 9,3% (dados experimentais)
Desvantagens	*Simulações realizadas em ambientes controlados (laboratório); *Os termossifões foram simulados por tubos de cobre refrigerados por uma corrente de água fria; *Estudo realizado com um tipo de torre de resfriamento; *Baixo rendimento em relação a recuperação de água com meios porosos exposta na literatura (até 35%).

Vantagens	*Redução no consumo de água; *Termossifãosão equipamentos passivos, ou seja, não necessitam de gastos energéticos; *Tecnologia pode ser adaptada em torres de resfriamento existentes; *Apresentam baixo custo de fabricação; * Fácil manutenção; * São tão eficientes quanto os equipamentos mais sofisticados; *Redução de plumas sobre a torre de resfriamento.

5. VISÃO GERAL DAS TECNOLOGIAS UTILIZADAS NA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA DE REPOSIÇÃO (*MAKE-UP*)

Para evidenciar de forma compacta a maturidade das tecnologias supracitadas, foi utilizado o conceito dos níveis de prontidão tecnológica desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Tratam-se de nove fases denominadas TRL (*Technology Readiness Levels*), que representam a evolução de uma idéia até a implantação completa de um produto no mercado (BANKE, 2015). Segundo Tony Strazisar, Tecnólogo Sênior da Direção da Missão de Pesquisa Aeronáutica da NASA em Washington "A NASA reconhece o sistema como um método útil, comumente entendido, para explicar aos colaboradores e às partes interessadas o quão maduro é uma tecnologia específica" (BANKE, 2015).

A definição dos níveis de maturidade tecnológica utilizada na avaliação das propostas para redução do consumo de água de reposição (*make-up)* em sistemas de resfriamento seguiram os conceitos dispostos na Tabela 16 (BANKE, 2015):

Tabela 16- Definição dos níveis de desenvolvimento e/ou prontidão tecnológica (TRL).

TRL	Definição	Conceito
1	Os princípios básicos são reportados e observados.	Nível raso de prontidão tecnológica. Pesquisa científica começa a ser transformada em pesquisa aplicada e desenvolvimento.
2	Formulação de conceito tecnológico e/ou aplicação.	Princípios básicos são observados e inicia-se a Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Aplicações são especulativas e podem ser improváveis.
3	Função crítica analítica e experimental e/ou característica “prova-de-conceito”.	Pesquisa ativa e desenvolvimento iniciado, incluindo estudos experimentais e analíticos para validar predições focando tecnologias.
4	Validação de componente/ subsistema em ambiente de laboratório.	Componentes tecnológicos básicos são integrados para verificar se estes trabalham bem em conjunto.
5	Validação do sistema/ subsistema/componente no ambiente relevante.	Integração dos componentes tecnológicos (com elementos razoavelmente realísticos), testados em ambientes com as funções críticas mais relevantes.
6	Demonstração de modelo de sistema/subsistema ou demonstração de protótipos em ambiente relevante.	Avaliação de protótipo ou modelo representativo em ambiente relevante.
7	Demonstração de protótipo em um ambiente operacional.	Avaliação de protótipo próximo ao planejado (real) em ambiente operacional.
8	Sistema real completo e qualificado em ambiente operacional, por meio de teste e demonstrações.	Em um sistema real, a tecnologia foi provada atender as condições especificadas.
9	Sistema real finalizado e qualificado por meio de operações com êxito.	Sistema incorporando a nova tecnologia final e aplicado em suas condições reais de operação (Sistema em uso).

O grau de maturidade tecnológica do estudo apresentado no item 4 (PROSPECÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE ÁGUA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EM REFINARIAS) encontra-se na Tabela 17.

Tabela 17- Níveis de desenvolvimento e/ou prontidão tecnológica (TRL) para tecnologias capazes de reduzir o consumo de água em sistemas de resfriamento.

Tecnologia	**TRL**
4.1.1 Tratamento eletromagnético da água	9
4.1.2 Utilização de sistemas de filtração	9
4.1.3 Utilização de sistemas híbridos- Utilização de *Air-Cooler*	9
4.1.3 Utilização de sistemas híbridos- TSC	7
4.1.3 Utilização de sistemas híbridos- HDWD	3
4.2.1 Automação da velocidade de ventiladores	9
4.2.2 Automação e otimização do ciclo de concentração	9
4.2.3 Utilização de venezianas (louvers)	9
4.2.4 Melhoria do design dos eliminadores de gotas	9
4.2.5 Resfriamento híbrido *wet/dry*	8
4.2.6 Resfriamento *dew/point*	6
4.2.7 Uso de trocador de calor com ventilador auxiliar	4
4.2.8 Condensação em estruturas porosas –uso de termossifão	4

6. APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO NO CONSUMO DE ÁGUA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EM REFINARIAS

Diversas alternativas de economia de água em sistemas de resfriamento evaporativo presentes em refinarias foram apresentadas. Muitos estudos encontram-se em andamento, porém muitas tecnologias já estão consolidadas e amplamente utilizadas pelo setor industrial. Para identificação da tecnologia mais adequada ao processo de resfriamento, é necessário envolvimento dos fabricantes dos equipamentos de resfriamento, das empresas responsáveis pelo tratamento da água do sistema e do corpo técnico da planta envolvido na garantia da qualidade dos serviços prestados pela refinaria.

