

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPTO. DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO

**Soluções em Eficiência Energética na
Indústria 4.0: Estudo de caso em
acionamento de bombas para testes
hidrostáticos**

Autor: André Ribeiro Siqueira, nº. USP: 9425622
Autor: Nelson Pires dos Santos Neto, nº. USP: 9368719
Orientador: Prof. Dr. Maximiliam Luppe

André Ribeiro Siqueira,
Nelson Pires dos Santos Neto

**Soluções em Eficiência Energética na Indústria 4.0:
Estudo de caso em acionamento de bombas para
testes hidrostáticos**

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Elétrica apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP, sob a orientação do Prof. Dr. Maximiliam Luppe.

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

Orientador: Prof. Dr. Maximiliam Luppe

São Carlos
Setembro de 2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

R482s Ribeiro-Siqueira Pires-Dos-Santos-Neto, André Nelson
Soluções em Eficiência Energética na Indústria
4.0: Estudo de caso em acionamento de bombas para
testes hidrostáticos / André Nelson Ribeiro-Siqueira
Pires-Dos-Santos-Neto; orientador Maximiliam Luppe. São
Carlos, 2020.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2020.

1. indústria 4.0. 2. internet das coisas. 3.
acionamento de bombas hidráulicas,. 4. teste
hidrostático. 5. eficiência energética. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: André Ribeiro Siqueira

Título: "Soluções em Eficiência Energética na Indústria 4.0"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 25/09/2020,

com NOTA 7,8 (sete, oito), pela Comissão
Julgadora:

Prof. Dr. Maximiliam Luppe - Orientador - SEL/EESC/USP

Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior -
SEL/EESC/USP

Mestre Júlio Augusto Druzina Massignan - Doutorando -
SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Nelson Pires dos Santos Neto

Título: "Soluções em Eficiência Energética na Indústria 4.0"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 25/09/2020
com NOTA 7,8 (sete, oito), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Maximiliam Luppe - Orientador - SEL/EESC/USP

Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior - SEL/EESC/USP

Mestre Júlio Augusto Druzina Massignan - Doutorando -
SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer, primeiramente, às nossas famílias, por todos esses anos de dedicação mútua e incansáveis esforços para que este momento fosse possível.

A Universidade de São Paulo, por nos ter fornecido os aparatos necessários para o desenvolvimento pessoal, intelectual, cultural e profissional durante o período da graduação.

Ao professor orientador Maximiliam Luppe, por ter nos acompanhado desde o início do curso através da Equipe EESC-USP Tupã, onde tivemos grandes momentos de aprendizado e por estar conosco na conclusão do projeto.

Por fim, aos nossos amigos, que dividiram conosco todas as experiências necessárias para o desenvolvimento saudável da cidadania e do progresso, e que também foram nosso suporte enquanto longe de nossas famílias.

Resumo

Nas últimas décadas, com o aumento da capacidade de processamento de dados, tornou-se possível a geração e análise, cada vez maiores, e mais complexas. A geração de dados na indústria foi impulsionada com a chegada da internet das coisas, que permitiu um aumento significativo da geração de dados e com isso o surgimento da Indústria 4.0. O estudo se baseia em abordar soluções em eficiência energética em uma indústria que fabrica tubos para extração de petróleo. Com o auxílio dos dados gerados, o objetivo é conseguir diminuir o custo operacional e aumentar a produtividade do sistema industrial. Para alcançar esse objetivo, foram feitas diversas análises dos dados levantando as oportunidades de melhorias, as possíveis soluções e custos envolvidos. Por fim, foi proposta uma solução que conta com a troca do motor da bomba, para aumentar a produtividade, e o uso do inversor, para diminuir o custo operacional em momentos que a planta não está produzindo nenhum tubo.

Palavras Chaves: indústria 4.0, internet das coisas, acionamento de bombas hidráulicas, teste hidrostático, eficiência energética

Abstract

In the last decades, with the increase of the data processing capacity, it has become possible to generate and analyze bigger and more complex information. The generation of data in the industry was boosted with the arrival of the internet of things, which allowed a significant increase in data generation and with it the emergence of Industry 4.0. The study is based on addressing energy efficiency solutions in an industry that manufactures tubes for oil extraction. With the help of the data generated, the objective is to reduce the operating cost and increase the productivity of the industrial system. To achieve this objective, several analyzes of the data were carried out, raising the opportunities for improvement, the possible solutions and costs involved. Finally, a solution was proposed that includes the replacement of the pump motor, to increase productivity, and the use of the inverter, to reduce operating costs at times when the plant is not producing any tubes.

Keywords: **industry 4.0, internet of things, actuation of hydraulic pumps, hydrostatic test, energy efficiency**

Lista de ilustrações

Figura 1 – Previsão da quantidade de dados gerados no mundo	14
Figura 2 – Revoluções Industriais	17
Figura 3 – Exemplo de sistema distribuído	20
Figura 4 – Exemplo arquitetura cliente servidor	22
Figura 5 – ELT x ETL	24
Figura 6 – FTP exemplo	25
Figura 7 – Exemplo de banco de dados	26
Figura 8 – Arquitetura padrão dos produtos iba	28
Figura 9 – Exemplo do uso do ibaFOB-D com dispositivos de aquisição	29
Figura 10 – ibaBM - Módulo de aquisição	30
Figura 11 – ibaBM - Modos de operação	31
Figura 12 – ibaPADU - Filtro anti-aliasing	32
Figura 13 – ibaPADU - Interface com ibaPDA	32
Figura 14 – ibaPDA - Topologia com um único servidor	33
Figura 15 – ibaPDA-QPanel - Painel interativo	34
Figura 16 – ibaPDA-Multistation - Exemplo de configuração do ibaPDA-Multistation com um mestre e dois escravos	35
Figura 17 – ibaAnalyzer	36
Figura 18 – Evolução Tecnológica dos Motores Elétricos	37
Figura 19 – LCC - Motores Elétricos	38
Figura 20 – Conceito de Sinergia em Eficiência	38
Figura 21 – Curvas de acionamento $Y - \Delta$	41
Figura 22 – Comparativo: Partida direta x Partida com Soft-Starter	42
Figura 23 – Diagrama de Blocos Componentes de Inversores de Frequência	43
Figura 24 – Esquemático das ligações de chaveamento	44
Figura 25 – Diagrama do macrofuncionamento dos inversores	44
Figura 26 – Saídas Moduladas do Inversor de Frequência	45
Figura 27 – Elementos que constituem o TH.	47
Figura 28 – Chegada do Tubo no TH.	47
Figura 29 – Tubo dentro do TH.	48
Figura 30 – Tudo posicionado no TH.	48
Figura 31 – Enchimento Tubo no TH.	49
Figura 32 – Arquitetura do iba.	50
Figura 33 – Uso do IBA para uma posicionador de soldagem	51
Figura 34 – Etapa de enchimento do teste hidrostático.	53
Figura 35 – Etapa de ventagem do teste hidrostático.	53

Figura 36 – Análise do ciclo de trabalho da unidade que realiza o teste hidrostático.	54
Figura 37 – Comportamento ideal da TH	59
Figura 38 – Comportamento escolhido da TH	61
Figura 39 – Comparação do tempo de ciclo para cada cenário.	64
Figura 40 – Coeficientes de Perda localizada para Entradas de Tubos	67
Figura 41 – Comparação entre a potência nominal e de ventagem	68
Figura 42 – Energia por ciclo por cenário, sem inversor.	69
Figura 43 – Custo por ciclo por cenário, sem inversor.	70
Figura 44 – Comportamento atual da TH	71
Figura 45 – Energia por ciclo por cenário, com inversor.	72
Figura 46 – Custo por ciclo por cenário, com inversor.	73
Figura 47 – Análise de fatores para a escolha do cenário	74
Figura 48 – Visualização do impacto econômico de cada mudança sugerida pelo cenário 4 em comparação com o cenário atual	75
Figura 49 – Cenário atual x cenário 4 com inversor.	77

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de características do ibaFOB-card	29
Tabela 2 – Tabela de protocolos suportados	30
Tabela 3 – Tabela de características do ibaPADU	32
Tabela 4 – Perfil de consumo energético do motor elétrico do TH	52
Tabela 5 – Extrapolação do consumo energético dos motores do TH	52
Tabela 6 – Cenários analisados	62
Tabela 7 – Dados utilizados no projeto	63
Tabela 8 – Métricas do sistema para cada um dos cenários propostos	63
Tabela 9 – Custo gerais dos cenários sem o uso de inversor	65
Tabela 10 – Custo gerais dos cenários com o uso de inversor.	71
Tabela 11 – Custos de implantação do cenário 4	75
Tabela 12 – Economia gerada pelo cenário 4	76
Tabela 13 – Payback simples do cenário 4	76

Sumário

Lista de ilustrações	9
Lista de tabelas	11
Sumário	12
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo	15
1.2 Organização do Trabalho	16
2 CONCEITOS E FUNDAMENTOS	17
2.1 A Indústria 4.0 - I.4.0	17
2.2 Eficiência Energética	19
2.3 Computação	19
2.3.1 Sistemas Distribuídos	19
2.3.1.1 Arquitetura cliente-servidor	21
2.3.1.2 Arquitetura de aquisição de dados	23
2.3.2 FTP	24
2.3.3 Banco de Dados	25
2.4 iba	27
2.4.1 Sistema	28
2.4.1.1 Arquitetura Padrão	28
2.4.2 iba hardware	28
2.4.2.1 ibaFOB	28
2.4.2.2 ibaBM	29
2.4.2.3 ibaPADU	31
2.4.3 iba Software	33
2.4.3.1 ibaPDA	33
2.4.3.2 ibaAnalyzer	35
2.5 Motores Elétricos	37
2.5.1 Partida de Motores de Indução Trifásicos (MIT)	39
2.5.1.1 Partida Estrela-Triângulo ($Y - \Delta$)	40
2.5.1.2 Partida com Soft-Starter	41
2.5.1.3 Partida e aplicações com Inversor de Frequência	42
3 DESENVOLVIMENTO	46
3.1 Teste Hidrostático - TH	46

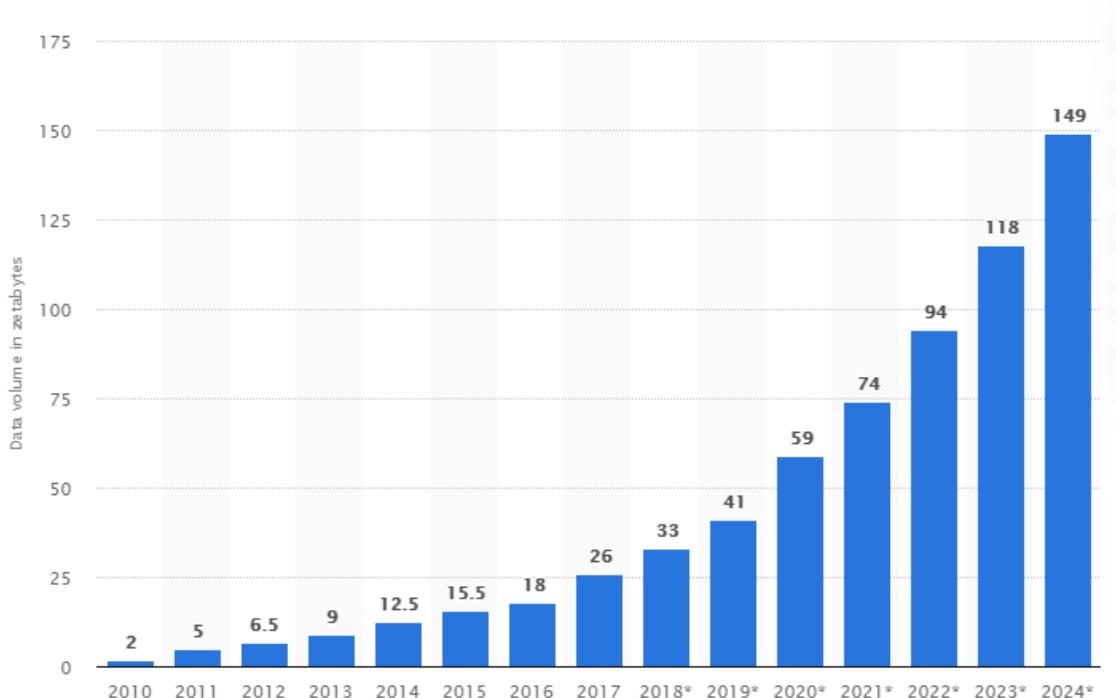
3.1.1	Funcionamento do Teste Hidrostático	47
3.2	Análise dos dados	49
3.2.1	Arquitetura de captura de dados	49
3.2.2	Diagnóstico energético	51
3.2.3	Aumento da capacidade produtiva	57
3.2.4	Diminuição do custo operacional	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1	Cenários	62
4.2	Capacidade dos cenários	63
4.3	Custos Gerais	64
4.3.1	Sem inversor	65
4.3.1.1	Análise do aumento da potência na etapa de ventagem	66
4.3.1.2	Análise geral	69
4.3.2	Com inversor	70
4.3.2.1	Análise do efeito do inversor no sistema	71
4.3.2.2	Análise geral	72
4.4	Escolha do cenário	74
4.5	Análise de viabilidade econômica	74
5	CONCLUSÃO	78
	Referências	80

1 Introdução

“Como o universo físico, o universo digital é grande - em 2020 terá quase tantos bits quanto estrelas no universo. Ele está dobrando de tamanho a cada dois anos, e em 2020 o universo digital - os dados que criamos e copiamos anualmente - chegará a 44 zettabytes ou 44 trilhões de gigabytes” [1]

A citação se refere a um estudo produzido em 2014 sobre a quantidade de dados no mundo e sua projeção. Em 2019, foram produzidos no mundo, mais de 40 zettabytes de dados [2], tudo indica, então, que a previsão feita no estudo de 2014 irá se concretizar.

Figura 1 – Previsão da quantidade de dados gerados no mundo ¹



Fonte: <https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/> Acessado em: 2020-08-16

E a projeção para o futuro, como mostra a figura 1, indica que essa tendência deve se perpetuar, principalmente impulsionada pela internet das coisas(*IoT*) [1].

Dado o mundo altamente competitivo em que vivemos, ser capaz de oferecer o menor preço e com maior velocidade, é o que determina o sucesso de um negócio. Em todo esse contexto, nasce a indústria 4.0, termo utilizado pela primeira vez em 2014 [3] para designar a 4º revolução industrial, muito impulsionada pelo *IoT*. Portanto, com mais

¹ * Previsão

dados sendo produzidos, se vê, cada vez mais, a necessidade de soluções que utilizam os dados gerados e que, desta forma, produzam conhecimento e entendimento sobre padrões, comportamentos e funcionamentos.

1.1 Objetivo

O estudo foi desenvolvido com base em um caso real de uma grande fabricante de tubos. A companhia irá produzir tubos de grandes dimensões, durante os próximos 2 anos, para projetos de um país vizinho. Para isso, foi necessário realizar um mapeamento de todo o sistema produtivo, identificando oportunidades de otimização.

