



GABRIELLE DO CARMO BRASILEIRO

**ELABORAÇÃO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL
PARA IDENTIFICAÇÃO DE CAUSAS-RAÍZES DE ALARMES
RELACIONADOS A TORRES DE RESFRIAMENTO**

**LAVRAS – MG
2023**

GABRIELLE DO CARMO BRASILEIRO

**ELABORAÇÃO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA IDENTIFICAÇÃO
DE CAUSAS-RAÍZES DE ALARMES RELACIONADOS A TORRES DE
RESFRIAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia Química, para
a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Gilson Campani Junior
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

GABRIELLE DO CARMO BRASILEIRO

**ELABORAÇÃO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA IDENTIFICAÇÃO
DE CAUSAS-RAÍZES DE ALARMES RELACIONADOS A TORRES DE
RESFRIAMENTO**

**ELABORATION OF A COMPUTATIONAL TOOL FOR IDENTIFICATION OF
ALARMS ROOT CAUSES RELATED TO COOLING TOWERS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia Química, para
a obtenção do título de Bacharel.

Dr. Gilson Campani Junior UFLA
Dr. Nathan Sombra Evangelista UFLA
Eng. Caio Taliani de Andrade BUCKMAN LABORATÓRIOS

Prof. Dr. Gilson Campani Junior
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, especialmente à minha mãe Eliana, meu pai Antonio e minha avó Vilma pelo imensurável apoio durante todos os anos da minha graduação, estando junto comigo em todos os momentos e comemorando as conquistas em conjunto, seja longe (pelas muitas chamadas telefônicas), seja perto (com o saudoso churrasco de volta para casa).

Ao professor Gilson Campani, agradeço por ter sido um ótimo orientador nos últimos anos, por toda a paciência e atenção, e por ter despertado em mim o gosto pela área de controle de processos, que vem a ser hoje grande parte do que faço em minha profissão.

Ao NEPRaE e, especialmente ao professor Janderson, agradeço por terem me apresentado à programação e as suas infinitas possibilidades de aplicação, que fez com que eu desenvolvesse vários projetinhos-piloto e tivesse experiência o suficiente para colocar esses conhecimentos em prática tanto neste estudo quanto no mercado de trabalho.

A todas as amizades que fiz pelo caminho ao longo desses anos de curso. Sem vocês, não conseguiria ter chegado tão longe! Alice, Bianca, Day, Isabela, Milena, Natália, Sarah, Vinícius e mais tantos outros, sentirei falta do nosso convívio diário na UFLA, mas fico feliz que todos estejam encontrando seus caminhos.

Ao pessoal do Time de Digital (Carol, André, Bruno, Gabi, Mari, Milena, Eneias, Hebert, Winderson, Rafa) e de Equipamentos (Caio, Silvio, Matheus) da Buckman Brasil, tanto os que permanecem quanto os que já foram, agradeço pelos inúmeros aprendizados em tão pouco tempo e pela disponibilidade em me ajudar no que fosse preciso, tanto durante o período de estágio quanto agora já como efetivada.

A Mike Willer e Ke Qiu, agradeço pelos desafios e missões dadas durante o trabalho. Foi fazendo uma dessas atividades que surgiu a ideia de desenvolver a ferramenta deste estudo, portanto, sou muito grata.

Por fim, não poderia deixar de agradecer à minha psicóloga, Deborah, pois ela ouviu falar bastante deste TCC nos últimos meses. As reflexões que tive após algumas sessões foram fundamentais para que eu conseguisse dar um gás e finalizasse o trabalho em tempo hábil.

Muito obrigada a todos!

RESUMO

A torre de resfriamento é um equipamento cuja principal função é a de resfriar água de modo eficiente, principalmente quando se trata de processos industriais, nos quais ela é utilizada em conjunto com trocadores de calor, geralmente para regular a temperatura de algum ponto da operação. Tendo em base essa aplicação vital, sabe-se que para a boa conservação e maior vida útil desse tipo de equipamento, que contribui tanto para o controle da temperatura de diversos processos, é preciso ser feito um monitoramento preciso da qualidade da sua água. Isso pode ser feito por meio de sensores aplicados em campo, que medem variáveis essenciais como pH, potencial de oxirredução (ORP), condutividade, concentração de sólidos suspensos e taxa de corrosão. A detecção de falhas e o controle dessas variáveis em condições ótimas de operação, aliada à aplicação de produtos químicos voltados para o tratamento da água, é o que garante que a torre de resfriamento terá menor ocorrência de problemas como corrosão, incrustação, deposição microbiológica, dentre outros. Com essa visão, pretendeu-se neste trabalho realizar um estudo sobre torres de resfriamento, avaliando o seu funcionamento e sistema gerenciamento de alarmes, tendo como base Indicadores-Chave de Performance (KPI's) definidos em normativas internacionais como a EEMUA 191 e ISA 18.2. Buscou-se também desenvolver uma ferramenta computacional, baseada em árvores de decisão de alarmes e análise de causa-raiz, capaz de contribuir para a elucidação, de forma mais simples e direta, de casos complexos de acionamento de alarmes por meio de recomendações de ações corretivas para cada cenário avaliado. Observou-se que para uma torre de resfriamento avaliada em uma empresa do ramo químico, duas das métricas de desempenho estiveram fora do valor esperado: o percentual de contribuição de alarmes mais frequentes em relação à carga geral de alarmes, atingindo um valor de 14,61%, frente ao limite de 5% recomendado pelas normas, devido ao baixo número de alarmes disparados durante o mês, sendo 219 ao todo, e a distribuição do anúncio de alarmes por ordem de prioridade, na qual alarmes de prioridade muito alta deveriam ser apenas 1% e tiveram 14,5% de incidência. Além disso, também foram avaliadas as causas-raízes de alarmes acionados em cenários complexos, com base em catorze árvores de decisão derivadas de vinte causas-raízes que serviram para alimentar o banco de dados da ferramenta computacional desenvolvida, denominada I_AM_ROOT. O programa foi feito em linguagem *python*, sendo utilizada a biblioteca *tkinter* para a criação da interface gráfica. A ferramenta I_AM_ROOT se mostrou promissora em facilitar a tomada de decisão de operadores em campo quando em face ao acionamento de diversos alarmes em conjuntos, fornecendo de maneira simples e intuitiva as recomendações para ações corretivas das situações encaradas.

Palavras-chave: Gerenciamento de Alarmes. Análise de Causa-Raiz. Ferramenta Computacional. I_AM_ROOT.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Sistemas de Água de Resfriamento.....	7
2.2	Torres de Resfriamento.....	7
2.2.1	Tipos de Torres de Resfriamento.....	14
2.2.2	Problemas Comuns Associados às Torres de Resfriamento.....	16
2.3	Controle e Monitoramento de Processos.....	17
2.3.1	Instrumentação Aplicada a Torres de Resfriamento.....	19
2.3.2	Controle e Monitoramento do Tratamento de Água em Torres de Resfriamento.....	19
2.4	Sistemas de Alarmes Industriais.....	23
2.4.1	Normas EEMUA 191 e ISA 18.2 para Gerenciamento de Alarmes.....	24
2.4.2	Análise de Causa-Raiz.....	30
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	Escolha do Sistema Estudado.....	32
3.2	Diagnóstico do Sistema.....	32
3.3	Método de Análise de Causa-Raiz dos Alarmes Identificados.....	33
3.4	Metodologia de Elaboração da Ferramenta Computacional.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1	Diagnóstico do Sistema.....	36
4.2	Análise de Causa-Raiz.....	37
4.3	Ferramenta Computacional.....	42
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
	REFERÊNCIAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

Torres de resfriamento são uns dos equipamentos mais comuns de serem encontrados quando se analisam as plantas químicas. Esse sistema se faz necessário devido à sua capacidade de remover parte da energia térmica e, com isso, regular a temperatura da água industrial que circula nos processos químicos, principalmente os de maior complexidade, como as refinarias de petróleo. As torres também podem ser utilizadas em outras aplicações mais rotineiras, não necessariamente ligadas à indústria, como para o bom funcionamento de sistemas de climatização de shoppings e hospitais, por exemplo.

Tendo isso em vista, é de suma importância que o monitoramento de torres de resfriamento seja feito de maneira constante, com atenção às condições ótimas de funcionamento do sistema. Para tal, a aplicação de sensores visando monitorar variáveis específicas, que impactam diretamente a eficiência do processo, e o gerenciamento de alarmes advindos desse acompanhamento surgem como as melhores alternativas em termos de visibilidade de todas as situações que podem vir a ocorrer durante a operação de uma torre de resfriamento (ARAÚJO, 2010; SILVA, 2018).

Para que o gerenciamento de alarmes seja feito de forma a gerar bons resultados no que tange à resolução e identificação de problemas, muitas indústrias recorrem à elaboração de árvores de decisão, que delineiam de maneira simples e objetiva o que determinado alarme significa e como o respectivo problema pode ser resolvido (REIS, 2010). Tal prática facilita muito o trabalho de operadores em plantas industriais, demonstrando o passo a passo e etapas de verificação para cada uma das situações adversas a serem vivenciadas.

Entretanto, quando há uma grande quantidade de alarmes disparados, várias ações devem ser tomadas ao mesmo tempo a partir de muitas informações que são processadas pelo time de operações em um curto intervalo de tempo. Portanto, por diversas vezes torna-se mais difícil a identificação das causas-raízes de certo problema de forma rápida e eficaz, dada a complexidade do caso ocorrido (MONTENEGRO, 2015).

Com isto em mente, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma análise do funcionamento dos alarmes presentes em uma torre de resfriamento em uma indústria do ramo químico, e desenvolver uma ferramenta computacional capaz de auxiliar na identificação de causas-raízes de alarmes relacionados à sua operação a partir de árvores de decisão utilizadas por operadores da indústria química.

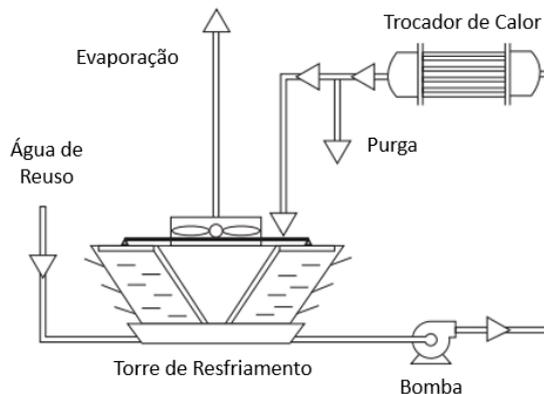
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas de Água de Resfriamento

Existem distintos tipos de sistemas de água de resfriamento, que podem ser classificados a partir do reaproveitamento da água de recirculação (ELKIND, 1996). São eles: sistema aberto, semiaberto e fechado.

O sistema aberto consiste na passagem da água de resfriamento pelo processo, sendo descarregada em outro ponto, sem haver qualquer tipo de reaproveitamento. Já o sistema fechado é aquele no qual a água é resfriada por outro fluido com o auxílio de um trocador de calor, mas sem que haja contato entre eles. Enquanto isso, o sistema semiaberto tem como característica a circulação da água de processo por uma torre de resfriamento para que ela consiga retornar à operação já a uma temperatura adequada. O sistema semiaberto, que será foco do estudo deste trabalho, está exposto na Figura 1.

Figura 1 – Sistema de recirculação semiaberto.



Fonte: Adaptado de Buckman (2017).

2.2 Torres de Resfriamento

A torre de resfriamento é um tipo de instalação capaz de fazer o resfriamento da água industrial, geralmente utilizada associada a trocadores de calor, por meio de contato com ar atmosférico. Devido às características de baixo custo e boa eficiência, tem se tornado uma parte crucial de diversos processos químicos em que essa troca de calor se faz necessária (KOLMETZ, 2014).

O seu funcionamento se baseia na entrada de certa quantidade de água quente, que é reduzida a gotas menores com o auxílio de *sprays* ou bicos pulverizadores. Essa água em

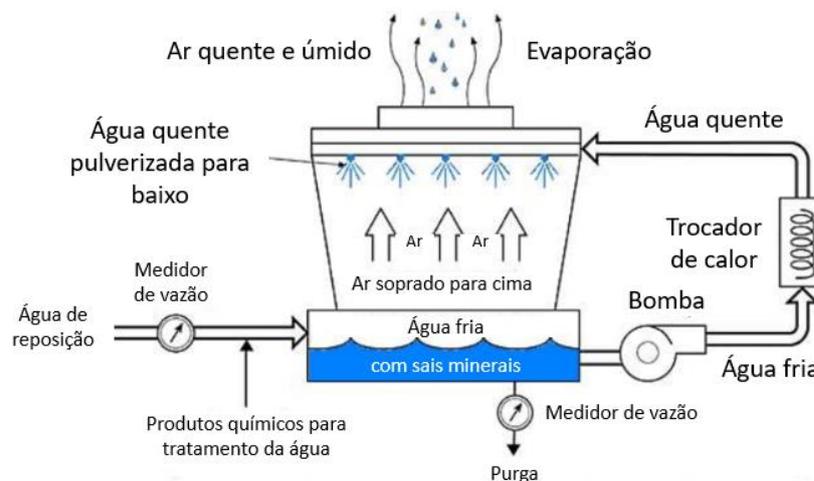
spray tem contato com o ar atmosférico, mais frio do que ela e, devido a uma maior superfície de contato dessas gotículas com o ar e à vaporização da água, ocorrem ali dois processos distintos: transferência de massa e transferência de calor (MCCABE, 2005). Ambos os fenômenos contribuem para a retirada de calor e conseqüente redução da temperatura da água.

