

FERNANDO DA COSTA LIMA

Otimização energética de torre de resfriamento: estudo de caso

Fernando da Costa Lima

Otimização energética de torre de resfriamento: estudo de caso

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Gestão Ambiental e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho
Coorientador: Prof. Dr. Andreas Nascimento

Guaratinguetá - SP
2019

L732o Lima, Fernando da Costa
Otimização energética de torre de resfriamento: estudo de caso / Fernando da Costa Lima. – Guaratinguetá, 2019.
74 f : il.
Bibliografia: f. 72-74

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho
Coorientador: Prof. Dr. Andreas Nascimento

1. Torres de resfriamento. 2. Energia - Consumo. 3. Energia - Conservação
4. Automação I. Título.

CDU 66.045.53 (043)

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8/9203

FERNANDO COSTA LIMA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr.^a Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
Orientador / UNESP-FEG



Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
UNESP-FEG



Prof. Dr. RICARDO EMILIO DA SILVA
INPE/Cachoeira Paulista

Janeiro de 2019

DADOS CURRICULARES

FERNANDO DA COSTA LIMA

NASCIMENTO	10.12.1983 – Guaratinguetá / SP
FILIAÇÃO	Inácio Jorge Santiago de Lima Zeneide Salústio da Costa Lima
2003/2007	Engenharia de Controle e Automação Universidade Federal de Itajubá
1999/2001	Curso Técnico em Informática Industrial Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho* e meu coorientador, *Prof. Dr. Andreas Nascimento* que jamais deixaram de me incentivar. Sem a orientação, dedicação e auxílio de vocês, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *Inácio e Zeneide*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

à minha esposa *Stephanie Caroline* por toda compreensão e paciência neste período.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimento, instala-se a dúvida.”

Goethe

RESUMO

A pesquisa desenvolvida visa a otimização do consumo de energia elétrica de torres de resfriamento a partir do controle de acionamento dos respectivos ventiladores e bombas de circulação, além da melhoria na instrução de trabalho dos operadores, os quais frequentemente são responsáveis pela gestão da temperatura e geralmente utilizam meios manuais para manter o processo estável. O método empregado consiste em avaliar três cenários com uma equipe multidisciplinar e, respeitando a limitação técnica e o ponto de vista de cada uma das áreas, desenvolver, validar e implementar soluções de eficiência energética e térmica de rápida configuração e com retornos mensuráveis. As alterações nas construções mecânicas dos equipamentos não são consideradas e as soluções propostas têm a automação e alteração nas instruções de operação como fontes de melhoria. O requisito básico para a implementação do método é a existência de um sistema de automação, nos casos avaliados, um Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD), os quais contemplam os sinais de instrumentos de medição instalados em campo e realizam o acionamento dos ventiladores e bombas nos modos manual e automático. Os resultados obtidos são controles eficientes para utilização dos ventiladores e bombas de circulação, levando em conta a possibilidade de economia de energia elétrica, diminuição das chances de um eventual desgaste mecânico natural e estabelecimento mais preciso das temperaturas de processo. Os resultados alcançados em eficiência energética são promissores, sem que haja prejuízo a equipe de operações, com economias de até 50% no tempo de utilização de ventiladores e, em casos extremos, eliminação de equipamentos. As propostas têm baixo custo de desenvolvimento e retornos significativos, onde o retorno do investimento é inferior a um mês.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência térmica. Automação. Economia. Energia. Torre de resfriamento.

ABSTRACT

The developed research aims electrical energy's consumption optimization on cooling towers through fans and circulation pumps actuating controls, besides improvements on operators instructions forms that are the responsables for temperature management and frequently use manual mode to keep the process stability. The used method consists in a multidisciplinary team assessment in three scenarios and, based on each area technical's limitation, develop, validate and implement themal and energy efficient solutions with fast implementation and measurable results. It was not evaluated equipment's mechanical improvement and the expected proposal were based on automation and operators instructions. The basic requirements for the method was the existance of a DCS (Distributed Control System) that was already in place in the evaluated scenarios. The DCS already manages the measurements from the installed instruments and acts fans and circulating pumps in manual and automatic mode. As results, it was developed efficient controls on fans and circulating pumps, electrical energy savings, reducing chances of natural mechanical detrition and optimize the process' temperatures. The results evaluated on energy efficiency were promising without operation losses, saving up to 50% on fans usage and in extreme cases, avoiding the usage of circulating pumps. The implemented proposals had a low cost investment and relevant results where payback was less than one month.

KEYWORDS: Thermal efficiency. Automation. Saving. Energy. Cooling tower.

Lista de ilustrações

Figura 1 - Esquema simplificado de uma torre de resfriamento.....	16
Figura 2 - Esquema de controle on/off	19
Figura 3 – Crescimento no uso das fontes primárias de energia de 1975 a 2015.....	26
Figura 4 - Crescimento do consumo das fontes primárias de energia por região de 1975 a 2015	26
Figura 5 – Matriz energética brasileira 2017 por fonte	27
Figura 6 - Crescimento do consumo energético brasileiro	28
Figura 7 - Consumo Energético Industrial – Brasil.....	29
Figura 8 - Esquema de torre de resfriamento seca.....	34
Figura 9 - Esquema de torre de resfriamento úmida	35
Figura 10 - Temperaturas do cálculo de eficiência da torre de resfriamento	36
Figura 11 - Pirâmide de fluxo de informações	37
Figura 12 - Fluxo de informações do sistema de automação	38
Figura 13 - Arranjo Caso 1 – duas torres sem inversor.....	40
Figura 14 - Arranjo Caso 2 – duas torres com inversor.....	42
Figura 15 - Arranjo Caso 3 – quatro torres sem inversor	44
Figura 16 - Modo de operação do Caso 1 antes da automação	49
Figura 17 - Modo de operação do Caso 1 depois da otimização energética	53
Figura 18 - Modo de operação do Caso 2 antes da automação do controle vazão.....	56
Figura 19 - Modo de operação do Caso 2 antes da automação do controle de temperatura ...	57
Figura 20 - Modo de operação do Caso 2 depois da otimização da automação do controle de vazão.....	60
Figura 21 - Modo de operação do Caso 2 depois da otimização da automação do controle de temperatura	60
Figura 22 - Modo de operação do Caso 3 antes da otimização	62
Figura 23 - Modo de operação do Caso 3 depois da otimização.....	64

Lista de tabelas

Tabela 1 - Fontes de Energia do Setor Industrial Químico (%)	29
Tabela 2 – Troca térmica média durante a operação para o Caso 1	50
Tabela 3 - Troca térmica máxima durante operação para o Caso 1	50
Tabela 4 - Troca térmica média durante a operação para o Caso 1 após otimização energética	54
Tabela 5 - Troca térmica máxima durante operação para o Caso 1 após automação	54
Tabela 6 - Comparativo dos dados meteorológicos dos dois períodos estudados.....	65
Tabela 7 - Comparação da média de temperatura de água resfriada para o Caso 3	65
Tabela 8 - Redução no consumo de energia dos ventiladores do Caso 3.....	66
Tabela 9 - Resultado financeiro após otimização energética para o Caso 1.....	67
Tabela 10 - Resultado financeiro após otimização energética para o Caso 2.....	67
Tabela 11 - Resultado financeiro após otimização energética para o Caso 3.....	68
Tabela 12 - Resumo dos benefícios encontrados.....	68

Lista de abreviaturas e siglas

BEN	Balanço Energético Nacional
CV	Cavalo Vapor
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IHM	Interface Homem Máquina
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
Mtoe	Megatonelada de óleo equivalente
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation Development</i>
PT	Transmissor de Pressão
PVI	<i>Present Value Index</i>
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
TT	Transmissor de Temperatura

Lista de símbolos

$^{\circ}\text{C}$	grau Celsius
c_p	calor específico
kcal	kilo caloria
\dot{m}	vazão mássica
Q	quantidade de calor
ΔT	variação de temperatura

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Considerações gerais	15
1.2	Justificativa e métodos da pesquisa	17
1.3	Objetivos.....	23
1.4	Estrutura da dissertação	23
2	Consumo energético	25
2.1	Consumo energético mundial	25
2.2	Consumo energético brasileiro	27
3	Eficiência energética	30
3.1	Conceitos	30
3.2	Avaliações técnicas e econômicas	31
4	Características dos sistemas e abordagem proposta	34
4.1	Configuração de torres de resfriamento.....	34
4.2	Eficiência das torres de resfriamento.....	35
4.3	Arquitetura de interligação	37
4.4	Seleções de estudos de caso.....	39
4.4.1	Caso 1 – duas torres de resfriamento sem inversor de frequência	39
4.4.2	Caso 2 – duas torres de resfriamento com inversor de frequência	41
4.4.3	Caso 3 – quatro torres de resfriamento sem inversor de frequência	43
4.5	Abordagem proposta	45
5	Resultados	48
5.1	Caso 1 – duas torres de resfriamento sem inversor de frequência.....	48
5.1.1	Situação de operação antes da otimização energética	48
5.1.2	Premissas adotadas, cálculos e estratégias	51
5.1.3	Resultados obtidos com a medição por meio do sistema MES	52
5.2	Caso 2 – duas torres de resfriamento com inversor de frequência	55
5.2.1	Situação de operação antes da otimização energética	55
5.2.2	Premissas adotadas, cálculos e estratégias	58
5.2.3	Resultados obtidos com a medição por meio do sistema MES	59
5.3	Caso 3 – quatro torres de resfriamento sem inversor de frequência.....	61
5.3.1	Situação de operação antes da otimização energética	61
5.3.2	Premissas adotadas, cálculos e estratégias	63

5.3.3	Resultados obtidos com a medição por meio do sistema MES.....	64
5.4	Resumo dos resultados obtidos	66
6	Conclusões	71
	Referências	72

1 Introdução

1.1 Considerações gerais

Há uma grande preocupação por parte dos órgãos ambientais com relação ao consumo de energia atual e os níveis de produção. As projeções para o futuro não são favoráveis neste aspecto, pois na tendência projetada haveria falta de energia para o consumo esperado (DUNIAM; GURGENCI, 2016). Por este motivo, há um constante viés para a otimização de sistemas energéticos de modo a torná-los cada vez mais eficientes (BUSTAMANTE; RATTNER; GARIMELLA, 2016).

Um exemplo de consumidor de energia elétrica que está presente nos mais variados segmentos de processos de transformação é a torre de resfriamento. Sua atuação é direta no sistema de controle de temperatura de reações. Estes são equipamentos utilizados para remover o calor residual dos processos de fabricação e dissipá-lo para a atmosfera (XIE et al., 2017).

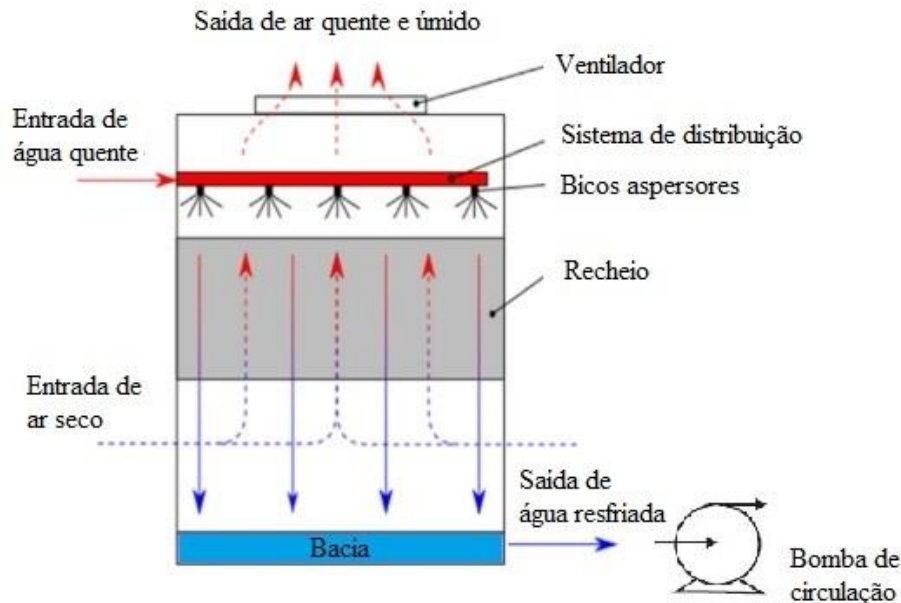
A água é frequentemente utilizada para resfriar processos exotérmicos nos diversos tipos de indústria e apresenta um ótimo rendimento térmico. Durante a passagem da água nos equipamentos a serem resfriados, a mesma recebe o calor proveniente das fontes de calor, que podem ser reatores, trocadores de calor, entre outros e retorna para as torres de resfriamento com uma temperatura superior à que saiu.

A torre de resfriamento possui a finalidade de diminuir a temperatura da água quente de retorno do processo para um nível que seja o mais próximo possível da temperatura de projeto, de forma a garantir a integridade e qualidade do processo (LI et al., 2017). É fundamental que os dados de projeto estejam disponíveis para que seja realizada a comparação dos resultados obtidos ao final dos experimentos.

Os principais componentes de uma torre de resfriamento são: ventilador, responsável pelo transporte de ar dentro do equipamento; recheio, responsável por criar obstáculo a passagem de água, fazendo com que a mesma permaneça o maior tempo possível dentro da torre de resfriamento e colaborando no processo de evaporação; bicos aspersores, responsáveis pela distribuição conforme especificada da água dentro do equipamento, de forma a garantir que a eficiência calculada seja alcançada.

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado com os principais componentes de uma torre de resfriamento.

Figura 1 - Esquema simplificado de uma torre de resfriamento



Fonte: adaptado de Keshtkar (2017).

Além da questão de eficiência térmica, é importante ressaltar a economia de água, pois por se tratar de um circuito fechado a água de resfriamento é reaproveitada (KESHTKAR, 2017). A economia de energia elétrica proveniente da otimização do ponto de operação por meio da automação dos sistemas de resfriamento de água deve ser modelada e entendida para melhor avaliação do sistema como um todo (CHEN et al., 2017).

Atualmente, com a elevação dos custos de energia, os processos térmicos auxiliares, os quais as torres de resfriamento fazem parte, oneram indiretamente o custo da produção final, tornando-se de difícil identificação, pois entram juntamente com outros custos periféricos de produção e, assim, são pouco utilizados no quesito de potencial benefício quando avaliado de forma superficial pela alta hierarquia das plantas produtivas. Por este motivo, muitas vezes os sistemas auxiliares não figuram na lista de prioridades de temas que mereçam o empenho de esforços técnicos para aumentos de rendimento e confiabilidade. É fundamental que este potencial de aumento de competitividade para as empresas seja explorado cada vez mais, pois a concorrência no mercado atual está se tornando maior e são os pequenos detalhes as verdadeiras vantagens competitivas.

Diversos fatores impactam nos projetos de melhorias dos sistemas auxiliares e, devido a situação econômica de anos anteriores até 2018, onde os custos de energia elétrica estão elevados, há uma crescente alteração na avaliação dos custos de resfriamento nos processos. Mesmo com o alto custo de energia elétrica, o valor investido nos projetos de melhoria nem

sempre é compatível com os retornos alcançados no final da implementação e os obstáculos são os mais variados, desde capacidade do equipamento, horas de operação, condições climáticas em constante alteração, características do processo e custos de equipamentos e mão-de-obra especializada para desenvolvimento.

Devido a evolução da tecnologia dos novos sistemas que vêm sendo empregados com maior frequência na indústria, a própria equipe interna das empresas deve estar em constante treinamento, evolução e capacitação. É necessário levar novos conhecimentos para os sistemas mais específicos, pois devido às particularidades existentes, e por se tratar de um sistema auxiliar, muitos colaboradores podem se sentir desconfortáveis em realizar manutenção e melhorias nas aplicações que forem modernizadas.

1.2 Justificativa e métodos da pesquisa

Existem muitas soluções que podem ser aplicadas para que haja um aumento na eficiência energética de uma torre de resfriamento que passam pelo estudo dos pré-requisitos de projeto e condições de operação. As opções podem ser das mais simples até as mais complexas, indo desde o ajuste de faixas de controle para acionamento de motores, até a opção de aquisição de equipamentos auxiliares, alterações de construção mecânica e automações complexas.

Porém, nem todas são sustentáveis, tendo em vista os resultados que vêm sendo obtidos e o considerável investimento necessário para sua efetivação final, tanto em novos materiais acrescidos da necessidade de maior capacitação da equipe de manutenção, quanto profissionais técnicos especializados para realizar o primeiro desenvolvimento e deixar o sistema apto para operar de acordo com as novas premissas.

Uma vez entregue o sistema apto para a operação, também há necessidade de uma maior capacitação para a equipe de manutenção, com a finalidade de manter a operação sustentável e implementação de pequenas melhorias que surgem devido às adaptações das condições de processo e avaliação de comportamento.

É importante ressaltar que algumas premissas devem ser obedecidas com relação a automação. Muitas torres de resfriamento em operação são de projetos de engenharia relativamente antigos, mais de vinte anos. Neste período aconteceram evoluções significativas do ponto de vista tecnológico, o que torna um equipamento obsoleto muito rápido, se não houver o devido acompanhamento técnico para melhoria contínua do mesmo.

Certamente, há vinte anos, não existiam métodos de controle eficazes como hoje, muito menos viabilidade técnica e econômica para instalação de instrumentos de medição e controle.

Em muitos casos, apenas indicações locais são existentes e não possuem nenhuma interligação com sistemas externos de controle.

É necessário que o mínimo de instrumentação exista no sistema da torre de resfriamento e tenha interface no sistema de controle, bem como os equipamentos de saída estejam devidamente conectados à saída do SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído) para que seja possível realizar a medição e controle das novas propostas. Neste caso, as condições básicas para a implementação de um sistema automatizado são:

- Transmissor de temperatura na água resfriada que vai para o processo, ou seja, no circuito de saída da torre de resfriamento;
- Acionamento do ventilador; e
- Acionamento da bomba de circulação;

Adicionalmente aos dados provenientes de instrumentos e componentes elétricos de campo, a folha de especificação da torre de resfriamento também é necessária para, pelo menos, levar em consideração nos estudos a vazão de água total do sistema.

Um instrumento adicional necessário para permitir os cálculos de rendimento da torre de resfriamento é a medição da temperatura da água quente de retorno do processo. Dessa forma, será possível a avaliação do rendimento, mas esta não é uma condição mandatória para que o sistema de automação seja empregado.

Caso os instrumentos mandatórios acima não estejam interligados no sistema de automação, um custo adicional deve ser contemplado para a aquisição, instalação e configuração dos mesmos. Assim como descrito anteriormente, esta condição de instalação adicional, ajuste de parâmetros e modificação nas instalações elétricas existentes pode inviabilizar o projeto.

SDCDs são sistemas de automação dedicados ao controle de plantas produtivas sendo possível desenvolver as lógicas de controle para que a produção opere de forma automatizada. É o sistema onde há a interface da operação com os sensores e atuadores que estão presentes no campo. Através do desenvolvimento de telas, são criadas as IHM (Interface Homem Máquina), onde a equipe de operação consegue monitorar e intervir no processo de maneira remota, caso seja necessário.