Um dos grandes gargalos encontrados, foi o da fase de testes, onde, para as dimensões desejadas, seriam produzidas, na configuração atual, cerca de 19 tubos por hora. Porém, para garantir o sucesso das operações, seriam necessários 27 tubos por hora. Com isso, utilizando um sistema moderno de extração de dados, em conjunto com a análise de eficiência energética, foram estudadas as possíveis soluções para o problema.

Com isso, o estudo visa utilizar dados como a tensão, corrente, especificações de fábrica dos equipamentos, tempos e demais informações gerados na fase de teste hidrostático da planta industrial para conseguir diminuir os custos operacionais da mesma, ou seja, deixando o processo mais eficiente, ao mesmo tempo aumentando sua capacidade de produção. Desta forma, serão tratadas as etapas envolvidas no sistema, desde o levantamento dos pontos a serem melhorados, passando pelas possíveis soluções, até a análise da viabilidade financeira, a fim de se encontrar a que melhor se adéqua aos requisitos.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho é dividido em 5 capítulos, contando com a introdução, conforme descrito a baixo:

- **Capítulo 2:** Expõe os fundamentos básicos utilizados no projeto.
- **Capítulo 3:** Apresenta os materiais e ferramentas aplicadas no trabalho, além de detalhar os procedimentos empregados.
- **Capítulo 4:** Discorre sobre os resultados obtidos até o fim do prazo útil.
- **Capítulo 5:** Conclui a discussão sobre o projeto, avaliando seus aspectos positivos e negativos.

2 Conceitos e Fundamentos

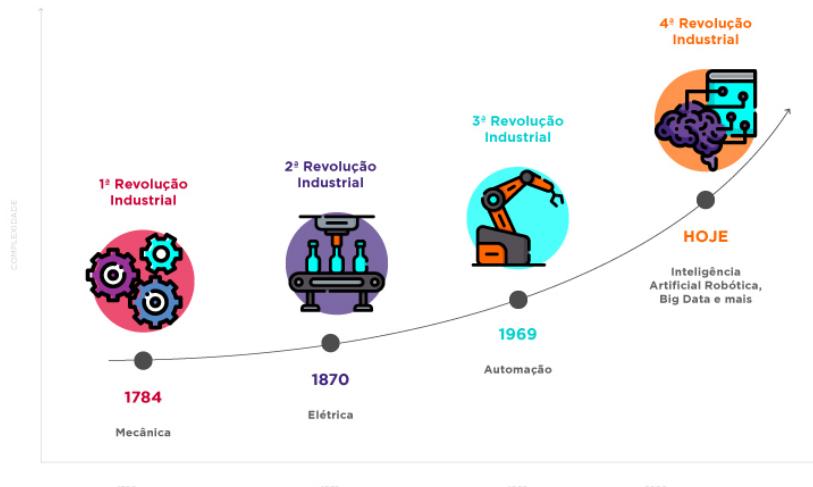
2.1 A Indústria 4.0 - I.4.0

Como Yuval Noah Harari explica em seu *best seller "Sapiens: Uma breve história da humanidade"* uma das principais características que garantiram o sucesso evolutivo do Homo sapiens foi a capacidade de acreditar e transmitir, em conjunto, informações sobre coisas que não existem [4]. Essa característica é a mola mestra da criação de novas tecnologias e soluções, independentemente do tempo em que elas se passam. Basta imaginar do que seria do mundo sem grandes pensadores e cientistas, que mesmo antes de qualquer aparato ultra tecnológico já foram capazes de idealizar teorias sobre células, eletricidade, sistema solar, gravidade e etc.

Com o passar dos anos, a sociedade foi desenvolvendo diversas soluções para os problemas do dia a dia e distribuindo essas produções para cada vez mais longe e para mais pessoas. Foi na Inglaterra, na metade do século XVIII, sobretudo após o advento da máquina a vapor, que os sistemas produtivos foram empregados para dar escala e velocidade no desenvolvimento de novos produtos.[5]

Na figura 2 é possível observar as revoluções industriais que o mundo vem passando bem como do aumento de sua complexidade, das gigantes e onerosas máquinas a vapor até assistentes pessoais que controlam dispositivos diversos utilizando uma malha global chamada internet:

Figura 2 – Revoluções Industriais



Fonte:<https://viridis.energy/pt/blog/industria-40-e-eficiencia-energetica> Acessado em: 2020-03-17

Para Dombrowski, todas as mudanças supracitadas, chamadas de "Revolução Industrial" têm a ver com disruptão dos meios produtivos bem como das modificações econômicas, sociais, das relações de trabalho e demais condições da vida e da riqueza da sociedade [6].

Existem várias definições para o que de fato é I.4.0. Uma das explicações mais aceitas é "*Uma combinação de máquinas inteligentes, produção, processos e sistemas que formam uma rede sofisticada interconectada*" [7].

Podemos dividir a I.4.0 em alguns princípios:[8]

1. **Interoperabilidade** - Capacidade dos sistemas se comunicarem, com transparência, entre si, mesmo sendo distintos uns dos outros;
2. **Virtualização** - Capacidade relacionada ao monitoramento dos processos físicos de forma virtual, permitindo leituras e acompanhamentos a distância;
3. **Descentralização** - Habilidade dos sistemas tomarem suas próprias decisões;
4. **Trabalho em Tempo Real** - Conciliações sistêmicas e contínuas da operação, tendo ações contra possíveis desvios;
5. **Orientações a Serviços** - Permitir a utilização dos serviços para demais integrantes dos processos através da rede utilizada;
6. **Sistema Modular** - Possuir flexibilidade para quaisquer mudanças, adaptando-se a novas configurações ou mudanças de características do produto.

No Brasil, a ABDI - Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial diz que com os avanços da "Industrialização 4.0", será possível gerar uma economia de até R\$ 73 bilhões ao ano. É estimada a redução de até R\$ 35 bilhões ao ano com reparos. São cerca de R\$ 31 bilhões com ganhos de eficiência produtiva e R\$ 7 bilhões com a diminuição do gasto com energia. Outro ponto aportado pela ABDI, é que a I.4.0 também colabora com a redução de impactos ambientais, podendo até reduzir emissões de *CO₂* [9].

2.2 Eficiência Energética

A eficiência energética trata da ideia de redução do consumo dos recursos naturais e a adoção de práticas mais eficientes da sua utilização. Economizar energia, ou seja, utiliza-la racionalmente, também traz, não só benefícios econômicos, mas sustentáveis, uma vez que a produção de energia pode impactar toda a cadeia produtiva e o ambiente que a cerca. Diversas empresas que produzem equipamentos utilizam selos ou certificações para que os consumidores se certifiquem que estão adquirindo produtos de menor impacto e de menor custo no tempo.

No Brasil, foi criado, no ano de 1985, o PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, que é responsável por fomentar a adoção de metodologias em eficiência energética em todo o território nacional. *"As ações do Procel contribuem para o aumento da eficiência dos bens e serviços, para o desenvolvimento de hábitos e conhecimentos sobre o consumo eficiente da energia e, além disso, postergam os investimentos no setor elétrico, mitigando, assim, os impactos ambientais e colaborando para um Brasil mais sustentável"* [10].

2.3 Computação

Aqui serão apresentados alguns conceitos de computação para o pleno entendimento da plataforma iba, que será explicado em detalhes mais a frente, que permite com que todos os dados aquisitados sejam processados, armazenados, distribuídos e analisados.

2.3.1 Sistemas Distribuídos

Com o aumento significativo de dados gerados em todos os lugares, desde sensores, computadores e até relógios, e com o barateamento do custo de armazenagem desses dados, surgiu a necessidade cada vez maior de se processar todo esse volume. Atrelado a isso, os dados começaram a se multiplicar exponencialmente e trouxeram um desafio ao tentar processá-los: Como processar uma quantidade de dados que não se cabe na memória de um computador, e se coubesse seria muito caro de se fazer por conta das características necessárias da máquina? Com isso, os sistemas distribuídos ajudam a solucionar algum desses problemas, ao mesmo tempo que adicionam alguns outros.

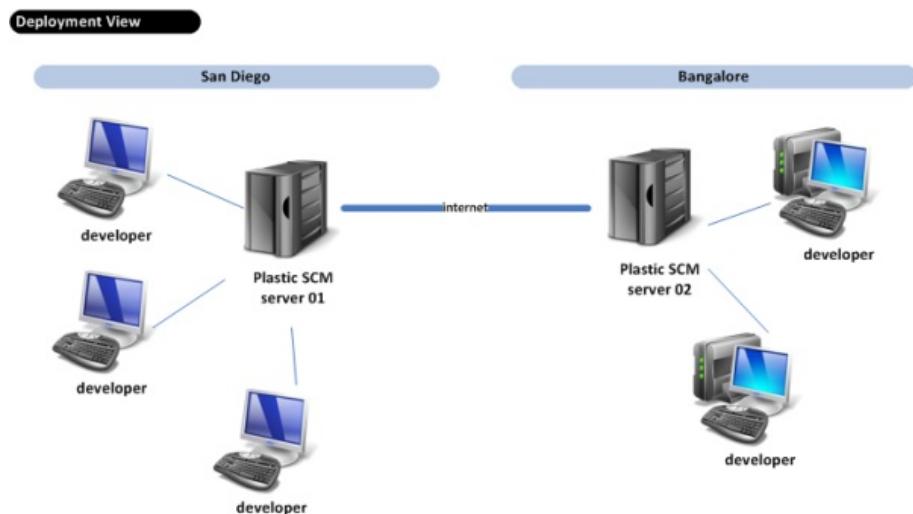
Alguns exemplos de sistemas distribuídos, como é de se esperar, vêm de setores que têm que lidar com quantidades massivas de dados todos os dias, são desses setores também que muitas das novas soluções e pesquisas na área de sistemas distribuídos saem. Alguns que se destacam: [11]

- Sistemas de pesquisas (motores de busca)
- Sistemas financeiros

- Redes Sociais

Segundo Tanenbaum [12], um sistema distribuído é um conjunto de computadores independentes entre si (e até diferentes), que se comunicam através de uma rede, que se apresentam aos usuários como um único sistema coerente. Além disso, um sistema distribuído deve ser resiliente, ou seja, caso um de seus componentes quebre, o sistema não deve falhar. A figura 3 exemplifica um sistema distribuído no qual permite com que pessoas em diferentes regiões e com acessos a diferentes servidores consigam interagir em um projeto.

Figura 3 – Exemplo de sistema distribuído



Fonte: <http://ivettehappy.blogspot.com/2012/01/tema-i-los-sistemas-operativos-en.html>
Acessado em: 2020-03-17

Há algumas vantagens e desvantagens de se usar sistemas distribuídos [13].

Vantagens

- Compartilhamento: É possível se compartilhar memória RAM, discos de estado sólido para armazenamento, impressoras, etc. Ou seja, os periféricos mais caros é possível que se compartilhem assim reduzindo o custo final da arquitetura.
- Confiabilidade: Caso um nó da rede falhe a rede não é comprometida, outros nós podem fazer exatamente o mesmo trabalho.
- Flexibilidade: É possível dividir a carga de trabalho entre quantos nós estiverem disponíveis.
- Velocidade de computação: É possível se ter mais poder computacional através do uso maior de concorrência e/ou paralelismo.
- Performance a baixo custo: É possível se utilizar de múltiplos processadores de baixo custo ligados em rede.
- Escalabilidade: De forma bem simples é possível se escalar a arquitetura, tanto

de forma vertical (adicionando mais processador ou memória a uma máquina) quanto de forma horizontal (adicionando mais máquinas).

Desvantagens

- Rede: Como a comunicação é feita por meio de uma rede local ou pela internet e não mais dentro do computador, o tráfego está sujeito a muito mais perdas de mensagens, sobrecarga de mensagens e até um mal dimensionamento da banda da rede.

- Segurança: Está sujeito as vulnerabilidades da rede e ataques a ela. É necessário uma validação dos usuários e quais recursos eles podem utilizar da máquina. E em caso de conexão com a internet, é necessário várias políticas de segurança, como encriptação das informações.

- Complexidade: Adiciona um nível de complexidade a mais às tarefas. Caso a tarefa que se esteja executando for muito simples talvez ela não se beneficiará do poder de processamento paralelo que os sistemas distribuídos dispõem.

Com isso, apesar de terem pontos contras bem expressivos, o fato de se conseguir um sistema resiliente com alta escalabilidade e performance fazem com que os sistemas distribuídos sejam amplamente usados, como já citado aqui.

2.3.1.1 Arquitetura cliente-servidor

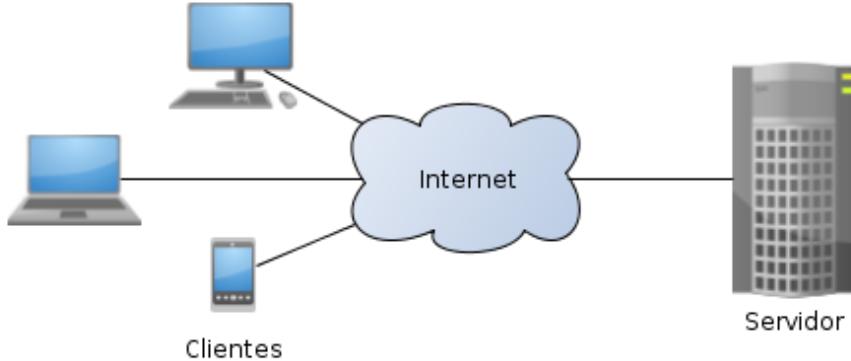
O modelo cliente-servidor é um dos tipos de arquitetura de computação distribuída, onde um usuário se conecta através de um cliente e faz requisições para um servidor que é responsável por partitionar, distribuir e processar as tarefas requisitadas. Ou seja, o cliente é responsável por enviar os comandos a serem executados, ou pede o que necessita, e o servidor executa os comandos necessários e envia para o cliente o resultado final gerado pela cadeia de comandos executados [14].

É importante ressaltar, que a definição de Tanenbaum [12] se mantém, o sistema se apresenta como se fosse um só para o usuário final, porém o processamento é feito de forma distribuída por uma ou mais máquinas do servidor. A comunicação entre o cliente e o servidor geralmente ocorre por uma rede de computadores, seja ela local ou remota, porém tanto o cliente como o servidor devem estar contidos no mesmo sistema. Além disso, o servidor conta com um ou mais computadores que executam os comandos/programas necessários para o funcionamento da rede, com isso alocam parte de seus recursos para cada cliente de acordo com a necessidade requisitada. Em contrapartida, o cliente não divide nenhum recurso com o servidor, consumindo de sua máquina apenas os recursos necessários para estabelecer uma conexão com o servidor, enviar as requisições e receber os resultados [14].

O maior exemplo da arquitetura cliente-servidor é a rede mundial de computadores (*World Wide Web*) também conhecida como internet. Para se usar a internet é necessário

um navegador (cliente) e a partir do mesmo se envia requisições para servidores, por exemplo para o *google.com*, e esses servidores devolvem como resultado uma página HTML que é interpretada e transformada pelo navegador em uma página virtual e interativa, e com isso é possível fazer suas buscas pela internet. A figura 4 ilustra o exemplo citado acima.