A transferência de massa se dá quando o ar entra em contato com essas gotículas de água quente. Com isso, ocorre a vaporização parcial da água para o ar, tornando o ar mais úmido na saída em relação à entrada (MCCABE, 2005). O calor latente necessário para a mudança de fase da água líquida para vapor é aquele retirado no processo de resfriamento.

Já a transferência de calor ocorre no processo de resfriamento devido à diferença de temperatura da água e do ar que adentraram à torre. Como a água quente pulverizada entra em contato íntimo com o ar, que estava a uma temperatura mais baixa, a tendência é que a temperatura dos dois entre em equilíbrio. Em conseqüência disso, a água é recolhida na base da torre, por efeitos gravitacionais, a uma temperatura inferior à de entrada; enquanto o ar sai pelo topo da torre, mais quente do que no início do processo, até porque a densidade do ar quente é menor, o que facilita a sua tendência de subida (MCCABE, 2005).

Resumindo as etapas descritas anteriormente, para a operação de uma torre de resfriamento tem-se como entradas: água quente e ar atmosférico para se obter como saídas, água fria, que é o principal objetivo do processo, além de ar úmido e quente. Na Figura 2 abaixo, é possível observar visualmente como se dá a base desta operação. Outros elementos ainda serão descritos posteriormente no texto.

Figura 2 – Torre de resfriamento: funcionamento básico.



Fonte: Adaptado de Kolmetz (2014).

Na Figura 2 é possível observar outros elementos do sistema como a água de reposição, a entrada de produtos químicos para o tratamento da água, a purga e a bomba, além do próprio trocador de calor e medidores de vazão. Alguns dos elementos citados são também importantes para o controle do processo a ser realizado, o que será abordado com detalhe mais adiante.

A bomba se faz necessária na operação da torre de resfriamento para retornar a água agora resfriada para o processo, recirculando-a novamente pelos trocadores de calor. Geralmente, o objetivo dos trocadores de calor é o de resfriar algum fluido de importância. Portanto, a água da torre de resfriamento passa pelo processo principal, cumprindo o seu papel de resfriamento, de modo que a instalação da torre é um recurso para que essa mesma água possa ser, portanto, recirculada e utilizada novamente com o mesmo objetivo.

Na base da torre de resfriamento, pode-se observar que geralmente existem tanques para o armazenamento de água e esse é um dos principais pontos em que o controle pode ser aplicado. Essa água mais fria, devido ao processo de vaporização sofrido, encontra-se mais concentrada em sais minerais, como cálcio, magnésio, potássio, sódio, sílica, dentre outros. Esses sais são os principais responsáveis de problemas que podem vir a levar ao desligamento ou até mesmo inutilização da torre de resfriamento, como corrosão, deposição e incrustação.

Tendo isso em vista, existem algumas medidas que podem ser tomadas para evitar que isso ocorra. Uma delas é a utilização da água de reposição e da purga no sistema. A partir do momento em que se observa que a água armazenada na torre está ficando muito concentrada em sais minerais, fator que é controlado geralmente a partir de dados de condutividade elétrica, abre-se a purga, para que essa água muito concentrada seja descartada. Diante disso, o sistema é reabastecido com uma certa quantidade de água de reposição, para que a concentração dos sais minerais se ajuste novamente aos valores ótimos. Isso faz com que seja reduzida a probabilidade de ocorrer quaisquer tipos de deposições envolvendo os íons livres na água do sistema. Além disso, para evitar os problemas supracitados e possíveis contaminações microbiológicas e/ou formação de espuma, são aplicados produtos químicos como biocidas, inibidores e dispersantes, aumentando a vida útil da torre e de seus componentes.

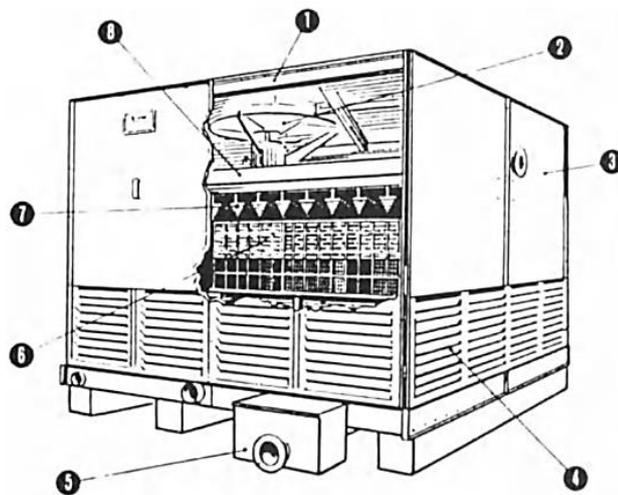
Os biocidas e dispersantes são muito importantes na preservação do recheio das colunas de resfriamento, dado que ajudam a evitar ou até mesmo retardam a formação de biofilme e espuma. Esses elementos podem impedir a água de seguir seu curso natural até o tanque de armazenamento e garantem que a água do sistema não causaria doenças, como a temida *Legionella*, em seus operadores. Exemplos de biocidas e dispersantes comumente

utilizados são a monocloramina, para controle microbiológico, e HEDP, sigla em inglês para “*Hydroxyethylidene Diphosphonic Acid*” como dispersante.

Já os inibidores são responsáveis por evitar que os íons se agreguem, levando à formação de corrosão, incrustação e deposição em determinados pontos da torre. Isso é importante principalmente no recheio, onde pode haver acúmulo de matéria, seja ela orgânica ou inorgânica, devido à maneira como ele é feito, justamente para aumentar ao máximo a superfície de contato da água com o ar.

Em se tratando dos componentes básicos de uma torre de resfriamento, estão entre eles: (1) a estrutura na qual se encontram os ventiladores; (2) ventiladores de fluxo axial; (3) painéis externos geralmente feitos de aço macio; (4) venezianas que permitem a entrada de ar; (5) reservatório; (6) recheio; (7) um sistema de distribuição de fluxo por efeitos gravitacionais e (8) eliminadores de gotas, como pode se observar na Figura 3.

Figura 3 – Componentes de uma torre de resfriamento.



Fonte: Hill et al. (1990).

Os ventiladores são cruciais para o bom funcionamento da torre, dado que eles são quem fazem a eliminação do ar quente e saturado, retirando-o do processo. Eles têm um efeito importante sobre a eficiência energética da operação e geralmente é onde se concentra uma boa parcela do custo de manter uma torre de resfriamento operando.

Na base das colunas, usualmente, encontram-se as venezianas. Por elas é onde ocorre a entrada de ar atmosférico no sistema. Note que na ilustração da Figura 3 elas estão inclinadas para cima. Isso se dá porque essa inclinação, além de evitar que se perca água no processo,

favorece com que o ar que entra siga o fluxo desejado, em direção aos ventiladores, no topo da torre. Na Figura 4, é possível observar um exemplo dessas venezianas.

Figura 4 – Exemplo de venezianas de uma torre de resfriamento.

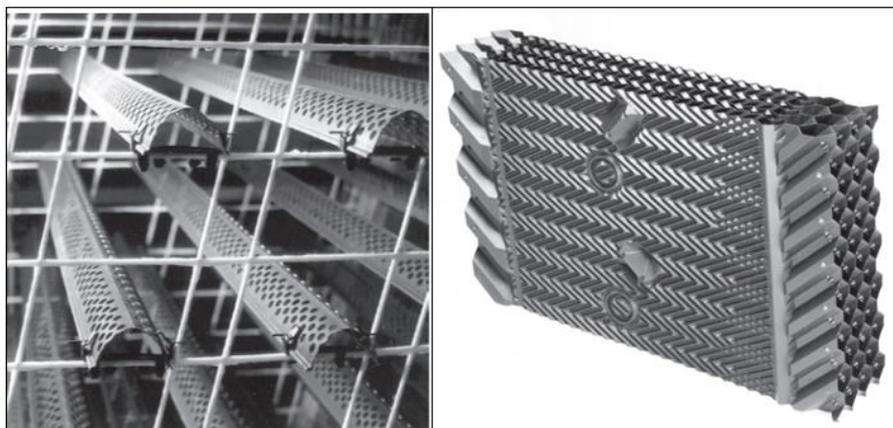


Fonte: Baltimore Aircoil Company (2021).

Outro ponto muito importante da torre é o recheio. Nele é onde ocorre a maior parte da transferência de calor do processo. O enchimento é capaz, ao mesmo tempo, de promover uma maior superfície de contato e o máximo tempo de contato entre o ar e a água, devido às dificuldades que ele cria para que a água siga o seu fluxo por conta da gravidade (JOHN, 2009). Isso faz com que as gotículas percam muito da sua velocidade e tenham um intervalo suficiente de tempo de contato com o ar, que contribui principalmente para a eficiência da transferência de calor.

Os dois tipos de recheios clássicos da indústria são a barra de respingo e o filme, que podem ser observados na Figura 5.

Figura 5 – Tipos de recheio de colunas de resfriamento, sendo a da esquerda, Barra de Respingo e da direita, Filme.



Fonte: John (2009).

As barras de respingo interrompem o fluxo vertical da água, fazendo com que ela respingue em outras barras próximas, diminuindo o tamanho da gota e aumentando a superfície de contato com o ar. Entretanto, apesar de eficiente e de evitar acúmulo de água que podem gerar problemas na torre, as barras devem obrigatoriamente permanecer perpendiculares ao fluxo de água, pois, com uma angulação diferente, facilmente criam-se caminhos preferenciais que podem prejudicar a troca de calor entre o ar e a água (JOHN, 2009).

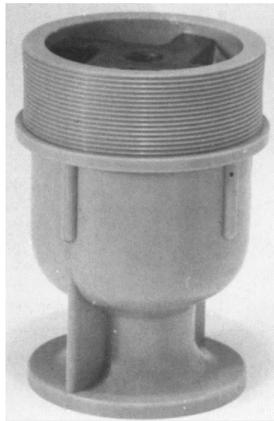
Além disso, o material com o qual as barras de respingo são feitas deve ser o mais inerte e prático possível, para evitar reações indesejadas e facilitar a troca de componentes, quando preciso. Os tipos de maior durabilidade são feitos de grade de plástico reforçada com fibra, mas há registros da utilização também de grades de arame revestidas de PVC, grades de aço carbono revestidas e até ripas de madeira tratada (JOHN, 2009).

Quanto ao filme, diferentemente da barra de respingo, ele mantém a trajetória vertical da água por um longo e sinuoso caminho, causando máxima exposição ao fluxo de ar. Para melhor desempenho, o espaçamento entre os filmes deve ser pequeno e uniforme além de se assegurar bom fluxo, tanto de ar quanto de água, pelo sistema. Em contrapartida, esse tipo de recheio é mais propício a sofrer com contaminações microbiológicas, levando à formação de biofilme e ao entupimento da estrutura, devido à maior possibilidade de acúmulo de matéria nas suas divisões internas (JOHN, 2009).

No que diz respeito ao material de fabricação, os filmes podem ser feitos de qualquer material que possa ser moldado de acordo com as necessidades de projeto do sistema. O mais comum, no entanto, é a aplicação de PVC para a confecção destas peças por conta das suas características como ser inerte, leve e moldável.

Em se tratando do sistema de distribuição de fluxo por efeitos gravitacionais, existe o do tipo calha e o formado por bicos aspersores. O segundo sistema é o mais utilizado atualmente, uma vez que pulveriza a água em pequenas gotículas no recheio para que assim possa haver uma maior troca térmica. Estes sistemas têm como principal matéria-prima plásticos inertes, como o polipropileno, como sinaliza a Figura 6.

Figura 6 – Exemplo de um bico de pulverização

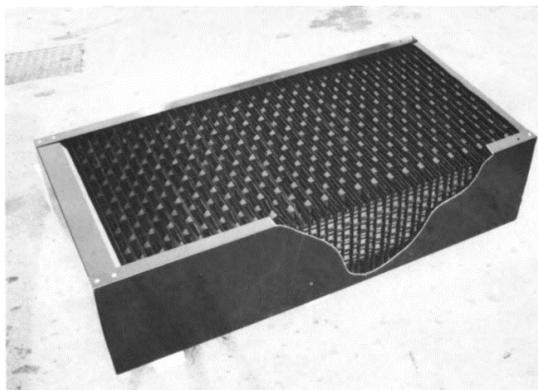


Fonte: Hill et al. (1990).