Com o intuito de identificar a economia de água gerada em torres de resfriamento com a implementação de algumas das tecnologias citadas no item anterior, abaixo são apresentadas manipulações matemáticas, utilizando dados de torres das refinarias brasileiras, que visam propor oportunidades de melhoria e otimização do processo. Foram selecionadas as tecnologias mais maduras e difundidas no setor industrial com ganhos conhecidos de água de reposição (*make-up*). São elas:

- Tecnologias externas as torres de resfriamento:
    - Automação da velocidade de ventiladores;
    - Automação e ajuste do ciclo de concentração;
    - Utilização de sistemas de filtração;
    - Utilização de sistemas híbridos.

- Tecnologias internas as torres de resfriamento:
    - Melhoria do design dos eliminadores de gotas.

Como base de cálculo utilizou-se os dados da Tabela 4, consumo de água em sistema de resfriamento nas refinarias.

Tabela 4 - Consumo de água em sistema de resfriamento nas refinarias.

(Fonte: VEIGA, 2015)

Refinarias	Água clarificada total (m^3/h)	Torres	Q rec. (m^3/h)	ΔT real (˚C)	*Make-up* real (m^3/h)
A	3.873	U-1363/4	34456	9,8	891
B	1.816	TR 6121/22	43503	13,5	946
C	1.274	TR 003	16000	7	331
D	1.537	TR 5902	11200	10	239
E	1.397	K-2801	13000	12	256
G	1.274	TR 51501	17500	13	383
X	713	T-5301	11515	10	181

6.1. ESTUDO DE CASO- REFINARIA A

A refinaria A é uma das refinarias que mais consome em vazão de água clarificada (Figura 2), desta forma é emergencial a implementação de técnicas que confiram redução no consumo de água nos processos de resfriamento da planta.

De acordo com a Figura 16, a refinaria A apresenta baixa eficiência em consumo de água percebido pelas grandes perdas líquidas por purgas periódicas, cerca de 37%. Além disso, perde um grande percentual de água em respingos e arraste, cerca de 7%. Desta forma a proposta de otimização de consumo de água no processo de resfriamento evaporativo engloba as seguintes tecnologias: automação e ajuste do ciclo de concentração, utilização de sistemas híbridos, automação da velocidade dos ventiladores e melhoria do design dos eliminadores de gotas.

A automação e ajuste do ciclo de concentração permitirá o decréscimo de perdas de água por purgas excessivas. A proposta seria o ajuste para o ciclo econômico de concentração igual a 5. Esta mudança pode conferir incrementos de 32,40 % em água de reposição (*make-up*) (Figura 40). Em colaboração para redução das perdas por purgas, propõe-se a utilização de sistemas híbridos para controle da evaporação e, consequentemente, da concentração de sais na água. A proposta visa utilizar um sistema seco para pré-resfriar a água quente que seguirá para o processo evaporativo. Considerando a redução de 1º C no *range* da torre úmida, este processo pode conferir ganhos de 10,6% de água de reposição (*make-up*), considerando dados da Tabela 5. Para minimizar os gastos energéticos com a implementação de mais um sistema de

resfriamento, propõe a automação da velocidade dos ventiladores. Aproveitando as diferentes condições climáticas ao longo do ano na refinaria A, pode-se obter além de ganhos no consumo energético, economia de 15 % no consumo de água (Figura 37). Por fim, associado a ergonomia da ventilação, pode-se minimizar os arrastes mecânicos (*drift*) com a melhoria do *design* dos eliminadores de gotas. Considerando que a implementação de um projeto eficiente de eliminadores de gotas pode acarretar em uma redução de arraste de água de 0,01% vazão de recirculação, para até 0,001% da mesma vazão (ASHRAE, 2008) e que a vazão de recirculação de água da refinaria A é de 34456 m^3/h, pode-se obter ganho de até aproximadamente 3,1 m^3/h de água de reposição.

A Tabela 18 apresenta a possível redução do consumo de água com adoção de medidas tecnológicas, acima descritas, nos sistemas de resfriamento da refinaria A. É importante ressaltar que os dados percentuais utilizados para o cálculo, ora são genéricos (dados da literatura), ora são simulações realizadas em apenas uma torre da refinaria. Além disso, as análises propostas foram feitas nas tecnologias em separado, ou seja, não se sabe o comportamento em relação à economia de água com a prática simultânea das ferramentas tecnológicas propostas. A viabilidade de implementação, os impactos gerados pela instalação de novas técnicas e estudo específico de outras torres da refinaria A não foram realizados.