Figura 4 – Exemplo arquitetura cliente servidor



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo_cliente%20%93servidor Acessado em:
2020-03-17

Os clientes e os servidores tem algumas características, que no geral, são bem definidas.

O cliente é responsável por sempre iniciar os pedidos aos servidores, esperar pela resposta desses pedidos, e em geral apenas recebe respostas. Pode se comunicar com mais de um servidor de uma só vez, mas em geral esse número de conexões é baixa. E por fim, ele interage diretamente com o usuário final através de algum tipo de interface, seja ela uma ferramenta de linha de comando (*CLI*) ou uma interface gráfica (*GUI*) [15].

Já o servidor ele sempre espera a chegada de um pedido de qualquer um dos clientes, ele executa os programas necessários para conseguir devolver a resposta requisitada pelo cliente. Além disso, um servidor pode se comunicar com outros servidores para conseguir atender a solicitação do cliente, e também consegue manter comunicação com mais de um cliente simultaneamente [15].

Como toda solução ela tem suas vantagens e desvantagens [15].

Vantagens

- Independente da capacidade de processamento do cliente que está fazendo as requisições, pois todo o processamento é feito pelo servidor.
- As responsabilidades de um sistema com essa arquitetura podem ser distribuídas entre vários computadores independentes, com isso fica mais fácil a manutenção dos servidores, permitindo até trocas sem que o sistema saia do ar.

- Como todos os dados ficam armazenados nos servidores isso dá mais segurança, porque servidores conseguem controlar melhor os acessos, recursos e permissões de cada usuários sendo assim mais difícil atacar eles do que os clientes que em geral são menos protegidos. Além disso, essa centralização dos dados facilita caso queira fazer atualização dos mesmos.

Desvantagens

- A rede de conexão é um limitante tanto em banda quanto em disponibilidade.
- Se um servidor crítico falhar não será mais possível prover os serviços aos clientes.

2.3.1.2 Arquitetura de aquisição de dados

Atualmente existem duas arquiteturas bem definidas para aquisição de dados a ELT(*Extract, load and transform*) e a ETL(*Extract, transform and load*).

O ELT é uma arquitetura em que o dado é aquisitado e salvo sem nenhum tratamento, na sua forma mais bruta. Posteriormente, quando precisa ser utilizado, o dado sofre algumas transformações para garantir certa consistência dos mesmos. Esse processamento geralmente é feito de forma paralela, através de sistemas distribuídos, para se conseguir maior velocidade nessa etapa das transformações [16].

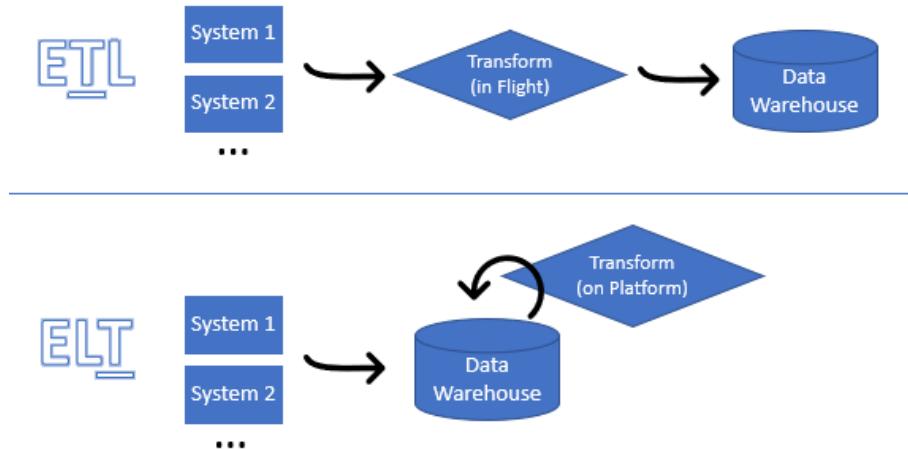
Já na arquitetura de ETL os dados são aquisitados, passam pelas transformações necessárias, que em geral são para garantir a consistência dos mesmos, e daí são salvos. Como no ELT, na etapa de transformação é utilizado, em geral, processamento paralelo dos dados para se conseguir maior velocidade [17].

A vantagem da arquitetura ELT são:

- Consegue lidar melhor com uma quantidade massiva de dados por não precisar processá-los em tempo real.
- Diminuição de erros de sincronização entre aquisição e armazenamento dos dados pelo mesmo motivo do item anterior.
- Análise e visualização em tempo real dos dados(o que é de extrema vantagem para o mapeamento de alguns eventos que acontecem rapidamente e que precisam de ação imediata).

A vantagem da arquitetura ETL é principalmente a disponibilidade dos dados salvos já serem tratados. Aumentando assim a velocidade de construção de análises mais complexas.

Figura 5 – ELT x ETL



Fonte: <https://www.bitracks.com/post/elt-vs-etl-for-siss> Acessado em: 2020-03-17

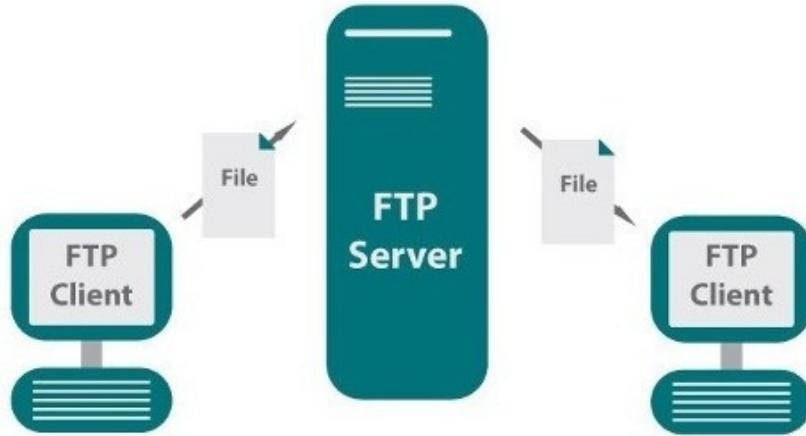
Na figura 5, comparam-se os dois modelos e são ressaltadas suas diferenças sutis, porém, importantes para o funcionamento do software. A principal diferença, é a ordem em que as etapas são executadas. Enquanto no modelo ETL a transformação é a etapa intermediária entre a aquisição e a disponibilidade dos dados, na etapa de ELT a transformação é executada após o armazenamento dos dados e de acordo com a demanda dos usuários.

2.3.2 FTP

O protocolo FTP é, basicamente, uma conexão que permite com que o usuário local compartilhe arquivos com um usuário remoto (fora da sua rede local). A sigla FTP significa *File Transfer Protocol*, que, em tradução livre, significa Protocolo de Transferência de Arquivos [18].

O usuário, ao utilizar uma sessão FTP, tem por objetivo conseguir transferir arquivos de ou para um servidor remoto, com o intuito que outros usuários também o possam fazer, desde que com a devida permissão. Como mostra na figura 6 o usuário interage com o FTP a partir de um cliente instalado em sua máquina local. Para que a conexão seja estabelecida com sucesso é necessário fornecer o endereço do servidor FTP, a identificação e senha, essas são fornecidas pelo dono do servidor FTP. Após isso, a conexão com o servidor FTP será estabelecida e o usuário poderá enviar suas solicitações, que pode ser requisitar arquivos que se encontram no sistema de arquivos do FTP ou enviar arquivos do seu sistema de arquivos local para o FTP [19].

Figura 6 – FTP exemplo



Fonte:

<https://blog.ipswitch.com/es/qu%C3%A9-es-el-protocolo-de-transferencia-de-archivos-ftp>

Acessado em: 2020-03-17

O FTP é um protocolo de transferência de arquivos e utiliza o TCP (Protocolo de Controle de Transmissão, em tradução livre). Uma das diferenças do FTP para outros protocolos de transferência de arquivos, como o HTTP que se tornou o tipo de comunicação padrão na internet, é que o mesmo utiliza duas conexões TCP em paralelo, uma conexão de controle e uma conexão de dados. A conexão de controle envia informações de autenticação como usuário, senha e comandos do FTP. Já a conexão de dados é usada efetivamente para a transferência de arquivos. Por conta dessa arquitetura fica estabelecido que o FTP envia sua informações de controle fora da banda.

Quando é iniciada uma sessão FTP entre o usuário e o servidor, primeiro é estabelecida uma conexão de controle entre o cliente FTP do usuário com o do servidor em um porta específica, nessa conexão é trafegado usuário, senha e comandos FTP. Caso seja válido o usuário e senha passado, o servidor recebe os comandos FTP e abre uma conexão de dados com o computador do usuário, em uma porta diferente da conexão de controle, após a transferência de um arquivo com sucesso essa conexão é fechada e caso o usuário queira mais arquivos, novas conexões terão que ser abertas. Em contrapartida, a conexão de controle permanece ativa durante toda a sessão do usuário [19].

2.3.3 Banco de Dados

Segundo Korth, um banco de dados é uma coleção de dados inter-relacionados e os programas para acessar esse dados. Geralmente, o banco de dados armazena informações relevantes para quem o detém. Além disso, o principal objetivo de um banco de dados é conseguir armazenar e consultar os dados presentes nele de uma forma conveniente e eficiente [20].

Os bancos de dados estão presentes em praticamente qualquer tipo de negócios. Algumas de suas aplicações são nas áreas de:

- Financeira: Transações de uma conta e/ou cartão de crédito, informações dos clientes
- Varejo: Preço e estoque de produtos, informações dos clientes, histórico de compras
- Universidades: Informações do aluno, aulas frequentadas, frequência e nota

O sistema de banco de dados é composto de quatro componentes básicos: dados, hardware, software e usuários [21].

Usuário: É quem injeta ou consulta dados no banco de dados.

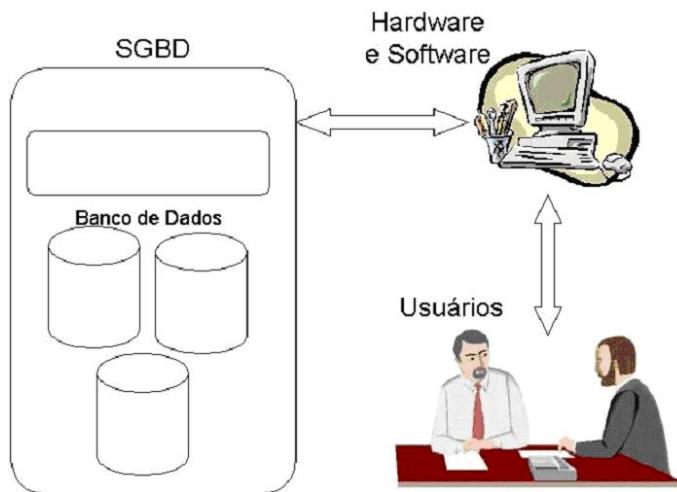
Dados: É a informação disposta em uma forma aceita pelo banco de dados, que foi inserida pelo usuário.

Software: É um sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD), que possui recursos capazes de manipular as informações do banco de dados e interagir com o usuário.

Hardware: É o computador onde os dados são processados e efetivamente armazenados.

A Figura 7 ilustra os componentes de um sistema de banco de dados.

Figura 7 – Exemplo de banco de dados



Fonte: <https://www.devmedia.com.br/conceitos-fundamentais-de-banco-de-dados/1649>
Acessado em: 2020-03-17

Existem dois grandes tipos de banco de dados que tem aplicações mais específicas [22].

- Relacional: São os mais amplamente utilizados no geral. Sua estrutura consiste em tabelas em que cada item representa uma linha e as características desse item são

representadas nas colunas, em geral. Eles são recomendados para quando o dado é altamente estruturado. E tem como vantagem a facilidade tanto de armazenamento quanto de consulta. Além disso, permitem o uso do mesmo em camadas, assim aumentando a segurança de quem utiliza o banco de dados.

- Não relacional: Não existe uma estrutura pré-definida dos dados de entrada, com isso, fica mais flexível seu uso. É utilizado geralmente quando os dados de entrada são não estruturados, e com isso o banco é mais resiliente a entrada de dados, permitindo vários formatos. Mas essa facilidade normalmente impacta a consulta a esse banco, o deixando mais lento. São usados geralmente para armazenar imagens, músicas e até vídeos.

Uma das grandes vantagens de se usar banco de dados, frente a qualquer outro sistema de armazenamento e consulta, além da sua linguagem de consulta ser extremamente otimizado, é o fato de em geral os bancos seguirem o conceito ACID: [23]

Atomicidade: Garante de que todos os comandos foram executados na ordem que deveriam e que nenhum teve falha, caso a tenha nenhum comando é executado e um erro é mostrado ao usuários.

Consistência: Garante que todos os dados estejam íntegros antes, durante e após os comandos.

Isolação: Garante que os dados de uma transação não impacte os dados de outra transação rodando em paralelo no mesmo banco.

Durabilidade: Garante que após os comandos executados no banco os dados estejam íntegros e disponíveis mesmo em caso de falha.

2.4 iba

Já empregado na Indústria em que o estudo foi pautando, o Iba é uma solução comercial, que permite a aquisição, tratamento, armazenamento e análise de dados. É importante ressaltar, que existem diversos módulos de aquisição de dados espalhados no mercado ou até em soluções em que são utilizados microcontroladores. Além disso, os softwares empregados no tratamento, armazenamento e nas análises também poderiam ser de qualquer outra desenvolvedora.

Em outras palavras, o Iba, ou sistemas análogos, são cada vez mais utilizados nas indústrias, uma vez que é possível acompanhar processos a distância, mantendo o histórico e interpretando os dados, o que é característico da Indústria 4.0.

Nesta seção são apresentadas as características e componentes da plataforma utilizada tanto para adquirir quanto para tratar e analisar os dados coletados.

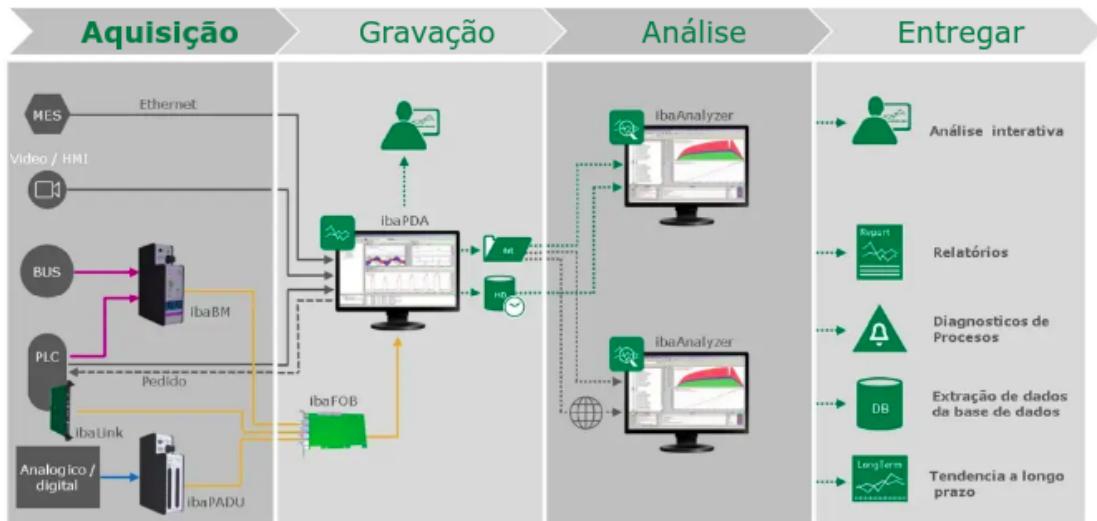
2.4.1 Sistema

Com a plataforma do iba é possível passar por todas as etapas do fluxo de dados, desde a medida da grandeza, a aquisição, sincronização e armazenamento até a análise. Ela utiliza da arquitetura ELT para aquisição dos dados, o que possibilita trabalhar com uma quantidade enorme de dados sem perder a sincronização com o banco de dados onde essas informações são armazenadas.