Além dos componentes da torre de resfriamento que já foram abordados, o eliminador de gotas (*drift eliminator*, em inglês) possui sua importância quando se trata da preservação dos ventiladores que atuam no sistema. Esses componentes, como o nome já diz, tem por missão, impedirem que o ar com vapor d'água saturado entre em contato com os ventiladores, a fim de evitar corrosão e diminuição da vida útil desses equipamentos, que, como mencionado anteriormente, interferem bastante no custo energético de operação.

Portanto, os eliminadores de gotas atuam quase da mesma forma que o recheio, mas de modo a evitar que as gotículas de água cheguem até os ventiladores. Ou seja, o ar ao passar pela estrutura tem várias mudanças abruptas de direção e isso faz com que as gotículas fiquem retidas ali e, eventualmente, voltem para o ciclo da torre, protegendo assim os equipamentos da ação da umidade (JOHN, 2009). Da mesma forma que os recheios, o material mais indicado para esses eliminadores é o PVC, e um exemplo pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Exemplo de um eliminador de gotas



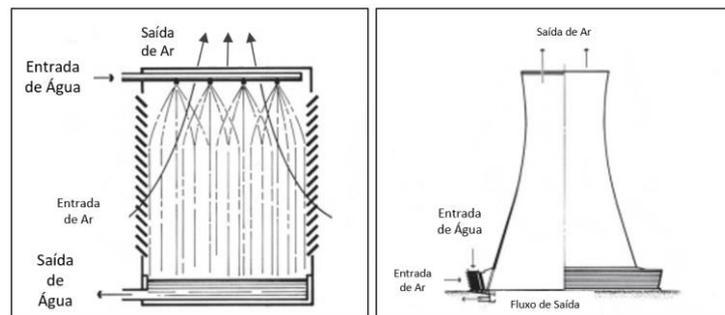
Fonte: Hill et al. (1990).

2.2.1 Tipos de Torres de Resfriamento

Para diferentes necessidades do processo, existem tipos de torres de resfriamento que se adaptam melhor às condições da planta química. Elas podem ser classificadas mais comumente de acordo com a corrente de ar ou pelo padrão do fluxo de ar.

As torres de tiragem natural possuem uma diferença entre as pressões externa e interna de tal forma que a circulação de ar na estrutura se dá naturalmente. Alguns exemplos mais comuns são as torres atmosféricas e as torres hiperbólicas, como descrito na Figura 8.

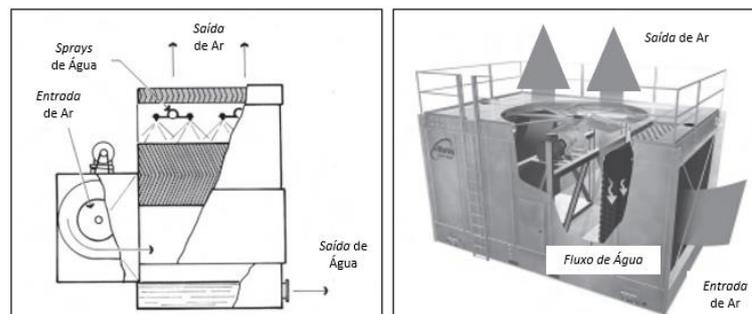
Figura 8 – Exemplos de Torres de Resfriamento de Tiragem Natural.



Fonte: Adaptada de IME (2020).

Já nas torres de tiragem mecânica, diferentemente das de tiragem natural, o escoamento de ar no interior da estrutura se dá por conta do ventilador instalado. Isso pode ocorrer de maneira forçada ou induzida. Nas torres de tiragem forçada, o ventilador encontra-se na base da torre e puxa diretamente o ar atmosférico. Já nas torres de tiragem induzida, o ventilador é instalado no topo da estrutura e induz a direção do vento para cima com o auxílio das venezianas. Na Figura 9 é possível analisar a diferença entre esses dois tipos de tiragem mecânica.

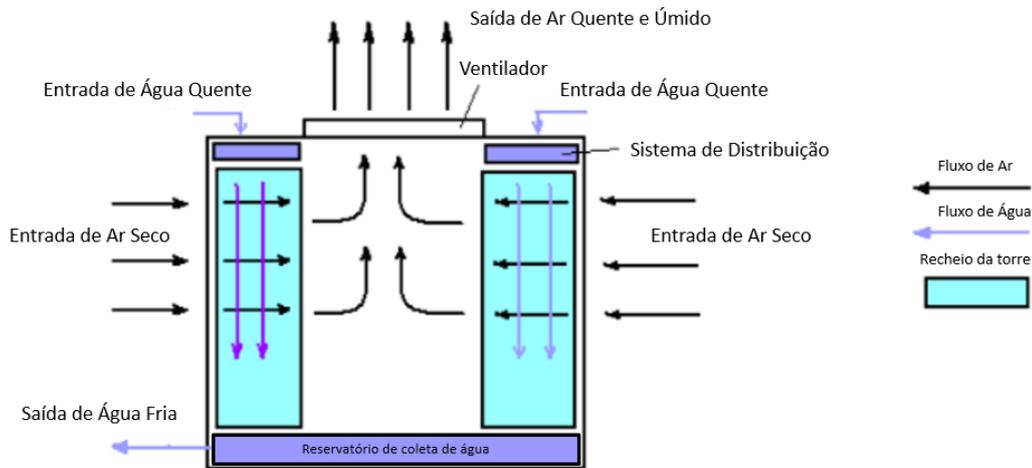
Figura 9 – Exemplos de Torres de Resfriamento de Tiragem Mecânica



Fonte: Adaptada de IME (2020).

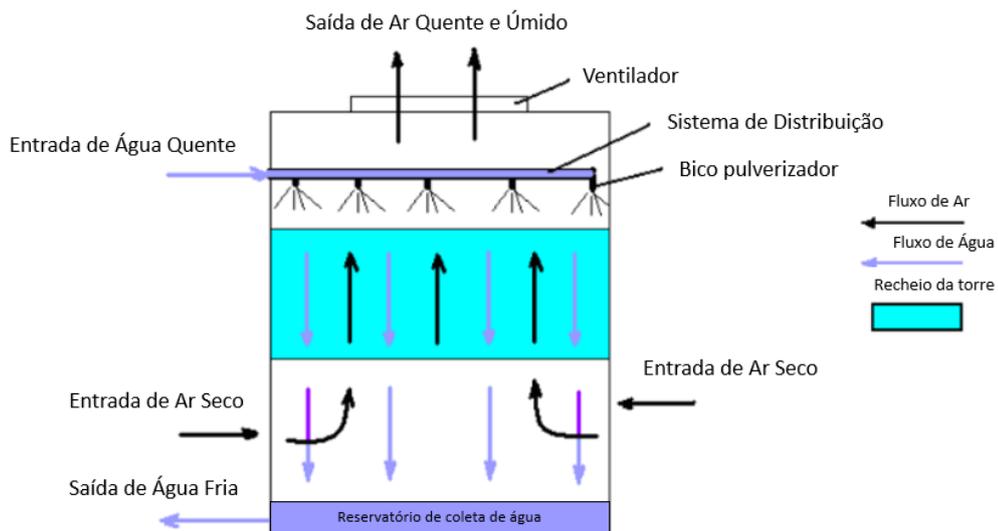
Além da classificação baseada na movimentação da corrente de ar, existe outra, que é baseada no padrão do fluxo de ar. Esse fluxo pode se dar de forma cruzada, na qual o ar e a água se encontram no interior da torre de forma perpendicular, ou contracorrente, onde a água e o ar se encontram em direções contrárias. Nas Figuras 10 e 11 pode-se notar a diferença entre os dois esquemas.

Figura 10 – Esquema de Torre de Resfriamento de Fluxo Cruzado.



Fonte: Adaptada de Kolmetz (2014).

Figura 11 – Esquema de Torre de Resfriamento de Fluxo Contracorrente



Fonte: Adaptada de Kolmetz (2014).

2.2.2 Problemas comuns associados às torres de resfriamentos

Para que haja uma boa operação da torre de resfriamento, é necessário que algumas condições sejam satisfeitas. Entre elas, é essencial que haja uma boa qualidade da água que circula pela torre, a fim de evitar alguns dos problemas mais comuns que podem vir a ocorrer nesse sistema, dentre eles: corrosão, como o principal; incrustação; formação de depósitos, mais conhecido pelo termo em inglês “*fouling*” e crescimento microbológico (BUCKMAN, 2017).

A corrosão, problema mais grave dentre os que ocorrem com torres de resfriamento, consiste em uma perda de material metálico devido a processos naturais de oxirredução que podem ocorrer tanto com a água quanto com o ar em contato com a superfície do metal (BUCKMAN, 2017). Isso faz com que possam surgir furos, redução de resistência mecânica, além de diminuir consideravelmente a vida útil da torre.

Já a incrustação pode ser definida como uma deposição inorgânica devido a um aumento na concentração de compostos antes dissolvidos na água que começam a precipitar. Ela pode causar obstrução de tubulação e componentes acessórios, diminuição na taxa de troca térmica devido à camada de material impedindo o contato entre a água e a superfície metálica, ou mesmo do recheio, e aumento de processos corrosivos por dentro da região em que houve a incrustação (BUCKMAN, 2017).

No que diz respeito à formação de depósitos, entram aqui quaisquer tipos de deposições indesejadas que possam impedir de alguma forma a troca de calor eficiente do sistema. O que é chamado em inglês de “*fouling*” se refere geralmente a deposições de origem orgânica, que apesar de precipitarem, não tem uma aderência tão forte às estruturas metálicas como as incrustações, podendo ser retiradas com uma limpeza apropriada da linha de produção, quando em estágios iniciais (BUCKMAN, 2017).

Por fim, o crescimento microbológico pode ser encarado como uma deposição microbológica que ocorre no sistema, interferindo no fluxo normal de água e induzindo até a uma maior corrosão na linha de processo. Os microrganismos mais comumente encontrados são algas, bactérias e fungos, os quais podem levar a problemas como redução da eficiência da torre, entupimento de tubulação e até gastos excessivos com produtos químicos para o tratamento da água de processo (BUCKMAN, 2017).

2.3 Controle e Monitoramento de Processos

Para o bom funcionamento de qualquer segmento industrial em termos de segurança, impacto ambiental e otimização de processos, é fundamental que haja a aplicação de mecanismos de controle, que visam manter as operações dentro de condições ótimas (SEBORG, 2017). Devido ao fenômeno de implementação de novas tecnologias nas etapas do processo produtivo, as indústrias estão cada vez mais automatizadas e, portanto, o devido conhecimento de técnicas de controle e monitoramento de processos químicos se mostra cada vez mais importante.

De modo geral, os sistemas de controle possuem dois objetivos principais: manter as variáveis de processo dentro de uma faixa de valores aceitáveis para condições operacionais e permitir a transição de uma condição operacional para a outra, assegurando a estabilidade do processo (SEBORG, 2017).

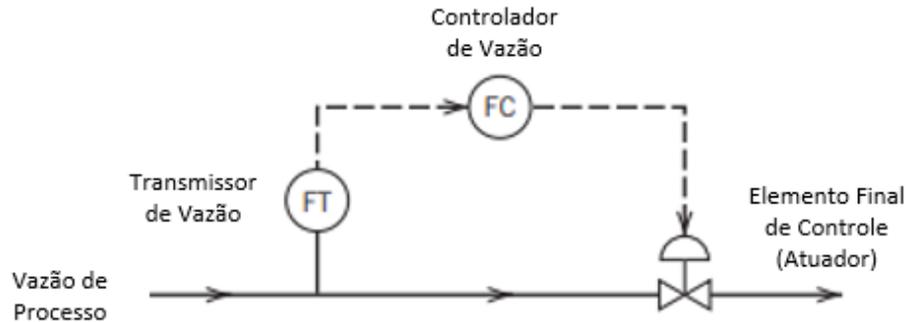
Para que os objetivos acima listados sejam cumpridos, devem ser respeitados alguns requisitos operacionais, como: especificações de produtos e/ou de clientes, regulamentações ambientais, fatores econômicos, precauções de segurança e restrições de processo (STEPHANOPOULOS, 1984).

Desse modo, controle de processos consiste na regulação de variáveis de interesse, por meio de variáveis manipuladas, sejam elas: temperatura, pressão, vazão, dentre outras, de modo a suprimir perturbações externas e manter o sistema dentro de condições operacionais aceitáveis, seguindo os requisitos de projeto.

Já o monitoramento de processos tem como premissa o acompanhamento íntimo da operação utilizando-se de medidas relevantes das variáveis de interesse (STEPHANOPOULOS, 1984). Um dos objetivos do monitoramento é a detecção de falhas, a partir da checagem constante da ocorrência ou não de comportamentos anormais durante a operação de uma planta química, por exemplo.