Tabela 18- Economia em água de reposição (*make-up*) na refinaria A com adoção de tecnologias viáveis.

Tecnologia	**Make-up real (m^3/h)**	**Economia de água de *make-up* (m^3/h)**	**Economia de água de *make-up* (%)**
Automação e ajuste do ciclo de concentração.	891	288,7	32,40
Utilização de sistemas híbridos		94,4	10,6
Automação de ventiladores		133,65	15
Melhoria do *design* dos eliminadores de gotas		3,1	0,35
	Total:	520m^3/h	58,35%

6.2. ESTUDO DE CASO- REFINARIAS J e K

As refinarias J e K utilizam, essencialmente, água bruta como reposição (Figura 2), e perdem grandes volumes de água por purgas periódicas. Cerca de 33% da perda de água em processo de resfriamento da refinaria J e 36% da refinaria K são por *blowdawn* (Figura 16). Em virtude dos dados, para a otimização e uso racional de água nos processos de resfriamento destas refinarias a proposta tecnológica passa por ajuste e automação do ciclo de concentração, associado à filtração lateral para o manutenção por mais tempo da qualidade da água recirculante, visto que a reposição (*make-up*) é realizada, em sua maioria, com a utilização de água bruta.

Com a automação e ajuste do ciclo de concentração para 5, pode conferir incrementos de 29,30 % em água de reposição (*make-up*) para a refinaria J e 23,20% para a refinaria K (Figura 40). Adicionalmente, para a manutenção da qualidade da água recirculante e consequentemente redução das purgas e consumo de água de reposição,

orienta-se o uso de filtração lateral com filtros centrífugos. Desta forma, espera-se uma redução no consumo de água de reposição (*make*-up) de até 10% (Tabela 3).

A Tabela 19 apresenta a possível redução do consumo de água com adoção de medidas tecnológicas, acima descritas, nos sistemas de resfriamento da refinaria J e K. Por não haver informações a respeito da vazão de recirculação e *make*-up, os resultados na tabela são expressos em dados percentuais. Como comentado anteriormente, é importante ressaltar que os dados percentuais utilizados para o cálculo, ora são genéricos (dados da literatura), ora são simulações realizadas nas refinarias. Além disso, as análises propostas foram feitas nas tecnologias em separado, ou seja, não se sabe o comportamento em relação à economia de água com a prática simultânea das ferramentas tecnológicas propostas. A viabilidade de implementação, os impactos gerados pela instalação de novas técnicas e estudo específico de outras torres da refinaria A não foram realizados.

Tabela 19- Economia em água de reposição (*make-up*) nas refinarias J e K com adoção de tecnologias viáveis.

	REFINARIA J	**REFINARIA K**
Tecnologia	**Economia de água de *make-up* (%)**	**Economia de água de *make-up* (%)**
Automação e ajuste do ciclo de concentração.	29,30 %	23,20%
Utilização de sistemas de filtração (Filtros centrífugos)	10%	10%
	Total: 39,3%	Total: 33,2%

7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Face ao cenário de escassez hídrica é importante elencar ferramentas que possam promover o uso racional de água nas refinarias. Desta forma, a prospecção de tecnologias capazes de economizar água em sistemas de resfriamento permite identificar

e motivar a introdução de novas propostas nas plantas industriais.

A seguir estão dispostas as principais conclusões do presente estudo:

• Existem tecnologias capazes de economizar água em sistemas de resfriamento convencionais, testadas e implementadas no setor industrial. Estas tecnologias podem ser utilizadas no interior ou exterior das torres, em projetos de *retrofit* ou na concepção de um novo sistema de resfriamento;

• Tanto os sistemas evaporativos de fluxo contracorrente ou fluxo cruzado presente em refinarias podem ser testados quanto a implementação de tecnologias capazes de reduzir o consumo de água nas torres de resfriamento;

• O tratamento eletromagnético da água de recirculação apresenta-se como uma tecnologia limpa e eficaz no tratamento de corrosão e incrustação. Isso viabiliza maiores ciclos de concentração e consequentemente ganhos no consumo de água de reposição (*make*-up). A tecnologia já está difundida no Brasil e está sendo utilizada em plantas industriais, *shopping center* e hospitais apresentando economia de até 50% no consumo de água de reposição (constatado pela tecnologia HydroFlow);

• A utilização de sistemas de filtração lateral, possibilita o tratamento parcial da água da bacia, melhorando a qualidade da água de recirculação e reduzindo a contribuição de água de reposição (*make-up*). Os filtros com elementos filtrantes podem ser um problema para torres com altas vazões de recirculação, portanto, nestes casos devem-se optar pelos sistemas com filtros centrífugo ou automáticos. A técnica de filtração lateral com filtros centrífugos pode representar uma economia de 5 à 10% em água de reposição em sistemas de resfriamento;