2.4.1.1 Arquitetura Padrão

A figura 8 ilustra os produtos da iba, tanto hardware quanto software, e sua aplicação ao longo de todas as etapas de tráfego dos dados. Além disso, ressalta o modelo ELT de extração de dados.

Figura 8 – Arquitetura padrão dos produtos iba



Fonte: <https://www.iba-ag.com/en/training/> Acessado em: 2020-03-17

2.4.2 iba hardware

Aqui são mostrados todos os produtos iba que fazem a parte de coleta e sincronização dos dados, também conhecidos como módulos aquisitores de dados.

2.4.2.1 ibaFOB

O ibaFOB, é a infraestrutura de comunicação por fibra óptica desenvolvida pela própria iba. Essa infraestrutura permite com que todos os sistemas se comuniquem através de fibra óticas com os módulos do ibaFOB permitindo assim maior velocidade no tráfego dos dados, maior segurança e confiabilidade também [24].

Um dos principais componentes do ibaFOB são as placas ibaFOB-D que são responsáveis pelo gerenciamento da comunicação entre os dispositivos de aquisição de dados

e o ibaPDA, que é responsável pela leitura em tempo real dos dados e pelo seu armazenamento.

A placa conta com vários modelos, e suas características principais são mostradas na tabela 1

Tabela 1 – Tabela de características do ibaFOB-card

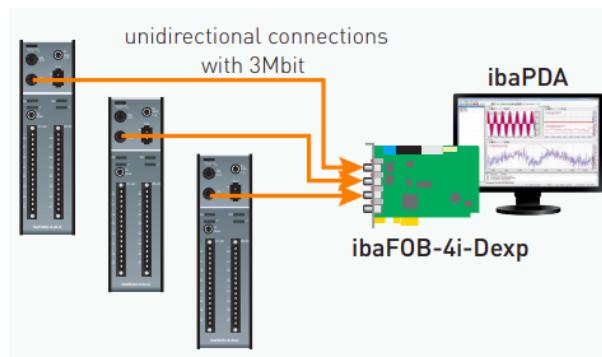
Bus Clock	2.5 Gbit/s
Taxa de amostragem	Depende do dispositivo de aquisição
Velocidade	3Mbit - 32Mbit
Entrada/Saídas	1-4 / 0-2
Protocolo de Comunicação	ibaNet

Além disso, o ibaFOB interage com o ibaClock, que é responsável pela sincronização de tempo nessa arquitetura de sistemas distribuídos. É um dispositivo vital nesse tipo de arquitetura justamente por permitir que todos os dados captados são confiáveis e portanto, refletem as reais características e atuações dos dispositivos monitorados [24].

A figura 9 ilustra o caminho percorrido desde que o dado é coletado pelos dispositivos aquisidores, a partir daí é feito um *streaming* dos dados em tempo real, ou o dispositivo armazena e posteriormente envia os mesmos, para o ibaFOB que faz a interface com o ibaPDA, que mostra todas as informações aquisitadas, e posteriormente as salva.

Como é possível verificar pela imagem 9 o ibaFOB pode se comunicar com mais de um dispositivo aquisitor de uma vez, o que permite um monitoramento em tempo real das atividades da planta muito eficiente.

Figura 9 – Exemplo do uso do ibaFOB-D com dispositivos de aquisição



Fonte: <https://www.iba-ag.com/en/pcs-and-fibre-optic-infrastructure/> Acessado em: 2020-03-17

2.4.2.2 ibaBM

O ibaBM(Bus monitor), é um sistema que permite com que o sistema iba tenha conectividade distinta com outros sistemas de automação e tecnologias de barramento [25].

Existem módulos de monitoramento para os protocolos listados na tabela 2, o que garante com que haja uma compatibilidade com uma gama bem alta de produtos presentes na indústria.

Tabela 2 – Tabela de protocolos suportados

CAN / CANopen
EtherCAT
EtherNet/IP
PROFIBUS
PROFINET
DDCS by ABB

As vantagens dos módulos de monitoramento é conseguir fazer o monitoramento e gravação do fluxo de dados entre os sistema de automação e os periféricos do mesmo sem interferência. Além disso, não é necessário que nenhuma configuração adicional no barramento para conseguir captar as informações. E como esperado todos os dados são sincronizados com as outras medidas feitas através do software ibaPDA. A figura 10 mostra alguns dos módulos aqui comentados para alguns protocolos de comunicação.

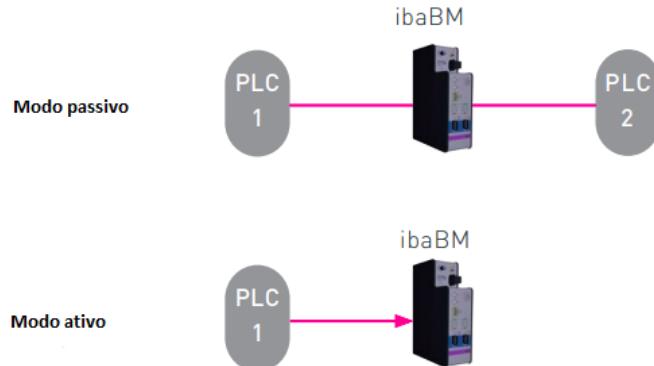
Figura 10 – ibaBM - Módulo de aquisição



Fonte: <https://www.iba-ag.com/en/field-and-drive-buses/> Acessado em: 2020-03-17

Há dois modos de operação do dispositivo, o modo ativo e o passivo, que são apresentados na figura 11.

Figura 11 – ibaBM - Modos de operação



Fonte: <https://www.iba-ag.com/en/field-and-drive-buses/> (modificado) Acessado em: 2020-03-17

No modo passivo, não é necessária nenhuma mudança na forma de comunicação do barramento, sendo menos invasivo. As informações passam por ele, e ele lê e as envia para o ibaFOB. Porém, nem todos os dados são enviados para o barramento, apenas aqueles dados que outro dispositivo necessita ler, sendo assim ele não consegue uma leitura completa do dispositivo.

No modo ativo, o dispositivo envia os dados diretamente para o ibaBM, que lê e os encaminha para o ibaFOB. Como após o dispositivo os dados não continuam no barramento é possível então enviar todos os dados que se deseja salvar.

2.4.2.3 ibaPADU

O ibaPADU(*Parallel Analog Digital Unit*) é um módulo de medição independente da rede para aquisição e gravação de dados móveis. O uso de um dispositivo compacto e de fácil manuseio permite com que os sinais analógicos e digitais possam ser gravados exatamente onde eles ocorrem [26].

Dessa maneira, fica mais fácil a instalação e aquisição dos dados mesmo em locais de mais difícil acesso na planta e com isso não é necessária nenhuma mudança drástica nas instalações.

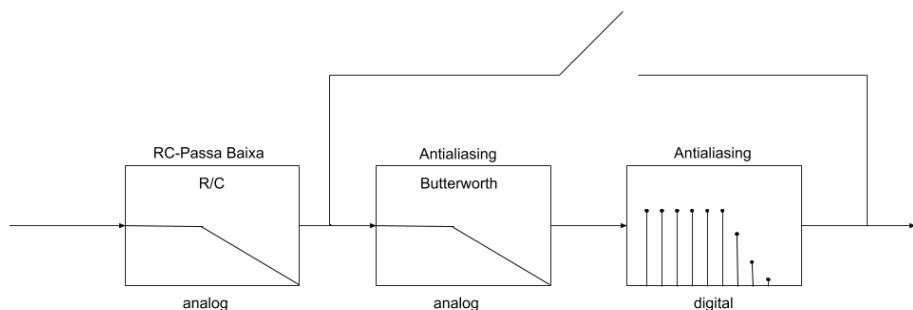
O dispositivo conta com 8 entradas analógicas com uma resolução de 16 bits e 8 entradas digitais. E consegue fazer aquisições numa frequência de até 100kHz. Entre outras características lista na tabela 3.

Tabela 3 – Tabela de caracteristicas do ibaPADU

Sinal de entrada	250mV - 24V
Taxa de amostragem	até 100 kHz
Impedância de entrada	50Ω - 1MΩ
Entrada/Saídas	8 A + 8 D
ibaNet Protocol	32 Mbit

Além disso, o dispositivo conta com um conjunto de filtros por canal que são ajustados automaticamente de acordo com a taxa de amostragem. Ele conta também com filtro *anti-aliasing*, o que permite a confiabilidade dos dados adquiridos. A figura 12 mostra um esquemático dos componentes presentes na conversão dos dados de analógico para digital.

Figura 12 – ibaPADU - Filtro anti-aliasing



Fonte: <https://www.iba-ag.com/en/mobile-data-acquisition/> Accessado em: 2020-03-17

O dispositivo não se conecta diretamente com o ibaPDA, o responsável por fazer o armazenamento dos dados e deixar os mesmos disponíveis para análise, com isso é necessário o *streaming* dos dados para o ibaFOB, que fará a interface com o ibaPDA possibilitando assim o armazenamento dos dados, como ilustra a figura 13.

Figura 13 – ibaPADU - Interface com ibaPDA



Fonte: <https://www.iba-ag.com/en/mobile-data-acquisition/> Acessado em: 2020-03-17

Caso, por algum motivo excepcional a comunicação não seja possível, o dispositivo ainda conta com armazenamento interno para guardar os dados de medição de forma local, e posteriormente fazer o *streaming* dos dados para o ibaFOB que faz a interface com o

ibaPDA. A única desvantagem dessa abordagem é que não é possível fazer a análise em tempo real dos dados.

2.4.3 iba Software

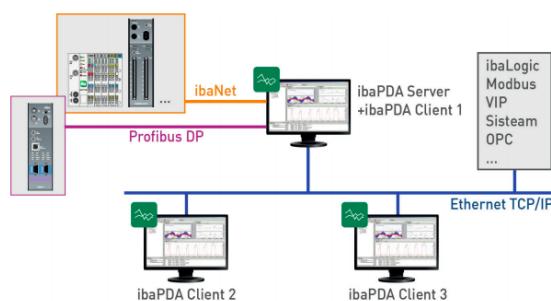
Com todos os dados gerados a cada segundo por todos os dispositivos conectados a rede do iba, são necessários softwares que simplifiquem tanto a etapa de monitoramento em tempo real, banco de dados e análise.

2.4.3.1 ibaPDA

O ibaPDA(*Process Data Acquisition*) é uma parte central do sistema iba, conta com uma arquitetura cliente-servidor, tem flexibilidade para a gravação dos dados escolhidos e configuração simples de auto-detecção [27].

Um bom ponto a se ressaltar das características do ibaPDA é sua arquitetura cliente-servidor que permite a configuração, aquisição, armazenamento e visualização de diferentes dispositivos. E com isso, é possível com que o monitoramento da planta seja feito de vários terminais diferentes e pegando dados diferentes também o que permite uma maior autonomia entre as diferentes áreas dentro da empresa em selecionar e monitorar o que é mais importante para a área em questão. A figura 14 exemplifica um dos possíveis arranjos da arquitetura em volta do ibaPDA.

Figura 14 – ibaPDA - Topologia com um único servidor



Fonte: <https://www.iba-ag.com/en/ibapda/> Acessado em: 2020-03-17

O servidor do ibaPDA contém a interface para aquisição, armazenamento e o processamento dos dados aquisitados. Enquanto o cliente pode configurar o servidor e visualizar de diferentes formas os dados em tempo real.

Os modos de funcionamento são variados pela facilidade dada pela arquitetura escolhida. O sistema pode ter vários servidores e um só cliente, vários clientes e só um servidor ou vários servidores e vários clientes.

Além de tudo que já foi dito, a escolha do iba para ser o sistema de captação de dados de toda a planta é reforçado pelo ibaPDA que uni, em um só programa, toda a

interface para análises em tempo real e para o armazenamento de dados, de forma simples, clara e concisa. Com isso, o operador só precisa aprender apenas um software e conseguir fazer todas as suas atividades do dia-a-dia.

O programa ainda é capaz de criar painéis para facilitar a visualização em tempo real, criar alarmes no qual você pode configurar limites para os quais as variáveis monitoradas podem ficar, escreve diretamente em serviços de computação em nuvem como AWS(Amazon Web Service) ou Microsoft Azure, que são serviços da Amazon e Microsoft, respectivamente. Ou seja, é um serviço que tem tanto funções básicas como avançados, assim atendendo aos mais variados tipo de necessidades do cliente.

Outra vantagem, do ibaPDA é que ele tem vários módulos extensores para necessidades muito específicas. Então você pode adquiri-los caso seja necessário para seu caso de uso. Algum desses módulos serão brevemente mostrados a seguir.