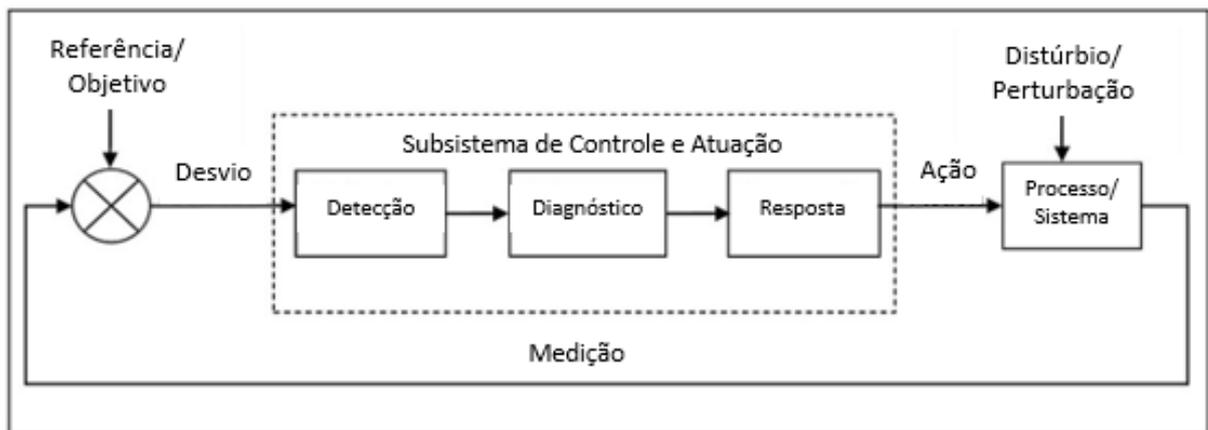
Além disso, há também o monitoramento para fins de controle, no qual são calculadas as ações a serem tomadas pelos atuadores baseadas em valores medidos e especificados das variáveis de processo, como exemplificado no esquema de um sistema de controle de vazão por realimentação (*feedback*) (Figura 12) e no diagrama de blocos para este tipo de sistema (Figura 13).

Figura 12 – Sistema de controle de vazão por realimentação (*feedback*).



Fonte: Adaptada de Seborg (2017).

Figura 13 – Diagrama de blocos de um sistema do tipo *feedback*.



Fonte: Adaptada de ISA 18.2 (2016).

Como pode-se observar no sistema exemplificado, tem-se uma variável de processo sendo medida a todo instante pelos equipamentos adequados. Essas medições são enviadas por meio do transmissor diretamente para o controlador, no qual a ação de controle será avaliada, baseado no valor de setpoint colocado para aquele sistema. Isso faz com que, conseqüentemente, o controlador mande um sinal para o atuador, determinando o que deve ser feito para que o sistema retorne ao seu ponto de equilíbrio.

Em se tratando de monitoramento e controle de torres de resfriamento, diferentes tipos de instrumentos podem ser aplicados para satisfazer os objetivos do sistema de controle proposto, o que será visto em sequência.

2.3.1 Instrumentação aplicada a Torres de Resfriamento

Por definição, a instrumentação de processos consiste em uma ciência na qual se estuda, desenvolve e aplica instrumentos para o monitoramento e controle de processos (BEGA, 2006). Dentre esses instrumentos, existem aqueles responsáveis por monitorar e detectar quaisquer variações no sistema (medidores); outros têm o papel de decidir o que deve ser feito em relação a alguma perturbação que tenha sido percebida (controlador) e, por fim, alguns atuam no processo de modo a tomar alguma ação a partir do que foi decidido pela programação prévia (atuador, como válvulas e bombas).

No que diz respeito a torres de resfriamento, a instrumentação do processo pode ter diferentes vertentes. Pode-se focar na preservação do equipamento avaliando a sua estrutura em si, fazendo a instalação de sensores e medidores de vibração, capazes de identificar perturbações fora do padrão no sistema. Também pode-se prezar pela manutenção da vida útil do equipamento monitorando os sinais apresentados pela água de processo ao longo da operação (BUCKMAN, 2017). Uma vez que as torres possuem estrutura metálica e a água tem grande potencial corrosivo, fazer o tratamento da água de modo adequado pode garantir o bom funcionamento do sistema por longos anos.

Sendo o controle e monitoramento do tratamento da água de processo das torres de resfriamento o foco do presente trabalho, serão abordadas adiante algumas das principais variáveis a serem medidas e controladas neste sistema, além dos principais tipos de instrumentos utilizados.

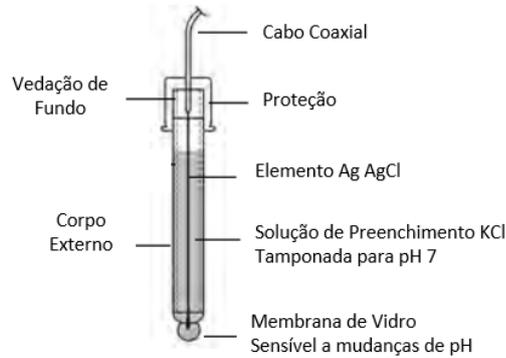
2.3.2 Controle e Monitoramento do Tratamento da Água em Torres de Resfriamento

Com o objetivo de manter a água de processo em condições adequadas para uma operação segura e evitar os tipos de problemas mais comuns que podem vir a atingir esse tipo de sistemas, as principais variáveis a serem avaliadas são pH, condutividade elétrica, potencial de oxirredução, concentração de sólidos suspensos e corrosão.

Para medições de pH, utiliza-se o sensor caracterizado como um analisador de íon seletivo, pois o foco desse medidor é a identificação de íons H^+ por meio de membrana seletiva. O seu mecanismo de funcionamento se dá por meio da relação de um transdutor eletroquímico que gera um determinado potencial elétrico a partir da concentração do íon de

interesse em solução (LIPTÁK, 2003). Um exemplo desse tipo de sensor está disposto na Figura 14.

Figura 14 – Sensor de pH.

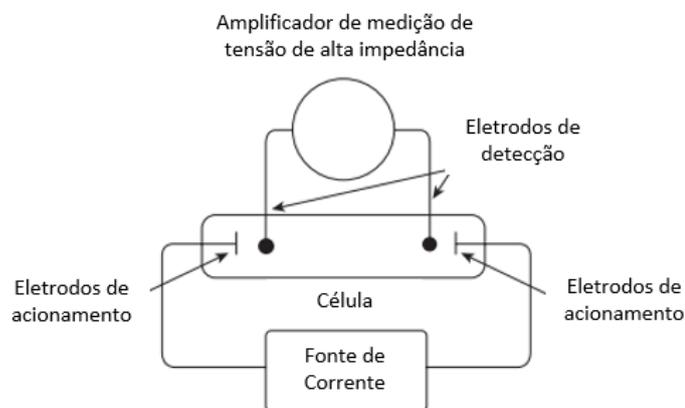


Fonte: Adaptado de Lipták (2003).

A medição do pH é muito importante para determinar se a água presente no reservatório da torre encontra-se ácida ou alcalina. O normal para operação de torres de resfriamento é que o pH da água esteja idealmente próximo de 8,3. Devido aos produtos químicos aplicados para o tratamento da água, manter esse controle é essencial para a preservação dos equipamentos, evitando problemas precoces de corrosão no sistema.

Já o sensor de condutividade elétrica funciona por meio da medição da concentração total de íons em solução. O mecanismo de funcionamento consiste em relacionar a quantidade de íons em solução com a sua condutividade elétrica de forma diretamente proporcional. A Figura 15 exemplifica um tipo de circuito de medição de condutividade elétrica.

Figura 15 – Circuito de medição para condutividade elétrica.



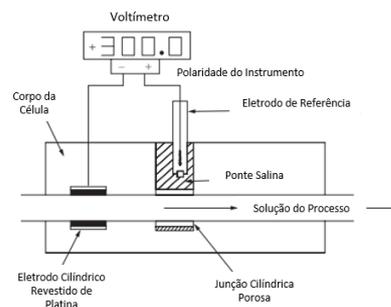
Fonte: Adaptada de Lipták (2003).

Este sensor se apresenta como crucial para determinar, de acordo com o sistema de controle, se haverá a necessidade de inserção de água de reposição no reservatório da torre ou não. O funcionamento se dá da seguinte forma: caso os ciclos de concentração e a condutividade medida estejam muito altos, considera-se que a água da torre está fora das suas condições ideais e, portanto, os atuadores são acionados a fim de que o ajuste seja realizado. A válvula de purga é aberta para que haja o descarte dessa água muito concentrada e, ao mesmo tempo, a válvula da água de reposição também é aberta para que uma água “nova”, ou seja, menos concentrada em íons, entre na torre, até que o valor de condutividade seja reajustado. Esse mecanismo preserva a torre em boas condições de funcionamento por mais tempo, retardando a ocorrência de alguns processos corrosivos.

O potencial de oxirredução é uma outra medida relevante utilizada em processos de tratamento de água para, por exemplo, controlar a adição de biocidas no sistema. Ou seja, nesses casos, o que é medido é o potencial que um desinfetante possui de inativar microrganismos e oxidar materiais orgânicos, a fim de evitar que patógenos sejam transmitidos através da água de processo. O objetivo principal da aplicação de sensores dessa natureza é monitorar o nível de oxidação de cloro livre ou cloro total na água. A diferença de potencial é captada pelo equipamento em casos de oxidação da matéria orgânica, de origem biológica, pelo cloro livre. Um valor de ORP positivo é obtido quando se observa uma maior concentração de cloro livre, enquanto uma maior presença de contaminantes pode ser identificada por um valor de ORP negativo, sendo o ideal para água em torres de refrigeração entre 250 a 350 mV, a depender do pH e alcalinidade da água.

Geralmente, os sensores de ORP contêm um elemento de referência de prata/cloreto de prata e um eletrodo de medição de platina, responsável por medir o potencial elétrico das reações redox e um exemplo de uma célula eletrolítica de medição de potencial de oxirredução pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Célula eletrolítica cilíndrica para medição de potencial de oxirredução.

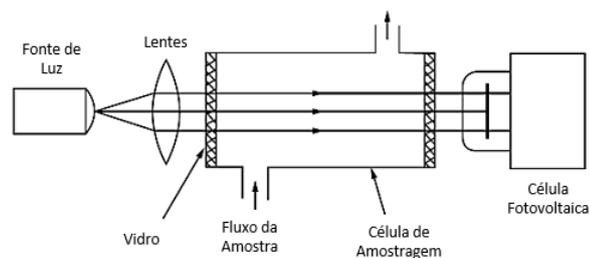


Fonte: Adaptada de Lipták (2003).

Para tratamento de água, ainda mais se referindo a torres de resfriamento, outro aspecto importante a ser avaliado é a concentração de sólidos suspensos em solução. Esse tipo de parâmetro indica a qualidade da água de processo, se é necessário fazer algum tipo de manutenção ou até mesmo identificar processos corrosivos ou de incrustação/deposição de forma mais rápida. Essas medições podem ser feitas a partir de um equipamento chamado turbidímetro.

O turbidímetro consegue, a partir de feixes de radiação eletromagnética na faixa do visível, analisar a dispersão deles no meio por conta das partículas em suspensão e assim estabelecer uma relação: quanto maior o teor de sólidos, maior será a turbidez. Na Figura 17, consta um esquema do funcionamento de um turbidímetro.

Figura 17 – Esquema de funcionamento de um turbidímetro.



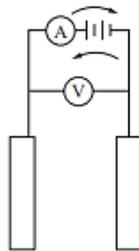
Fonte: Adaptada de Lipták (2003).

Por fim, dentre os sensores utilizados em torres de resfriamento, um dos mais importantes é o de corrosão, dada a sua criticidade para o bom decorrer da operação do equipamento. O sensor de corrosão é capaz de identificar de modo preventivo se a água precisa de tratamento ou se outras medidas podem ser tomadas para que a corrosão, que é um processo natural, possa ser retardada ao máximo, aumentando assim de maneira significativa a vida útil da torre.

A aplicação mais comum em plantas industriais é a de cupons de corrosão, pequenas peças de metal inseridas em meio à vazão de processo, que são monitoradas por determinado período e posteriormente retiradas do sistema. O uso dos cupons permite determinar a taxa média de corrosão pelo cálculo da perda de massa do material durante o intervalo de exposição às condições de operação da torre. Os cupons mais utilizados são geralmente de materiais que costumam compor a estrutura da torre de resfriamento, como aço carbono e cobre (LIPTÁK, 2003).

Para processos em que se almeje o monitoramento dessa variável de modo constante, é possível fazer a aplicação de uma sonda de polarização linear, como observada na Figura 18, que é capaz de fornecer medidas instantâneas de corrosão (LIPTÁK, 2003).

Figura 18 – Esquema de Sonda de Polarização Linear para Medição de Corrosão.



Fonte: Lipták (2003).