• A utilização de sistemas híbridos, tais como, *air-coolers* são alternativas para diminuição do *range* e consequentemente obtenção de menores consumos de água de reposição (*make-up*) devido a redução da evaporação. Outros sistemas híbridos estão sendo estudados, como as tecnologias TSC e HDWD, porém ainda encontram-se em plantas como unidades piloto sem dados concretos de economia de água quando utilizados em refinarias. Os dados de economia de água de reposição esperados para utilização de unidades TSC e *air-coolers*, são de até 75% e até 41% respectivamente;

• A automação da velocidade de ventiladores é um artifício simples, flexível e eficaz que pode representar de 15% a 30% de redução no consumo de água de reposição em

sistemas de resfriamento. Através da avaliação climática da região, os ventiladores podem atuar de maneira autônoma, mantendo a eficiência do processo de troca de térmica, e obtendo economia de água e energia pois utilizará, apenas, a potência exigida pelo processo de resfriamento;

• A automação do ciclo de concentração permitirá que operadores acompanhem o volume de água que está sendo consumido pelo sistema de resfriamento além de verificar se o ciclo de concentração está adequado ao ponto ótimo pré-determinado. Este monitoramento é realizado através da instalação de medidores de vazão da água de reposição e purga, como também analisadores *online* dos parâmetros de monitoramento do ciclo de concentração (condutividade, cloretos entre outros). Adicionalmente, utiliza-se a operação da purga em modo contínuo mantendo o parâmetro de monitoramento até um limite de controle superior com a utilização de um *software* estatístico de controle (fornecido pelas empresas tratadoras de água de resfriamento). Com isso, objetiva-se menores oscilações e maior precisão do processo, consequentemente economia no consumo de água de reposição (*make-up*), que pode chegar à 33% dependendo do estudo de caso;

• A utilização de venezianas (*louvers*) e a melhoria do *design* dos eliminadores de gotas são alternativas para minimização dos efeitos *splash out e* arrastes mecânicos de gotas, respectivamente. Adicionalmente, os *louvers* inibem a entrada de sol e controlam a entrada de sólidos dispersos no ar, eliminando a proliferação de microrganismos e acúmulo de sais que propiciam incrustações, corrosões e, consequentemente, queda na eficiência de troca térmica e desequilíbrio no tratamento e manutenção de águas nas bacias das torres de resfriamento. Essa diminuição de algas e sais dissolvidos reduz a água descartada através de purgas, consome menor quantidade de produtos químicos e biocidas para o tratamento da água, além de exigirem menores intervenções para limpezas e manutenções nas torres. Ambas as tecnologias, utilização de *louvers* e melhoria do *desing* dos eliminadores de gotas, já são utilizadas pelas indústrias e são apontadas como ferramentas importantes na redução do consumo de água em sistemas de resfriamento. A utilização de um *desing* adequado de eliminadores de gotas pode reduzir as perdas por arraste para faixa de 0,001 a 0,005% da água de recirculação;

• O resfriamento híbrido *wet/dry* torna-se uma opção valiosa para implementação, em especial, nas localidades com escassez hídrica e com restrições quanto ao aparecimento de pluma de vapor d´água. Adicionalmente, apresenta-se como equipamento compacto, podendo ser instalados várias unidades de acordo com a potência de resfriamento

exigido, além de poder atuar em sistemas híbridos, pré-resfriando a água quente de entrada na torre úmida, com menor consumo de água quando comparado ao sistema úmido convencional. Seus estudos em escala piloto apontam economia média no consumo de água de reposição de 38,1%, ± 16,0% com o sistema Eco-WD. No entanto, não há dados reais de aplicações em refinarias;

• O resfriamento *dew/point* é uma tecnologia em estudo que oferece grande potencial para melhoria da eficiência global das centrais térmicas das torres de resfriamento, através da diminuição da temperatura da água resfriada. As avaliações preliminares da tecnologia, indicaram reduções significativas nas perdas por evaporação e necessidades de água de reposição (*make-up*). Entretanto estudos mais concretos estão sendo realizados para evidenciar o ganho real em economia de água;

• O uso de trocador de calor com ventilador auxiliar é um estudo que aponta tendência favorável para recuperação de água de evaporação, com economia esperada de 28% em água de reposição. No entanto, os estudos foram realizados em condições controladas de laboratório e em escala bem menores quando comparados a uma torre de resfriamento real. O protótipo desenvolvido, apresenta-se como motivador para o desenvolvimento de novos projetos considerando diferentes configurações de torres, trocadores de calor e variáveis de processo, que traz grande contribuição para o cenário de inovação, preservação e uso racional de água;

• Os estudos simulados em laboratório com condensação em estruturas porosas assistidas por termossifões obtiveram resultados positivos em recuperação de água evaporada em torres de resfriamento com fluxo cruzado, reduzindo em 9,3% o consumo de água de reposição. Além disso, a utilização de estruturas como termossifões garantem uma tecnologia passiva (não necessitam de gastos energéticos), flexível pois podem ser adaptadas em torres de resfriamento existentes, econômica (apresentam baixo custo de fabricação), de fácil manutenção e tão eficiente quanto os equipamentos mais sofisticados empregados, atuando na economia de água do processo além de auxiliar na redução de plumas sobre a torre de resfriamento.