Durante o desenvolvimento da pesquisa com foco em automação, as seguintes abordagens foram levadas em consideração para que o resultado fosse obtido por meio da viabilidade técnica e econômica:

- Escalonamento e determinação de níveis de acionamento de ventiladores;
- Escalonamento e determinação de níveis de acionamento de bombas de circulação;
- Utilização de inversor de frequência para todos motores das bombas de circulação.

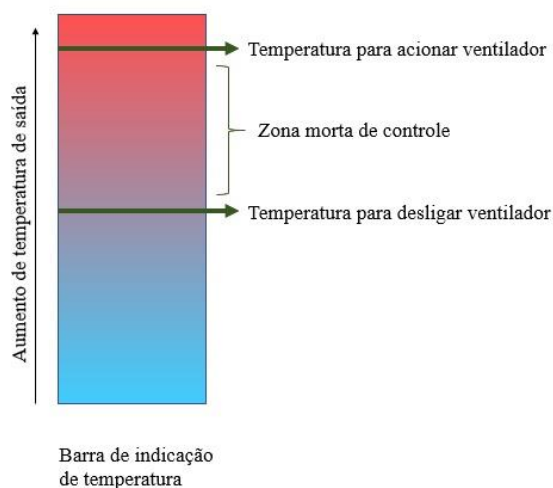
As bombas de circulação e ventiladores são os maiores consumidores para este tipo de processo, portanto merecem atenção especial no estudo de eficiência energética (MA, J.; WANG; FENG, 2017).

Basicamente, o controle e acionamento de bombas de circulação e ventiladores pode ser realizado de duas maneiras:

- Contatores: utilizado em controle do tipo *on/off*. Neste caso, existem apenas duas condições de operação para o motor em operação ou desligado; e
- Inversores de frequência: dispositivos que alteram a frequência disponibilizada pela rede para que seja possível controlar a velocidade dos motores.

Inversores de frequência nem sempre são uma alternativa economicamente viável, tendo em vista a facilidade da implementação de controles tipo *on/off* e a percepção imediata de seus benefícios (CHANG et al., 2015). Na grande maioria das vezes, os controles do tipo *on/off* são facilmente desenvolvidos por equipe interna de manutenção ou engenharia das empresas e os resultados podem ser observados em intervalos a partir de dois a três dias. Os controles do tipo *on/off* são esquematizados conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de controle *on/off*



Os controles *on/off* possuem característica bem simples. Basicamente são escolhidos dois pontos de trabalho, onde um é responsável pelo acionamento do motor e outro é responsável pelo desligamento do mesmo. No intervalo dos dois pontos de trabalho existe a zona morta de controle. Esta área é necessária para que não aconteça o chaveamento cíclico da saída de controle, comprometendo a vida útil do motor acionado.

Por se tratar de uma variável de resposta lenta, que é a característica da temperatura, a zona morta de controle também auxilia na estabilização do sistema, pois uma vez que a ação é tomada, há uma curva de tendência da variável que deve ser respeitada, pois a resposta não é imediata. Este intervalo de controle auxilia na identificação da alteração no sistema após a intervenção tomada.

Os sistemas de controle do tipo *on/off* possuem desvantagens com relação aos sistemas com inversores de frequência. Dentre as desvantagens mais evidentes, destacam-se duas situações que afetam diretamente o comportamento do processo:

- Frequência de acionamento dos motores elétricos: com a finalidade de aumentar a vida útil dos motores elétricos, é necessário que haja um correto ajuste dos pontos de controle (liga e desliga) dos motores elétricos, de modo a evitar o acionamento repetitivo. Quanto mais próximos os pontos de acionamento e desligamento dos motores, maior é a frequência de acionamento, e isso implica em uma maior quantidade de partidas a quente de um motor por hora. Ultrapassando a recomendação do fabricante, ocorre a redução da vida útil dos mesmos. Tal fato que vai em caminho oposto a uma das propostas de melhoria referente à automação, que é justamente o aumento da vida útil dos componentes da torre de resfriamento;
- Controle estável de temperatura: os inversores de frequência possuem a capacidade de modular a velocidade dos motores elétricos com base em um sinal de retorno que direciona as ações a serem tomadas pelo mesmo. Em uma das condições avaliadas, onde um ventilador é diretamente responsável pela troca térmica de um sistema de controle de temperatura, fica evidente como o resultado do controle é uma maior estabilidade na temperatura de saída. Diferentemente, os controles do tipo *on/off* geram como resultado uma oscilação na temperatura de saída que fica dentro dos limites de controle estabelecidos.

Além das opções de automação, não se deve descartar uma nova modelagem, que permita a adequação mecânica do processo a partir de modificações de projeto ou aquisição de equipamentos para otimização dos resultados.

A escolha dos enchimentos das torres, bem como os bicos aspersores e o ponto de funcionamento do equipamento dentro da curva característica de projeto, afetam significativamente a eficiência térmica do equipamento (GAO et al., 2016). Todos estes fatores devem ser levados em consideração no momento da avaliação da melhor opção existente no mercado, a fim de gerar o melhor resultado em termos de viabilidade técnica e econômica, porém, as interações entre os itens mencionados são complexas, devido a variedade na interação entre as variáveis e como as mesmas são afetadas pelas condições ambientes (QI et al., 2016).

Durante a operação das torres de resfriamento é vital que a eficiência da mesma seja constantemente verificada, pois o desgaste natural de componentes mecânicos pode afetar os rendimentos esperados sem que haja sinais evidentes de necessidade de manutenção (NING et al., 2015).

A fim de que os ganhos de eficiência térmica e econômica sejam calculados, também é necessário que as seguintes premissas de projeto sejam levadas em consideração:

- Temperatura de bulbo úmido;
- Temperatura da água resfriada;
- Temperatura da água quente; e
- Vazão de água no sistema.

Outros fatores importantes, como a capacidade térmica, são obtidos indiretamente com base nos dados informados acima. Estes dados são relevantes para que a estimativa de benefício seja calculada, bem como a sua viabilidade técnica com base na carga térmica do projeto das torres de resfriamento.

Na prática, quando se utiliza a automação para variação de velocidades e condições de operação de motores de bombas de circulação e ventiladores, alteram-se diretamente as premissas do projeto, o que pode acarretar em uma operação divergente do ponto esperado. É necessário levar em consideração que, por exemplo, quando a vazão de água de um sistema é alterada, modifica-se a pressão da água na entrada da torre de resfriamento e a consequente distribuição da mesma perante o recheio do equipamento, podendo ocasionar uma redução de eficiência (ALKHEDHAIR et al., 2016).

O mesmo raciocínio pode ser utilizado para o controle de velocidade de motores que, além dos eventuais problemas de frequências de ressonância, a vazão de ar dentro da torre de resfriamento pode ser alterada e, conseqüentemente, reduz-se a troca térmica da água, afetando o rendimento do equipamento.

Além dos fatores que estão sob o controle de automação, as condições ambientais de temperatura e umidade afetam o rendimento com relevância, tornando a previsibilidade dos resultados mais difícil. Porém, por meio da fórmula de calorimetria exposta na equação (1), pode-se realizar tais previsões de benefícios com base nas novas condições de operação:

$$Q = \dot{m}.c_p.\Delta T \quad (1)$$

Onde:

- Q = quantidade de calor [kcal/h];
- \dot{m} = vazão mássica [kg/h];
- c_p = calor específico (durante todo o estudo será adotado o valor de calor específico da água = 1 kcal/kg°C); e
- ΔT = variação de temperatura [°C].

Um outro ponto analisável a partir da equação (1) é a verificação precisa se a atual torre de resfriamento em utilização realmente atende às necessidades do processo, sendo conclusivo a necessidade de substituí-la ou somente aplicar o processo de otimização por método automatizado, por vezes auxiliado por adequações mecânicas. Isso ocorre devido ao fato das plantas produtivas sofrerem alterações relevantes de carteira de produtos com certa frequência, e muitas vezes o sistema de resfriamento não é avaliado com a nova carga térmica produzida. Alguns reflexos observados geralmente estão ligados à queda de rendimento, elevação do tempo de produção, maior dificuldade na estabilização da produção e não estabilização da temperatura de saída esperada (YUAN et al., 2015).

Atualmente, na empresa em estudo, não há uma aplicação padronizada de programação para que a atuação no controle térmico seja realizada de forma eficiente, causando redução na qualidade da produção por consequência da demora na resposta do sistema manual.

Sendo assim, a aplicação de um método automatizado apresenta vantagens evidentes, e a sua implementação cabe como referência no estudo e análise dos ganhos dos sistemas térmicos, agregando valor à dissertação proposta. Ainda, o tema apresentado nesta pesquisa é muito

presente na indústria petroquímica, possibilitando dissertar sobre um problema real encontrado na indústria.

1.3 Objetivos

O objetivo geral é determinar soluções sustentáveis para o processo de otimização energética de torres de resfriamento com base na automação.

Os estudos de caso apresentados a seguir buscam atingir especificamente os seguintes resultados:

- Avaliar projetos e instalações existentes de três instalações de torres de resfriamento e, com base no conceito considerado na época da aquisição das mesmas no passado, levando em consideração as limitações técnicas do período, propor estudos de melhoria que sejam técnica e economicamente viáveis para serem implementados;
- Desenvolver, justificar e avaliar os resultados das propostas de eficiência térmica para torres de resfriamento com base na avaliação do comportamento da operação e instalações existentes com o envolvimento de equipes multidisciplinares para a avaliação de diversos pontos de vista e possíveis impactos. As soluções de baixo custo e rápida implementação devem ser preferenciais;
- Focar nas propostas com base em automação e mudança de comportamento na operação das torres de resfriamento. Não serão consideradas intervenções mecânicas, como substituição de recheios e bicos aspersores, devido a maior complexidade e necessidade de uma operação mais estável para que as alterações sejam realmente eficazes;
- Demonstrar uma forma de contextualizar os problemas e propor soluções, tendo em vista que os casos estudados são diferentes entre si e possuem particularidades. Para cada caso, uma abordagem diferente será utilizada. As abordagens não são únicas e possuem diversos meios de atingirem o mesmo resultado.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta de seis capítulos.

O capítulo 1 aborda a motivação do estudo, introdução dos tópicos e objetivos a serem alcançados na conclusão do trabalho.

O capítulo 2 apresenta um panorama do consumo energético mundial e brasileiro, com ênfase nas tendências para os próximos anos.

O capítulo 3 trata da questão de eficiência energética e como os seus estudos devem ser avaliados de forma a serem economicamente viáveis. Analisa-se o processo como um todo, desde a busca de oportunidades até a comprovação final e obtenção de recursos financeiros para o desenvolvimento e implementação da oportunidade encontrada.

O capítulo 4 aborda a modelagem dos três casos estudados. Ele contextualiza os dados teóricos disponíveis e os instrumentos e elementos de saída existentes e interligados ao sistema de automação da planta. Demonstra-se que a falta de alguns dos dados necessários na teoria nem sempre impacta o estudo realizado, pois se tratando de sistemas antigos, existe muita carência de investimento para modernização.

O capítulo 5 exhibe os métodos utilizados e os resultados alcançados para cada um dos casos estudados, levando em consideração as suas limitações, e apresenta os meios utilizados para a comprovação dos resultados.

O capítulo 6 relata as conclusões obtidas após as intervenções e resultados dos três casos estudados, bem como as semelhanças e diferenças entre os mesmos. Apresenta sugestões que podem ser exploradas em trabalhos futuros.

2 Consumo energético

2.1 Consumo energético mundial

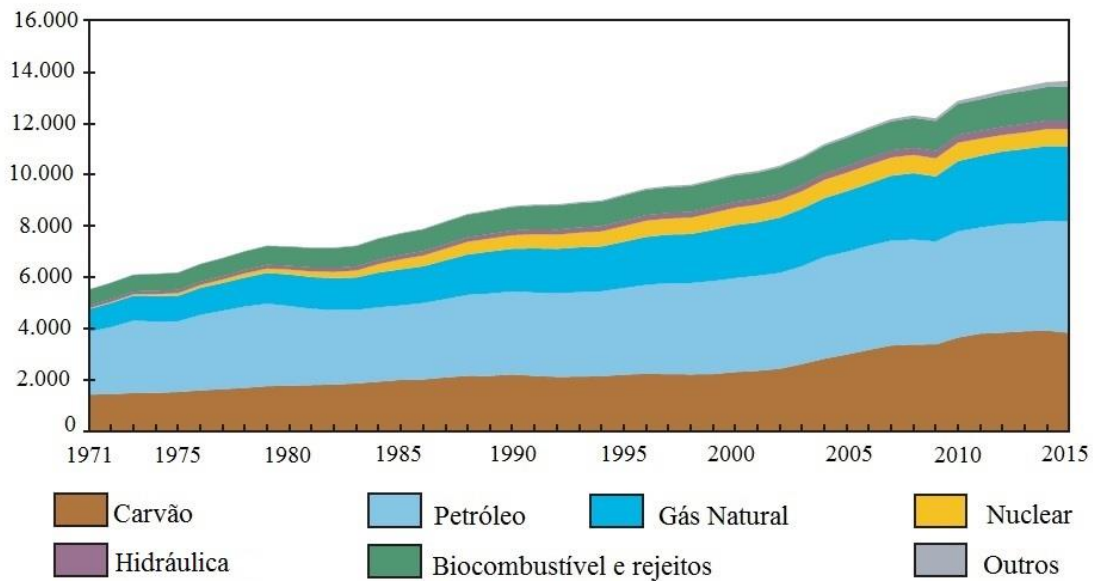
O consumo de energia pode ser relacionado com um indicador de desenvolvimento da região. Sendo assim, quanto maior for o consumo de energia, maior o desenvolvimento da região avaliada.

A IEA (*International Energy Agency*) foi fundada em 1974 com o intuito de fornecer um panorama e estudos relacionados a energia, desde assuntos sobre demanda e produção, até fatores externos, que possam, de alguma forma, afetar o consumo de energia. O foco da agência está nos seus 30 países membros, que são basicamente os europeus mais Estados Unidos, Canadá, México, Japão, Coreia do Sul e Nova Zelândia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017).

O crescimento do uso das fontes primárias de combustível pode ser visto na Figura 3. É importante avaliar que há um crescente consumo significativo nas fontes de energias não renováveis, especialmente para o carvão, petróleo e gás natural. Este é um ponto de atenção para as autoridades ambientais, pois como há uma relação forte e direta entre consumo de energia e desenvolvimento, há o risco de um colapso em breve, devido à falta de oferta de energia.

As fontes de energia renováveis são pouco significativas no total e não apresentam aumento significativo frente às demais nos últimos anos. Isso deixa o futuro de oferta mais incerto, pois o desenvolvimento de tecnologias que viabilizem a utilização das mesmas deve ter os seus investimentos em pesquisa aplicados o mais breve possível, para que haja tempo de maturação no desenvolvimento e aplicação.

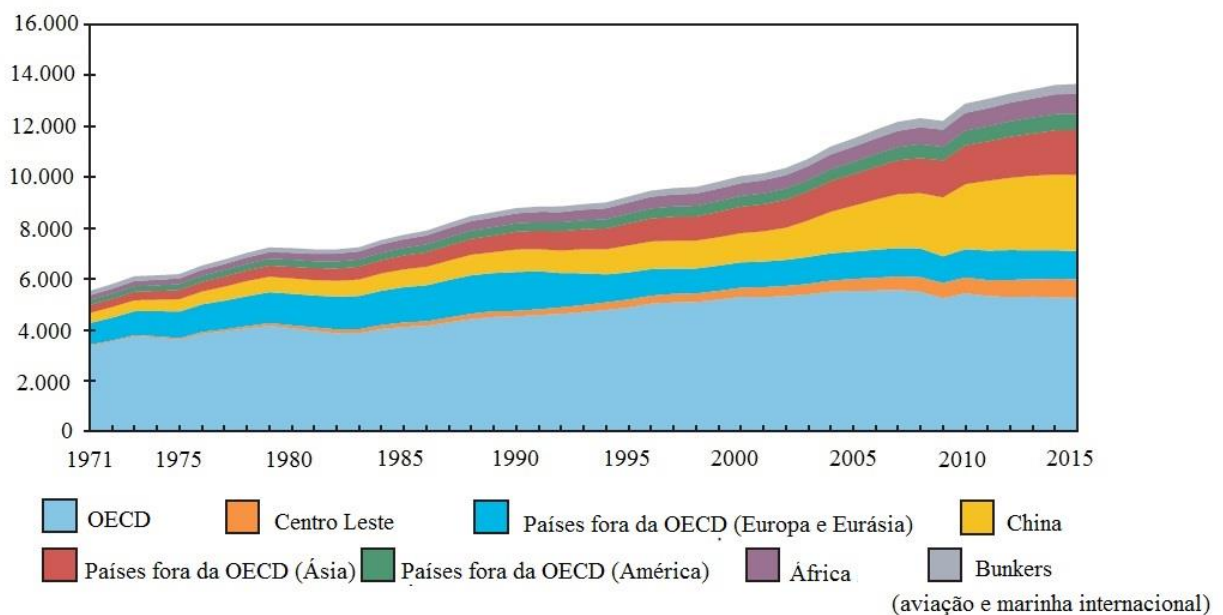
Figura 3 – Crescimento no uso das fontes primárias de energia de 1975 a 2015
Fontes Primárias de Energia de 1971 a 2015 por combustível (Mtoe)



Fonte: adaptado de *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY* (2017)

A Figura 4 demonstra a relação entre as regiões no uso das fontes de energia primária.

Figura 4 - Crescimento do consumo das fontes primárias de energia por região de 1975 a 2015
Fontes Primárias de Energia de 1971 a 2015 por região (Mtoe)



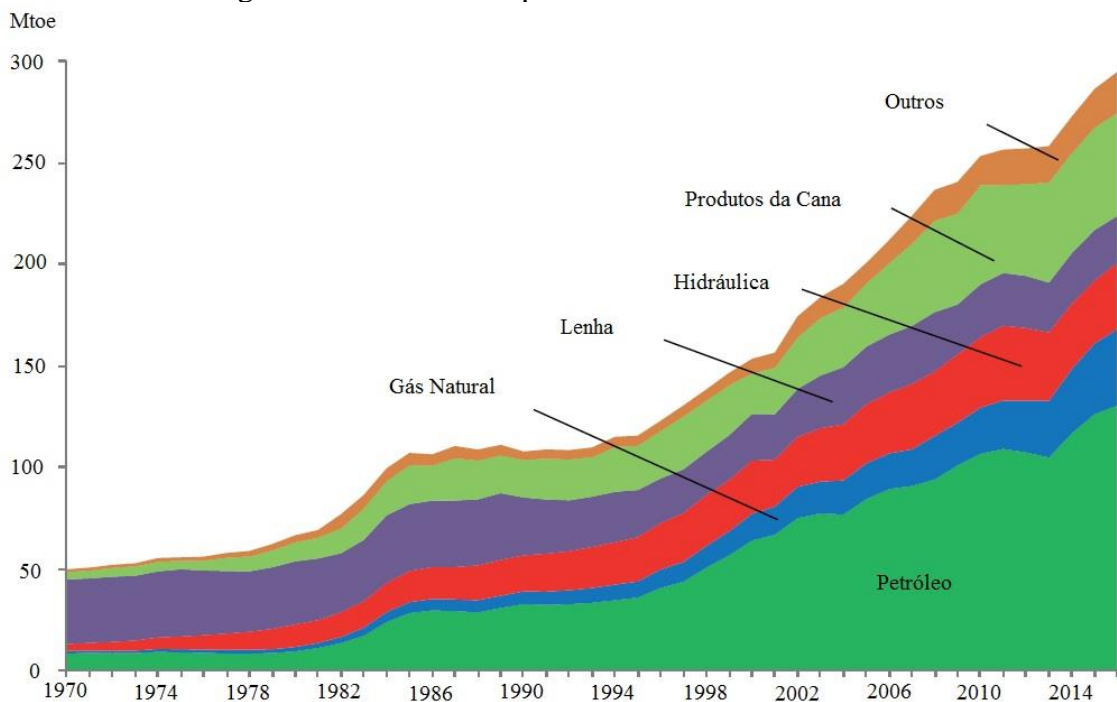
Fonte: adaptado de *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY* (2017)

A Figura 4 indica que a grande consumidora de fontes de energia são os países da OECD, seguidos da China. Avaliando o desenvolvimento dos países da OECD listados, juntamente com a China, é possível notar a relação entre os grandes consumidores de energia e os países que possuem maior desenvolvimento.