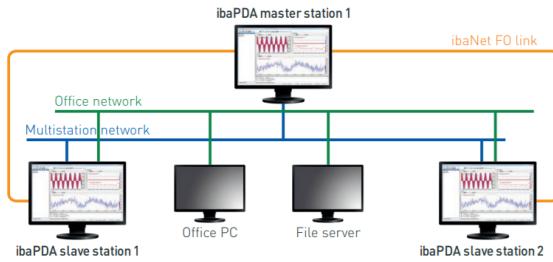
Figura 15 – ibaPDA-QPanel - Painel interativo



Fonte: <https://www.iba-ag.com/en/ibapda/> Acessado em: 2020-03-17

O ibaQPanel, mostrado na figura 15, é um painel interativo. O ibaPDA já dispõem de um sistema próprio para elaborar painéis complexos porém os mesmos não são interativos, ou seja, você não consegue fazer uma interface com o dispositivo que adquiriu aquelas informações e enviar comandos para os mesmos. Com o ibaQPanel isso é possível, tornando os painéis ainda mais úteis

Figura 16 – ibaPDA-Multistation - Exemplo de configuração do ibaPDA-Multistation com um mestre e dois escravos



Fonte: <https://www.iba-ag.com/en/ibapda/> Acessado em: 2020-03-17

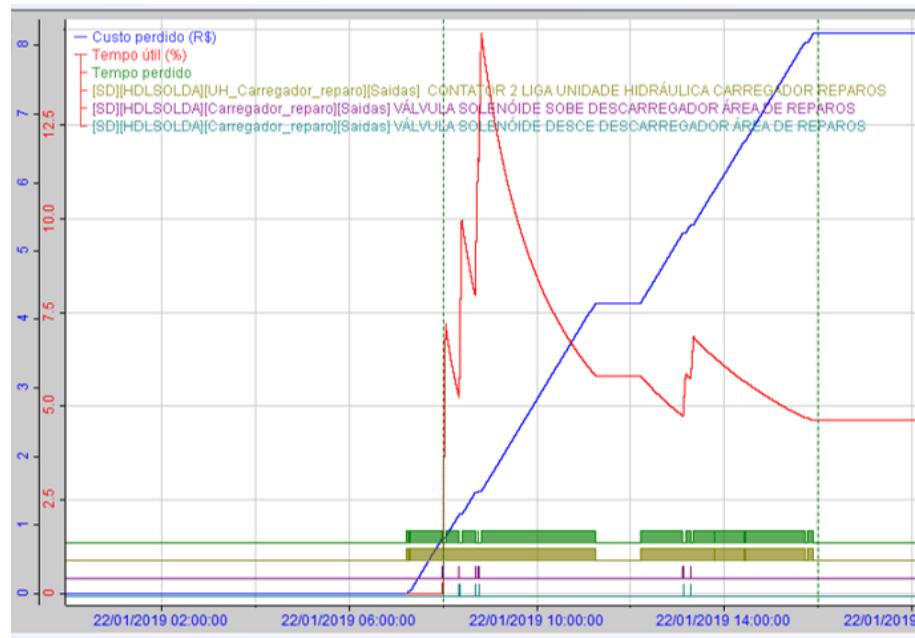
O ibaPDA-Multistation, mostrado na figura 16, é utilizado quando se deseja gravar de forma sincronizada dados de diferentes servidores ibaPDA. Então, os mesmos são utilizados em cenários bem específicos como, por exemplo, se você necessitar que os dados de diferentes plantas em galpões diferentes ou até localidades diferentes, sejam gravadas de forma síncrona.

Um ponto que vale ressaltar é que no caso da empresa em questão, o ibaPDA salva seus dados em um servidor próprio da empresa via comunicação FTP, e que posteriormente pode ser acessado por diferentes formas.

2.4.3.2 ibaAnalyzer

O ibaAnalyzer é um software feito para realizar análises dos dados coletados pela arquitetura do iba. Oferece ferramentas que tornam mais simples várias análises mais usuais além de contar com um sistema de extensões que permite que outras funcionalidades sejam adicionadas ao sistema do iba [28]. A figura 17 mostra um exemplo de uso do iba, no caso em questão é ilustrado o comportamento de uma outra unidade fabril, porém é possível notar a variação da linha azul (Custo perdido) e da linha vermelha (tempo útil) que mostra um relacionamento inversamente proporcional entre elas.

Figura 17 – ibaAnalyzer



Fonte: Autor.

O ibaAnalyzer foi utilizado para fazer a parte de análises dos dados coletados principalmente por contar com uma interface nativa com os dados, com isso, acelerando a fase de tratamento dos dados aquisitados e permitindo um maior foco na construção das análises. Caso não se queira trabalhar no iba também é possível exportar os dados para utilizar outras ferramentas, como por exemplo, a exportação dos dados para csv e utilizar o Excel para realizar as análises.

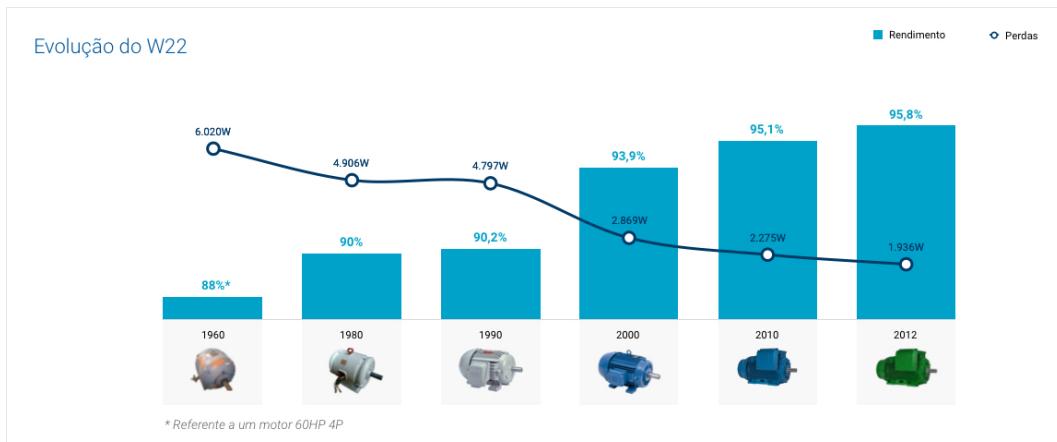
2.5 Motores Elétricos

No Brasil, os motores elétricos são de suma importância para todo o sistema produtivo, estando presentes em diversos setores, sobretudo o industrial, onde o seu uso representa 70% de toda a energia utilizada para esse segmento, o que, a nível de Brasil, representa 29% de toda a energia produzida no país [29].

Dada a importância da energia elétrica para o desenvolvimento da sociedade e toda a cadeia envolvida em sua produção, transmissão e distribuição, torna-se indispensável a utilização de política de consumo eficiente deste recurso. Estudos mostram que, de maneira geral, é mais barato, via de regra, a economia no consumo do que o preço para gerar a mesma quantidade de energia [30].

Utilizando as informações anteriores, é possível observar o quanto importante é o uso de motores elétricos de forma eficiente. Não por acaso as grandes fabricantes desses equipamentos vêm modernizando o setor há anos, como podemos observar na figura 18, com o modelo W22, motor de indução trifásico, carro chefe de eficiência da WEG.

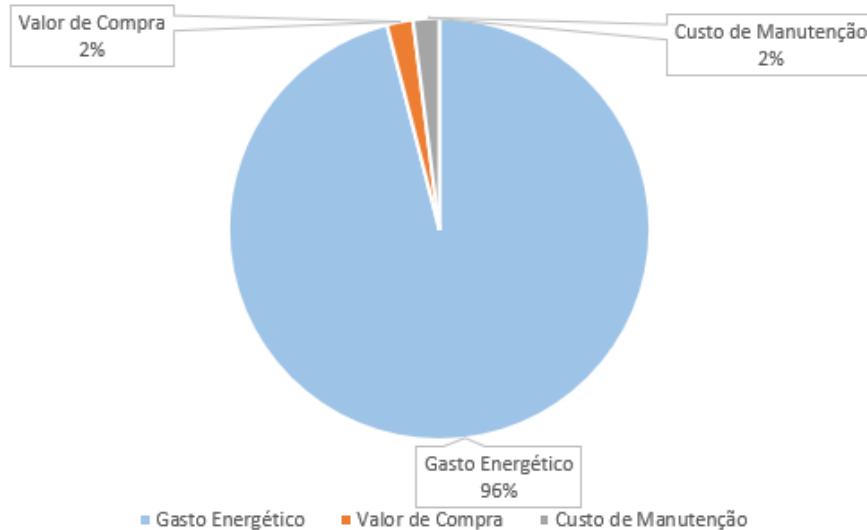
Figura 18 – Evolução Tecnológica dos Motores Elétricos



Fonte: Material de Divulgação WEG

Os motores elétricos funcionam por muitas horas no ano, portanto, uma pequena melhoria pode trazer impactos significativos na economia no consumo de energia elétrica. Tendo isso posto, é imprescindível analisar o Custo do Ciclo de Vida, doravante chamada de LCC. Em resumo, o consumo de energia elétrica de um motor figura entre 60-200 vezes maior que o seu custo inicial [31], o que de forma geral representa cerca de 96% do custo total da vida do equipamento [32].

Figura 19 – LCC - Motores Elétricos



Fonte: Wilfried Voss. Copperhill Technologies Corporation. 2007

Para a utilização dos motores elétricos, existem diversos elementos que podem influenciar o consumo energético, alguns exemplos:

- Eficiência do motor
- Partida do Motor
- Equipamento de controle: Soft Starter/Inversor de Frequência
- Sistema mecânico acoplado
- Práticas de manutenção
- Dimensionamento correto dos componentes

Figura 20 – Conceito de Sinergia em Eficiência

Componentes elétricos	Componentes mecânicos	Aplicação	Automatização da fábrica
Manutenção adequada e regular			
Motores eficientes energeticamente	Caixa de engrenagens, correias mais eficientes energeticamente	Sistemas de acionamento de velocidade variável	Fontes mais eficientes
Dispositivos de correção de fator de potência	Bombas, ventiladores, compressores mais eficientes energeticamente	Reducir perdas elétricas de transmissão	Modo de baixa energia durante a parada

Fonte: Material Interno da Companhia

A tabela 20 retrata a sinergia que precisa existir para se ter um sistema mais otimizado. Os componentes elétricos devem estar sempre dimensionados corretamente, para evitar sobreaquecimento, desgaste e possíveis curto-circuitos. Valido ressaltar a importância se se utilizar banco de capacitores, capazes de controlar o fator de potência e permitir uma melhor eficiência.

Em termos de componentes mecânicos, a lubrificação dos mancais, alinhamentos do eixo, caixa de câmbio/engrenagens precisam ser sempre verificadas, afim de se garantir pleno funcionamento do equipamento.

No que diz respeito ao funcionamento, os sistemas de controle de velocidade são essenciais para garantir a eficiência do processo. Com eles seria possível ter um modo de consumo de baixa energia em momentos de baixa produção.

De forma geral, existem alguns pontos que são necessários no estudo de implementações de motores ou de eventuais trocas.

Uma delas é olhar, separadamente, os componentes envolvidos na instalação e suas eficiências. Desta forma, adotando apenas equipamentos eficientes é possível obter melhores ganhos. A adoção de motores altamente eficientes pode trazer economias de 2% a 10%.

Outra forma seria a utilização de drives de velocidade, mais conhecidos como inversores de frequência, que são equipamentos capazes de controlar o funcionamento, sobretudo a velocidade do motor elétrico, seja variando a tensão de alimentação, frequência, impactando diretamente na potência consumida da rede.

2.5.1 Partida de Motores de Indução Trifásicos (MIT)

Quando da instalação de um motor elétrico, é necessário verificar o sistema de partida que será adotado. Para a partida de motores gaiola de esquilo, em partida direta, recomenda-se a utilização de componentes eletromecânicos para controlar o acionamento do sistema de potência e suas respectivas cargas [33].

O acionamento mencionado acima pode possuir algumas questões técnicas e ressalvas:

-Questões normativas: NBR 5410/04 - a queda de tensão durante a partida de um motor não deve ultrapassar 10% da sua tensão nominal no ponto de instalação dos dispositivo de partida correspondente”

-Questões dimensionais: Os condutores bem como os conectores precisam estar superdimensionados para suportarem a corrente de partida do motor. Por conta disso, o projeto de instalação pode ter seu custo elevado, uma vez que serão necessários materiais de especificação superior.

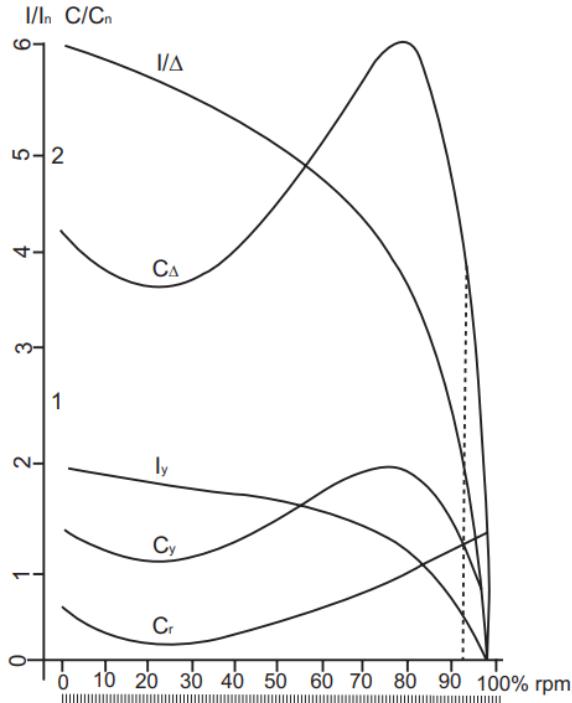
-Questões de distribuição: As concessionárias podem determinar quais as faixas limites de funcionamento da rede para quedas de tensão.

De forma geral, do caso da impossibilidade de acionamentos diretos, referentes aos motivos levantados anteriormente, são adotados outros artifícios e equipamentos para se assegurar que a corrente no momento da partida não atinja valores indesejáveis, impactando a rede ou degradando os condutores e demais itens instalados na rede. Com isso, podem ser adotados diferentes métodos de partida indireta [33], como partidas Estrela-Triângulo, Soft-Starter, Inversores, Chave compensadora e outros.

2.5.1.1 Partida Estrela-Triângulo ($Y - \Delta$)

Muito empregado na indústria, o acionamento Estrela-Triângulo é tipicamente utilizado em processos em que a partida é dada em vazio, ou seja, não possui carga acoplada ao seu eixo até que atinja uma rotação mínima indicada. Isto é, quando o torque for grande o suficiente para garantir a aceleração adequada do equipamento com a configuração de menor corrente [34]. Como pré-requisito, o motor elétrico precisa possuir a ligação por seis bornes e configuração de dupla tensão (220/380V ; 360/660V).

O funcionamento se dá quando do acionamento em Estrela, que possui a configuração de maior tensão, portanto menor corrente, elevando a rotação nominal do motor até alcançar a velocidade de regime, quando ocorre a comutação dos contatores para a configuração triângulo. Este artifício possibilita a redução de até 1/3 da corrente de partida do motor [35].