Dado o exposto, é possível afirmar que o estudo de tecnologias capazes de reduzir o consumo de água em sistemas de resfriamento é de suma importância no cenário industrial, em especial nas refinarias de petróleo. Muitas oportunidades de minimização do consumo de água em torres foram evidenciadas, porém os dados apresentados são

provenientes de manipulações matemáticas, dados específicos de um sistema, ou projetos desenvolvidos em laboratório sob condições controladas. Desta forma, recomenda-se um estudo de caso para cada planta de refino, onde a conformação da tecnologia a ser implementada compila os dados de condições climáticas locais, viabilidade de implementação tecnológica e os impactos gerados, além da avaliação econômica da utilização e manutenção de novos sistemas. É importante ressaltar que os projetos em estudo ou em escala piloto, apresentam-se como motivadores e inspiradores para os fabricantes de torres de resfriamento. No entanto, recomenda-se que os testes prossigam para simulações em ambientes reais, com proporções similares aos encontrados nas refinarias, que possam representar de maneira fidedigna as contribuições em economia de água nos sistemas de resfriamento atuais.

Por fim, tendo em vista as atuais dificuldades em se obter outorgas para novas captações de água e a indisponibilidade do recurso em muitas regiões onde as refinarias estão localizadas, cabe aos gestores junto aos órgãos ambientais competentes, pressionarem as empresas fabricantes de torres de resfriamento a investirem em desenvolvimento de projetos capazes de recuperar parte da água perdida pelos sistemas de resfriamento convencionais. Novos projetos podem ser desenvolvidos considerando novos formatos de torres, trocadores de calor e variáveis de processo, que traz grande contribuição para o cenário de inovação, preservação e uso racional de água.

.

8. REFERÊNCIAS

ABREU, R.; OSIPI, S. **Histórico, Panorama e Perspectivas do Reúso de Água na Petrobras**. XII Workshop de Reúso de Água na Indústria, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REGRIGERATIING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook- Systems and Equipment**. Chapter 39, Cooling Towers. January 15, 2008.

ASHRAE, HVAC. ***Systems and equipment handbook***. Capítulo 36, 2000.

ASVAPOOSITKUL, W.; KUANSATHAN, M. **Comparative evaluation of hybrid (dry/wet) cooling tower performance**. Applied Thermal Engineering**,** Volume 71, Issue 1, 5 October 2014, Pages 83–93.

BANKE, J. **Technology Readiness Levels Demystified.** July 31, 2015*. Disponível em:* https://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/trl_demystified.html. Acessado em 20\05/2017.

BENN, S.; POPLASKI,L.; FAGHRI, **A.**; BERGMAN, T. **Analysis of thermosyphon/heat pipe integration for feasibility of dry cooling for thermoelectric power generation**. Applied Thermal Engineering**,** Volume 104, 5 July 2016, Pages 358–374.

BUSHART, S. **Advanced Cooling Technologies for Water Savings at Coal-Fired Power Plants.** Corner Stone: The Oficial Journal of The World Coal Industry. The third issue of Volume 4, 2014.

CARTER, T. P.; P. E. **Water Savings Using The Thermosyphon Cooler Hybrid Heat Rejection System: Case Studies From Atlanta, Phoenix, Seattle, and Boston.** Johnson Controls, Inc. Waynesboro, PA, USA, 2014.

CHO, Y. I., LANE, J.; KIM W. **Pulsed-power treatment for physical water treatment**. International Communications in Heatand Mass Transfer, vol. 32, p. 861–871, 2005.

CORTINOVIS, G. F.; SONG, T. W. **Funcionamento de uma Torre de Resfriamento de Água**. EPUSP. Revista de Engenharia Química. Ano VI, n. 14, 2005.

DALAVIA, F. L. **Filtro Automático RF3 é nova solução para reuso da água**. Revista Meio Filtrante edição Nº 47 - Novembro/Dezembro de 2010.

DEZIANI, M.; RAHMANI, Kh.; ROUDAKI, M.; KORDLOO, M. **Feasibility study for reduce water evaporative loss in power plant cooling tower by using air to heat exchanger with auxiliary Fan**. Desalination, volume 406, pages 119-124, 2015.