2.2 Consumo energético brasileiro

As fontes de energia primária do Brasil seguem a tendência mundial, o que pode ser visto na Figura 5, porém há uma maior significância na utilização de fontes de energias renováveis comparado com o cenário mundial.

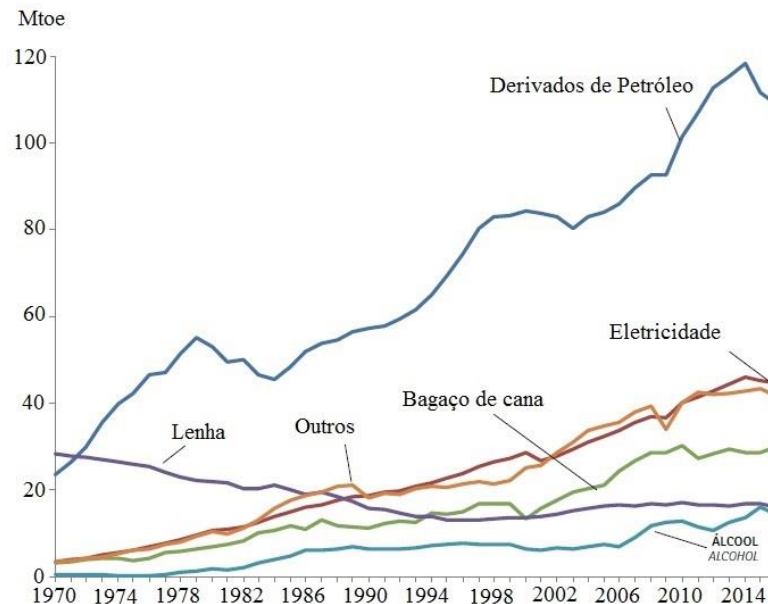
Figura 5 – Matriz energética brasileira 2017 por fonte



Fonte: adaptado de ENERGIA (2017)

A Figura 6 apresenta a tendência do crescimento do consumo brasileiro energético projetado ao longo dos anos.

Figura 6 - Crescimento do consumo energético brasileiro
Consumo final por fonte



Fonte: adaptado de *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY* (2017)

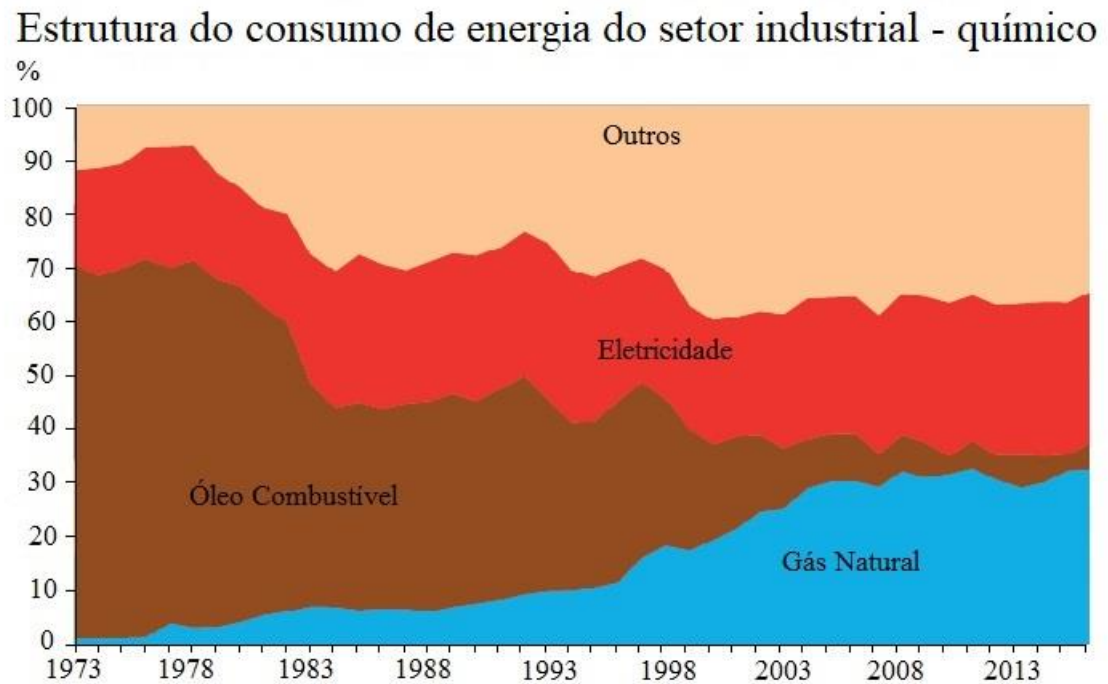
Anualmente, no Brasil, é lançado o BEN (Balanço Energético Nacional) preparado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética). O relatório tem como principal intuito apresentar a situação da energia nacional no ano base, tendo como referência as principais fontes de energia e seus respectivos consumidores. Faz um balanço entre a oferta e demanda.

Há uma grande representação para o consumo de derivados do petróleo, mas isso está muito relacionado ao setor de transportes. Aproximadamente 60% dos derivados de petróleo são consumidos por este setor (ENERGIA, 2017).

Restringindo a interpretação dos dados para o setor industrial químico brasileiro, há um grande equilíbrio entre algumas fontes primárias de energia. As que mais se destacam são: gás natural e energia elétrica. Cada uma representa aproximadamente 32% do consumo industrial (ENERGIA, 2017). A Figura 7 detalha a participação de cada fonte de energia para o setor químico industrial e Tabela 1 exhibe as fontes de energia envolvidas neste segmento.

Portanto, para este tipo de indústria, os estudos de eficiência energética deveriam focar nas duas fontes de energia mencionadas anteriormente, por possuírem maior impacto na matriz energética como um todo.

Figura 7 - Consumo Energético Industrial – Brasil



Fonte: adaptado de *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY* (2017)

Tabela 1 - Fontes de Energia do Setor Industrial Químico (%)

FONTES	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
GÁS NATURAL	29,3	32,2	31	31,7	32,8	30,5	29,1	30,2	32,3	32,6
CARVÃO VAPOR	1,1	1,3	1	1,7	1,4	2,3	2,2	2,5	2,5	1,9
LENHA	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
ÓLEO COMBUSTÍVEL	6,2	6,6	6,5	3,2	5,1	4,5	6,1	4,8	3	4,8
ELETRICIDADE	25,7	26,4	27,2	28,5	27,1	28	28,1	28,7	28,2	28,2
OUTRAS	37	32,8	33,8	34,2	33	34	33,8	33,1	33,3	31,9
TOTAL	100	100	100,1	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: adaptado pelo autor a partir de *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY* (IEA) (2017)

3 Eficiência energética

3.1 Conceitos

A eficiência energética está ligada a otimização na taxa de conversão da energia consumida para o resultado em que é gerado. Este conceito genérico pode ser empregado para os mais variados segmentos da indústria, como consumo de energia elétrica para sistemas de iluminação, climatização, bombeamento, entre outros. Também pode ser utilizado para os segmentos comerciais, residências, transporte público e demais setores.

A utilização eficiente da energia pode ser um fator diferencial para o desenvolvimento das economias, e a sua escassez, pode trazer impactos significativos para a população global, afetando aspectos vitais como a segurança, por exemplo. O uso racional da energia proporciona diferenciais competitivos entre nações e empresas. As projeções para o futuro com relação ao aumento de energia são expressivas, por exemplo, é esperado um crescimento no consumo residencial de energia elétrica de 32% entre os anos de 2015 e 2040. Parte deste crescimento está relacionado ao aumento do padrão da qualidade de vida da população, que cada vez consome mais produtos de conforto e conectividade (TUMBAZ; MOĞULKOÇ, 2018).

Além das novas tecnologias, que vêm revolucionando a maneira de consumir através da oferta de produtos revolucionários, ainda há uma forte questão comportamental que impacta diretamente no consumo eficiente de energia. Governos aplicam, através de políticas públicas, cada vez mais incentivos à pesquisa e desenvolvimento para aprimorar os produtos ofertados. Em complemento, o governo reforça a ideia de que as informações a respeito dos produtos, com relação a consumo de energia e infraestrutura utilizada, estejam a disposição dos consumidores, para que seja possível a tomada de decisão com base em informações claras (LABANCA; BERTOLDI, 2018).

As políticas públicas também tendem a conscientizar os empreendedores de que as ações para aprimorar a eficiência energética podem superar avaliações prévias de que não é necessário prejudicar ainda mais o meio ambiente para maximizar os resultados possíveis de serem alcançados. Há diversas maneiras alternativas de buscar as inovações sem que haja o consumo exagerado de recursos. O impulso de desenvolvimento pode ser realizado com base no consumo consciente e melhorias contínuas (CANTORE; CALÌ; VELDE, 2016).

A fase de conscientização, no caso de indústrias, também passa pela avaliação dos ativos atualmente existentes nas plantas produtivas. Em muitos casos existem equipamentos obsoletos que estão carentes de manutenção e atualização, sendo que a partir de uma rápida avaliação

técnica e econômica, muitas vezes são facilmente passíveis de substituição ou significativa modernização. Cada vez mais pesquisas estão sendo desenvolvidas, além da maior velocidade na troca de informações globais entre pesquisadores, de forma a acelerar o lançamento de novidades que buscam aumentar a eficiência dos processos, gerando menor custo e maior autonomia na operação.

3.2 Avaliações técnicas e econômicas

O processo de decisão nas grandes corporações, assim como a maioria dos consumidores racionais, passa por um processo de avaliação criteriosa com relação aos benefícios alcançados com as novas propostas de modificação, passando por todos os custos que são envolvidos.

Para o caso de processos industriais, como as condições são complexas, é necessária uma equipe multidisciplinar que possa trocar experiências e pontos de vista na busca das melhores soluções. Há casos onde estas equipes multidisciplinares são dedicadas ao estudo de eficiência energética, na busca da redução de custo, geração de valor e criação de vantagem competitiva para as organizações que são adeptas e investem nestes planos de economia de energia.

O primeiro passo a ser desenvolvido é levantar os maiores consumidores energéticos de uma área, pois certamente será o local onde existem maiores oportunidades de desenvolvimento de iniciativas de eficiência. É necessário que o grupo multidisciplinar possua integrantes que sejam conhecedores do processo, pois as particularidades de cada sistema devem ser levadas em consideração para entender os pontos vitais e os aspectos vulneráveis das áreas em estudo. É comum avaliações externas com conhecimentos superficiais dos processos causarem impactos negativos através da subestimação das condições operacionais.

Uma vez levantadas as oportunidades de estudo e avaliadas as condições de processo, é necessário que o grupo multidisciplinar busque alternativas viáveis ao utilizado. Esta busca pode ser simples ou complexa e depende das condições encontradas.

As soluções complexas passam por estudos detalhados e contato com fornecedores externos ou fabricantes, para que os mesmos avaliem o projeto entregue e passem a estudar as novas condições de operação na busca da maximização dos resultados. Geralmente estas são alternativas com maior custo e tempo de maturação elevado, onde diversas áreas da empresa necessitam ser envolvidas para a avaliação e aprovação das medidas. Certamente este tipo de projeto é estudado e colocado no plano de investimento das plantas produtivas para os anos subsequentes, portanto, levam anos para apresentar algum benefício real e medido.

Em contrapartida, por meio de avaliações mais simples, bons resultados são encontrados em períodos de tempo muito curtos, ou seja, períodos de quatro a oito semanas para a total maturação e implementação. Muitas soluções rápidas são advindas de programas das empresas que premiam colaboradores com boas ideias que trazem resultado significativo, com relação ao investimento necessário. Outra fonte de ideias simples também pode ser encontrada com os grupos multidisciplinares, que através da vivência em processos similares e o conhecimento detalhado do estudo em andamento, encontram soluções simples e eficazes, aumentando assim a eficiência no consumo de energia.

Na sua grande maioria, as soluções mais simples não possuem grandes resultados financeiros, porém, conseguem estabilizar o processo de maneira mais rápida, bem como ser rapidamente medida a partir dos resultados praticamente imediatos.

Independentemente da solução encontrada, seja ela simples ou das mais complexas, é necessário que seja realizada uma avaliação técnica e econômica. A avaliação técnica, na grande maioria das vezes, é elaborada pela equipe multidisciplinar e aprovada pelos superiores. Uma vez formulada, não há grandes discussões a respeito da proposta. Grande parte das dificuldades enfrentadas está relacionada aos cálculos dos benefícios econômicos. São dois os fatores que dificultam as justificativas de projetos:

- Falta de medições nos pontos que estão sendo estudados: o que não é medido, dificilmente é controlado e justificado. Pela experiência dos integrantes, os benefícios são evidentes, porém, são difíceis de comprovar devido a falta de dados. A comparação da situação anterior para a proposta acaba esbarrando em comprovações com números para a viabilidade; e
- Benefícios relacionados a ganhos de segurança e qualidade: estes benefícios dificilmente são mensurados de forma monetária, porém demanda investimento. Em muitos casos, representantes destes departamentos são peças essenciais para auxiliar na medição de benefícios e, como não são situações que ocorrem com frequência definida, é um grande desafio para todos os envolvidos.

Superados os desafios mencionados anteriormente, é possível elaborar um estudo de caso robusto que mencione os custos envolvidos e os benefícios oriundos dos ganhos de eficiência. Tendo as informações em mãos, as avaliações são realizadas pelos times de controladoria das empresas, utilizando índices como *payback* e PVI. O *payback* é o tempo de retorno do investimento empregado, ou seja, após o investimento inicial para o desenvolvimento do

projeto, em quanto tempo os benefícios retornaram para reembolsar o empresário, tendo em vista que, a partir deste ponto, os resultados positivos entram como benefício direto. O PVI é uma medida de eficiência do projeto, o qual racionaliza o benefício alcançado com o investimento necessário.

Os métodos de avaliação apresentados neste item são significativos para a racionalização dos projetos com base nos benefícios que são alcançados. Como na grande maioria das vezes os detentores da responsabilidade de liberar e priorizar investimentos não são pessoas técnicas, apenas esta justificativa não é necessária. É preciso que os números econômicos também sejam consistentes para obter a confiança e a disponibilidade de recursos para a execução das iniciativas que foram originalmente desenvolvidas com base nas avaliações realizadas com as equipes multidisciplinares.

Após a fase de obtenção de capital para o desenvolvimento dos projetos, uma nova fase é aberta, onde a alta liderança começa a monitorar o final do projeto e o início das medições dos benefícios, para certificar que o desenvolvimento técnico está respondendo de acordo com as expectativas. Além da questão de monitoramento, esta fase é de grande utilidade para a equipe multidisciplinar avaliar os resultados e aprender com os imprevistos no decorrer das atividades, para que sirva de experiência para os próximos projetos.

4 Característica dos sistemas e abordagem proposta

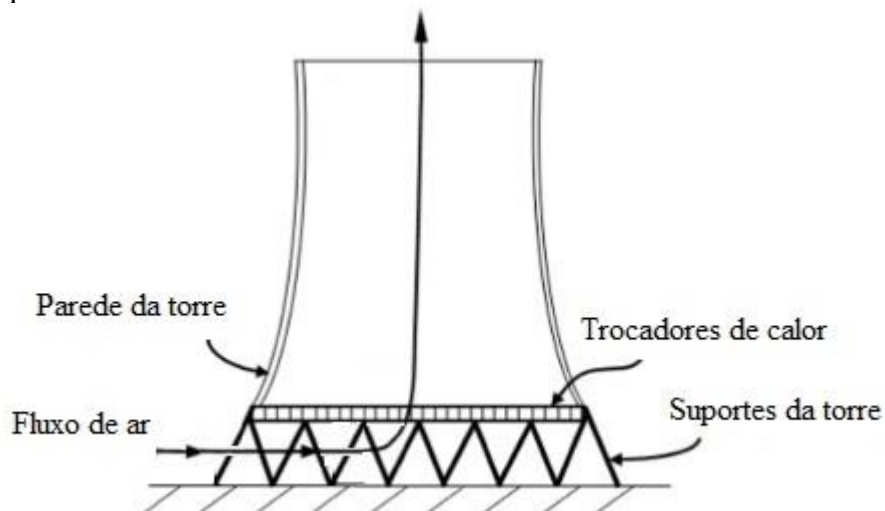
4.1 Configurações de torres de resfriamento

Existem dois tipos de torres de resfriamento onde a diferença entre os modelos está no método em que a água a ser resfriada circula no sistema (SINGLA; SINGH; DAS, 2016). Os tipos são:

- Torres de resfriamento do tipo seca;
- Torres de resfriamento do tipo úmida.

Para os modelos de torre de resfriamento do tipo seca, a água circula em uma tubulação que a separa do ar ambiente, funcionamento semelhantemente a um trocador de calor, que faz uso da transferência de calor do tipo convectiva (KLIMANEK; CEDZICH; BIALECKI, 2015). A grande vantagem deste modelo de torre de resfriamento é a economia de água, pois não há perda por evaporação (MA, H. et al., 2015). Porém, o sistema não possui grande eficiência quando operando em regiões com altas temperaturas ambientes, o que dificulta o processo de troca térmica (HE et al., 2016). Para minimizar esta influência, uma técnica existente é justamente o pré-resfriamento do ar de entrada, de maneira a garantir que o esforço do sistema durante a troca térmica seja minimizado e tenha menor influência do ar externo (HE et al., 2017). O esquema genérico da torre de resfriamento seca está é mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Esquema de torre de resfriamento seca

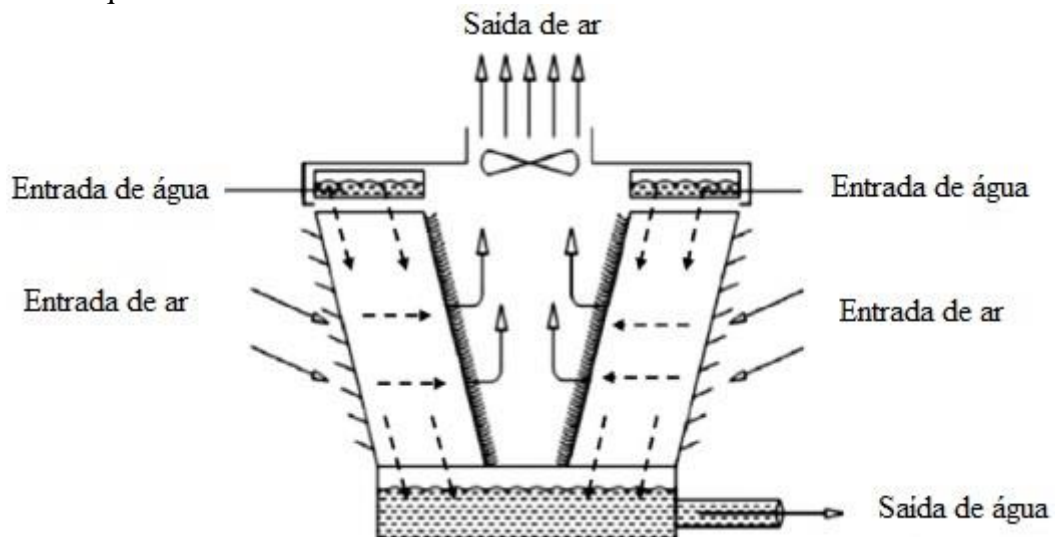


Fonte: adaptado de Duniam (2016).