Figura 21 – Curvas de acionamento $Y - \Delta$ 

Fonte: Guia de Aplicação de Motores Elétricos [33], pág. 22

I_{Δ} = Corrente em triângulo

I_y = Corrente em estrela

C_Δ = Conjugado em triângulo

C/C_n = Conjugado do motor / conjugado nominal

I/I_n = Corrente do motor / corrente nominal

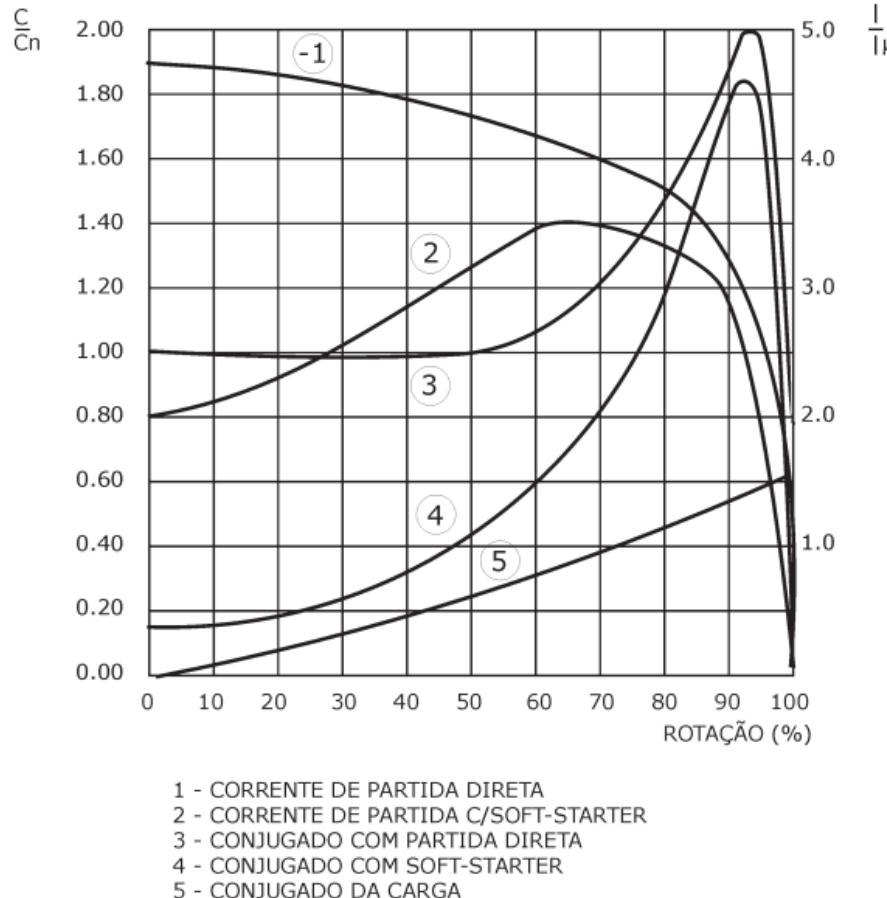
C_r = Conjugado resistente

2.5.1.2 Partida com Soft-Starter

Trata-se de um dispositivo largamente empregado em instalações elétricas industriais, sobretudo em ventiladores, bombas centrífugas e demais equipamentos de alta potência. O equipamento é constituído de SCRs - *Retificador Controlado de Silício*, em configuração antiparalela [34].

O Soft-Starter funciona alterando o ângulo de disparo de cada par de tiristor que é controlado eletronicamente, aplicando uma variação nos terminais do motor durante o período de acionamento. Tal característica é chamada de "partida suave", como sugere a curva de partida apresentada a seguir:

Figura 22 – Comparativo: Partida direta x Partida com Soft-Starter



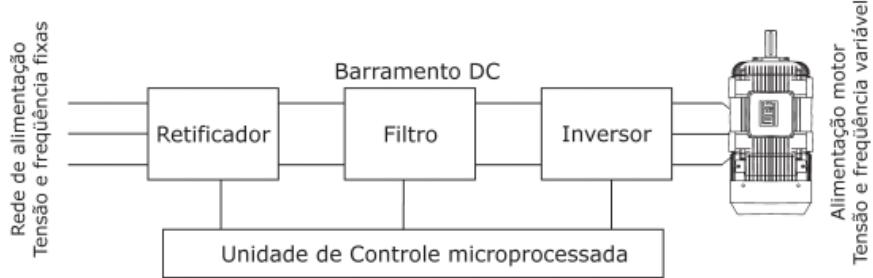
Fonte: Guia de Aplicação de Inversores de Frequência [33], pág. 41

O microprocessador acoplado é o responsável pelo controle eletrônico do acionamento, sobretudo do gatilho dos tiristores, que, a partir das configurações feitas por quem especifica os parâmetros de funcionamento, variando conforme a aplicação, no tempo da rampa de aceleração.

2.5.1.3 Partida e aplicações com Inversor de Frequência

O inversor de frequência é um dos grandes responsáveis pelo uso eficientes e inteligente da energia elétrica em operações industriais. De forma resumida, este componente é capaz, através de diversos circuitos de eletrônica de potência, varia as frequências de alimentação do motor elétrico, de modo a alterar a sua velocidade dinamicamente, não só nos momentos de partida, mas também utiliza-lo em malhas que recebem *feedback*, através de sensores, de outros equipamentos envolvidos em um processo, ajustando a velocidade dos motores conforme desejado.

Figura 23 – Diagrama de Blocos Componentes de Inversores de Frequência



Fonte: *Guia de Aplicação de Inversores de Frequência [33]*, pág. 51

De forma simples, é possível relembrar a seguinte relação de velocidade de motores elétricos de indução:

$$n = \frac{120f(1 - s)}{p} \quad (2.1)$$

Em que:

n = Velocidade em rotações por minuto (RPM)

f = Frequência de alimentação (Hz)

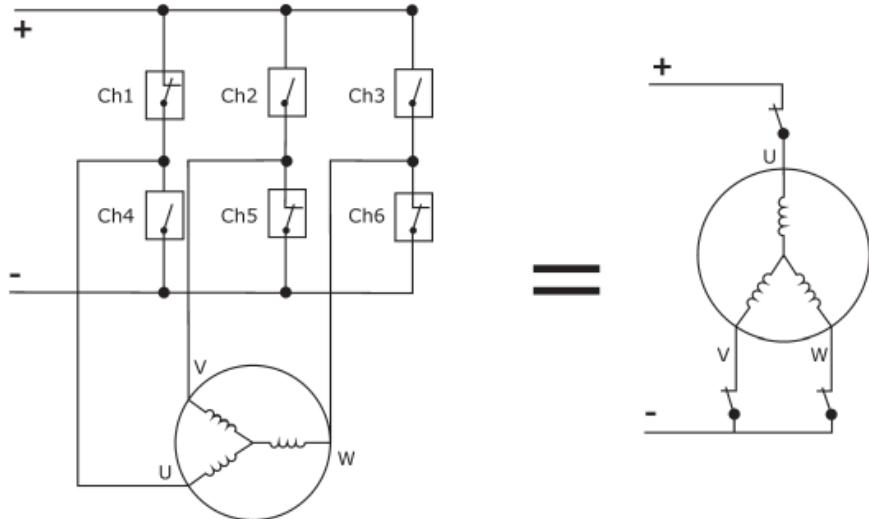
p = N° de polos

s = Escorregamento

De posse da equação (2.1) e tendo em mãos os dados de placa do motor, é possível variar a velocidade somente alterando o parâmetro f , ou seja, a frequência de alimentação do motor. Esta possibilidade, embora pareça simples, permite um universo de aplicações, como será visto posteriormente durante o trabalho.

Os chaveamentos, como mencionado anteriormente, são realizados por componentes semicondutores, geralmente transistores *IGBT- Transistor Bipolar IGBT com Porta Isolada* que permitem diferentes configurações e portanto frequências resultantes que alimentarão o motor. Utilizando-se do manual do fabricante, podemos observar a configuração:

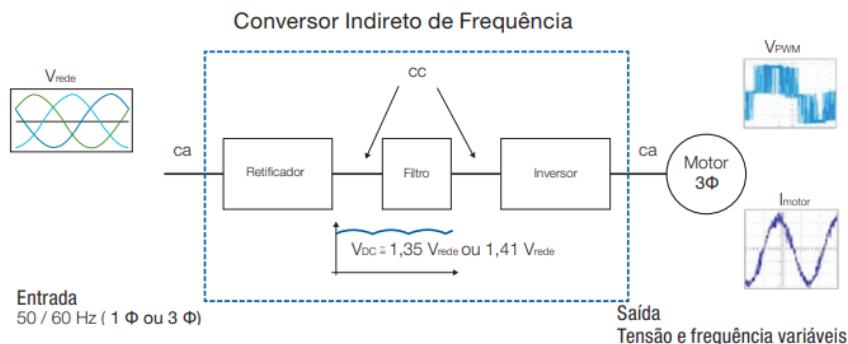
Figura 24 – Esquemático das ligações de chaveamento



Fonte: Guia de Aplicação de Inversores de Frequência [33], pág. 51

Abordando um pouco mais detalhadamente o funcionamento do inversor, o seguinte esquema fornecido pela WEG será utilizado:

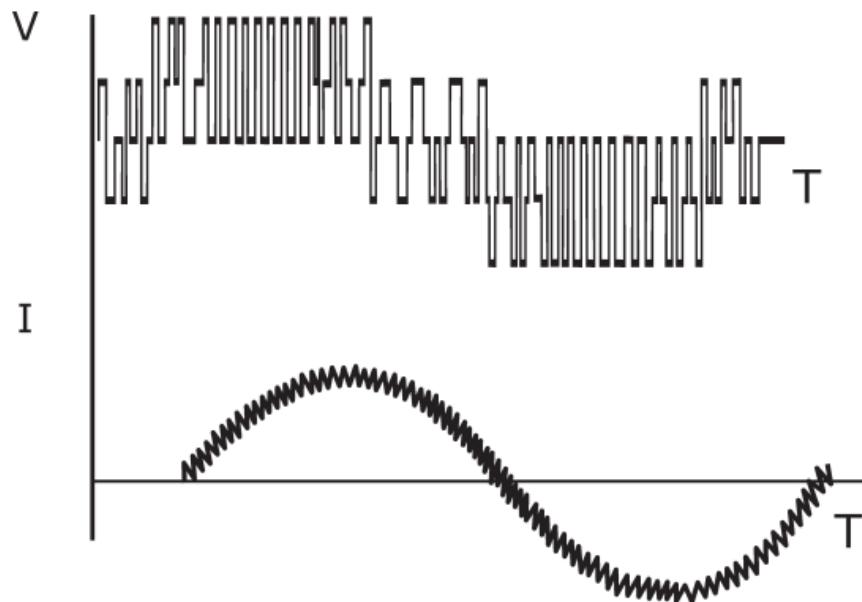
Figura 25 – Diagrama do macrofuncionamento dos inversores



Fonte: Guia de Aplicação de Inversores de Frequência [33], pág. 60

Inicialmente ocorre a transformação da corrente proveniente da rede (CA) em corrente contínua (CC) a ser trabalhada dentro dos elementos semicondutores mencionados anteriormente, tendo em etapas intermediárias, a geração de uma CC pulsada, simulando, em valor RMS, um tensão CA. A saída desta fase, então, passa pelo filtro, que regula, através de um banco de capacitores, uma tensão CC estável. Por fim, utilizando-se dos IGBTs, é fonecido ao motor uma tensão CC modulada por um PWM. Nesta fase, também é levado em conta os parâmetros que o usuário deseja, ou seja, os níveis de frequência desejados. A modulação pode ser observada, por exemplo, nas curvas a seguir:

Figura 26 – Saídas Moduladas do Inversor de Frequência



Fonte: Guia de Aplicação de Inversores de Frequência [33], pág. 54

Dentre a diversidade de aplicações, inversores de frequência são muito empregados em sistemas de bombas centrífugas em que se torna necessária a variação de velocidade de acordo com vazões desejadas para as mais diversas aplicações. A fórmula 2.3 desenvolvida inicialmente se torna muito eficaz quando munido das especificações técnicas das bombas, sobretudo no que diz respeito a velocidades. Vale ressaltar que, pela relação de semelhanças, utilizadas em cálculos hidráulicos, que o torque da carga aumenta com o quadrado da velocidade, por conseguinte, a energia consumida é proporcional à velocidade ao cubo [36]. De forma geral, a utilização de drives de controle de velocidade possibilita diminuir as pressões e as vazões a níveis baixos, representado um potencial econômico [37].

3 Desenvolvimento

De forma a mapear e levantar todas as possibilidades de otimização da zona fabril, foram realizadas diversas análises dos dados de produção, adquiridos através de crono-análises, ou seja, estudo dos tempos do processo nas etapas envolvidas, bem como da compilação e tratamento dos dados aquisitados através do sistema de monitoramento inteligente ligado à rede da companhia.

De posse das principais características que compõem o sistema estudado, foi possível desenvolver um panorama geral, tanto do regime de funcionamento dos equipamentos, bem como das potencialidades encontradas em termos de eficiência energética e ganho operacional.

Dado o exposto, existem dois pontos vitais para o direcionamento das análises:

- 1- Oportunidades e ações para o aumento da capacidade produtiva da planta;
- 2- Diminuição do custo operacional na produção;

Para ambos os itens, foram levantados os dados necessários para identificar as oportunidades e, posteriormente, os cenários possíveis para que fosse garantida a melhor configuração possível em termos de custo x benefício.

3.1 Teste Hidrostático - TH

Remetendo ao início do trabalho, o projeto almeja ser capaz oferecer ganho de produtividade e aumento da eficiência energética em uma das regiões gargalo para a produção dos tubos, que é o teste hidrostático.

Para manter o alto grau de confiabilidade e integridade do produto, são realizadas diversas validações durante seu processo produtivo.

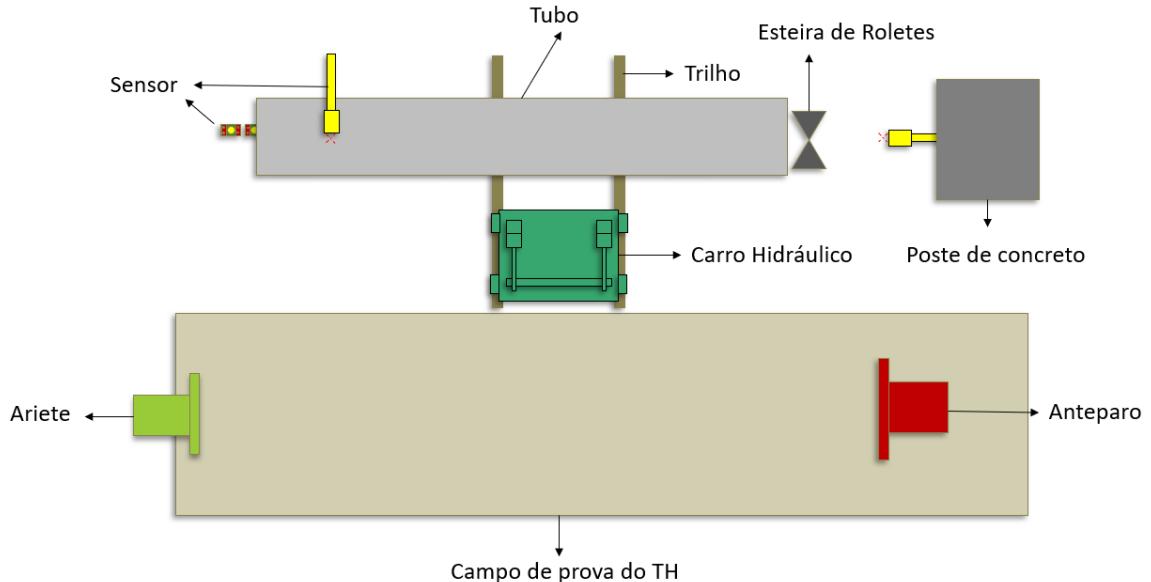
O teste hidrostático é um ensaio realizado em diversos materiais e equipamentos, sobretudo tubos, que consiste em enchê-los com líquidos pressurizados a fim de se encontrar possíveis vazamentos ou rupturas em decorrência de alguma anormalidade em sua produção.