Enquanto o sensor de ORP dá maiores indicativos a respeito da qualidade da água de processo, os sensores de corrosão são aplicados com o objetivo de fornecer informações relevantes a respeito da taxa de corrosão ocorrendo no equipamento e, portanto, do possível estado da estrutura da torre em contato constante com a água de processo. Com o uso desses sensores, pode-se, prever em quanto tempo serão necessárias ações corretivas mais incisivas contra a corrosão que pode vir a ocorrer na torre (MELLO, 2008).

Todos os instrumentos citados anteriormente fazem parte de um extenso esquema de controle, cujas variáveis são monitoradas e mantidas em condições ótimas visando uma maior eficiência e maior tempo de vida útil da torre de resfriamento.

Para que o monitoramento dessas variáveis tenha o efeito desejado, além da configuração de controle, é preciso também estabelecer todo um sistema de alarmes associado aos sensores instalados (ALVES, 2013). Desse modo, a qualquer momento em que haja uma inconformidade ou o controle estabelecido falhe em sua finalidade, avisos devem ser disparados visando à resolução do problema identificado, além de armazenar dados para a criação de um histórico de comportamento do processo.

2.4 Sistemas de alarmes industriais

Antes de falar sobre sistemas de alarmes industriais, é importante abordar a definição de um alarme. Segundo normativa N-2900A da Petrobras (PETROBRAS, 2011), um alarme caracteriza-se como “qualquer meio auditivo ou visual que indique uma condição inesperada

no processo, equipamento, sistema ou instrumento que exige uma ação corretiva em tempo restrito”.

Tendo isso em mente, as indústrias desenvolvem, portanto, sistemas para facilitar a identificação e gerenciamento destes alarmes, tudo isso seguindo normas já estabelecidas como a EEMUA 191 e ISA 18.2.

2.4.1 Normas EEMUA 191 e ISA 18.2 para gerenciamento de alarmes

Segundo a norma 191 da Engineering Equipment and Materials Users' Association, mais conhecida como EEMUA 191, são 4 os princípios fundamentais para a criação de um sistema de alarmes: usabilidade, segurança, monitoramento de performance e investimento em engenharia.

A usabilidade se faz presente quando são levados em conta aspectos como a relevância da informação de certo alarme para o operador da planta; a indicação clara da finalidade daquele alarme e qual tipo de resposta é esperada a partir do seu disparo; a frequência de disparos de modo a ser minimamente administrável pelo operador e a facilidade de entendimento quanto ao funcionamento do sistema de alarmes (ENGINEERING EQUIPMENT AND MATERIALS USERS' ASSOCIATION – EEMUA 191, 2013).

Já a segurança se faz presente, pois é o principal intuito do projeto de um sistema de alarmes. Ou seja, deve-se garantir a integridade do processo que está sendo monitorado na planta química e daqueles que o operam, observando aspectos ambientais e legislativos de segurança do trabalho (ENGINEERING EQUIPMENT AND MATERIALS USERS' ASSOCIATION – EEMUA 191, 2013).

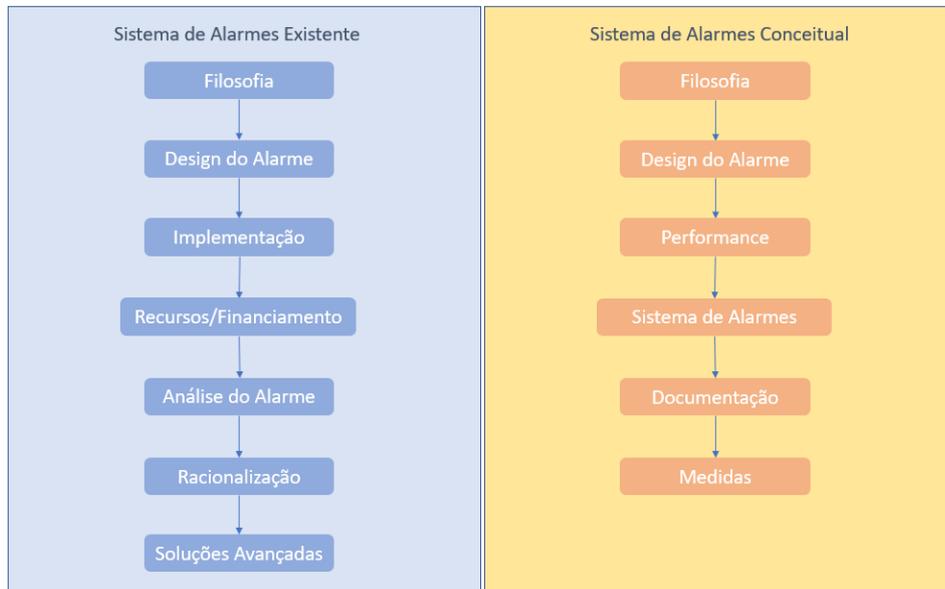
No que tange ao monitoramento de performance, um sistema de alarmes robusto deve passar por avaliações tanto durante a sua etapa de projeto quanto de comissionamento, a fim garantir que ele é efetivo sob quaisquer circunstâncias de operação. Além disso, já durante a operação da planta química, o sistema deve ser constantemente monitorado de modo a manter o alto nível de performance em todas as situações (ENGINEERING EQUIPMENT AND MATERIALS USERS' ASSOCIATION – EEMUA 191, 2013).

Por fim, o investimento em engenharia diz respeito à qualidade do sistema de alarmes criado, que deve sempre respeitar altos padrões. Ao adicionar novos alarmes a um sistema ou fazer modificações em um sistema existente, tudo deve seguir uma metodologia devidamente estruturada, onde cada mudança ou adição é embasada em fatores ambientais, econômicos e de segurança, de modo a evitar problemas operacionais futuros e manter, ou até mesmo

aumentar, a qualidade já estabelecida no projeto inicial (ENGINEERING EQUIPMENT AND MATERIALS USERS' ASSOCIATION – EEMUA 191, 2013).

Ainda segundo a normativa 191, existem duas abordagens possíveis para a implementação de um sistema de alarmes: uma quando ele já está em operação e outra para quando ele ainda está em fase conceitual, como pode-se observar na Figura 19.

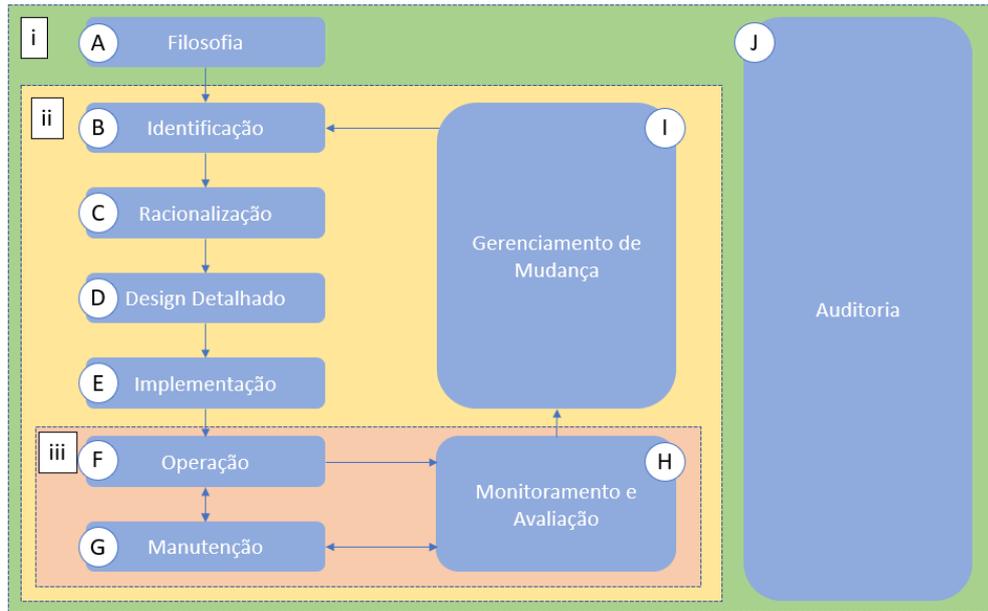
Figura 19 – Roteiros de implementação da norma EEMUA 191 para sistemas de alarmes existentes e em estágio conceitual.



Fonte: Adaptada de EEMUA 191 (2013).

Esses roteiros, que estabelecem o caminho a ser seguido para a elaboração de um sistema de alarmes de alto padrão, vão de encontro ao que é disposto em uma das normas da International Society of Automation, a ISA 18.2. Na Figura 20, pode-se observar como se desenvolve o ciclo de vida do gerenciamento de alarmes de acordo com a norma supracitada.

Figura 20 – Ciclo de vida de um sistema de gerenciamento de alarmes segundo ISA 18.2.



Fonte: Adaptada de ISA 18.2 (2016).

Tendo como base o esquema proposto pela ISA 18.2 (Figura 20), é possível detalhar cada um dos estágios pelos quais passa a elaboração de um bom sistema de alarmes, que foram citadas anteriormente.

A filosofia de alarmes (A) se trata de uma documentação na qual constam os objetivos do sistema proposto, além dos processos necessários para atingi-los. Ela irá, portanto, refletir todos os aspectos operacionais e de manutenção dessa operação. Neste registro, deverão estar presentes os critérios para priorização de alarmes e a definição de suas classes, métricas e limites de performance, além de requisitos de relatórios baseados nos objetivos e princípios para sistemas de alarmes (INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION – ISA 18.2, 2016).

Ainda segundo a norma, a filosofia deverá especificar os processos que serão definidos para cada um dos estágios do ciclo de vida do sistema de gerenciamento de alarmes, e ela deve ser mantida para garantir a consistência do processo de desenvolvimento como um todo. As especificações de requisitos do sistema também entram nesta primeira etapa, sendo mais detalhadas e servindo de guia para a posterior elaboração do design do sistema.

O estágio de identificação (B) passa pela análise minuciosa de quais alarmes podem vir a ser necessários para a aplicação proposta. Isso pode ser feito de diversas maneiras, como pelo levantamento dos potenciais perigos do processo, cumprimento dos requisitos de segurança e ambientais, recomendações advindas da investigação de incidentes, revisões de

procedimentos operacionais e boas práticas industriais (INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION – ISA 18.2, 2016). Todas as informações capturadas por meio desse estudo serão utilizadas na etapa seguinte.

A racionalização de um alarme (C) conecta a sua identificada necessidade de existência com o que foi definido em termos de filosofia do sistema. O resultado disso é uma documentação na qual, a partir da aplicação dos requerimentos levantados, tem-se reunidas informações como o setpoint do alarme especificado, a consequência dele e as ações corretivas que devem ser tomadas pelo operador após o seu disparo (INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION – ISA 18.2, 2016).

Além disso, a etapa de racionalização inclui a prioridade dos alarmes, definida durante a elaboração da filosofia do sistema, baseada no nível das consequências de cada alarme e tempo de resposta permitido, além a separação deles em classes, tendo como guia os critérios citados há pouco (INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION – ISA 18.2, 2016). Os resultados da racionalização são, por fim, documentados em uma base de dados, chamada de Master Alarm Database, que é mantida durante todo o ciclo de vida para eventuais consultas.

O design detalhado (D) se configura em atributos adicionais que são pensados e especificados após a etapa de racionalização, que pode ser dividido em três áreas: Design Básico de Alarme, Design de Interface Homem-Máquina para Alarmes e Design de Técnicas Avançadas de Alarmes (INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION – ISA 18.2, 2016).

Segundo a norma, o Design Básico segue diretrizes baseadas no tipo de alarme e sistema de controle específico. Já o Design de Interface Homem-Máquina inclui critérios para a exibição e anúncio dos alarmes, além de ter as indicações do estado dos alarmes e de sua ordem de prioridade. Enquanto isso, o design voltado para as Técnicas Avançadas de Alarmes é pensado com o objetivo de desenvolver funcionalidades adicionais que levem a uma melhora na eficácia do sistema de alarmes, em comparação com os dois modelos de design anteriores, que são feitos com base apenas no estado do sistema.

No que diz respeito à implementação (E), todas as atividades relacionadas à instalação do sistema de alarmes até o início da sua operação devem estar completas. Neste estágio estão inclusas toda a instalação física além da verificação de lógicas de controle e funcionamento do sistema. Esta é, portanto, a etapa de testes, treinamento de operadores e comissionamento (INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION – ISA 18.2, 2016).

Quanto à operação (F), o sistema pensado já estará funcionando com o total de sua capacidade, executando todas as suas funções. Aqui recomenda-se, de tempos em tempos, que

os treinamentos dados durante a implementação sejam refeitos para que sempre os operadores tenham em mente a filosofia do sistema de alarmes que eles monitoram e o propósito de cada um deles (INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION – ISA 18.2, 2016).