Disponível em: www.arquiteturaeengenharia.com.br. Acessado em 28/11/2016.

Disponível em: www.coolingtowerdepot.com. Acessado em 28/11/2016.

Disponível em: www.ecobuild.eco.br. Acessado em 28/11/2016.

Disponível em: www.ecotep.com.br/home. Acessado em 28/11/2016

Disponível em: www.hamon.com.br. Acessado em 22/11/2016.

Disponível em: www.hidroambiental.com.br. Acessado em 22/11/2016.

Disponível em: www.laffi.com.br. Acessado em 24/11/2016.

Disponível em: www.termoparts.com.br. Acessado em 21/11/2016

Disponível em: *http://sistemas.eel.usp.br. Acessado em 18/10/2016*.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **Dew-Point Cooling for Increased Water Use Efficiency and Power Plant Productivity**.Issues & Overviews, Technology Innovation Sector, 2013, p.2.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **Performance Evaluation of an Evapco Eco Wet-Dry Cooler at the Water Research Center**. Technical Results, Generation sector, 2015, p.40.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **Program on Technology Innovation:** A Hybrid (Dry/Wet) Dephlegmator for Incorporation into Air-Cooled Steam Condenser Systems: Research and Development of a Novel Concept for Enhancing Air-Cooled Condenser Performance and Improving Steam Turbine Output**.** Technical Results, Environment Sector, 2016, p. 192.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **Technology Insights Brief**: Thermosyphon Cooler Hybrid System for Water Savings in Power Plant. Issues& Overview, Technology Innovation Sector, 2012, p.3.

EUROPEAN COMMISSION. **Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas**, 2015. *Disponível em: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/REF_BREF_2015.pdf.* Acessado em: 16/12/2016.

FARRUGIA, B. **Filtração em Torres de Resfriamento. Revista TAE, Especializada em Tratamento de Água e Efluentes, 2012.** *Disponível em*: **http://www.revistatae.com.br/noticiaInt.asp?id=4483**. Acessado em 28 de novembro.

FERRAZ, F. **Torres de resfriamento.** Documento técnico, 2008.

FURTADO, M. **Reuso de água: refinarias da Petrobrás mantêm planos para reaproveitar efluentes em caldeiras e torres de resfriamento**. Química e Derivados, Agência Petrobrás, 2013.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5ª Edição. Editora LTC, 368p, 2007.

GHISLIERI, D. **Tratamiento de Agua de Sistemas de Enfriamiento. Instituto de Ingeniería Química Tecnología y Servicios Industriales**. *Disponível em*: *www.fing.edu.uy/iq/cursos/qica/repart/Aguaenfr.doc*. Acessado em: 16 de janeiro 2017.

GODIM, N. M.; YOKOYAMA, L. **Otimização do ciclo de concentração em sistema de resfriamento de refinarias de petróleo no Brasil.** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental- ABES, Goiânia, 2013.

GODIM, N. M. **Alternativas para Redução do Consumo de Água e Energia em Sistemas de Água de Resfriamento e Geração de Vapor em Refinarias de Petróleo do Brasil**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental - PEA. UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

GROBBELAAR, P.; REUTER, H.; BERTRAND, T. **Performance characteristics of a trickle fill in cross- and counter-flow configuration in a wet-cooling tower**. Applied Thermal Engineering 50 (2013) 475 e 484.

HARSTON, J. D; ROPITAL, F.**Control of corrosion in cooling waters**. European Federation of Corrosion, London, no. 40, 2004.

HENSLEY, J. C. **Cooling tower fundamentals.** 2.ed. Kansas: Marley Cooling Tower Company, 2009.

INFRA AKTIF SDN BHD COMPANY. **Keeping Water In Cooling Tower Clean Without The Aid Of Chemicals: water treatment technology aids in keeping cooling towers maintenance low and save water**. Boletim 64.

JAMBO, H. C. M & FÓFANO, S. **Corrosão: Fundamentos, Monitoração e Controle**. 1ª Edição. Editora Ciência Moderna. 372 p, 2008.

JONHSON CONTROL INC. **Manual de Operação do Sistema Híbrido de Resfriamento TSC**. *Disponível em:*www.johnsoncontrols.com. Acessado em 21/12/2016.

LEGNER, 2014. **Filtros para sistema de torre de resfriamento.** Revista Meio Filtrante edição Nº 67 - Março/Abril de 2014.

LINDAHL, P.; ANUJÉ, K.; HEGG, T. **Cooling Tower Operation and Maintenance is the Key for Improved Energy Efficiency.** Houston: Cooling Technology Institute, 2010. 114 p.

LUCAS M. *et al*. **Experimental study on the performance of a mechanical cooling tower fitted with different types of water distribution systems and drift eliminators**. Applied thermal engineering [1359-4311], 2013 vol: 50 iss:1 pg:282 -292.