As torres de resfriamento do tipo úmida muitas vezes são adotadas para grandes cargas térmicas, maiores que 100 TR, por serem mais flexíveis e possuírem um baixo custo com boa confiabilidade (NAIK; MUTHUKUMAR, 2017). O princípio utilizado é o evaporativo, onde uma parcela da água de circulação é evaporada para que haja a redução na temperatura da água (CUTILLAS; RAMÍREZ; MIRALLES, 2017). Neste processo também há um menor consumo de energia se comparado ao modelo apresentado anteriormente (RUIZ; KAISER; LUCAS, 2017).

Para que a água fique mais tempo dentro do equipamento, há a utilização de bicos aspersores para melhorar a distribuição da mesma no equipamento e recheios mecânicos internos que permitem que a água permaneça ainda por mais tempo. Pode ser alcançado uma melhoria no rendimento de até 5,5% com alteração nos arranjos de bicos aspersores devido a melhor a distribuição de água e maior o tempo de residência dentro da torre de resfriamento. Alinhado com a utilização racional dos ventiladores, maior será a eficiência do equipamento (SADAFI; JAHN; HOOMAN, 2016). A Figura 9 exibe um exemplo de modelo de torre de resfriamento úmida.

Figura 9 - Esquema de torre de resfriamento úmida



Fonte: adaptado de Naik (2017).

Os demais modelos existentes são derivações dos dois modelos supramencionados e são chamados de modelos híbridos (BEST; RIVERA, 2015).

4.2 Eficiência das torres de resfriamento

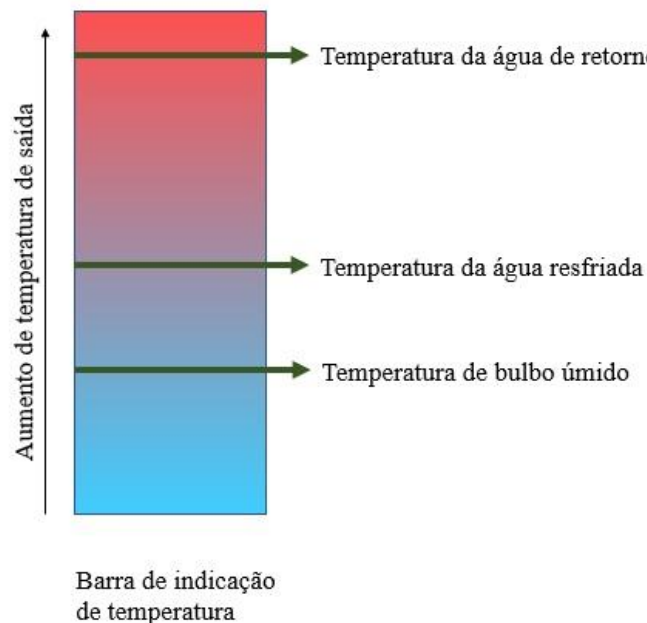
A eficiência das torres de resfriamento pode ser calculada conforme equação (2).

$$\text{Eficiência} = \frac{(\text{Temperatura da água de retorno} - \text{Temperatura da água resfriada})}{(\text{Temperatura da água de retorno} - \text{Temperatura de bulbo úmido})} \times 100 \quad (2)$$

A equação (2) indica, do ponto de vista da torre de resfriamento, qual a eficiência do equipamento em abaixar a temperatura da água de retorno com relação à temperatura de bulbo úmido, ou seja, o quanto mais próximo da temperatura de bulbo úmido, maior a eficiência do equipamento.

O conceito para as temperaturas mencionadas na equação (2) pode ser entendido a partir da Figura 10.

Figura 10 - Temperaturas do cálculo de eficiência da torre de resfriamento



Fonte: Autor

A temperatura de bulbo úmido é a temperatura mais baixa que, através da evaporação, é possível ser alcançada. Este é um dado de premissa de projeto e varia de acordo com o histórico das condições climáticas da região. É entendido que, a partir de uma condição perfeita de funcionamento, esta seja a temperatura mais baixa a ser alcançada na água resfriada na saída da torre de resfriamento (TAGHIAN DEHAGHANI; AHMADIKIA, 2017).

A temperatura de água resfriada é a saída da torre de resfriamento que vai para o processo. Durante a fase de projeto, este é o valor informado para os especialistas de produto para que, juntamente com a carga térmica do processo, seja feita a avaliação da eficiência do

sistema como um todo. Conseqüentemente, a temperatura da água de retorno é referente ao ganho energético que a água teve ao trocar calor com os equipamentos de produção.

Referente ao tipo de torre de resfriamento utilizado no estudo, foi considerada a utilização de torres de resfriamento do tipo úmida, pois são os equipamentos atualmente existentes nas plantas produtivas da empresa estudada. Sendo assim, o estudo possui maior potencial para a multiplicação do conceito utilizado no desenvolvimento desta tese.

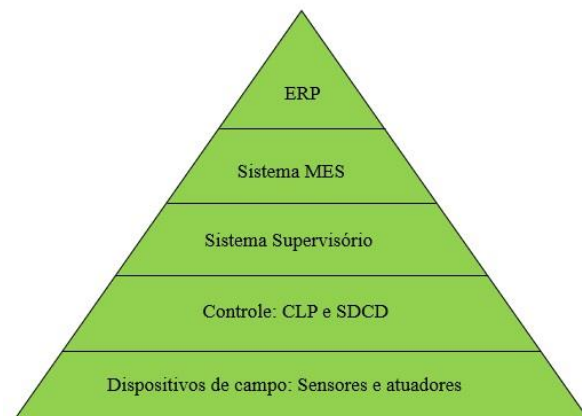
4.3 Arquitetura de interligação

Os sistemas de automação existentes nas plantas, SDCDs, são responsáveis por coletar as informações provenientes dos instrumentos de campo, tais como transmissores de pressão, temperatura, vazão, etc, realizar o processamento e enviar ações para os atuadores, que são as válvulas, contadores, etc.

Conforme pirâmide de fluxo de informações, é necessário que haja uma boa instrumentação para que o controle seja eficiente. Quanto maior a quantidade de instrumentos, mais refinado é o controle, pois as informações podem melhorar o modelamento de equipamentos.

Atualmente a empresa conta com um sistema de automação adequado e, além da primeira camada da pirâmide, há uma interação suficiente com as demais camadas. Isso significa que as principais informações de processo estão disponíveis para que os times de engenharia, produção e manutenção da planta realizem estudos de otimização de maneira mais assertiva, com dados históricos de até dez anos e ferramentas de cálculos estatísticos, além de informações gráficas de tendência. O fluxo de informações é mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Pirâmide de fluxo de informações



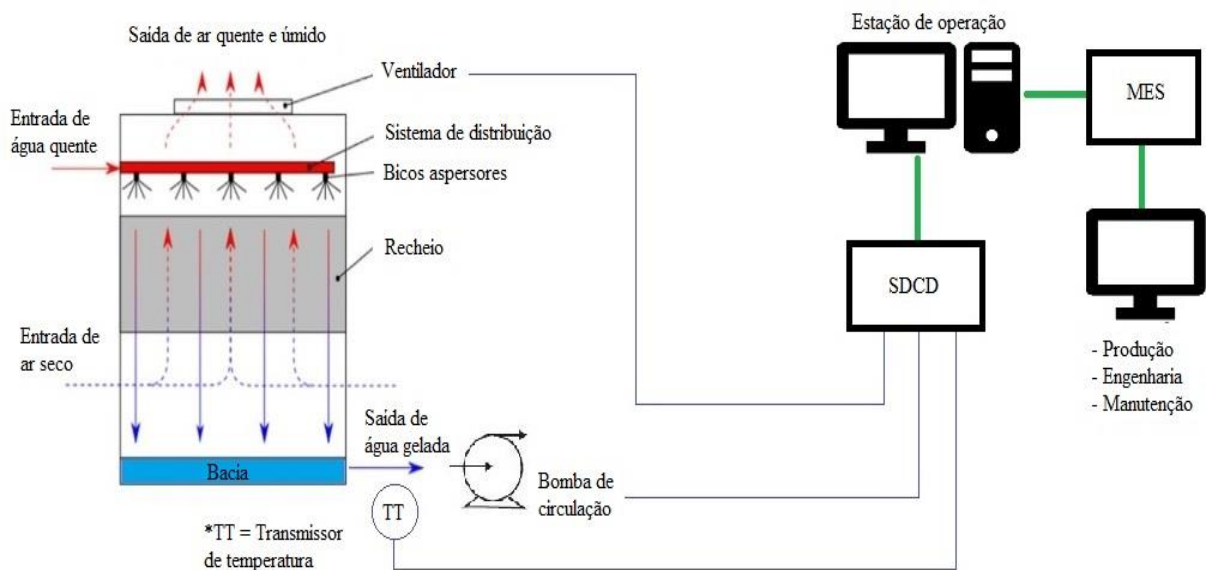
O sistema MES (*Manufacturing Execution System*) é o responsável por disponibilizar a informação de forma mais resumida para os times de engenharia, produção e manutenção. Ele também armazena os dados de processo por longos períodos, que no caso da empresa estudada, é de dez anos.

O sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) é a camada mais alta da pirâmide, que é responsável por interligar as diversas áreas da empresa. Neste ponto, a informação extrapola os limites da planta produtiva e começa a interagir com outros departamentos, como logística, financeiro, comercial e outros. A melhor condição é quando os dados da produção conseguem interferir diretamente nos demais processos, como por exemplo, emitir pedidos de compra automáticos e organizar operações logísticas com base em inventário.

Levando em consideração os sistemas de torres de resfriamento estudados, é necessário demonstrar como o fluxo de informação acontece durante o estudo, desde a instrumentação básica até o estudo dos dados na camada MES.

A Figura 12 ilustra um caso genérico de como os sistemas estudados possuem interligação com as demais camadas de informação.

Figura 12 - Fluxo de informações do sistema de automação



Fonte: adaptado de Naik (2017).

É possível verificar na Figura 12 que as informações dos transmissores estão diretamente interligadas no sistema de automação, bem como os atuadores. O sistema de automação também é responsável por disponibilizar as informações relevantes para a camada MES. Deve-se levar em consideração que as informações relevantes não contemplam lógicas de funcionamento, pois estas são internas ao sistema de automação.

As estações de trabalho dos engenheiros, responsáveis pela produção e manutenção, estão interligadas ao banco de dados da camada MÊS de modo que podem acessar as informações para realizarem os cálculos estatísticos e acompanharem tendências de processo.

Atualmente, na empresa estudada, não há uma interligação eficiente da camada MES para o sistema ERP. São oportunidades de desenvolvimento que podem ser exploradas em um futuro próximo.

4.4 Seleções de estudos de caso

Com base na disponibilidade das informações mencionadas na seção anterior, são estudados três casos com arranjos de torres de resfriamento diferentes entre si. Cada um dos casos apresentados possui suas características específicas, mas são classificados de acordo com a existência de equipamentos de controle de velocidade, os inversores de frequência. Assim, são estudados dois casos sem inversor de frequência e um com inversor de frequência, conforme descrição a seguir.

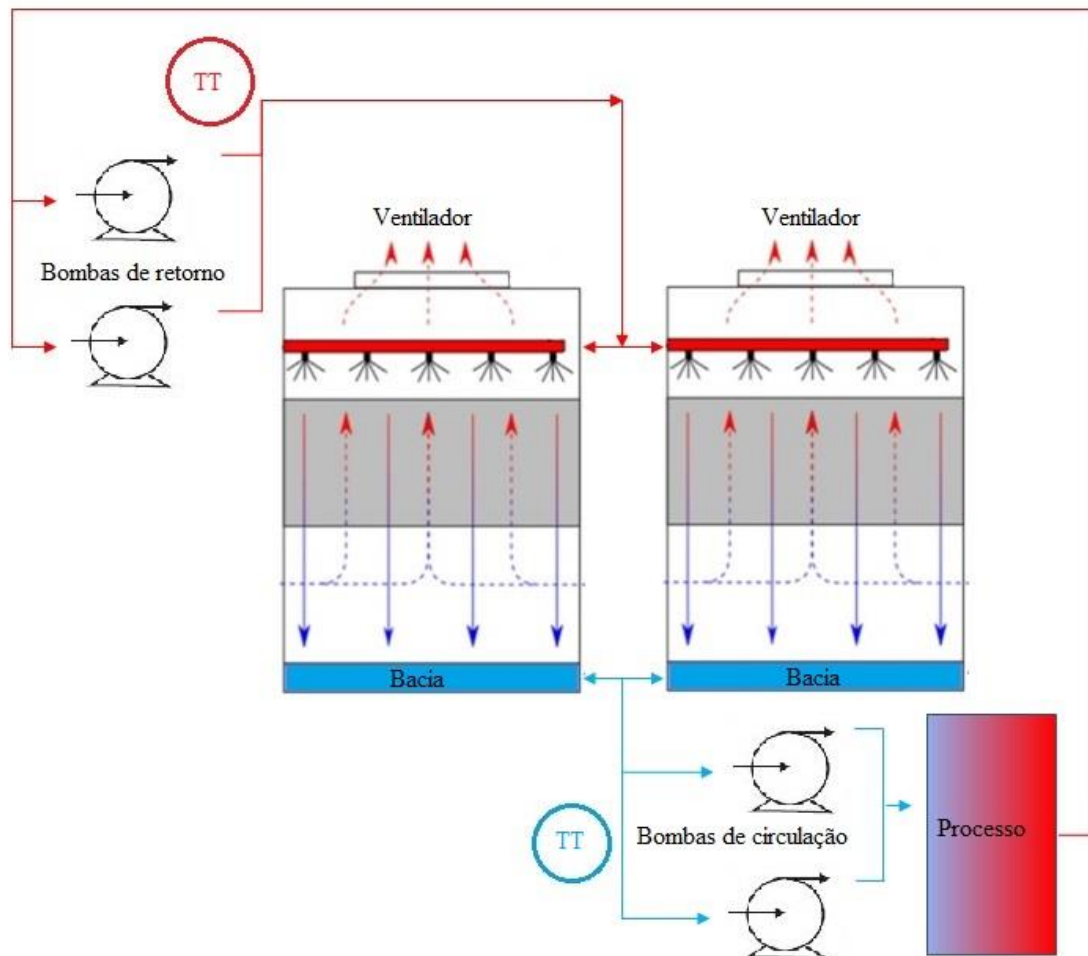
4.4.1 Caso 1 – duas torres de resfriamento sem inversor de frequência

O primeiro caso estudado tem o arranjo da Figura 13. É importante ressaltar que todos os motores envolvidos possuem acionamento elétrico por partida direta, sendo que o sistema apresenta as seguintes características:

- Duas torres de resfriamento em paralelo, que recebem a mesma água de retorno e possuem bacias interligadas de modo que a água que vai para o processo é a mistura da saída das torres de resfriamento;
- Cada torre de resfriamento possui o seu próprio ventilador e este é único para cada equipamento;
- Existem duas bombas de circulação em paralelo que bombeiam a água existente na bacia das torres de resfriamento através de um tubo coletor;
- Existem duas bombas de retorno que estão em paralelo e enviam a água proveniente do processo de volta para as duas torres de resfriamento;
- Dados técnicos de projeto dos equipamentos (informações individuais):
 - Potência dos ventiladores: 15 CV

- Potência das bombas de circulação: 20 CV
- Potência das bombas de retorno: 40 CV
- Temperatura de projeto de bulbo úmido: 26°C
- Temperatura de projeto de água resfriada: 32°C
- Temperatura de projeto de água quente: 48°C
- Vazão de água do sistema: 120.000 kg/h
- Carga térmica da torre de resfriamento: 1.920.000 kcal/h
- Eficiência, conforme equação (2): 73%
- Com relação à instrumentação interligada no SDCD, tem-se:
 - Transmissor de temperatura da água de retorno;
 - Transmissor de temperatura da água gelada;
 - Retorno do contator do acionamento das bombas de circulação e retorno;
 - Retorno do contator do acionamento dos ventiladores.

Figura 13 - Arranjo Caso 1 – duas torres sem inversor



O modo de operação do sistema antes da implementação do estudo é descrito a seguir.

- Acionamento dos ventiladores: controlado pela operação. Frequentemente os dois ventiladores estavam acionados, salvo períodos de manutenção corretiva. A parada de produção ocorre semanalmente entre o sábado às 22:00h e segunda-feira às 06:00 e durante os feriados municipais, estaduais e nacionais. Era uma boa prática que os ventiladores fossem desligados neste período;
- Bombas de circulação e retorno: as quatro bombas ficavam ligadas constantemente, inclusive durante os finais de semana;
- Conclusão: o conjunto das duas torres de resfriamento operava com carga máxima, independentemente das condições ambientais. Os fatores externos, como chuva, inverno, verão, dia e noite não eram levados em consideração. A operação não consegue fornecer atenção suficiente ao controle, o que leva ao sistema operar na condição mais segura, que é a carga máxima. A água que vai para o processo, na maior parte do tempo, estava com temperatura abaixo das condições de projeto.