Em relação à manutenção (G), diferentemente do estágio anterior, o sistema não estará em modo operacional, mas sim sendo alvo dos devidos reparos necessários. A manutenção periódica é essencial para assegurar que todos os alarmes estejam funcionando corretamente e da maneira como foram desenvolvidos nas etapas anteriores deste ciclo de vida (INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION – ISA 18.2, 2016).

O monitoramento e avaliação do sistema (H) podem acontecer concomitantemente às fases F e G do ciclo, pois nesse ponto é observada a performance geral do sistema de alarmes. De acordo com os dados recolhidos, é possível estabelecer períodos específicos de manutenção ou até mesmo identificar pontos de melhoria, tanto no sistema quanto nos procedimentos operacionais (INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION – ISA 18.2, 2016). É importante ressaltar também que, sem o monitoramento, a tendência é que a performance do sistema de alarmes vá caindo ao longo do tempo.

A etapa de gerenciamento de mudanças (I) é onde modificações no sistema de alarmes são propostas e, eventualmente, aprovadas. Quaisquer alterações devem seguir cada um dos passos estabelecidos anteriormente, desde a identificação (B) até a possível implementação (E) (INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION – ISA 18.2, 2016).

Por fim, de acordo com a normativa, o estágio de auditoria (J) consiste em revisões periódicas para avaliar a eficácia do processo de gerenciamento de alarmes e manter a integridade do sistema proposto. Essas auditorias podem revelar falhas não aparentes no monitoramento rotineiro e identificar pontos de melhoria na disciplina e organização em seguir a filosofia de alarmes criada.

Para avaliação do sistema de alarmes proposto, existem algumas métricas de performance, os chamados indicadores-chave de performance (KPI's, do inglês Key Performance Indicators), que devem ser avaliados, de acordo com a filosofia criada. Dentre as métricas mais comuns estão os registros de alarmes, que contêm informações sobre eles e são produzidos pelo sistema quando o alarme ocorre. Nesses registros estão presentes também os atributos de alarmes, que correspondem à estrutura de dados relacionada a cada alarme, como o seu tipo, setpoint, classificação na ordem de prioridade, limites inferior e superior, dentre outros (INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION – ISA 18.2, 2016).

A Tabela 1, a seguir, descreve de modo geral estes e outros indicadores recomendados para estimar o nível de performance do sistema de alarmes.

Tabela 1 – Métricas de desempenho recomendadas para avaliação de alarmes

Métricas de Desempenho de Alarmes

(baseadas em, no mínimo, 30 dias de dados disponíveis)

Métrica	Valor Alvo			
A. Alarmes Anunciados/Tempo	Aceitável		Máximo Gerenciável	
A.1. Alarmes anunciados por hora no console do operador	~ 6 (em média)		~ 12 (em média)	
A.2. Alarmes anunciados a cada 10 minutos no console do operador	~ 1 (em média)		~ 2 (em média)	
Métrica	Valor Alvo			
B. Porcentagem de períodos de 10 minutos contendo mais de 10 alarmes	~ < 1%			
C. Número máximo de alarmes em um período de 10 minutos	≤ 10			
D. Porcentagem de tempo em que o sistema de alarmes fica em condição de avalanche	~ < 1%			
E. Porcentagem de contribuição dos 10 alarmes mais frequentes para a carga geral de alarmes	~ < 1% a 5% no máximo, havendo planos de ação para endereçar as deficiências do sistema			
F. Quantidade de alarmes intermitentes	Zero, e elaborar planos de ação para corrigir quaisquer alarmes intermitentes que venham a surgir			
G. Quantidade de alarmes obsoletos	Menos de 5 em um único dia, e elaborar planos de ação para endereçar responsabilidades			
H. Distribuição de Anúncio por Ordem de 3 Prioridades	3 prioridades			
	Baixa	Média	Alta	
	~ 80%	~ 15%	~ 5%	
I. Distribuição de Anúncio por Ordem de 4 Prioridades	4 prioridades			
	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
	~ 80%	~ 15%	~ 5%	~ < 1%

Fonte: Adaptada de ISA 18.2 (2016).

Esses aspectos são avaliados quantitativa e qualitativamente a fim de que se consiga analisar o sistema como um todo, considerando tanto a ótica dos operadores quanto o projeto do sistema de alarmes em si, dentre outros aspectos. Faz-se isso com o objetivo de aprimorar cada vez mais o gerenciamento de alarmes e realizar planos de ação corretivos de forma clara e organizada.

Além do gerenciamento de todos os alarmes relacionados a uma planta química, outro ponto que deve ser observado é como lidar com a resolução do problema após o alarme ter sido gerado. O disparo de um alarme relacionado a um aumento na vazão do processo ou uma queda abrupta no valor de pH, por exemplo, pode ter os mais variados motivos. Tendo isso em mente, algumas abordagens baseadas em conhecimento prévio podem vir a ser utilizadas com a finalidade de facilitar a detecção e resolução de eventos anormais em um processo.

2.4.2 Análise de causa-raiz

A análise de causa-raiz se encaixa como uma das abordagens baseadas em conhecimento, nas quais são utilizadas informações qualitativas, obtidas a partir de conhecimento prévio do processo e experiências passadas, para a resolução e detecção de eventos anormais. Outros métodos também usados são os diagramas de árvores de falhas, lógica difusa (em inglês, *fuzzy logic*), raciocínio lógico e sistemas especializados (SEBORG, 2017).

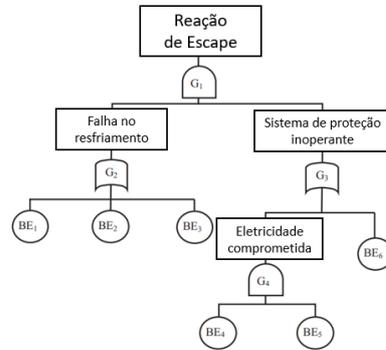
Para chegar até as causas-raízes de determinadas situações de processo, primeiramente devem ser feitos dois tipos de análises, elaboradas com base em diagramas lógicos, utilizados em avaliações de risco. São elas: análise da árvore de falhas (em inglês, *Fault Tree Analysis* (FTA)) e análise da árvore de eventos (em inglês, *Event Tree Analysis* (ETA)) (SEBORG, 2017).

As árvores de falhas destacam todos os tipos de falhas de componentes que possam vir a gerar algum tipo de acidente, explosão ou até mesmo uma série de eventos em cadeia. Já as árvores de eventos focam em um único evento inicial para então avaliar as consequências, classificando-as a partir do quão sérias elas seriam (SEBORG, 2017).

Colocando ambos os tipos de análises à luz, para a FTA há um ponto inicial causador de uma situação indesejada e a partir dele são consideradas todas as causas possíveis de gerá-lo (Figura 21). Cada uma delas é posterior e profundamente avaliada para entender o porquê de terem ocorrido. Ou seja, a análise de árvore de falhas é uma abordagem *top-down*, capaz de gerar uma árvore de relações causais a partir de um evento inicial. Para esse tipo de

abordagem, diagramas lógicos de controle que incluem “E” e “OU” são os mais utilizados (SEBORG, 2017).

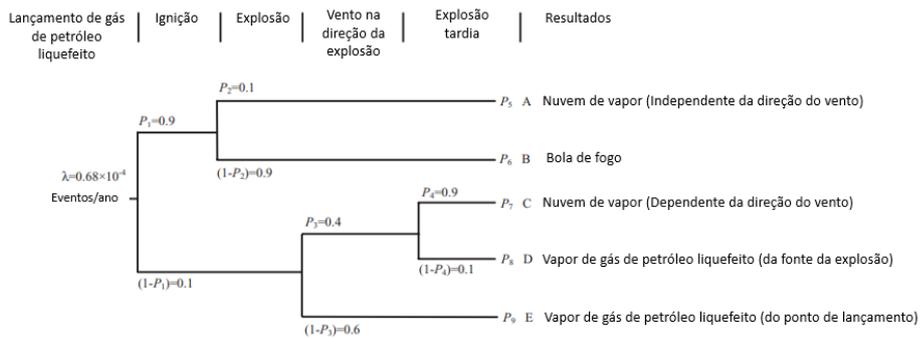
Figura 21 – Exemplo de uma árvore de falhas



Fonte: Adaptada de Ferdous et al. (2010).

Por outro lado, a ETA tem uma única causa como ponto inicial. Diferentemente da FTA, na ETA, para uma causa, serão listados diversos resultados indesejados, mostrando a propagação dessa causa raiz para diferentes tipos de problemas (Figura 22). Portanto, a análise de árvore de eventos se dá a partir de uma abordagem *bottom-up* (SEBORG, 2017).

Figura 22 – Exemplo de uma árvore de eventos



Fonte: Adaptada de Ferdous et al. (2010).

Após a realização de uma ou ambas as análises, uma distribuição de probabilidades deve ser especificada para cada passo das árvores de decisão, a fim de se realizar uma avaliação de riscos do sistema (SEBORG, 2017). Apesar do caráter mais subjetivo que essas análises possuem em relação a outras abordagens, elas fazem parte de um método já validado e detalhado no campo de controle de processos, podendo ser utilizadas nas mais diversas situações.

3. METODOLOGIA

3.1 Escolha do sistema estudado

O sistema escolhido corresponde a uma torre de resfriamento de tiragem mecânica e fluxo cruzado aplicada para o melhor funcionamento de uma instalação física de uma empresa do ramo químico no interior de São Paulo, como exemplificado na Figura 23.

Figura 23 – Exemplo de instalação física de uma torre de resfriamento.



Fonte: Water Chillers (2019).

3.2. Diagnóstico do sistema

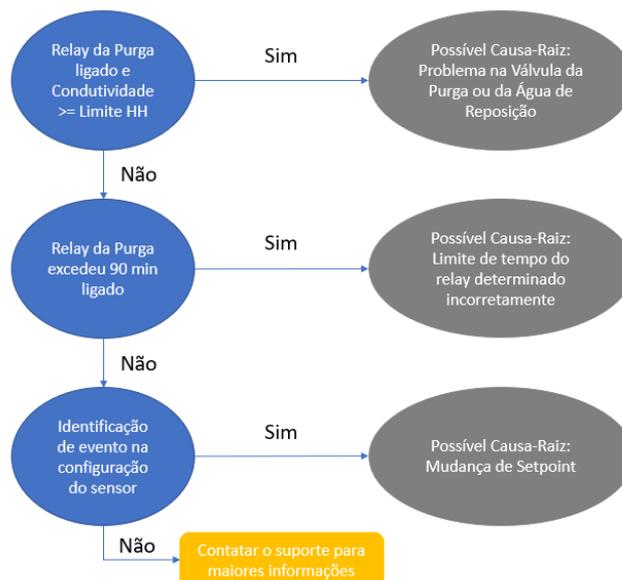
O diagnóstico atual do sistema tem como base um levantamento aprofundado de todas as condições e alarmes pelos quais o sistema em análise foi submetido nos últimos 30 dias para posterior avaliação. Esse diagnóstico visa levantar alguns dos principais KPI's do sistema atual para entender onde a análise de causas-raízes pode vir a contribuir para a melhora deles.

Portanto, a partir do sistema de sensores já instalado no processo estudado no presente trabalho, foram recolhidos dados referentes a condições que remetem à qualidade da água do sistema, fundamental para determinar o tempo de vida útil da torre de resfriamento. Sendo assim, valores de pH, ORP, Condutividade, Concentração de Sólidos Suspensos e Corrosão foram monitorados. Além disso, quaisquer alarmes disparados durante o período de análise, referentes a uma destas cinco variáveis, foram registrados para entender o padrão de funcionamento do sistema e computar os valores atuais de cada um dos KPI's descritos na Tabela 1.

3.3. Método de análise de causa-raiz dos alarmes identificados

Tendo em mente o levantamento retroativo realizado a respeito de cada um dos alarmes que já haviam ocorrido para o sistema analisado, foi feito um estudo causal, que relacionava o disparo de determinados alarmes a certas condições do processo. Para tal, foram utilizadas como guia árvores de decisão, criadas com o intuito de delimitar ações a serem tomadas para a checagem de cada uma das possíveis causas relacionadas a um alarme específico. Na Figura 24, é apresentado um exemplo que demonstra os aspectos que devem ser avaliados e ações a serem tomadas para quando um alarme de tempo limite do *relay* da purga é ativado.

Figura 24 – Exemplo de árvore de decisão para alarme de tempo limite de acionamento da purga disparado.



Fonte: Da autora (2023).

Entretanto, apesar de ser uma ótima ferramenta para tomada de decisão, as árvores consideram e delineiam de modo geral as principais ações a serem tomadas para o disparo de um alarme em específico, como demonstrado acima, de forma simplificada.

O objetivo deste trabalho é, portanto, recolher as informações de cada uma das árvores de decisão existentes para os sensores instalados para a avaliação da água da torre de resfriamento analisada. Assim, encontram-se os pontos em comum, ou seja, causas-raízes que levem à ocorrência de um ou mais alarmes. A partir dessa informação, foi elaborada uma ferramenta computacional para que as causas-raízes possam ser identificadas de maneira mais rápida e levem os operadores em campo a resoluções mais assertivas de cenários complexos.