Após as chapas de aço, matéria prima da manufatura, passarem por uma série de etapas, como cortes, alinhamentos, dobras, soldagens, expansões, lavagens, o tubo passa por um teste a elevadas pressões. O teste hidrostático tem como objetivo testar a resistência do produto, sobretudo da solda realizada em etapas anteriores, umas vez que a extração e escoamento de petróleo podem estar susceptíveis a uma série de condições extremas.

3.1.1 Funcionamento do Teste Hidrostático

A figura 27 mostra, em detalhes, os elementos envolvidos no teste hidrostático:

Figura 27 – Elementos que constituem o TH.

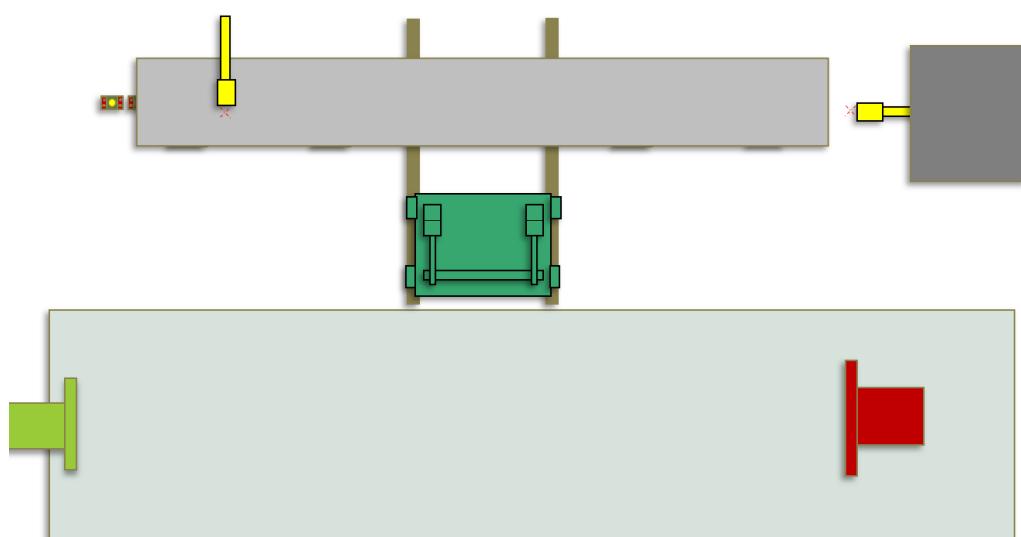


Fonte: Autor

A partir disso, podemos dividir o funcionamento nas seguintes etapas:

1. O tubo chega através de esteiras rolantes. Um carro hidráulico transportador, então, carrega o tubo para dentro do TH.

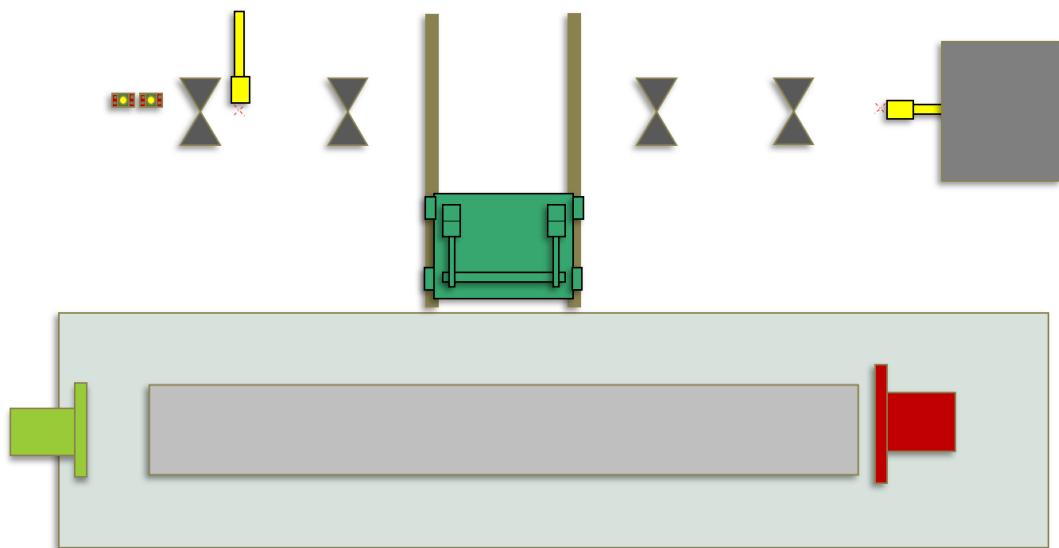
Figura 28 – Chegada do Tubo no TH.



Fonte: Autor

2. O tubo é posicionado com a solda para cima, a fim de se monitorar possíveis problemas na costura, através da cabine de controle, com o uso de câmeras.

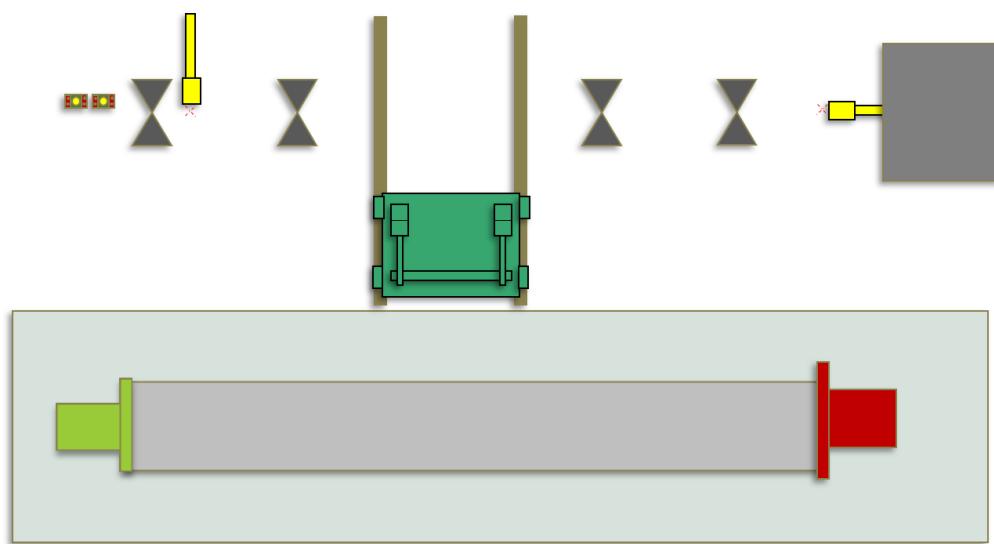
Figura 29 – Tubo dentro do TH.



Fonte: Autor

3. O ariete, que é uma espécie de flange móvel, se movimenta, selando o tubo na estrutura.

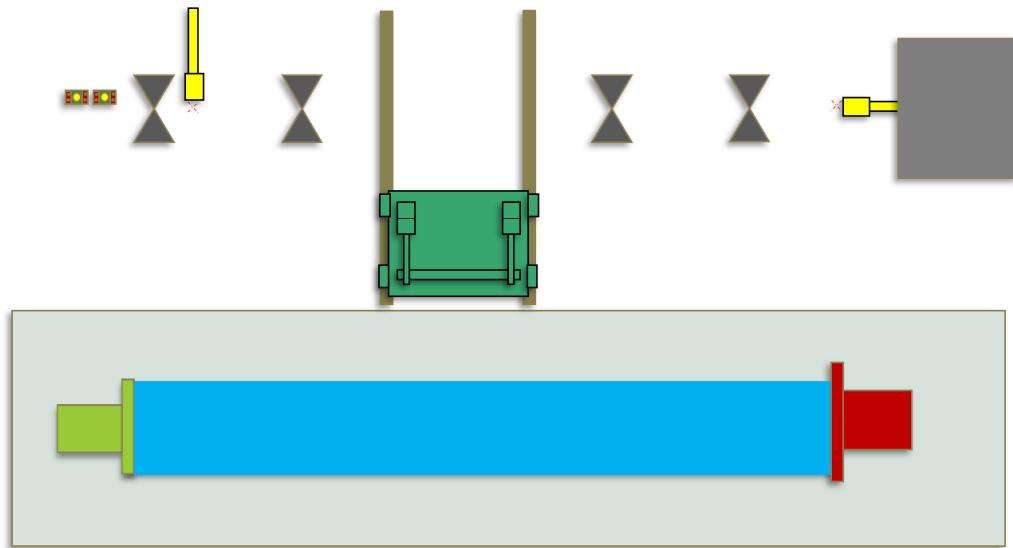
Figura 30 – Tudo posicionado no TH.



Fonte: Autor

4. A bomba é acionada e a água do tanque é direcionada para dentro do tubo.

Figura 31 – Enchimento Tubo no TH.



Fonte: Autor

5. Após cheio, há o acionamento da válvula que redireciona o fluxo para o tanque, levando a água de volta para o tanque. Tal etapa é conhecida como "Ventagem". Posteriormente, os vasos intensificadores adicionam mais água no tubo, de forma que a pressão interna se eleve até a pressão de teste desejada.
6. Feito isso, o tubo é empurrado para fora de estrutura e um novo ciclo se repete.

3.2 Análise dos dados

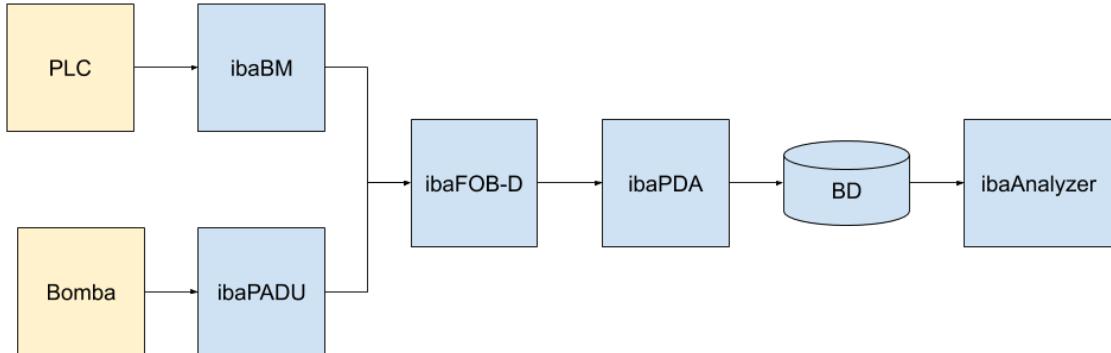
A partir do acompanhamento das etapas no capítulo anterior, é possível, então, reunir as informações para que seja possível, tomar ações que sejam viáveis e baseadas no real contexto da produção.

Desta forma, as análises serão direcionadas a fim de se encontrar os pontos mencionados no início do capítulo 3.0: aumento da produtividade e diminuição do custo.

3.2.1 Arquitetura de captura de dados

Os dados foram capturados utilizando as soluções providas pelo *ibaSystem*, tanto a parte de aquisição, armazenamento e análise. A figura 32 mostra de forma simplificada um esquemático do sistema.

Figura 32 – Arquitetura do iba.



Fonte: Autor

Os dados foram medidos, principalmente, pelo *ibaPADU* e pelo *ibaBM*. O *ibaPADU* fica acoplado diretamente no motor para efetuar as leituras analógicas necessárias, como atuação dos solenóides das bombas por exemplo, convertendo-as a uma resolução de 16 bits que miniminiza os erros e conta ainda com uma alta taxa de amostragem. Enquanto isso, o *ibaBM* fica acoplado ao CLP (controlador lógico programável) conseguindo, assim, registrar tanto dados mais gerais medidas pelo CLP quanto comandos específicos que as lógicas implantadas pelo CLP enviam para o sistema de monitoramento.

Todos os dados coletados são enviados por meio de fibra óptica para as placas *ibaFOB-D* que são as responsáveis por gerenciar a comunicação e fazer a interface com o *ibaPDA* enviando os dados.

O *ibaPDA*, por sua vez, tem a missão de, no cliente, conseguir mostrar para os operadores os dados mais brutos e que não precisam de tratamento em tempo real, permitindo aos operadores tomar decisões críticas mais rapidamente e também acompanhar o status geral da unidade. Enquanto isso, nos servidores, o sistema salva os dados sem ter perda de sincronismo, para isso, utilizando-se computação distribuída, o objetivo é salvar tanto em banco de dados quanto em FTPs todos os dados coletados.

Após essas etapas, os dados estão prontos para serem consumidos pelo *ibaAnalyzer*, que foi o principal software utilizado para a realização das análises.

O iba, pela robustez da sua arquitetura, permite que os dados sejam coletados com a melhor precisão e sejam salvos com o horário exato das suas ocorrências, ou seja, não tenha dessincronização entre o registro da métrica e o horário que foi salvo no banco de dados. Permitindo assim, análises utilizando os horários dos registros no banco de dados para calcular os tempos de cada etapa do ciclo, além das demais medições feitas pelo sistema, evitando possíveis erros de amostragem.

Na figura 33, é possível observar uma das modelagens realizadas em um carro de solda da companhia, onde foi possível encontrar os padrões de funcionamento, bem como

de oportunidades de redução do custo operacional.

Figura 33 – Uso do IBA para uma posicionador de soldagem



Fonte: Gerado através do IBA

Azul - Tempo em que o motor da UH - Unidade Hidráulica fica ligado.

Verde - Braço de subida do posicionador de tubos para a soldagem.

Amarelo - Braço de descida do posicionador após a soldagem.

Vermelho - Tempo em que a UH não realiza trabalho útil, também denominado de tempo em ventagem.

Linha Roxa - Gasto financeiro acumulado (tempo ventando (h) x kWh (R\$)) com a UH redirecionando fluxo

Linha Verde - Trata-se do tempo útil(%) em que a UH está funcionando.

3.2.2 Diagnóstico energético

Dado que o ambiente em que o estudo foi realizado não possui registros do consumo energético de forma individualizada para o TH, é possível observar o perfil de consumo através do IBA, para o período de 16 dias, tempo em que a empresa realizou diversos testes de demanda, em que foram produzidos tubos de mesmas dimensões da que o estudo se refere. Foi utilizada a potência de funcionamento do motor para estimar o consumo médio energético do TH.

Tabela 4 – Perfil de consumo energético do motor elétrico do TH

Consumo Total(kWh)	Tempo Ventando (%)	Custo Total (R\$)
1015	70	385,7
927	68	352,26
900	64	342
925	64	351,5
927	70	352,26
1007	64	382,66
928	59	352,64
852	66	323,76
1001	67	380,38
929	65	353,02
942	67	357,96
859	64	326,42
861	68	327,18
1006	60	382,28
939	64	356,82
929	62	353,02
Média	934,19	354,99

Os dados da tabela 4 podem ser construídos analisando gráficos semelhantes ao 33. Todas as informações demonstradas representam o funcionamento de cerca de 8h do equipamento. Utilizando-se dos valores médios e realizando extração para 24h de funcionamento para 26 dias de trabalho, teríamos o seguinte padrão de consumo de energia elétrica.