LYU, D.; SUN, F.; ZHAO, Y. **Impact mechanism of different fill layout patterns on the cooling performance of the wet cooling tower with water collecting devices**. Applied Thermal Engineering 110 (2017) 1389–1400.

MAGRINI, A.; MONTEIRO, J. P.; SZKLO, A. S.; NUNES, R. T. **Gerenciamento de água na indústria de refino de petróleo.** Portal Tratamento de Água, Centro Projekt do Brasil, 2009. *Disponível* em: http://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/gerenciamento-de-agua-na-industria-de-refino-de-petroleo/. Acessado em 29/10/16.

MANTELLI, M. B. H. **Development of porous media thermosyphon technology for vapor recovering in cross-current cooling towers.** Applied Thermal Engineering, 2016, v. 108, p. 398–413.

MANTELLI, M. B. H. **Tubos de calor e termossifões.** Notas de aula, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

MARTINS, M. C. Palestra: **Otimização em sistemas com torres de resfriamento de água**. *Greenbuilding* Brasil 6ª edição, 2015.

MEISSNER, D. C. Tratamento de efluentes – A Importância de Controlar a Temperatura no Tratamento de Efluentes**. Celulose *online*, 2015.** *Disponível em:* http://celuloseonline.com.br/tratamento-de-efluentes-david-charles-meissner-a-importancia-de-controlar-a-temperatura-no-tratamento-de-efluentes-1/.Acessado em: 10/11/2016.

MIERZWA, J.; HESPANHOL, I. **Água na Industria: uso racional e reúso**. São Paulo, Oficina de Textos, 2005.

MOLINA, C. G. **Climatización, Sistemas de Água Sanitária, Humidificadores Evaporativos y Similares**. Curso de Mantenimiento Higiênico-Sanitario de Instalaciones de Riesgo Frente a Legionelosis. Academia Abrisqueta. Murcia. 27- 41. 188 p, 2009.

NALCO CAMPANY OPERATION. **Cooling Water Treatment**. Boletim B-34.

NOBLE, R.; SHI, J.; Bushart, S**. EPRI Power Plant Cooling Technology Innovation Research and Water Resource Center Overview.** DOE ARPA-E Alternative Power PlantCooling Workshop. Chicago, 2014.

OLIVEIRA, A. **Análise da Utilização de Gargalos e Fios de Garrafas PET como Enchimento para Torres de Resfriamento**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

OWEN, M**. A hybrid dephelegmator for incorporation into in air-cooled steam condenser.** Univ. Stellenbosch/Dept. M&M Eng./STERG. Energy Postgraduate Conference, 2013.

PANDOLFO, M. **Variable Resonance Descaling Descalcifier Device Connected to a Forced Sequential Rephasing Transformer**. United States Patent US 6506299B1, 14/01/2003.

PEREZ, N. **Sistemas Fluido mecânicos**. Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2014. *Disponível em*: http://www2.feg.unesp.br. Acessado em 22/02/2017.

PETROBRAS. **Relatório de Análise Integrada da Água na Cadeia Produtiva da Petrobras**. CTTTRA-012/2016/ CENPES/PDEDS/TTRA, 2016.

PINHEIRO, A. P. B. **Torres de resfriamento e o impacto no consumo de energia e água**. Engenharia e Arquitatura, 2016. *Disponível em: http://www.engenhariaearquitetura.com.br/noticias/1305/Torres-de-resfriamento-e-o-impacto-no-consumo-de-energia-e-agua.aspx?preview=s*. Acessado em 02/12/2016.

PIRANI, J.; VENTURINI, S. **Eficiência Energética me Sistemas de Refrigeração Industrial.** PROCEL, Eletrobrás- Brasil, 2004.

POZZOBON, J. C. **RECUPERAÇÃO DE ÁGUA EM TORRES DE RESFRIAMENTO POR MEIO DE ESTRUTURAS DE CONDENSAÇÃO POROSAS.** Dissertação de Mestrado pelo Programa em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

PRIORI, A. **In Defense of Eyesores**. American Nuclear Society, September, 2011. *Disponível em: http://ansnuclearcafe.org/2011/09/07/in-defense-of-eyesores*. Acessado em 20/03/2017.

RAKSHAN COOLING TOWERS. *Disponível em: http://rakshancoolingtowers.co.in/Natural-Draft-Cooling-Towers-Manufacturers-Natural-Draft-Cooling-Towers-are-nothing-but-the-water-is-cooled-with-natural-atmospheric-air-tra-/b58*. Acessado em 20/03/2017.

REIS, J.; SILVEIRA, J.; DOMENI, P. **Economia de Energia Elétrica em Torres de Resfriamento**. UNESP - Campus de Guaratinguetá, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

REUTER, H.; KRÖGER, D. **Hybrid (dry/wet) dephlegmator for incorporationintoACCs.** Apresentação à Universiteit Stellnbosch University, 2013.