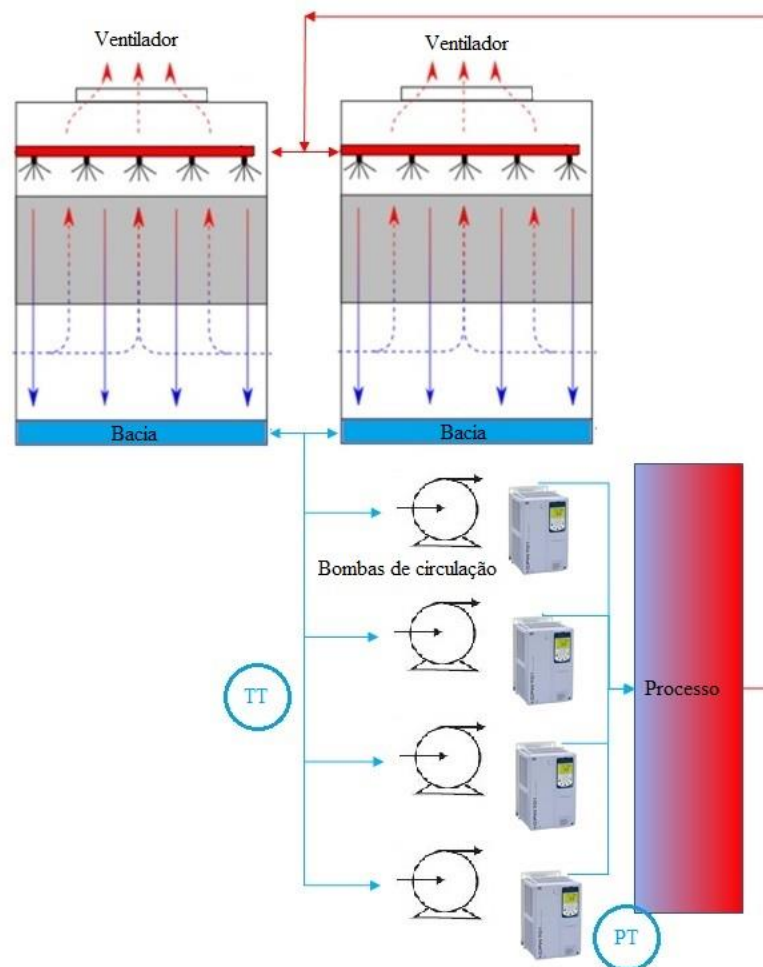
4.4.2 Caso 2 – duas torres de resfriamento com inversor de frequência

O segundo caso estudado tem o arranjo da Figura 14. Ressalta-se que os motores das bombas de circulação envolvidos possuem acionamento elétrico por inversor de frequência, enquanto que os motores dos ventiladores possuem acionamento elétrico por partida direta. O sistema apresenta as características descritas a seguir.

- Duas torres de resfriamento em paralelo que recebem a mesma água de retorno e possuem bacias interligadas de modo que a água que vai para o processo é a mistura da saída das torres de resfriamento;
- Cada torre de resfriamento possui o seu próprio ventilador e este é único para cada equipamento;
- Existem quatro bombas de circulação em paralelo, que bombeiam a água existente na bacia das torres de resfriamento através de um tubo coletor;
- Dados técnicos de projeto dos equipamentos (informações individuais):
 - Potência dos ventiladores: 35 CV
 - Potência das bombas de circulação: 40 CV

- Temperatura de projeto de bulbo úmido: 25°C
- Temperatura de projeto de água resfriada: 30°C
- Temperatura de projeto de água quente: 45°C
- Vazão de água do sistema: 500.000 kg/h
- Carga térmica da torre de resfriamento: 7.500.000 kcal/h
- Eficiência, conforme equação (2): 75%
- Com relação a instrumentação interligada no SDCD, tem-se:
 - Transmissor de temperatura da água gelada;
 - Transmissor de pressão da linha de água gelada, instalado após as quatro bombas;
 - Retorno do inversor de frequência com relação à rotação das bombas de circulação;
 - Retorno do contator do acionamento dos ventiladores.

Figura 14 - Arranjo Caso 2 – duas torres com inversor



Fonte: adaptado de Keshtkar (2017).

O modo de operação do sistema antes da implementação do estudo é descrito a seguir.

- Acionamento dos ventiladores: controlado pela operação. Frequentemente os dois ventiladores estavam acionados, salvo períodos de manutenção corretiva. A planta produz no regime 24h / 7 dias na semana;
- Bombas de circulação: três bombas em operação constante e uma de reserva. As bombas operavam na condição de rotação nominal;
- Conclusão: o conjunto das duas torres de resfriamento operava com carga máxima, independentemente das condições ambientais. Os fatores externos, como chuva, inverno, verão, dia e noite não eram levados em consideração. A operação não consegue fornecer atenção suficiente ao controle, o que leva ao sistema operar na condição mais segura, que é a carga máxima. A água que vai para o processo, na maior parte do tempo, estava com temperatura abaixo das condições de projeto. Além desses fatores, a troca térmica nos equipamentos não era eficiente, devido ao grande volume de água bombeado pelas três bombas em operação com máxima vazão. Turbulências frequentes eram detectadas nos equipamentos devido à alta vazão. Desta forma, a utilização em capacidade máxima dos equipamentos ocasionava uma deficiência na troca térmica, devido às limitações mecânicas da instalação existente.

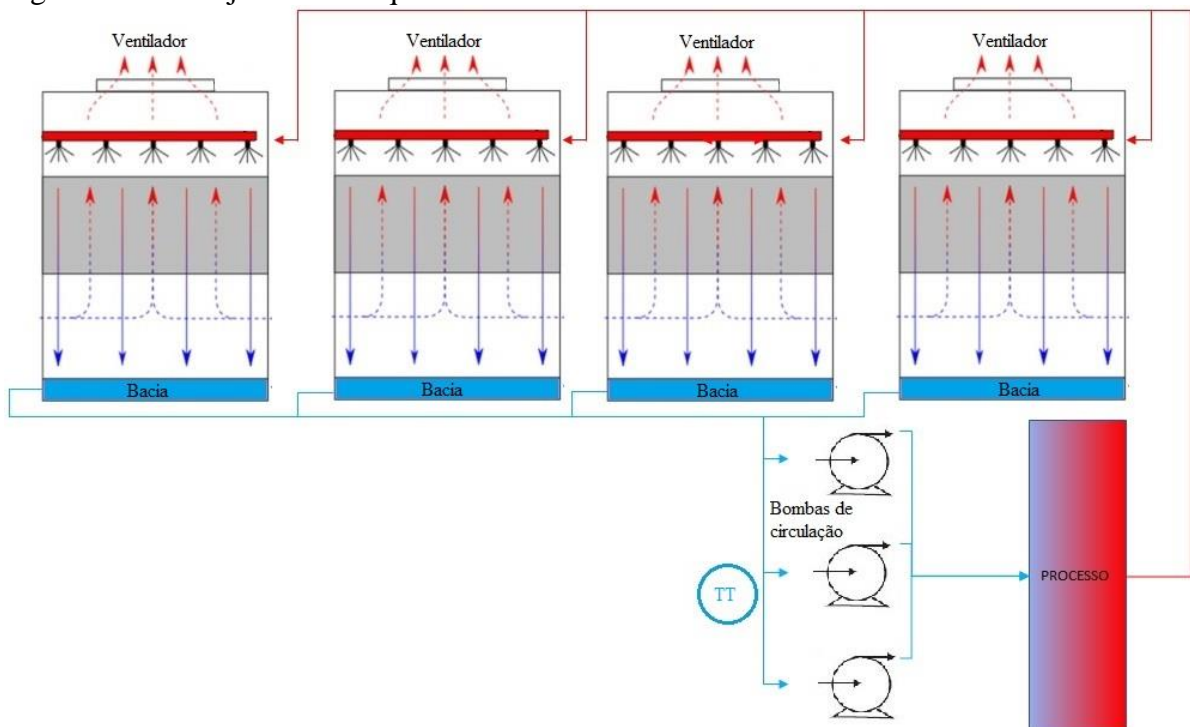
4.4.3 Caso 3 – quatro torres de resfriamento sem inversor de frequência

O terceiro caso estudado tem o arranjo da Figura 15 ressalta-se que todos os motores envolvidos possuem acionamento elétrico por partida direta. O sistema apresenta as seguintes características.

- Quatro torres de resfriamento em paralelo que recebem a mesma água de retorno e possuem bacias interligadas de modo que a água que vai para o processo é a mistura da saída das torres de resfriamento;
- Cada torre de resfriamento possui o seu próprio ventilador e este é único para cada equipamento;
- Existem três bombas de circulação em paralelo, que bombeiam a água existente na bacia das torres de resfriamento através de um tubo coletor;

- Dados técnicos de projeto dos equipamentos (informações individuais):
 - Potência dos ventiladores: 20 CV
 - Potência das bombas de circulação: 40 CV
 - Temperatura de projeto de bulbo úmido: 24°C
 - Temperatura de projeto de água resfriada: 29°C
 - Temperatura de projeto de água quente: 34°C
 - Vazão de água do sistema: 215.000 kg/h
 - Carga térmica da torre de resfriamento: 1.075.000 kcal/h
 - Eficiência, conforme equação (2): 50%
- Com relação a instrumentação interligada no SDCD, tem-se:
 - Transmissor de temperatura da água gelada;
 - Retorno do contator do acionamento das bombas de circulação;
 - Retorno do contator do acionamento dos ventiladores.

Figura 15 - Arranjo Caso 3 – quatro torres sem inversor



Fonte: adaptado de Keshtkar (2017).

O modo de operação do sistema antes da implementação do estudo é descrito a seguir.

- Acionamento dos ventiladores: controlado pela operação. Frequentemente os quatro ventiladores estavam acionados, salvo períodos de manutenção corretiva. A planta produz no regime 24h / 7 dias na semana;
- Bombas de circulação: três bombas em operação constante;
- Conclusão: o conjunto das quatro torres de resfriamento operava com carga máxima, independentemente das condições ambientais. Os fatores externos, como chuva, inverno, verão, dia e noite não eram levados em consideração. A operação não consegue fornecer atenção suficiente ao controle, o que leva ao sistema operar na condição mais segura, que é a carga máxima. A água que vai para o processo, na maior parte do tempo, estava com temperatura abaixo das condições de projeto. Há uma observação por parte da operação com relação a vazão do sistema, pois as três bombas de circulação devem estar em constante operação para suprir a necessidade do sistema completo. Embora houvesse um controle *on/off* para o acionamento dos ventiladores, os *set points* de controle não estavam otimizados. Foram encontrados valores de *set point* com último estágio de acionamento em 21°C, temperatura essa que está bem abaixo da temperatura de projeto das torres de resfriamento. Com base nesta constatação, foi detectado que o sistema operava em sua condição máxima por todo tempo, devido ao receio da operação em perder o controle da temperatura da água que circula no processo.

4.5 Abordagem proposta

Cada uma das aplicações mencionadas nos itens 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3 devem ser tratadas de uma forma diferente, seja pelo período de dados disponível para a comparação, bem como a disponibilidade da área de operação em colocar em prática os novos conceitos apresentados durante a fase de estudos nas equipes multidisciplinares.

Tendo como base o programa de eficiência energética que está em evidência dentro da empresa, a qual busca oportunidades para redução do consumo de energia em equipamentos e processos potenciais, os três arranjos de torres de resfriamento apresentados foram identificados como potenciais fontes de economia e baixo custo de implementação, bem como uma iniciativa de rápida mensuração de resultados.

Após a identificação dos equipamentos, foi realizado um levantamento juntamente com a equipe de manutenção e operação local para que todos os dados fossem disponibilizados para estudo. Os dados considerados eram as premissas e características do projeto e o que de fato há

de automação no local para que possíveis intervenções fossem efetuadas e monitoradas ao longo do tempo. Os dados solicitados foram os referentes ao projeto da época de implementação do equipamento e os instrumentos, dispositivos e atuadores que estavam ligados ao SDCD da área em estudo.

Em paralelo, um estudo das condições de operação foi relatado juntamente com avaliações em campo e instruções de operação para que possíveis pontos de melhoria fossem levantados. As informações de possíveis melhorias foram listadas e priorizadas conforme potencial de benefício, esforço de implementação e impacto na produção e manutenção atual. Neste ponto, algumas instruções de trabalho antigas, que nunca passaram por revisão, foram também avaliadas de maneira a maximizar os resultados por meio do comportamento da equipe de operação.

As informações de projeto são importantes para avaliação do potencial do equipamento com base na capacidade atual consumida do mesmo, informação essa coletada durante a fase de avaliação. A diferença entre o potencial do equipamento e a real utilização é o principal dado de entrada no estudo de viabilidade. É a partir deste ponto que é definido se o equipamento atual possui capacidade para atender os projetos de melhoria e mensurar o benefício estimado.

Juntamente com o time de operação da planta, um novo cenário é desenhado de forma a otimizar a utilização dos equipamentos e melhorar o comportamento dos operadores, de modo a consumir a menor quantidade possível de energia e manter estável a produção. A partir deste ponto, uma análise de viabilidade de projeto é desenvolvida, de modo que haja uma aprovação formal da gerência da planta e do time de controladoria da empresa.

Após a aprovação formal, os times de engenharia, manutenção e operação são envolvidos para que todas as atualizações de documentos sejam realizadas. A estratégia de implementação é elaborada de forma a minimizar os impactos na produção durante as alterações e garantir que todos os recursos estejam disponíveis durante a fase de desenvolvimento e colocação em marcha.

Uma vez que a implementação é finalizada, o time de manutenção gerencia o comportamento do equipamento modificado e alerta o time de engenharia caso haja alguma anormalidade no sistema. O time de operação também gerencia o comportamento do novo sistema e verifica os impactos positivos e negativos na produção, e sugere pontos de melhoria de acordo com a necessidade operacional e capacidade produtiva. Este método de monitoramento contínuo é relevante para que possíveis impactos negativos sejam facilmente detectados e rapidamente corrigidos, de forma a minimizar a ação dos mesmos na produtividade.

O procedimento de validação de benefícios da empresa sugere que as modificações calculadas sejam avaliadas por um período de um ano para que todos os benefícios sejam acompanhados e validados. Por meio de sistemas de armazenamento de dados para grandes períodos de tempo e da utilização de ferramentas de cálculos estatísticos, bem como disponibilização de gráficos, é possível comprovar os resultados obtidos que, dependendo das características de implementação, melhorias propostas e alterações nos modos de operação, podem ser superiores ou inferiores ao previsto. A partir deste ponto é feito um cálculo de ajuste entre o inicialmente previsto e o realmente medido.

As metodologias empregadas para os três casos mencionados acima podem ser replicadas para todos os arranjos de torres de resfriamento da empresa estudada, pois se tratam de métodos de avaliação genéricos que possuem ampla aplicabilidade. Uma vez com os resultados comprovados, os casos de sucesso são demonstrados para as demais áreas da empresa, de modo a compartilhar o conhecimento adquirido e buscar novos potenciais benefícios de economia de energia.

5 Resultados

As aplicações apresentadas em 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3 foram abordadas de maneira semelhante, por meio da avaliação dos dados de projeto e operação. Após o levantamento das condições, propostas de melhorias, que são detalhadas a seguir, foram sugeridas e implementadas. Respeitando as condições de caso, as propostas de melhoria foram tratadas de forma diferentes para atender cada uma das particularidades.

O período estimado de avaliação de um ano após a implementação não se fez necessário, uma vez que os resultados obtidos foram visíveis e relevantes momentos após o desenvolvimento e colocação em marcha, conforme apresentado a seguir.

Os resultados são apresentados de acordo com a seguinte sequência.

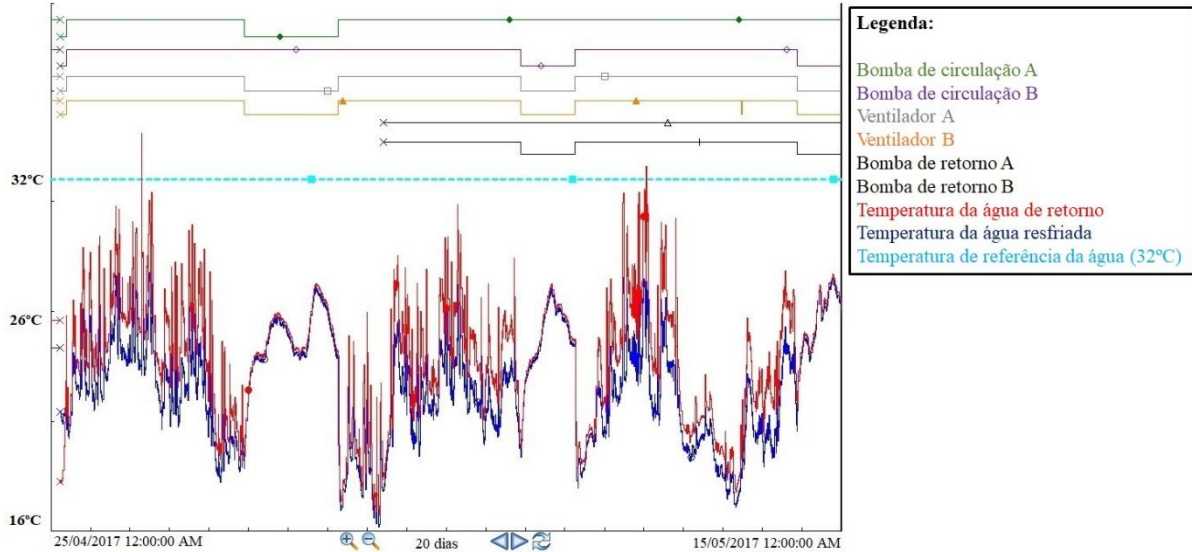
- Situação de operação antes da otimização energética;
- Premissas adotadas, cálculos e estratégias;
- Resultados medidos.

5.1 Caso 1 – duas torres de resfriamento sem inversor de frequência

5.1.1 Situação de operação antes da otimização energética

A planta foi avaliada por vinte dias para definição da estratégia de otimização do consumo de energia. Foram avaliadas as bombas de circulação e retorno, ventiladores e temperatura de água de retorno e água resfriada. O comportamento do sistema é mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Modo de operação do Caso 1 antes da automação



Fonte: Autor

Na parte inferior do gráfico da Figura 16 estão as temperaturas de retorno da água de processo (vermelho) e água resfriada (azul). Está evidente que a troca térmica do sistema é muito baixa devido ao pouco deslocamento vertical das linhas, uma vez que a escala do gráfico é única. Devido à particularidade da planta produtiva não operar entre sábado 22:00h e segunda-feira 06:00h e nos feriados, pode-se notar que a temperatura da água de retorno e da água resfriada são praticamente idênticas. Além da pouca troca térmica, é possível verificar que a temperatura de projeto do sistema de torres de resfriamento para a água resfriada nunca é alcançada (32 °C). Muito pelo contrário, fica significativamente abaixo do projetado.

As duas primeiras linhas do gráfico são referentes às bombas de circulação, que enviam a água resfriada para o processo. As próximas duas linhas do gráfico se referem ao acionamento dos ventiladores. As bombas de retorno de água para a torre de resfriamento estão representadas na quinta e sexta linhas do gráfico. Devido à uma limitação do sistema, os dados da quinta e sexta linhas ficaram disponíveis apenas após metade do período de avaliação, porém sem ônus ao experimento. O estado apresentado é 1 ou 0 , onde 1 representa equipamento em funcionamento e 0 representa equipamento desligado.

Observa-se que o time de operação respeitou as instruções operacionais, que solicitam o desligamento dos ventiladores, uma bomba de circulação e uma bomba de retorno durante os finais de semana e feriados. No restante do tempo, durante a operação regular, o sistema operava com capacidade máxima, ou seja, todos os seis motores elétricos em funcionamento.

A Tabela 2 exhibe resumidamente os parâmetros encontrados e a carga térmica média utilizada durante o período de avaliação.