3.4. Metodologia de elaboração da ferramenta computacional

A fim de estabelecer uma relação entre os diferentes tipos de alarmes que podem vir a ser disparados durante um processo com as suas causas-raízes de forma mais dinâmica, foi criada uma interface gráfica, utilizando-se da biblioteca tkinter do Python. Nessa ferramenta, nomeada I_AM_ROOT, diversos cenários foram reproduzidos, os quais eram capazes de serem encontrados a partir do preenchimento de algumas informações a respeito dos alarmes do sistema.

Primeiramente, a ferramenta apresentou como premissa que até cinco variáveis básicas medidas poderiam ser utilizadas para verificação, dentre elas: pH, ORP, Condutividade, Concentração de Sólidos Suspensos e Corrosão. Estas, em termos de tratamento e qualidade de água das torres de resfriamento, são as principais variáveis a serem medidas pelos respectivos sensores no processo.

Após a indicação destas variáveis pela interface gráfica, a próxima etapa consistiu em ajustar os limites estabelecidos para as variáveis de acordo com o sistema estudado. No caso da análise feita com base em uma instalação de torre de resfriamento, os sensores possuíam quatro limites principais, a serem respeitados e avaliados.

Dentre eles, tinha-se o “*Low Low Alarm Limit*”, termo em inglês que se refere ao menor valor possível o qual uma variável poderia alcançar dentro daquele sistema e, caso alcançado, geraria ações de controle mais severas. Posteriormente, identificava-se o “*Low Alarm Limit*”, considerado como um aviso de que a variável havia se distanciado do setpoint e aproximava-se de um limite mais grave e não desejado no sistema, que era o “*Low Low*”. A mesma lógica se aplica para o “*High High Alarm Limit*” e “*High Alarm Limit*”, mas levando

em consideração um limite superior máximo e um aviso de que a variável havia saído do setpoint e tendia a um valor próximo ao limite máximo.

Ou seja, a partir da definição destes limites, independentemente dos valores mais adequados para a torre de resfriamento instalada, com suas especificidades, nesta segunda etapa, o intuito da ferramenta era justamente o de recolher dados que refletissem o momento presente em termos de disparos de alarmes. Com isso, numa próxima etapa, esses dados puderam então ser combinados com as informações armazenadas das árvores de decisão, gerando conhecimento de maneira a agregar na resolução do problema por parte do operador da planta.

Dadas as variáveis monitoradas e os seus limites estabelecidos, é possível gerar uma análise preliminar de causa-raiz que aponte o que pode ter ocorrido com o sistema naquele momento e quais as recomendações de ações a partir disso. Por exemplo, caso tenha se identificado o disparo de vários alarmes que atingiram condições abaixo das esperadas, levando em consideração o pH ideal de operação, valores padrão de ORP, condutividade, concentração de sólidos suspensos, e até mesmo níveis de corrosão identificados, pode-se intuir que a causa geradora destes alarmes combinados é uma possível perda de água/vazamento em algum ponto do sistema.

Tendo isso em mente, a interface gráfica, além de delimitar a possível causa-raiz pela combinação dos alarmes indicados, também apresenta recomendações de ações a serem tomadas. Por exemplo, podem ser sugeridas verificações em pontos críticos do processo em busca de válvulas abertas ou tubulação danificada, que justifique o porquê da ocorrência do cenário complexo.

O grande ganho da ferramenta ao ser aplicada por operadores em campo é dar a possibilidade de observar cenários complexos de forma simplificada e, a partir das recomendações do sistema, tomar ações mais assertivas que venham a resolver os problemas identificados de forma mais rápida.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Diagnóstico do sistema de alarmes

Para obter resultados referentes ao diagnóstico do sistema da torre de resfriamento da indústria do ramo químico, ele foi avaliado por 30 dias corridos, sendo feitos levantamento semana a semana da quantidade de alarmes anunciados e respectivas ordens de prioridade.

Os resultados do diagnóstico do sistema, baseados nos KPI's indicados na tabela de métricas de desempenho (Tabela 1), estão apresentados abaixo na Tabela 2.

Tabela 2 – Diagnóstico do sistema de alarmes

Métrica	Valor Calculado (recomendação)												
A.1. Alarmes Anunciados/Hora	0,3 (6-12)												
A.2 Alarmes Anunciados/10 min	0,0507 (1-2)												
B. % minutos com mais de 10 alarmes em 10 min	0 % (< 1%)												
C. Número máximo de alarmes em 10 min	3 (\leq 10)												
D. % sistema de alarme em avalanche	0 % (< 1%)												
E. % contribuição dos 10 alarmes mais frequentes na carga geral de alarmes	14,61% (1% - 5 %)												
F. Alarmes intermitentes	0 (0)												
G. Alarmes obsoletos	0 (< 5 por dia) 4 prioridades												
I. Distribuição de Anúncio por ordem de prioridade	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Baixa</th> <th>Média</th> <th>Alta</th> <th>Muito Alta</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>25,5%</td> <td>27,3%</td> <td>32,7%</td> <td>14,5%</td> </tr> <tr> <td>(80%)</td> <td>(15%)</td> <td>(5%)</td> <td>(< 1%)</td> </tr> </tbody> </table>	Baixa	Média	Alta	Muito Alta	25,5%	27,3%	32,7%	14,5%	(80%)	(15%)	(5%)	(< 1%)
	Baixa	Média	Alta	Muito Alta									
25,5%	27,3%	32,7%	14,5%										
(80%)	(15%)	(5%)	(< 1%)										

Fonte: Da autora (2023).

Tendo como base o diagnóstico do sistema apresentado, nota-se que um dos pontos de destaque é no percentual de contribuição dos alarmes mais frequentes na carga geral de alarmes. Esse valor ultrapassou o limite previsto pelas normativas, entre 1 e 5%, ficando em 14,61%. Uma possível razão para o valor obtido nesta métrica é o baixo número de alarmes no mês, que ficou em 219, no total, fazendo com que a contribuição dos alarmes mais frequentes fosse mais significativa para o todo.

Outro ponto de destaque, que requer melhoria, está relacionado ao anúncio de alarmes por ordem de prioridade. De acordo com a ISA 18.2, os alarmes de prioridade “muito alta” devem ser menos de 1% dos alarmes identificados, o que não ocorreu neste caso. Pode-se observar que houve quase um equilíbrio dentre as prioridades dos alarmes avaliados, demonstrando que possivelmente devem ser implementados ajustes quanto às ordens de prioridade para que se observe uma redução na incidência de alarmes cuja prioridade seja alta/muito alta.

4.2. Análise de causa-raiz

Para o resultado de análise de causa-raiz, foram avaliadas 14 árvores de decisão de alarmes, ligadas às 5 variáveis principais indicadas como relevantes para o tratamento de água: pH, ORP, Condutividade, Concentração de Sólidos Suspensos (CSS) e Corrosão. Este estudo delimitou 20 possíveis causas-raízes para o disparo de alarmes no processo em questão, dentre elas:

- a) Perda de água e/ou vazamentos na torre de resfriamento podem vir a ser identificados pelo conjunto de disparos de alarmes de condutividade, ORP, pH e turbidímetro, atingindo valores abaixo do esperado em relação aos limites inferiores propostos para monitoramento;
- b) Para o caso de altos ciclos de concentração, ou seja, aqueles em que a faixa é maior, diferentemente do cenário anterior, identifica-se um aumento significativo no valor encontrado na condutividade, ORP, pH e turbidímetro, ultrapassando os limites superiores ajustados para o sistema em análise;
- c) Em situações nas quais a torre recebe tratamentos químicos para melhor conservação da água de processo, é possível identificar que o sistema tenha ficado sem o devido fornecimento de produtos devido à combinação de leituras baixas de ORP e do turbidímetro, aliadas a um pH consideravelmente mais alto;

- d) O mesmo padrão de comportamento pode ser associado a outra causa-raiz, que é um problema ou mal funcionamento na bomba de alimentação do processo;
- e) Um possível descontrole na abertura e fechamento da purga pode vir a ser identificado a partir de uma queda abrupta nos valores de condutividade, ORP, pH e turbidímetro aliados;
- f) Alta taxa de aplicação de produtos químicos leva à um pH mais ácido, além de valores mais altos de ORP e concentração de sólidos suspensos;
- g) Uma condutividade muito alta no processo pode estar aliada a um problema na válvula da água de reposição ou da purga, que faz com que a troca da água de processo não seja realizada da forma que deveria;
- h) Outro ponto relacionável à condutividade alta pode ser uma maior incidência de sais na água de processo utilizada;
- i) Já uma baixa incidência de sais na água de processo pode levar ao disparo de alarme de condutividade por estar em desacordo com os valores mínimos especificados;
- j) Para uma água considerada muito ácida, isso se refletirá majoritariamente no pH baixo e níveis altos de corrosão;
- k) Uma dosagem excessiva de biocida seria caracterizada por altos níveis de ORP e corrosão;
- l) Já uma baixa concentração de inibidor aplicado na linha seria observada a partir de um pH mais baixo e uma corrosão mais incidente;
- m) Calibração inválida de qualquer um dos sensores do sistema poderá levar a observação de valores sem sentido ou que ultrapassem os limites de operação para as variáveis analisadas.

As devidas causas-raízes e os respectivos alarmes que configuram cada cenário estão descritos resumidamente na Tabela 3.

Tabela 3: Resultado da análise de causas-raízes (Continua)

Possível Causa-Raiz	Alarmes Associados à Causa-Raiz	Recomendação
Perda de água ou vazamentos no sistema	pH: L ou LL ORP: L ou LL Condutividade: L ou LL CSS: L ou LL	Checar o sistema em busca de vazamentos

Tabela 3: Resultado da Análise de Causas-Raízes (Continua)

Possível Causa-Raiz	Alarmes Associados à Causa-Raiz	Recomendação
Alto valor de ciclos de concentração	pH: H ou HH ORP: H ou HH Condutividade: H ou HH CSS: H ou HH	Ajustar o processo, reavaliando os ciclos de concentração
Problema na Bomba ou na Linha de Alimentação	pH: H ou HH ORP: L ou LL CSS: L ou LL	Checar condições das bombas Fazer uma checagem na linha de operação
Purga fora de controle com falha no fechamento	pH: L ou LL ORP: L ou LL Condutividade: L ou LL CSS: L ou LL	Checar integridade da válvula da purga
Baixa quantidade de produtos químicos na linha	pH: H ou HH ORP: L ou LL CSS: L ou LL	Fazer a reposição dos produtos químicos para o tratamento de água
Alta taxa de alimentação de produtos químicos na linha	pH: L ou LL ORP: H ou HH CSS: H ou HH	Checar setpoint da dosagem de químicos Se necessário, ajustar a dosagem de químicos na linha
Turbidímetro descalibrado	CSS: L ou LL CSS: H ou HH	Avaliar estado do sensor Checar a consistência dos valores obtidos pelo sensor Checar a data da última calibração Se necessário, recalibrar o sensor Se persistir a ocorrência de valores inconsistentes, efetuar a troca do sensor

Tabela 3: Resultado da Análise de Causas-Raízes (Continua)

Possível Causa-Raiz	Alarmes Associados à Causa-Raiz	Recomendação
Problema na abertura da válvula da água de reposição ou da purga	Condutividade: H ou HH	<p>Checar integridade das válvulas da água de reposição e purga</p>
Condutímetro descalibrado	<p>Condutividade: L ou LL</p> <p>Condutividade: H ou HH</p>	<p>Avaliar estado do sensor</p> <p>Checar a consistência dos valores obtidos pelo sensor</p> <p>Checar a data da última calibração</p> <p>Se necessário, recalibrar o sensor</p> <p>Se persistir a ocorrência de valores inconsistentes, efetuar a troca do sensor</p>
Água muito ácida	<p>pH: L ou LL</p> <p>Corrosão: H ou HH</p>	<p>Diminuir dosagem de ácido no programa de tratamento de água</p> <p>Fazer outras análises na água para melhor investigação do problema</p>
Sonda de ORP descalibrada	<p>ORP: L ou LL</p> <p>ORP: H ou HH</p>	<p>Avaliar estado do sensor</p> <p>Checar a consistência dos valores obtidos pelo sensor</p> <p>Checar a data da última calibração</p> <p>Se necessário, recalibrar o sensor</p> <p>Se persistir a ocorrência de valores inconsistentes, efetuar a troca do sensor</p>

Tabela 3: Resultado da Análise de Causas-Raízes (Continua)

Possível Causa-Raiz	Alarmes Associados à Causa-Raiz	Recomendação
Sonda de pH descalibrada	pH: L ou LL pH: H ou HH	Avaliar estado do sensor Checar a consistência dos valores obtidos pelo sensor Checar a data da última calibração Se necessário, recalibrar o sensor Se persistir a ocorrência de valores inconsistentes, efetuar a troca do sensor
Água com alta concentração de sais	Condutividade: H ou HH	Aumentar a vazão da purga
Água com baixa concentração de sais	Condutividade: L ou LL	Ajustar melhor a vazão da purga
Dosagem excessiva de biocida na linha	ORP: H ou HH Corrosão: H ou HH	Reavaliar a dosagem de biocida na linha e ajustar, caso necessário
Sonda de Corrosão descalibrada	Corrosão: L ou LL Corrosão: H ou HH	Avaliar estado do sensor Checar a consistência dos valores obtidos pelo sensor Checar a data da última calibração Se necessário, recalibrar o sensor Se persistir a ocorrência de valores inconsistentes, efetuar a troca do sensor
Baixo nível de inibidor aplicado na linha	pH: L ou LL Corrosão: H ou HH	Ajustar a quantidade de inibidor aplicada na linha

Tabela 3: Resultado da Análise de Causas-Raízes (Conclusão)

Possível Causa-Raiz	Alarmes Associados à Causa-Raiz	Recomendação
Aumento de contaminação microbiológica	ORP: L ou LL	Ajustar quantidade de biocida aplicado para diminuir a contaminação microbiológica
Água de reposição ácida	pH: L ou LL	Fazer análises na água de reposição
Aumento da deposição	CSS: L ou LL	Ajustar dosagem de químicos na torre

Fonte: Da autora (2023).