REVIMAQ. **Tecnologia para Torres de Resfriamento**: economia de água, energia e dinheiro, 2015. *Disponível em*: www.revimaq.com. Acessado em 28/11/2016.

REVISTA TAE: Especializada em Tratamento de Água e Efluentes**. Água de resfriamento, porquê mantê-la limpa?.** 2010. *Disponível em:* http://www.revistatae.com.br/noticiaInt.asp?id=280. Acessado em 28/11/2016.

SAMPAIO, F. M. **Projecto de uma Torre de Arrefecimento de 3 MW de Potência Térmica.** Dissertação de Mestrado pelo Programa em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

SAMPAIO F. S. **Torre de Resfriamento Modelagem, Simulação e Testes Experimentais para Apoio ao Ensino de Engenharia Mecânica.** Dissertação de Mestrado pelo Programa em Engenharia Mecânica. Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2013.

SCHALY, R. **Estudo da Viabilidade do Tratamento Eletromagnético para Águas de Resfriamento em Indústrias Químicas**. Dissertação de Mestrado em Ciências. Universidade de São Paulo/ Escola Politécnica, 2015.

SCHALY, R.; BRESCIANI. É; GUARDANI, R. **Estudo da Viabilidade de Tratamento Físico para Água de Resfriamento**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis/SC, 2014.

SENEVIRATNE, M. **A practical approach to water conservation for commercial and industrial facilities**. Bulington, MA: Elsevier, 2007.

SHI, J.; BUSHART S. **Advanced Cooling and Water Treatment Technology Concepts for Power Plants**. Eletric Power, 2014. *Disponível em: http://www.powermag.com/advanced-cooling-and-water-treatment-technology-concepts-for-power-plants/?pagenum=2.* Acessado em 02/12/2016.

TERBLANCHE, A.; REUTER, H.; KRÖGER, D. **Drop size distribution below different wet-cooling tower fills**. Applied Thermal Engineering 29 (2009) 1552–1560.

U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY. **Cooling towers: understanding key components of cooling towers and how to improve water efficiency**. Federal Energy Management Program, 2011.

TÜRETGEN, I. **Reduction of microbial biofilm formation using hydrophobic nano-silica coating on cooling tower fill material.** Istanbul University, Faculty of Science, Department of Biology, Istanbul Turkey, Journal Home. Vol 41, No 3 (2015).

UNEP – United Nations Environment Programme. **Energy Efficiency Guide forIndustry in Asia – Electrical Energy Equipment: Cooling Towers**. Divisonof Technology, Industry, and Economis. Sweden, 2006. *Disponível em: www.energyefficiencyasia.org*. Acesso em: 16 outubro de 2016.

VANELLI, C. A. **Conservação de Água na Indústria do Petróleo: caso da REVAP**. Dissertação Mestrado em Engenharia de Energia. Universidade Federal de Itajubá, 2004.

VEIGA, A. A. **Estudo do Efeito Biocida do Cloro e do Peróxido de Hidrogênio em Sistemas de Resfriamento com Reúso de Efluente como Água de Reposição.** Tese de Doutorado pelo Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química. UFRJ/EQ, 2010.

VEIGA, A. A. **Prospecção de Novas Tecnologias para Redução de Consumo de Águas em Sistemas de Resfriamento em Refinarias**. Apresentação para Gerência da Petrobras. CNEPES/PDEDS/TTRA, 2015.

VEIGA, A. A. **Prospecção de Novas Tecnologias para Redução de Consumo de Águas em Sistemas de Resfriamento em Refinarias**. Apresentação para Gerência da Petrobras. CNEPES/PDEDS/TTRA, 2016.

VITKOVIC P.; SYROVATKA, V. **OPTIMAL WATER DISTRIBUTION IN THE COOLING TOWER**. Journal of flow visualization and image processing [1065-3090], 2009 vol:16 iss:4 pg:367 -375.

WALSER, S.; GERSTNERA, D.; BRENNERA, B.; HÖLLERB, C.; LIEBL, B.; HERRA, C. **Assessing the environmental health relevance of cooling towers – A systematic review of legionellosis outbreaks.** International Journal of Hygiene and Environmental Health 217 (2014) 145– 154.

WHO, 2013. **Legionellosis**. In: Mediacentre (Ed.), Fact sheet N° 285. World Health Organization.

ZHAO, Y.; SUN, F.; LONG, G.; HUANG, X.; HUANG, W.; LYV, D. **Comparative study on the cooling characteristics of high level water collecting natural draft wet cooling tower and the usual Cooling tower**. Energy Conversion and Management 116 (2016) 150–164.

XING, X. **Research on the Electromagnetic Anti-fouling Techonology for Heat Transfer Enhancement.** Applied Thermal Engineering, vol. 28, Issus 8-9, pag. 889-854, Jun 2008.