Tabela 2 – Troca térmica média durante a operação para o Caso 1

Período de 25/04/2017 a 15/05/2017	
Temperatura média de água resfriada (°C)	21,78
Temperatura média de água de retorno (°C)	23,45
Vazão de água do sistema (m ³ /h)	240
Taxa de transferência de calor do sistema (kcal/h)	400.800

Fonte: Autor

Por meio da Tabela 2 é possível concluir que o sistema operou com a temperatura média da água resfriada aproximadamente 9 °C abaixo da temperatura de projeto. Também é possível concluir que houve pouca troca térmica no período devido a grande vazão de água no sistema e a temperatura de trabalho baixa, fatores estes superdimensionados para a operação da época em que foram realizados os estudos.

É necessário também avaliar o momento de maior troca térmica do sistema. Os valores encontrados estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Troca térmica máxima durante operação para o Caso 1

Período de 25/04/2017 a 15/05/2017	
Varição máxima de temperatura de água (°C)	6,87
Vazão de água do sistema (m ³ /h)	240
Taxa de transferência de calor do sistema (kcal/h)	1.648.800

Fonte: Autor

A Tabela 3 indica o caso onde houve maior exigência do sistema no período de avaliação. O sistema foi projetado para uma troca térmica de 16 °C, enquanto no pior momento, a maior diferença de temperatura entre a água de retorno e a água resfriada foi de aproximadamente 7 °C.

Com base nos valores encontrados na Tabela 4 e Tabela 5, foi possível avaliar que o sistema estava operando em uma condição superdimensionada para a real necessidade, gerando assim ponto de atenção para oportunidade de melhoria de eficiência térmica.

As seguintes conclusões podem ser extraídas a partir do período de avaliação:

- Modo de operação do sistema: manual. A produção iniciava o sistema por completo na segunda-feira às 06:00h e desligava o mesmo no sábado às 22:00h. Durante o período avaliado, houve um feriado no dia primeiro de maio. Neste dia, o sistema também ficou desligado. Apenas uma bomba de circulação e uma

bomba de retorno ficaram ligadas durante a parada da planta para atender os requisitos de qualidade no tratamento de água;

- Temperatura: a temperatura média, considerando apenas o período de produção, ou seja, descontando os finais de semana e feriados, da água resfriada no período foi de 21,78 °C (informação retirada do software MES existente na planta) e a água de retorno teve temperatura média de 23,45 °C. Para este equipamento, era esperado uma temperatura de saída de 32 °C, ou seja, aproximadamente 8 °C abaixo do necessário. Em nenhum momento a temperatura de água resfriada excedeu o valor de 32 °C. É importante ressaltar que a temperatura da água resfriada se manteve abaixo da temperatura de bulbo úmido de projeto durante todo o tempo, isso porque a temperatura de bulbo úmido é uma média anual;
- Ventiladores, bombas de circulação e retorno: ficaram em operação durante 100% do tempo de produção, parando apenas nos finais de semana e feriado, exceto um conjunto de bomba de circulação e retorno que ficou em operação durante todo tempo. Dos vinte dias avaliados, que representam 480 horas, o sistema ficou em produção 360 horas.

5.1.2 Premissas adotadas, cálculos e estratégias

Por meio da equação (1), foi possível determinar que o sistema estava operando, na média, com capacidade térmica de 400.800 kcal/h conforme observado na Tabela 2. Isso representa aproximadamente 21% da capacidade de apenas uma das torres.

Avaliando o momento de maior troca térmica, o sistema operou com aproximadamente 86% da capacidade de uma torre de resfriamento.

Inicialmente foi proposta a utilização de apenas uma torre de resfriamento e a elevação do *set point* de acionamento da mesma para 32 °C, além da eliminação de um conjunto de bombas de retorno e circulação. Com o novo arranjo proposto e considerando a carga térmica calculada de 400.800 kcal/h, teria-se uma variação de temperatura calculada de 3,34 °C. Esta proposta não foi aprovada pela área de produção da planta a fim de se resguardar de possíveis variações no sistema e afetar a qualidade do produto final.

Ficou definido, então, em acordo com a engenharia, manutenção e produção, que existiriam dois níveis de acionamento de ventiladores e dois níveis de desligamento dos ventiladores, respeitando o conceito de zona morta de controle apresentado na Figura 2. Os

níveis de acionamento dos ventiladores foram definidos em 26 °C e 30 °C. Os níveis de desligamento dos ventiladores foram definidos em 28 °C e 24 °C, respectivamente.

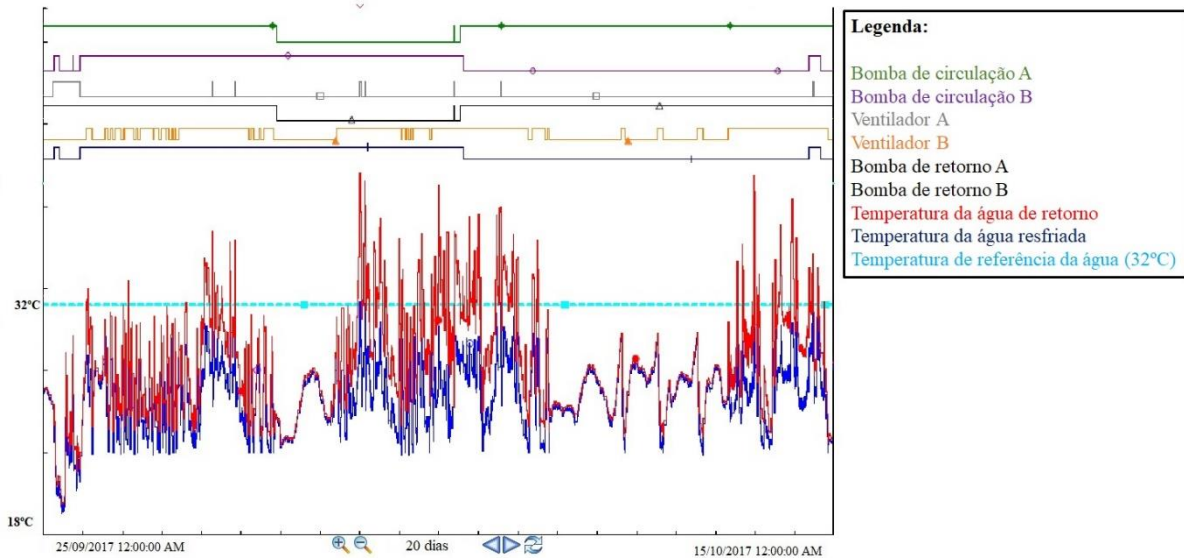
Com relação às bombas de circulação e retorno, foram criados comunicados através de instrução de operação para que as bombas fossem desligadas quando a temperatura do sistema estivesse estável. Foi optado pela área de produção que a automação não fosse implementada nas bombas. Condições estas bem conservadoras devido à época do ano, final de setembro. A principal preocupação é para os meses mais quentes do ano, entre outubro e março.

Inicialmente, o cálculo de benefício seria de uma torre de resfriamento, ou seja, um ventilador, uma bomba de circulação e uma bomba de retorno. Fato esse reforçado pelo período de maior troca térmica, conforme avaliado na Tabela 3, onde durante o período de um mês, apenas 86% da capacidade de uma das torres de resfriamento foi utilizada. Porém, com as premissas acordadas, a nova temperatura de controle estaria por volta de 27 °C, o que acrescenta mais 5 °C na variação de temperatura assumida até chegar a temperatura de projeto de 32 °C. Isso representa um aumento de aproximadamente 30% na carga esperada da torre. Devido à proximidade da temperatura de bulbo úmido, a energia necessária para a redução de temperatura cresce exponencialmente. Dessa forma, foi estimada a redução de operação em 70% de um dos ventiladores e 50% de uma das bombas de circulação.

5.1.3 Resultados obtidos com a medição por meio do sistema MES

No período de 25 de setembro de 2017 a 14 de outubro de 2017 foi realizada a medição dos resultados, por se tratar de uma época do ano com condições climáticas semelhantes ao final de abril e início de maio. Os resultados medidos estão na Figura 17.

Figura 17 - Modo de operação do Caso 1 depois da otimização energética



Fonte: Autor

Comparando a Figura 17 com a Figura 16, observa-se uma melhoria na eficiência energética do sistema. Com menor utilização das bombas e ventiladores, há uma maior diferença entre as temperaturas da água de retorno e resfriada. Deve-se observar que, mesmo após a otimização e a redução do consumo de energia elétrica, a temperatura de água resfriada sempre operou abaixo da temperatura de projeto, não impactando na performance da produção.

A partir de uma nova instrução operacional, as bombas de circulação e retorno passaram a operar na maior parte do tempo com um motor de cada conjunto desligado. Devido à solicitação do time operacional, estas bombas não foram incluídas na automação.

A maior economia energética é referente à operação dos ventiladores. Após a otimização observou-se que um dos ventiladores não entrou em operação, ao passo que o outro ficou modulando. Não foram raros os momentos em que nenhum dos dois ventiladores estavam em operação e a temperatura de água resfriada não foi comprometida.

De acordo com o software MES utilizado, os seguintes resultados foram alcançados:

- Ventiladores: um dos ventiladores operou por 20 horas e o outro por 277 horas, de um total de 408 horas de produção. Isso representa uma utilização dos ventiladores de aproximadamente 5% e 68% do tempo respectivamente. Uma vez que a planta opera no regime mencionado, o tempo total de produção é de 7.072 horas por ano. A redução de 95% e 32% representa uma economia de 8.981 horas de utilização. O motor do ventilador é de 15 CV (11 kW). A economia anual de energia elétrica é de 99MWh por ano;

- Bombas de circulação e retorno: considerando que um conjunto de bomba de circulação e bomba de retorno deve ficar ligado durante os finais de semana e feriados, tem-se que um conjunto economizou 23% do tempo e o outro conjunto economizou 40% do tempo de operação. Sendo assim, a vazão média no período foi de 164 m³/h. A troca térmica do novo sistema pode ser visualizada na Tabela 4, onde constata-se uma diminuição na vazão média de água, bem como um aumento na temperatura da água de retorno e água resfriada. Com um menor acionamento dos ventiladores das torres e menor vazão de água no sistema, foi possível operar em uma condição mais próxima das temperaturas de trabalho consideradas no momento do projeto. Também houve um pequeno aumento na diferença das temperaturas de água de retorno e água resfriada, quando comparadas com a Tabela 2, o que caracteriza que o sistema ainda opera com capacidade ociosa e potencial para ajustes futuros devido à menor quantidade de calor do sistema quando comparado à situação antes da implementação da otimização energética.

Tabela 4 - Troca térmica média durante a operação para o Caso 1 após otimização energética
Período de 25/09/2017 a 15/10/2017

Temperatura média de água resfriada (°C)	26,50
Temperatura média de água de retorno (°C)	28,70
Vazão de água do sistema (m ³ /h)	164
Taxa de transferência de calor do sistema (kcal/h)	360.800

Fonte: Autor

- Avaliando a situação de maior troca térmica, o sistema operou segundo a Tabela 5. Fica evidente que a diferença de temperatura no caso de maior demanda ainda está abaixo do projeto, porém o sistema atendeu aos requisitos de operação e demonstrou capacidade para estudos de melhoria posteriores.

Tabela 5 - Troca térmica máxima durante operação para o Caso 1 após automação
Período de 25/09/2017 a 15/10/2017

Varição máxima de temperatura de água (°C)	10,04
Vazão de água do sistema (m ³ /h)	164
Taxa de transferência de calor do sistema (kcal/h)	1.646.560

Fonte: Autor

- A eficiência energética exibida na Figura 17 é referente à 4.843 horas de operação, sendo metade para as bombas de circulação e metade para as bombas de retorno. As bombas de circulação são de 20 CV (15 kW) e as bombas de retorno são de 40 CV (29 kW). A economia anual total de energia elétrica é de 106 MWh;
- A economia total para o Caso 1 foi de 205 MWh por ano;
- Durante o período de medição, a temperatura média da água resfriada foi de 26,5°C e a média da temperatura da água de retorno foi de 28,7°C.
- Investimento: a intervenção de alteração na automação, que possuiu um baixo custo, necessitou de 24 horas de mão de obra técnica para configuração do sistema;
- Para ambos os cenários, antes e após a otimização, a taxa de transferência de calor do sistema foi praticamente a mesma, não importando a quantidade de ventiladores e bombas utilizados. Portanto, conclui-se que, para este caso, a alteração na automação gerou benefício na eficiência térmica com potencial de expansão para o futuro, ajustando os limites de controle para níveis menos conservadores.

5.2 Caso 2 – duas torres de resfriamento com inversor de frequência

5.2.1 Situação de operação antes da otimização energética

A planta avaliada não possuía sistema de camada MES no início dos estudos, portanto não existem dados armazenados desde o princípio. O primeiro passo do projeto foi a aquisição de licenças de programas para a melhor utilização dos dados da planta na busca da melhor eficiência energética.

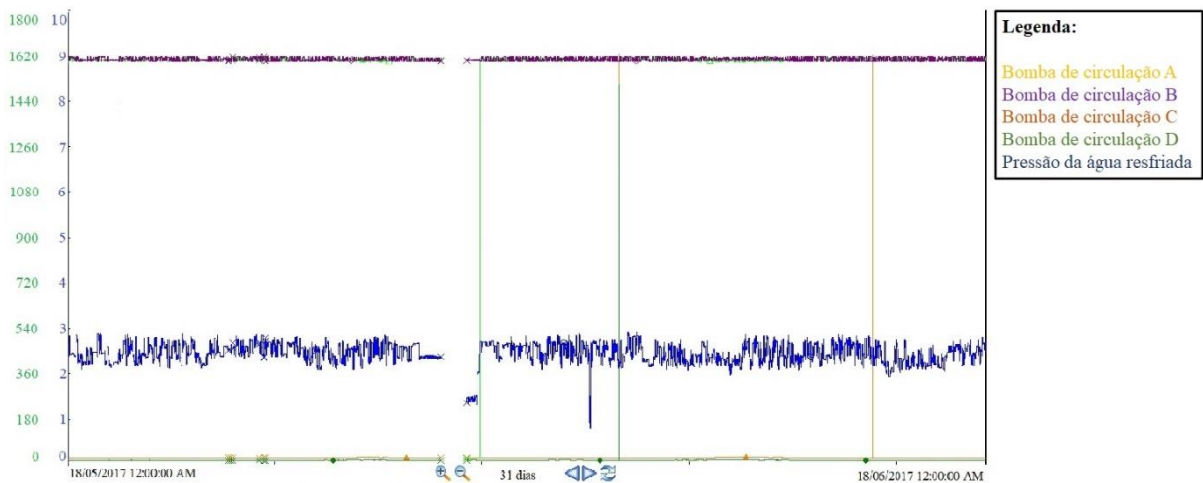
Devido a projetos de anos anteriores, as bombas de circulação de água resfriada da torre de resfriamento possuíam inversores de frequência instalados.

Quando foram realizadas as primeiras visitas, constatou-se que três das quatro bombas de circulação estavam em operação com rotação próxima a nominal de 1.680 rpm, o que descaracterizava a funcionalidade dos inversores de frequência instalados. Isso causava uma pressão elevada na linha de água e uma conseqüente redução na eficiência de troca térmica dos equipamentos instalados na planta devido a turbulências ocasionadas no interior da tubulação.

A primeira ação do estudo, de forma preliminar, foi a retirada de operação de uma bomba de circulação, deixando a operação cotidiana com duas bombas em rotação nominal e duas bombas de reserva.

Após três meses da primeira visita realizada e com as licenças de *software* adquiridas e devidamente instaladas, foi realizado um monitoramento do comportamento da planta por trinta e um dias e os resultados obtidos estão nas Figura 18, referente ao comportamento da malha de controle de vazão, e Figura 19, referente ao comportamento da malha de controle de temperatura.

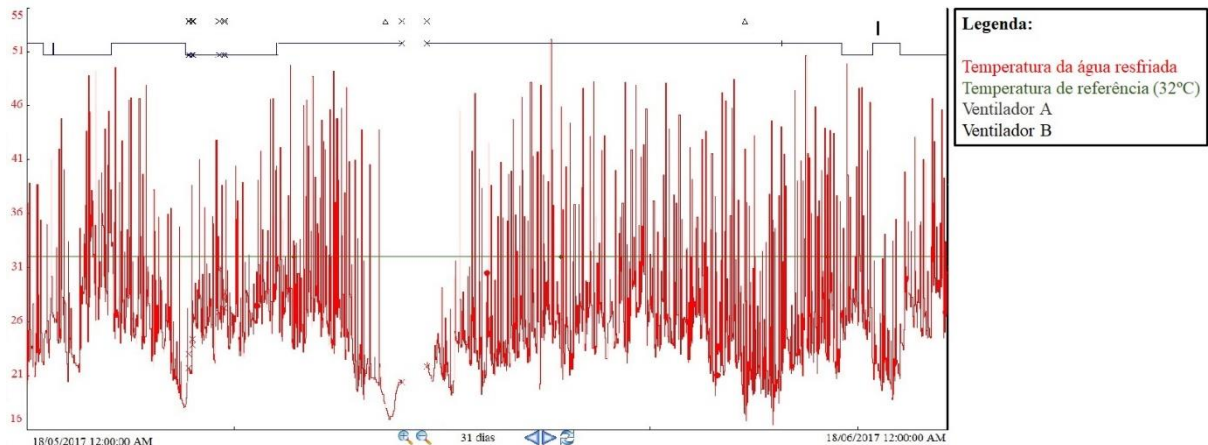
Figura 18 - Modo de operação do Caso 2 antes da automação do controle vazão



Fonte: Autor

A Figura 18 apresenta a rotação das bombas de circulação, com as quatro bombas de circulação representadas nas primeiras quatro linhas da legenda, e a pressão da água resfriada. Três inversores operavam constantemente em rotação próxima a nominal e ocorria a variação na pressão da água resfriada, gerando maior dificuldade no controle dos sistemas subsequentes dependentes da água resfriada.

Figura 19 - Modo de operação do Caso 2 antes da automação do controle de temperatura



Fonte: Autor

A Figura 19 demonstra o efeito dos ventiladores, as duas primeiras curvas do gráfico, sobre a temperatura da água resfriada, curva em vermelho. Existem diversos picos de temperatura ao longo do gráfico, mas os mesmos estão associados ao posicionamento do transmissor de temperatura na instalação. Avaliando a média da temperatura observa-se que a mesma ficou próxima a 25 °C, ou seja, abaixo da temperatura de projeto de água resfriada de 30 °C.