As informações levantadas na Tabela 3 serviram, portanto, para a alimentação do banco de dados da ferramenta computacional, que gera também, recomendações de ações a serem realizadas baseado no cenário identificado dos alarmes.

4.3. Ferramenta computacional: I_AM_ROOT

A interface gráfica da ferramenta, nomeada como I_AM_ROOT, teve como principal objetivo levar o usuário a preencher as informações, as quais levam ao resultado de uma das 20 causas-raízes apontadas acima, com recomendações de ações corretivas específicas para cada situação.

Como pode-se observar na Figura 25, a primeira interação disponibilizada para o usuário é a que permite que ele faça o preenchimento das variáveis monitoradas do sistema. Podem ser incluídas até cinco variáveis, sendo elas: pH, ORP, Condutividade, Concentração de Sólidos Suspensos (Sólidos Suspensos) e Corrosão.

Figura 25 – Tela inicial da ferramenta computacional I_AM_ROOT.

Fonte: Da autora (2023).

Logo em seguida, ao clicar em próximo, o usuário irá se deparar com uma extensão da página inicial apresentada, na qual ele poderá preencher os limites identificados dos alarmes de um cenário complexo, como mostrado na Figura 26.

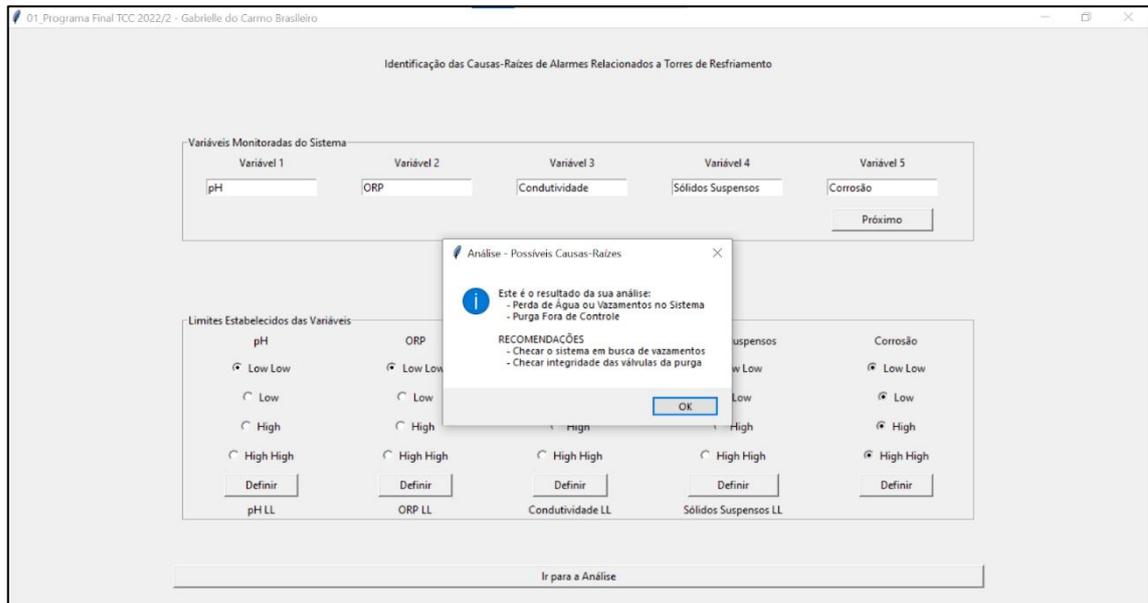
Figura 26 – Segundo menu de preenchimento da ferramenta I_AM_ROOT.

Variable	Low Low	Low	High	High High	Definir	Label
pH	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Definir	pH LL
ORP	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Definir	ORP LL
Condutividade	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Definir	Condutividade LL
Sólidos Suspensos	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Definir	Sólidos Suspensos LL
Corrosão	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Definir	

Fonte: Da autora (2023).

Feito o passo a passo de recolhimento destas informações, a ferramenta as processa e compara com o banco de dados das 20 causas-raízes existentes para que seja feita a análise do cenário em questão. Ao confirmar as opções selecionadas e ir para a análise, é gerada uma tela informativa com o resultado, tendo as possíveis causas-raízes associadas ao disparo destes alarmes em conjunto e recomendações, em ordem de prioridade, do que pode ser feito a respeito de ações corretivas. Um exemplo pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Tela informativa com o resultado da análise da ferramenta I_AM_ROOT, baseada nas árvores de decisão do banco de dados da ferramenta.



Fonte: Da autora (2023).

A acurácia da ferramenta em questão é aquela obtida a partir das árvores de decisão já elaboradas e utilizadas na planta para cada um dos cenários avaliados individualmente. Se algum cenário foi cogitado dentre uma das possíveis causas para o disparo de um ou mais alarmes, ele faz parte do banco de dados, juntamente com a recomendação de ações corretivas, para eventual consulta do operador.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do estudo realizado ao longo deste trabalho, foi possível fazer um diagnóstico do desempenho do sistema gerenciamento de alarme de uma torre de resfriamento empregada em uma empresa do ramo químico no interior de São Paulo, de acordo com as normas EEMUA 191 e ISA 18.2. Além disso, foram analisadas as causas-raízes mais comuns de problemas associados à operação deste tipo de torre e, com o auxílio da ferramenta computacional I_AM_ROOT, delineadas ações corretivas para cada um dos cenários complexos apresentados.

O diagnóstico do sistema de alarmes indicou que, dentre as métricas de desempenho avaliadas para o sistema em questão, duas delas estavam em desconformidade: (i) o percentual de contribuição dos 10 alarmes mais frequentes em relação à carga geral de alarmes, atingindo um valor de 14,61%, frente ao limite superior de 5% recomendado pelas normas, e (ii) a distribuição do anúncio de alarmes por ordem de prioridade, na qual alarmes de prioridade muito alta deveriam ser apenas 1% e tiveram 14,5% de incidência. O problema (i) pode ser atribuído ao baixo número de alarmes identificados ao longo do mês, fazendo com que a contribuição dos 10 mais frequentes fosse mais significativa para o total. Quanto à desconformidade (ii), sugere-se que a ordem de prioridade dos alarmes seja revista, sendo feitos ajustes para que alarmes com ordem de prioridade muito alta sejam reduzidos. Isso irá requerer uma avaliação da filosofia de alarmes implementada, de modo a corrigir a inconformidade.

Já com respeito à análise de causas-raízes, foram levantadas 14 árvores de decisão relacionadas às 5 variáveis mais importantes para o tratamento de água de torres de resfriamento, que levaram à determinação de 20 causas-raízes para o disparo de alarmes de cenários complexos.

Com a realização da ferramenta computacional, estes cenários foram devidamente mapeados e mostrados de forma simples e intuitiva para o operador a partir do preenchimento da situação ocorrida, ou seja, dos alarmes e os respectivos níveis disparados. As recomendações de ações corretivas são dadas de acordo com uma ordem de prioridade estabelecida e ajudam o operador a tomar atitudes mais acertadas em campo quando diversos alarmes são disparados ao mesmo tempo. Desse modo, encara-se que a ferramenta pode também potencialmente reduzir o tempo de resposta de operadores para determinados problemas que venham a ser identificados na planta.

No que tange às melhorias da ferramenta elaborada, no futuro, pode haver uma implementação na qual o usuário possa deixar a interface mais customizada, determinando previamente quantas são as variáveis que ele deseja avaliar. Também é uma possibilidade de melhoria, para o caso em que o disparo de alarmes corresponda a uma combinação que não exista ainda no banco de dados, que o usuário seja capaz de indicar o novo cenário identificado, estabelecendo a devida ordem de prioridade, para que ele seja adicionado às informações existentes.

REFERÊNCIAS

- ALVES, C. F. **Otimização do sistema de alarmes em uma planta química utilizando conceitos de Lean e Six Sigma**. 2013. 67 f. Projeto de Monografia (Graduação) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.
- ARAÚJO, E. V. **Gerenciamento de alarmes em plantas industriais: Conceito, normas e estudo de caso em um forno de reaquecimento de blocos**. 2010. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- BALTIMORE AIRCOIL COMPANY. **Air Intake Louvers**. Baltimore, 2021. Publicação. Disponível em: <https://baltimoreaircoil.com/parts/heat-transfer/air-intake-louvers>. Acesso: 07 dez. 2022.
- BEGA, Egídio Alberto (Org.). **Instrumentação industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2006.
- BUCKMAN. **The Cooling Water Handbook**. Memphis, 2017. *E-book*. Disponível em: <https://www.buckman.com/wp-content/uploads/2018/04/w961a4-coolingwaterhandbook.pdf> Acesso: 07 dez. 2022.
- ELKIND, R. **Petrobras – Tratamento de Água de Resfriamento**. Rio de Janeiro, Brasil. 1996.
- ENGINEERING EQUIPMENT AND MATERIALS USERS' ASSOCIATION. **EEMUA Publication 191 Alarm systems - a guide to design, management and procurement**. 3rd ed. Londres: EEMUA, 2013.
- FERDOUS, R.; KHAN, F.; SADIQ, R.; AMYOTTE, P.; VEITCH, B. **Fault and Event Tree Analyses for Process System Risk Analysis: Uncertainty Handling Formulations**. Risk Analysis, Vol. 31, No 1, 2011.
- HILL, G. B.; PRING, E. J.; OSBORN, P. D. **Cooling Towers Principles and Practice**. 3rd ed. 1990.
- INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA. **Torres de Arrefecimento**. Rio de Janeiro: IME, 2020. Apostila. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~antonio/Torres%20de%20Arrefecimento.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2022.
- INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. **ANSI/ISA-18.2-2016, Management of Alarm Systems for the Process Industries**. Piemonte: ISA, 2016.
- JOHN. C. H. **Cooling Tower Fundamentals. Compiled from the knowledge and experience of the entire SPX Cooling Technologies staff**. SPX Cooling Technologies Inc. 2009
- KOLMETZ, K. **Kolmetz Handbook of Process Equipment Design - Cooling Tower Selection, Sizing and Troubleshooting (Engineering Design Guidelines)**. KLM Technology Group. 2014.

LIPTÁK, B. G. **Process Measurement and Analysis, vol. 1.** 4th. ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2003. (cap. 8).

MCCABE, W. L. **Unit operations of chemical engineering.** 7th ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 2005.

MELLO, L. C. **Influência de Variáveis de Processo no Desempenho de Torre de Resfriamento.** 2008. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MONTENEGRO, E. **Estudo de Falhas de Processos de Gerenciamento de Alarmes Baseado em Índices de Desempenho e Análise de Causa-Raiz.** 19º Seminário de Automação e TI Industrial, Rio de Janeiro, 2015.

PETROBRAS. **Norma Técnica N-2900 – Gerenciamento de Alarmes.** Rio de Janeiro, 2011.

REIS, P. J. C. A. **Aplicação de árvores de decisão em sistemas de alarmística.** 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010.

SEBORG, D. E. et al. **Process Dynamics and Control.** 4 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

SILVA, G. C. **Gerenciamento de alarmes em indústrias: Conceitos e a aplicação da racionalização de alarmes em uma planta.** 2018. 55 p. Monografia de Especialização em Automação Industrial, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

STEPHANOPOULOS, George. **Chemical process control: an introduction to theory and practice.** Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, c1984.

WATER CHILLERS. **Cooling Tower vs Chiller Cooling Towers on Roof.** Houston, 2019. Publicação. Disponível em: <https://waterchillers.com/media/wysiwyg/cooling-tower-vs-chiller-cooling-towers-on-roof.jpg>. Acesso: 05 fev. 2023.