As seguintes conclusões são extraídas a partir do período de avaliação:

- Modo de operação do sistema: manual. A produção opera no regime de vinte e quatro horas por dia e sete dias por semana. As paradas de manutenção ocorrem apenas durante períodos previamente programados entre manutenção e operação;
- Pressão da linha de água resfriada na saída das torres de resfriamento: embora exista um inversor de frequência para cada bomba de circulação, durante o período de avaliação as bombas operaram com rotação fixa, em torno de 1.620 rpm, e a pressão na linha teve constantes variações, com média de 2,45 bar. A oscilação na pressão ocasionava alguns problemas de ineficiência na troca térmica. Embora com inversores de frequência, o sistema operava como se fossem motores com partida direta;
- Temperatura: a temperatura média, no período de avaliação, da água resfriada foi de 25,08 °C, conforme informação do software MES existente na planta industrial. Não há informações da água de retorno devido à falta de instrumentação de campo. Para este equipamento, era esperada uma temperatura de saída de 30 °C, ou seja, aproximadamente 5 °C abaixo do necessário. Ocorreram constantes picos

que ultrapassaram a temperatura de 30 °C, mas a partir do cálculo de média do período e da análise de comportamento do gráfico, é possível concluir que os picos não são sustentáveis e estão ligados a oscilações de medição. É importante ressaltar que a média da temperatura da água resfriada se manteve abaixo da temperatura de bulbo úmido de projeto durante todo o tempo, isso porque a temperatura de bulbo úmido é uma média anual;

- Ventiladores: os ventiladores geralmente operam em todo o período de produção, porém durante o tempo de avaliação, houve parada por manutenção corretiva em um dos equipamentos. Sendo assim, durante as 744 horas de avaliação, o ventilador A ficou em operação por 724 horas e o ventilador B ficou em operação por 530 horas das 744 disponíveis.

5.2.2 Premissas adotadas, cálculos e estratégias

O uso da equação (1) não se mostrou eficiente para definição de um nível de utilização das torres de resfriamento, uma vez que não foi possível realizar a medição da temperatura da água de retorno do processo. Diferentemente do Caso 1, foram necessárias duas abordagens diferentes para a otimização energética do sistema:

- Controle de pressão: por meio de testes empíricos, foi determinada a pressão de 1,9 bar como a de melhor resposta para o sistema de troca de energia. Sendo assim, foi elaborado um controle automático onde o operador define a pressão para o sistema e o controlador automaticamente define a mesma rotação para as bombas de circulação. Além disso, caso duas bombas não sejam suficientes para atingir a pressão determinada pela operação, uma terceira bomba é ligada e opera em paralelo, a fim de atingir a pressão desejada. O mesmo acontece para a necessidade de redução de pressão, onde as bombas são retiradas de funcionamento até que um nível adequado de pressão seja atendido;
- Controle de temperatura: a primeira concepção do time de projeto foi instalar um sistema de controle *on/off* para os ventiladores, de modo que a temperatura de acionamento do último ventilador fosse a mais próxima possível de 30 °C, porém, houve uma forte resistência por parte do time de operação, alegando que a água resfriada é um importante fator no controle das reações e que muitos sistemas de segurança estão interligados nos mesmos. Sendo assim, havia uma

possibilidade real de reação descontrolada durante as fases de implementação e operação continuada. Em acordo com os times de engenharia, operação e manutenção, com base no sistema de controle apresentado na Figura 2, foram definidos os níveis de acionamento dos ventiladores em 24 °C e 28 °C. Os níveis de desligamento dos ventiladores foram definidos em 26 °C e 22 °C. Esses níveis de acionamento garantem a segurança da operação, porém ainda deixam margens para melhorias futuras com a estabilização do controle.

Devido à falta de informações para compor o modelo matemático, o cálculo de benefícios não foi trivial. Com relação à redução na pressão da linha de água resfriada da saída da torre de resfriamento, houve o estudo da curva da bomba e o benefício estimado era de 10% de economia de energia elétrica devido ao estudo prévio realizado, onde, por meio de testes práticos, uma redução de 10% na rotação atingiu o valor aproximado de 1,9 bar na linha de água resfriada da torre de resfriamento.

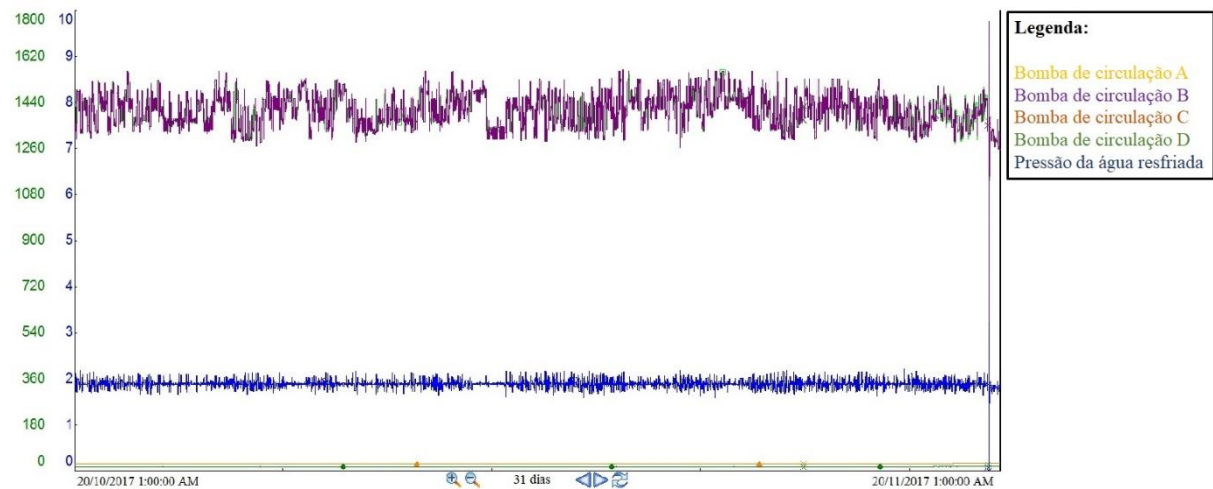
Para os ventiladores, como não foi possível determinar a troca térmica do sistema e, ainda, devido ao fato da temperatura de trabalho definida ser abaixo da característica de processo e muito próxima da temperatura de bulbo úmido, foi estimado um benefício de 5% na utilização dos ventiladores, uma vez que a variação de temperatura esperada devida ao controle *on / off* era de aproximadamente 10% acima da situação atual. Por não se tratar de um sistema operando sob as condições de projeto e em ponto crítico com relação a temperatura de bulbo úmido, foi estimado um valor conservador.

5.2.3 Resultados obtidos com a medição por meio do sistema MES

No período de 20 de outubro de 2017 a 20 de novembro de 2017 foi realizada a medição dos resultados. Os resultados medidos estão nas Figuras 20 e 21.

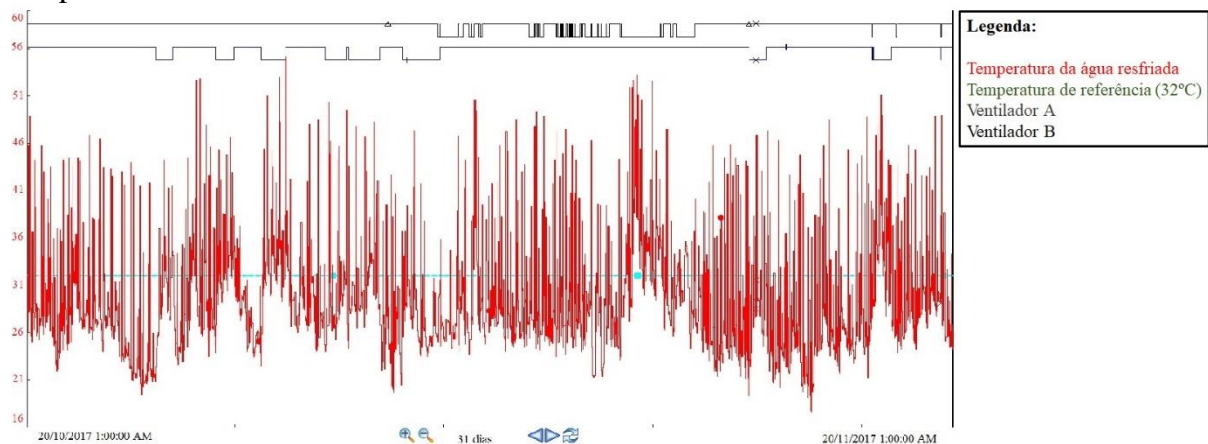
A Figura 20 apresenta o resultado da pressão de água resfriada após a otimização do sistema de automação. Com a pressão mais estável e os inversores de frequência operando nas condições esperadas, houve uma melhora significativa no processo produtivo com relação ao controle de temperatura dos equipamentos. Por meio da melhoria, com a redução da pressão de trabalho, houve uma economia de energia nas bombas de circulação, uma vez que a rotação das mesmas diminuiu, além da eliminação do uso de uma bomba de circulação.

Figura 20 - Modo de operação do Caso 2 depois da otimização da automação do controle de vazão



Fonte: Autor

Figura 21 - Modo de operação do Caso 2 depois da otimização da automação do controle de temperatura



Fonte: Autor

A Figura 21 ilustra a resposta dos ventiladores após a alteração na automação e a temperatura da água resfriada. Nesta situação em específico, por se tratar de um sistema de segurança crítico para a planta, o controle dos ventiladores foi mais conservador. A temperatura média de saída ainda permaneceu abaixo dos 32 °C, girou em torno de 28 °C, e houve uma pequena redução no consumo energético dos ventiladores. O foco do resultado obtido para este caso foi referente a economia nas bombas de circulação frente a adequação da pressão de operação do sistema.

De acordo com o software MES utilizado, os seguintes resultados foram alcançados:

- Ventiladores: um dos ventiladores operou por 624 horas e o outro por 594 horas, de um total de 744 horas de produção. Isso representa uma utilização dos ventiladores de aproximadamente 84% e 80% do tempo respectivamente. Uma vez que a planta opera no regime mencionado, o tempo total de produção é de 8.760 horas por ano. A redução citada acima representa uma economia de 2,4% de utilização, ou seja, 424 horas. O motor do ventilador é de 40 CV (25,7 kW). A economia anual de energia elétrica é de 11MWh por ano;
- Bombas de circulação: este foi o maior ganho encontrado nesta avaliação. Houve uma redução média de 12% na rotação das bombas, de 1.620 rpm para 1.410 rpm. Além da redução mencionada, também houve a eliminação de uma bomba que ficava em operação, desta forma, uma redução adicional de 100%. Considerando as 8.760 horas de operação, obteve-se uma economia anual total de energia elétrica de 315 MWh;
- A economia total para o Caso 2 foi de 326 MWh por ano;
- Durante o período de medição, a temperatura média da água resfriada foi de 28 °C. Isso representa uma operação 2 °C abaixo da temperatura de projeto e uma oportunidade de benefício para otimizações futuras.
- Investimento: a intervenção de alteração na automação, que possuiu um baixo custo, necessitou de 32 horas de mão de obra técnica para configuração do sistema.

5.3 Caso 3 – quatro torres de resfriamento sem inversor de frequência

5.3.1 Situação de operação antes da otimização energética

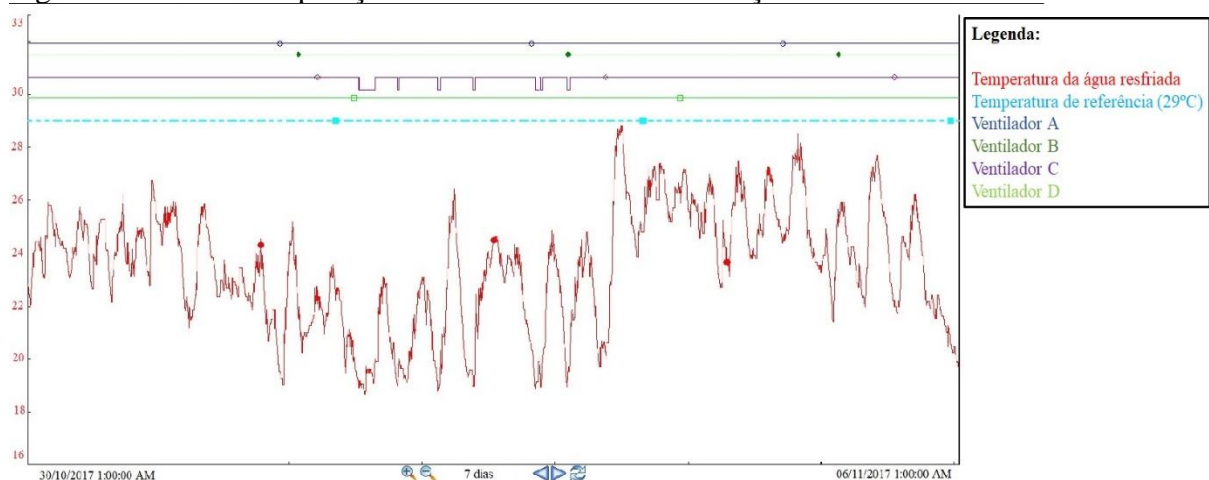
De todos os casos estudados, este foi o de mais fácil implementação. O sistema de camada MES coletou os dados das torres de resfriamento e, além disso, possuía sistema de controle *on / off* implementado no SDCD.

Os ventiladores operavam a partir do controle existente no SDCD e as bombas de circulação das torres de resfriamento estavam constantemente acionadas, uma vez que havia sido reportado pela área de operação da planta que as três bombas em operação são necessárias para suprir a carga térmica dos equipamentos. Fato esse reforçado pelos períodos de

manutenção, onde os produtos frequentemente sofriam aumentos indesejados em suas temperaturas e, por vezes, comprometiam a qualidade do produto final.

Embora existente, o controle de temperatura operava com condições bem abaixo do necessário e contava com quatro *set points* de temperatura, um para cada torre de resfriamento, sendo os seguintes pontos para acionamento dos ventiladores A, B, D e C respectivamente: 15 °C, 17 °C, 19 °C e 21 °C. Os *set points* para desligamento dos ventiladores eram respectivamente: 13 °C, 15 °C, 16 °C e 17 °C. Aparentemente não havia critério para a definição dos mesmos e foram estabelecidos durante a partida da planta e nunca foram revisados. Diferentemente do usual, as definições de *set point* não estão disponíveis nas telas de IHM de operação para que os supervisores realizem as alterações. Neste caso, a alteração é possível apenas por meio da estação de engenharia, com senha de manutenção e/ou administração do sistema, deixando o ajuste dos parâmetros apenas para os colaboradores da área técnica especializada, pois é necessário a alteração diretamente no *software* aplicativo do sistema. A Figura 22 apresenta a operação do sistema antes dos ajustes realizados.

Figura 22 - Modo de operação do Caso 3 antes da otimização



Fonte: Autor

A Figura 22 apresenta nas quatro curvas superiores a utilização dos ventiladores das torres de resfriamento. Seguindo o mesmo critério dos casos anteriores, o sinal de 1 representa que o equipamento está em utilização e o sinal de 0 representa que o equipamento está desligado.

Constata-se que, dos quatro ventiladores existentes, um estava desligado devido a motivos de manutenção e os demais operavam por todo o período avaliado, salvo o ventilador C, que possuiu pequenas paradas de operação devido a atividades de manutenção.

A temperatura de água resfriada se manteve significativamente abaixo da temperatura de projeto, demonstrando grande oportunidade de melhoria.

O período estudado foi de apenas uma semana, uma vez que todo o sistema estava implementado e eram necessárias apenas algumas alterações de automação para o cálculo de benefícios. Durante as 168 horas avaliadas, os quatro ventiladores operaram a seguinte quantidade de tempo: 0, 168, 162 e 168 horas. Durante o período, uma das torres de resfriamento estava em manutenção. A temperatura média da água resfriada de saída da torre de resfriamento foi de 23,6 °C e foi constatado que o sistema operava com a carga máxima.

A planta produtiva opera no regime de sete dias na semana e 24 horas por dia, totalizando no ano 8.760 horas de produção.

Durante o período de avaliação, no início da época mais quente do ano, em nenhum momento foi registrada temperatura acima da temperatura de água resfriada do sistema de torres de resfriamento, indicando que realmente o sistema estava operando com maior capacidade que o necessário.

5.3.2 Premissas adotadas, cálculos e estratégias

O uso da equação (1) não se mostrou eficiente para definição de um nível de utilização das torres de resfriamento, uma vez que não foi possível realizar a medição da temperatura da água de retorno do processo. Em uma abordagem mais direta, excluindo o estudo nas bombas de circulação de água resfriada devido a informações prévias da equipe de operação, apenas os ventiladores foram avaliados:

- Controle de temperatura: a primeira concepção do time de projeto foi adequar o controle *on/off* para os ventiladores de modo que a temperatura de acionamento do último ventilador fosse a mais próxima possível de 29 °C, porém houve uma forte resistência por parte do time de operação, alegando que a água resfriada é um importante fator no controle das reações e que qualquer desvio afeta diretamente a qualidade da produção, podendo ocasionar a perda de lotes relevantes de produtos. Em acordo com os times de engenharia e operação, foram mantidos os níveis de acionamento e desligamento dos ventiladores B e D. Sendo que o ventilador A estava em manutenção. Para o ventilador C, o *set point* de acionamento foi aumentado em 3 °C, passando para 24 °C. Os níveis de

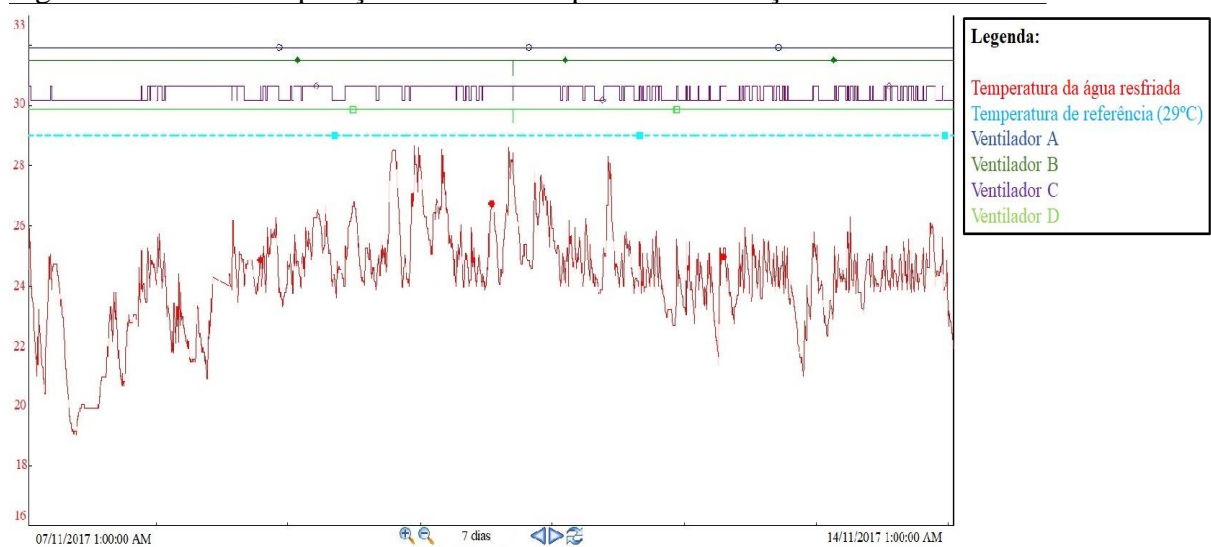
desligamento dos ventiladores foram mantidos, com exceção do ventilador C, que teve seu nível aumentado em 4 °C, passando para 21 °C.

Os ajustes nos pontos de operação foram muito pequenos, devido a limitações impostas pelo time de operação. Por isso, o cálculo estimado de benefício não pode ser realizado. Além destes fatores, 67% do sistema não sofreu alteração, ficando apenas uma das torres de resfriamento responsável por realizar alguma modificação relacionado à otimização energética.

5.3.3 Resultados obtidos com a medição por meio do sistema MES

No período de 7 de novembro de 2017 a 14 de novembro de 2017 foi realizada a medição dos resultados. Os resultados medidos estão na Figura 23.

Figura 23 - Modo de operação do Caso 3 depois da otimização



Fonte: Autor

A Figura 23 indica que, após o breve período de ajuste de temperatura de controle no ventilador C, obteve-se a otimização energética no funcionamento do mesmo, garantindo uma temperatura de água resfriada bem abaixo da temperatura de projeto. Devido a uma solicitação da área operacional, não foi realizada nenhuma alteração de controle nos demais ventiladores, embora houvesse uma grande oportunidade de otimização.

A Tabela 6 apresenta a comparação entre os dados meteorológicos dos períodos de avaliação antes e depois dos ajustes de parâmetros de automação.

Tabela 6 - Comparativo dos dados meteorológicos dos dois períodos estudados

DADOS METEOROLÓGICOS	
Temperatura média de 30-outubro-2017 a 06-novembro-2017	19,98 C
Umidade média de 30-outubro-2017 a 06-novembro-2017	69,67 %
Temperatura média de 07-novembro-2017 a 14-novembro-2017	20,06 C
Umidade média de 07-novembro-2017 a 14-novembro-2017	66,08 %

Fonte: Autor

Por meio da comparação dos dados meteorológicos da Tabela 6, é possível constatar que não houve alteração significativa nas condições ambientes, que poderiam afetar o comportamento do sistema. Sendo assim, pode-se concluir que as alterações propostas no sistema de automação são robustas para convencer a manutenção da condição atual e incentivar futuros ajustes para aumentar a eficiência energética do sistema.

Embora as condições ambientais influenciem no rendimento das torres de resfriamento, neste caso as condições ambientes permaneceram constantes durante os dois períodos e os resultados obtidos foram devidos à alterações nos sistemas de automação.

Após os novos ajustes de *set point*, o sistema permaneceu operando com temperatura de água resfriada na saída das torres de resfriamento abaixo da temperatura de água de resfriamento de projeto. A média do período foi de 24,5 °C, ou seja, 0,9 °C acima da temperatura com os *set points* não otimizados, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Comparação da média de temperatura de água resfriada para o Caso 3

DADOS MEDIDOS	
Temperatura da água de saída da torre	
30-out17 a 06-nov-17	23,6 °C
07-nov-17 a 14-nov-17	24,5 °C

Fonte: Autor

Obviamente não é possível afirmar que a alteração de *set points* foi otimizada como desejado, devido às restrições impostas pelo time de produção, porém houve uma pequena melhora que pode ser observada. Com relação ao tempo de operação dos ventiladores, os seguintes valores de horas de operação foram calculados para o mesmo período: 0, 168, 93 e 168 horas, conforme explícito na Tabela 8. Isso representa uma redução em 43% do tempo de operação de um ventilador. Como o ventilador é de 20 CV (15 kW), a redução anual no consumo de energia elétrica é de 56,5 MWh.

Tabela 8 - Redução no consumo de energia dos ventiladores do Caso 3

Ventilador	Potência (kWh)	Horas de funcionamento 30-out-17 a 06-nov-2017	Horas de funcionamento 07-nov-17 a 14-nov-2017	% redução
W9140A	14,71	-	-	0%
W9140B	14,71	168	168	0%
W9140C	14,71	162	93	43%
W9140D	14,71	168	168	0%
Total		498	429	14%

Fonte: Autor

Embora o número da Tabela 10 seja pouco expressivo, é importante ressaltar que este benefício foi obtido com apenas duas horas de discussão, e nenhum esforço adicional. Este é o caso que representa o maior benefício para estudos futuros, pois certamente há um grande potencial de otimização com um baixíssimo investimento.

5.4 Resumo dos resultados obtidos

As plantas químicas produtivas são bastante complexas e possuem diversos tipos de controles e ativos, que devem ser constantemente monitorados. Os sistemas auxiliares, tais como as torres de resfriamento, são sistemas adquiridos para suprir as necessidades de resfriamento e, quando possível, aumentar o rendimento das reações.

Existem diversos fatores econômicos ou de melhorias contínuas, nos quais as cargas térmicas na produção sofrem variações ao longo do tempo. Com o passar dos anos observam-se novos ativos sendo incorporados na produção, ao passo que ativos antigos são retirados de operação. Um exemplo é a carteira de produtos do sequenciamento de produção. Existem plantas com dezenas ou até centenas de produtos que são produzidos nos mesmos equipamentos, porém possuem cargas térmicas que divergem entre si.

Os sistemas auxiliares corriqueiramente são adquiridos no início da vida útil da planta e perduram por dez, quinze ou mais anos. Desta forma, uma torre de resfriamento, por exemplo, que é adquirida para uma determinada carga térmica definida há dez anos atrás, certamente pode não atender a planta com a melhor eficiência após diversas alterações ao longo dos anos. Porém, a substituição de um sistema auxiliar não é trivial e necessita de um significativo projeto de engenharia e montagem.

Para minimizar os impactos decorrentes das alterações das plantas, é comum que o time de operação trabalhe com o sistema na sua capacidade máxima, uma vez que o impacto econômico deste sistema no custo total da planta não é significativo e muitas vezes não há o

interesse por parte da engenharia em otimizar sistemas que trazem resultados de menor relevância. Corriqueiramente, os esforços são direcionados a grandes consumos de energia.

Considerando um custo aproximado de R\$300,00/MWh para energia elétrica e R\$150,00 a hora do técnico de manutenção especializado, pode-se realizar o cálculo monetário de benefício para cada um dos casos apresentados. A Tabela 9 exibe o resultado para o Caso 1, assim como a Tabela 10 apresenta o resultado para o Caso 2 e o Caso 3 é mostrado na Tabela 11.

Tabela 9 - Resultado financeiro após otimização energética para o Caso 1

CÁLCULO DE BENEFÍCIOS - CASO 1	
Investimento	
Horas gastas	24,00
Valor da hora (R\$)	150,00
Total do investimento (R\$)	3.600,00
Benefício	
Economia de energia elétrica anual (MWh)	205,00
Valor do MWh (R\$)	300,00
Total do benefício (R\$)	61.500,00
Payback (anos)	
	0,06
Payback (dias)	
	21,37

Fonte: Autor

Tabela 10 - Resultado financeiro após otimização energética para o Caso 2

CÁLCULO DE BENEFÍCIOS - CASO 2	
Investimento	
Horas gastas	32,00
Valor da hora (R\$)	150,00
Total do investimento (R\$)	4.800,00
Benefício	
Economia de energia elétrica anual (MWh)	326,00
Valor do MWh (R\$)	300,00
Total do benefício (R\$)	97.800,00
Payback (anos)	
	0,05
Payback (dias)	
	17,91

Fonte: Autor

Tabela 11 - Resultado financeiro após otimização energética para o Caso 3

CÁLCULO DE BENEFÍCIOS - CASO 3	
Investimento	
Horas gastas	1,00
Valor da hora (R\$)	150,00
Total do investimento (R\$)	150,00
Benefício	
Economia de energia elétrica anual (MWh)	56,50
Valor do MWh (R\$)	300,00
Total do benefício (R\$)	16.950,00
Payback (anos)	0,01
Payback (dias)	3,23

Fonte: Autor

Para os três casos explicitados na dissertação, observa-se que com um baixíssimo investimento é possível alcançar resultados significativos, com valores de *payback* irrelevantes. Desta forma, a viabilização de estudos se torna muito mais atrativa do ponto de vista da liderança responsável pela destinação de investimentos. As teorias são reforçadas com resultados expressivos e de fácil obtenção, pois de uma semana para a outra é possível verificar os primeiros benefícios, assim como demonstrado no Caso 3.

A Tabela 12 apresenta um sumário dos três casos estudados e o benefício global alcançado com as iniciativas.

Tabela 12 - Resumo dos benefícios encontrados

RESUMO DE BENEFÍCIOS				
Caso estudado	Investimento (R\$)	Benefício (R\$)	<i>Payback</i> (anos)	<i>Payback</i> (dias)
1	-	61.500,00	0,00	0,00
2	4.800,00	97.800,00	0,05	17,91
3	150,00	16.950,00	0,01	3,23
Geral	4.950,00	176.250,00	0,03	10,25

Fonte: Autor

Com baixo esforço, R\$176.250,00 anuais foram economizados com pequenas mudanças de cultura do modo de operação das plantas produtivas e ajustes de níveis de controle, com *payback* inferior a um mês. Por se tratar de um projeto em evidência para a empresa no momento do estudo, houve maior facilidade para acordo entre as equipes multidisciplinares.

Embora o caso que possuía inversor de frequência instalado apresente um benefício superior aos demais, não significa que esta seja a opção mais rentável dentre todos os casos. O

certo é que os inversores mantêm a operação da planta mais estável. Deve-se levar em consideração que o sistema já possuía a estrutura de inversores instalada e que os equipamentos elétricos existentes possuem maior potência, o que gera maiores economias, mas não necessariamente em termos percentuais. Se a aquisição, instalação e configuração dos inversores fizesse parte do escopo do Caso 2, certamente o *payback* seria superior a um ano.

De uma maneira geral, conforme Tabela 12, os benefícios foram extremamente recompensadores tendo em vista o investimento realizado. *Paybacks* menores de um mês são atrativos e demonstram, acima de tudo, a eficiência do corpo técnico envolvido na busca de alternativas inovadoras para problemas existentes.

A importância da automação para os sistemas produtivos também ficou evidente, tendo em vista que somente foi possível realizar a medição e comprovação dos benefícios devido a instrumentação instalada, sistemas de controle configurados e dados compartilhados e disponíveis para estudo por meio de sistemas da camada MES.

Com relação à capacitação da equipe de manutenção, não houve nenhuma necessidade adicional, tendo em vista que as soluções empregadas foram simples e de conhecimento de todos, faltando apenas direcionamento de tarefas e estudo de caso para que as soluções fossem todas implementadas.

Por se tratar de sistemas auxiliares, que não são específicos para nenhum tipo de produção, houve ainda maior motivação por parte dos envolvidos, principalmente da equipe de manutenção, na busca e implementação de novas oportunidades para casos semelhantes em outras áreas da empresa. Além do benefício técnico, também trouxe para o time uma motivação adicional após a verificação dos ganhos comparados com os baixos esforços empregados.

Outro fator de sucesso dos estudos de caso está ligado ao contato próximo com os operadores de produção para cada um dos estudos, pois os mesmos são peças fundamentais para que seja possível entender de forma mais eficiente como o processo se comporta a partir de algumas variações e os limites seguros para que o sistema opere da forma mais eficiente possível.

Grande parte das estimativas apresentadas foram baseadas na experiência dos envolvidos no estudo, uma vez que não foi possível compor um modelo matemático fiel aplicável para todos os casos. Acertadamente, as estimativas foram alcançadas nos testes práticos, os quais comprovaram que é possível a otimização dos equipamentos sem afetar a qualidade da produção, com baixo investimento de desenvolvimento e implementação.

Os sistemas auxiliares são amplamente utilizados na indústria e, em muitos casos, são utilizados de forma ineficiente, porém, atendendo as necessidades esperadas. Além disso, é

preciso, juntamente com o time de operações, difundir a cultura de otimização energética para os sistemas que pouco consomem energia, pois há diversas oportunidades a serem exploradas e os retornos são, em sua maioria, garantidos.

O mais importante é que o primeiro passo para a otimização pode ser feito com custo baixo e rápido resultado. Ainda assim, após esta primeira avaliação, há uma oportunidade a ser desenvolvida com base nas adequações mecânicas dos equipamentos para as novas condições de trabalho, de forma a alcançar resultados ainda mais significativos de eficiência energética.

6 Conclusões

Após o desenvolvimento dos estudos, as seguintes conclusões foram obtidas:

- As três instalações de torres de resfriamento existentes foram avaliadas, tendo como referência as folhas de especificação técnica do momento do projeto de aquisição e as informações provenientes do time de operações. Respeitando as características especificadas e o atual regime de operação, novas condições de trabalho foram apresentadas de modo a aumentar a eficiência energética dos equipamentos.
- Pelo menos um representante de cada equipe multidisciplinar acompanhou e validou as propostas de melhoria. Foi fundamental a contribuição de cada um dos participantes para a validação e robustez dos projetos apresentados. As propostas de melhoria basearam-se na otimização da utilização dos equipamentos elétricos existentes que já estavam interligados aos sistemas de automação para atender ao requisito de baixo custo e rápida implementação.
- Os resultados alcançados com a automação das torres de resfriamento são mais rápidos de serem implementados e medidos. Além disso, a implementação de controles simples de automação possui custo irrelevante. Para intervenções mecânicas há uma necessidade maior de
- Cada caso estudado de arranjo de torre de resfriamento possuía uma particularidade com relação ao nível de informação disponível para ser trabalhada. Alguns sistemas com pouca instrumentação de campo dificultam a avaliação de propostas e medição de resultados. Foi possível determinar um requisito mínimo de instrumentação para que seja possível implementar projetos de melhoria simples e com resultados expressivos.

Para trabalhos futuros é recomendada a avaliação do impacto gerado a partir de modificações nos componentes mecânicos das torres de resfriamento frente ao custo envolvido na eficiência energética alcançada. Avaliar a instalação de inversores de frequência no sistema como um todo ou em parte para posterior estudo de eficiência e custos envolvidos, bem como alteração nas instruções de trabalho que são aplicadas aos colaboradores.

Referências

- ALKHEDHAIR, A. et al. Numerical simulation of water spray in natural draft dry cooling towers with a new nozzle representation approach. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 98, p. 924–935, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.118>>. Acesso em: 21 jun. 2018.
- BEST, R.; RIVERA, W. A review of thermal cooling systems. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 75, p. 1162–1175, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.018>>. Acesso em: 21 jun. 2018.
- BUSTAMANTE, J. G.; RATTNER, A. S.; GARIMELLA, S. Achieving near-water-cooled power plant performance with air-cooled condensers. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 105, p. 362–371, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.065>>. Acesso em: 31 mai. 2018.
- CANTORE, N.; CALÌ, M.; VELDE, D. W. te. Does energy efficiency improve technological change and economic growth in developing countries? **Energy Policy**, Surrey, v. 92, p. 279–285, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.040>>. Acesso em: 10 jul. 2018.
- CHANG, C. C. et al. Energy conservation improvement and ON-OFF switch times reduction for an existing VFD-fan-based cooling tower. **Applied Energy**, Londres, v. 154, p. 491–499, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.025>>. Acesso em: 17 abr. 2017.
- CHEN, L. et al. Thermo-flow characteristics of indirect dry cooling system with elliptically arranged heat exchanger bundles around a traditional circular cooling tower. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 121, p. 419–430, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.093>>. Acesso em: 21 jun. 2018.
- CUTILLAS, C. G.; RAMÍREZ, J. R.; MIRALLES, M. L. Optimum design and operation of an HVAC cooling tower for energy and water conservation. **Energies**, Paris, v. 10, n. 3, 2017. Acesso em: 21 jun. 2018.
- DUNIAM, S.; GURGENCI, H. Annual performance variation of an EGS power plant using an ORC with NDDCT cooling. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 105, p. 1021–1029, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.025>>. Acesso em: 31 mai. 2018.
- ENERGIA, M. de M. e. **Balço Energético Nacional - ano base 2016**, Brasília. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>. Acesso em 09 jul. 2018.
- GAO, M. et al. Influence of non-uniform layout fillings on thermal performance for wet cooling tower. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 93, p. 549–555, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.054>>. Acesso em: 09 ago 2017.
- HE, S. et al. Comparative study on the performance of natural draft dry, pre-cooled and wet cooling towers. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 99, p. 103–113, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.060>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

He, S et al. Selection of wetted media for pre-cooling of air entering natural draft dry cooling towers. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 114, p. 857–863, 2017. Acesso em: 31 mai. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Key world energy statistics**, Paris.

Disponível em:

<<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>>. Acesso em: 09 jul. 2018.

KESHTKAR, M. M. Performance analysis of a counter flow wet cooling tower and selection of optimum operative condition by MCDM-TOPSIS method. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 114, p. 776–784, 2017. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.043>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

KLIMANEK, A.; CEDZICH, M.; BIALECKI, R. 3D CFD modeling of natural draft wet-cooling tower with flue gas injection. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 91, p. 824–833, 2015. Acesso em: 21 jun. 2018.

LABANCA, N.; BERTOLDI, P. Beyond energy efficiency and individual behaviours: policy insights from social practice theories. **Energy Policy**, Surrey, v. 115, n. July 2017, p. 494–502, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.027>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

LI, X. et al. Performance enhancement for the natural draft dry cooling tower under crosswind condition by optimizing the water distribution. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 107, p. 271–280, 2017. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.046>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

MA, H. et al. A new theoretical method for predicating the part-load performance of natural draft dry cooling towers. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 91, n. 2, p. 1106–1115, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.104>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

MA, J.; WANG, Y.; FENG, X. Simultaneous optimization of pump and cooler networks in a cooling water system. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 125, p. 377–385, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.026>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

NAIK, B. K.; MUTHUKUMAR, P. A novel approach for performance assessment of mechanical draft wet cooling towers. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 121, p. 14–26, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.042>>. Acesso em: 31 mai. 2018.

NING, T. et al. Experimental investigation on the performance of wet cooling towers with defects in power plants. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 78, p. 228–235, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.032>>. Acesso em: 21 jun 2018.

QI, X. et al. Performance prediction of a shower cooling tower using wavelet neural network. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 108, p. 475–485, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.117>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

- RUIZ, J.; KAISER, A. S.; LUCAS, M. Experimental determination of drift and PM 10 cooling tower emissions: Influence of components and operating conditions. **Environmental Pollution**, Barking, v. 230, p. 422–431, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026974911731120X>>. Acesso em: 09 ago.2017.
- SADAFI, M. H.; JAHN, I.; HOOMAN, K. Nozzle arrangement effect on cooling performance of saline water spray cooling. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 105, p. 1061–1066, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.078>>. Acesso em: 21 jun. 2018.
- SINGLA, R. K.; SINGH, K.; DAS, R. Tower characteristics correlation and parameter retrieval in wet-cooling tower with expanded wire mesh packing. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 96, p. 240–249, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.063>>. Acesso em: 21 jun. 2018.
- TAGHIAN DEHAGHANI, S.; AHMADIKIA, H. Retrofit of a wet cooling tower in order to reduce water and fan power consumption using a wet/dry approach. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 125, p. 1002–1014, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431117327084>>. Acesso em: 08 jul. 2018.
- TUMBAZ, M. N. M.; MOĞULKOÇ, H. T. Profiling energy efficiency tendency: A case for Turkish households. **Energy Policy**, Surrey, v. 119, n. May, p. 441–448, 2018. Acesso em: 14 jul. 2018.
- XIE, X. et al. Deciphering the thermal and hydraulic performances of closed wet cooling towers with plain, oval and longitudinal fin tubes. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 120, p. 203–218, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.138>>. Acesso em: 21 jun. 2018.
- YUAN, L. et al. Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics in Solar Enhanced Natural Draft Dry Cooling Tower. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 87, p. 98–105, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.004>>. Acesso em: 21 jun. 2018.