Tabela 5 – Extração do consumo energético dos motores do TH

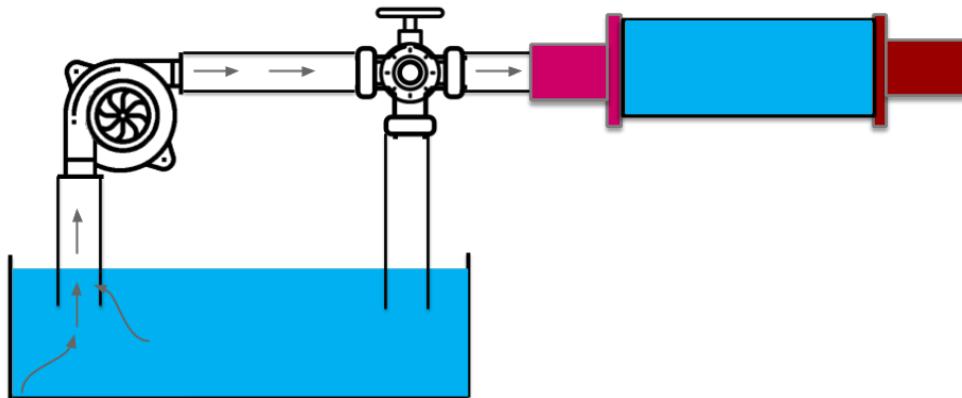
Total Dia(kWh)	Tempo Ventando (%)	Custo Total (R\$)	Custo Total Mês (R\$)
2802,56	65,13	1064,97	27689,31

Partindo da análise dos consumos históricos, vemos que em média, 65,13% do tempo a bomba apenas redireciona o fluxo para o tanque, indicando grande potencial de redução do consumo energético, como será melhor explorado na sequência.

No capítulo 3.1, foi descrito, em detalhes, o teste hidrostático. Para uma melhor visualização, vale a divisão do processo em duas etapas, enchimento e ventagem. Vale ressaltar que o objetivo do estudo está no funcionamento das bombas e não no resto do sistema que compõe o TH, como carros hidráulicos, sensores, e equipamentos adjacentes.

A primeira etapa é chamada de enchimento, onde o gasto energético é justificável, uma vez que seu consumo se dá em momentos em que de fato os tubos estão sendo testados.

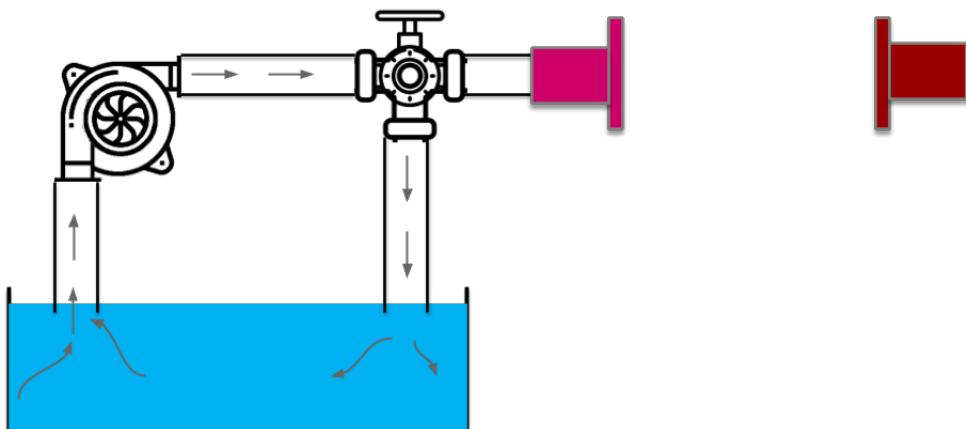
Figura 34 – Etapa de enchimento do teste hidrostático.



Fonte: Autor

A segunda etapa é chamada de ventagem, onde é possível explorar as possibilidades de redução, uma vez que se trata de uma fase de espera, na qual o fluxo de água que vai para o tubo é redirecionado para o próprio reservatório.

Figura 35 – Etapa de ventagem do teste hidrostático.



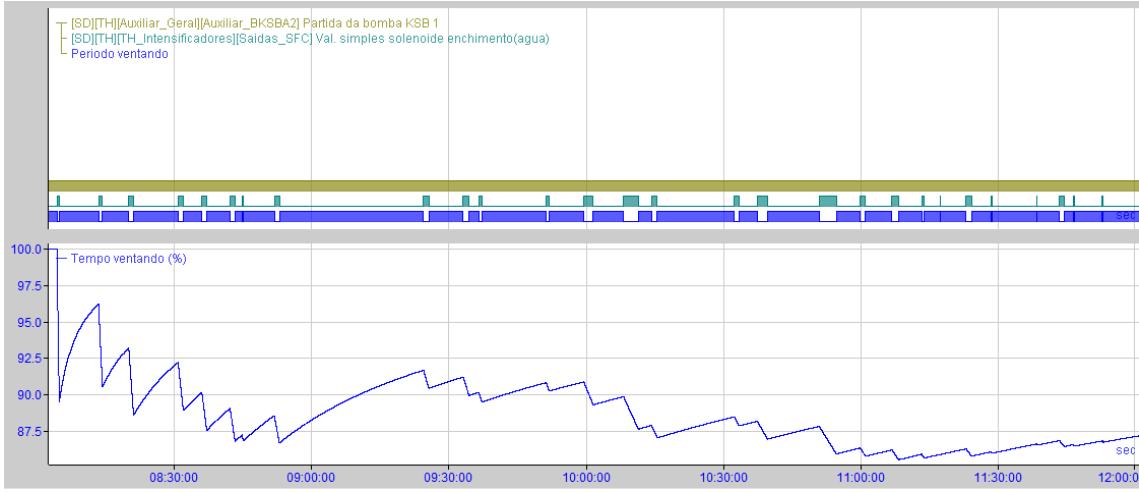
Fonte: Autor

Vale ressaltar que, os dados analisados nessa seção são de tubos de apenas uma dimensão, e que os números podem ser diferentes para cada especificação de tubos.

Para se identificar os problemas energéticos do status atual da instalação, foi feita uma análise sobre o ciclo de trabalho da unidade que realiza o teste hidrostático. O objetivo dessa primeira análise era verificar se em alguma etapa do ciclo de trabalho estava tendo uma ociosidade muito grande.

Essa análise está presente na figura 36 que mostra o gráfico gerado pelo iba Analyzer que utilizou dados captados pelo iba PDA.

Figura 36 – Análise do ciclo de trabalho da unidade que realiza o teste hidrostático.



Fonte: Autor

No gráfico 36 vale a explicação dos principais elementos que aparecem no mesmo. Na primeira parte do gráfico é mostrado o período de ativação de alguns elementos e na segunda parte do gráfico é possível ver o percentual de vezes que um desses elementos é selecionado.

Verificando mais a fundo a primeira parte, o elemento em marrom representa a partida da bomba, ou seja, se a mesma está ligada ou desligada. O elemento em verde-claro representa o acionamento da válvula que controla o enchimento dos tubos a serem testados, ou seja, quando ela é acionada existe tubo sendo testado e quando ela está desligada não está sendo realizado teste em nenhum tubo. E por fim, o elemento azul é uma variável, que foi construída para essa análise, que representa o tempo ventando, ou seja, o tempo realizando trabalho não útil feito pela planta. A fórmula para isso é mostrado na equação 3.1.

$$tempo_{ventando} = tempo_{bombaDesligada} - tempo_{realizandoTeste} \quad (3.1)$$

Verificando mais a fundo a segunda parte da figura 36, ela mostra para cada instante de tempo a representação da fase ventando sobre o total de tempo decorrido até ali, ou seja, quanto representa a fase ventando sobre o tempo total, essa equação é ilustrada na equação 3.2. Nessa visão é bem mais simples conseguir mensurar a duração de cada fase.

$$tempo_{ventando}(\%) = \frac{tempo_{bombaDesligada} - tempo_{realizandoTeste}}{tempo_{totalAnalizado}} \quad (3.2)$$

Pode se perceber na figura 36 que na amostra observada, o tempo realizando trabalho útil é a minoria, a grande maioria do tempo é despendida com a fase ventando do processo. Isso fica ainda mais exacerbado quando se nota que em nenhum período(hora)

analisado o percentual de tempo ventado é menor do que 85%, nem nos momentos de maior execução de testes. Isso evidencia que em momentos de pouca produtividade se gasta muito com o período de ventagem.

Além disso, esse é um comportamento que pode mudar dependendo das exigências dos projetos desenvolvidos pela empresa. Com isso, outro comportamento da etapa de ventagem se destaca. Os tubos que redirecionam o fluxo de água para os tanques têm diâmetro menor dos que os tubos que levam água diretamente para o teste, ou seja, a água passa por tubos mais estreitos na etapa de ventagem (trabalho não útil) do que na etapa de enchimento (trabalho útil). Isso faz com que a bomba tenha que fazer mais força na etapa de ventagem, aumentando assim sua corrente e em consequência sua potência. Logo, se chega a conclusão que devido a esse comportamento a fase de ventagem tem um custo por unidade de tempo maior que o período de enchimento, que será melhor explorado em capítulos posteriores.

Com isso, fica claro que para se diminuir os custos operacionais o foco tem que ser em deixar a etapa de ventagem mais eficiente possível.

Na empresa, são desenvolvidos tubos que atendem a uma gama bem grande de especificações, e essa diversificação tem uma relação na quantidade de tubos produzidos por hora. Em outras palavras, tubos maiores demoram mais tempo para serem produzidos, com isso, causam um espaçamento maior na hora do teste. Já tubos menores são produzidos de forma mais rápida e com isso tem uma etapa de teste com menor intervalo na entrada de cada tubo, podendo assim inviabilizar essa solução, que teria um menor custo para empresa.

Não foi levada em consideração a opção de desligar o motor durante o período de ventagem. A partida do motor poderia provocar queda de tensão na rede, o que poderia afetar demais equipamentos interligados. Outro fator importante seria a vida útil do motor e seus componentes, dado o grande número de acionamentos. Aliado a isso, há acoplado ao sistema cilindros pressurizadores que levam água aos motores e precisam dos motores trabalhando a uma potência suficiente para que continuem funcionando e lubrificando os mancais da bomba.

A segunda abordagem surgiu da observação tanto do comportamento quanto da arquitetura da unidade. Foi visto que a bomba mantinha sua rotação inalterada tanto durante a fase de ventagem quanto durante a fase de enchimento do tubo. Logo, o custo da energia para as duas fases é o mesmo, o que acarreta num custo de trabalho não útil maior do que o de trabalho útil, por conta da fase de ventagem, no geral, ser maior que a fase de enchimento. Essa foi a principal oportunidade encontrada. A velocidade quando a bomba estava ligada era a mesma, independente de qual etapa do ciclo estivesse. Logo, uma forma de se conseguir controlar a velocidade da bomba seria a instalação de um inversor de frequência, que permitiria uma faixa de velocidades adequadas para quaisquer

especificações de tubos.

Importante dizer que a frequência mínima a ser utilizada no motor seria de 30Hz. Tal especificação foi determinada devido às necessidades hidráulicas da instalação. Como mencionado anteriormente, a equipe de engenharia mecânica forneceu informações sobre a vazão necessária para garantir o pleno funcionamento dos cilindros pressurizadores durante a realização dos testes. Dado isso, não foi necessário realizar uma série de validações térmicas e de dados ao ciclo de vida do motor elétrico por se tratar de uma faixa de velocidade que não acarretaria em sobreaquecimento dos condutores.

3.2.3 Aumento da capacidade produtiva

De forma geral, a companhia sempre mede sua capacidade produtiva a fim de se negociar com os clientes os possíveis prazos, especificações, preços, realiza análise de demandas, impacto e uma infinidade de detalhes necessários para garantirem a entrega do produto da melhor forma possível. Dado isso, após levantamentos internos, foi evidenciado que um dos grandes gargalos para produção de tubos de 30"x0,5" estava no TH. Portanto, no estudo de eficiência energética, também foi incumbida a necessidade de garantir a produção de 27tubos/h do equipamento.

Dado que as análises hidráulicas foram realizadas por uma equipe paralela, seguem algumas alternativas levantadas junto a KSB, fabricante de bombas centrífugas:

1. Alterar a bomba existente, inserindo um estágio a mais e aumentando o diâmetro do rotor

- Pontos Positivos:

- Não seria necessário comprar uma bomba nova, mas sim recondicionar as existentes;
- Custo da bomba/recondicionamento é menor do que quando comparado com uma bomba nova;
- Atende às necessidades de vazão, aumentando de 550 para $820m^3/h$

- Pontos Negativos:

- Comprimento da bomba aumenta, podendo gerar interferência na montagem, o que pode ser resolvido retrabalhando o comprimento do eixo;
- Motor de acionamento passaria de 175cv para 350cv;
- Necessária nova peça de estoque, não mantendo intercambialidade com as demais plantas da empresa.
- Possíveis perdas em eficiência energética.

2. Utilização de duas bombas em paralelo

- Pontos Positivos:
 - Atende às necessidades de vazão, indo de 550 para $858m^3/h$
 - Segunda bomba com motor de 175cv já instalada.
- Pontos Negativos:
 - Necessidade de compra de uma nova bomba reserva.
 - Necessidade de redimensionamento da edificação em que o reservatório está instalado.

3. Substituir a bomba atual por uma de modelo superior

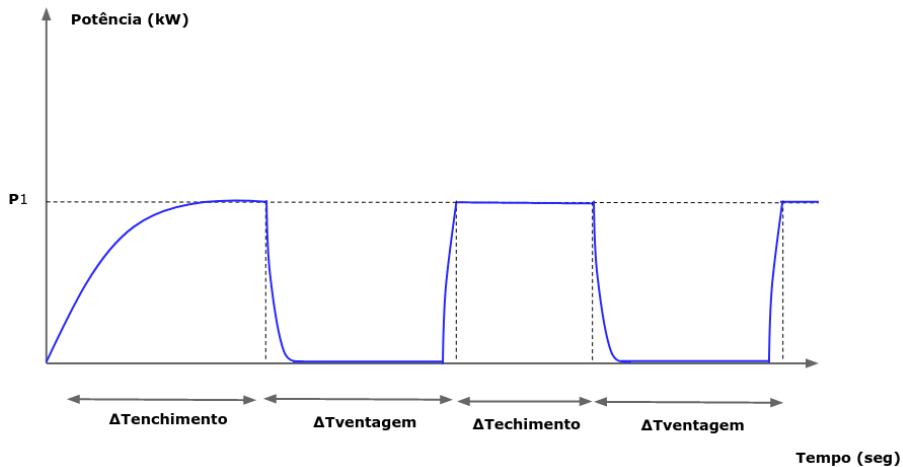
- Pontos Positivos:
 - Atende às necessidades de vazão, indo de 550 para $900m^3/h$
 - O motor, quando comparado com a opção 1, teria 300cv e não 350cv
 - Seria utilizada uma bomba comercial, padrão de catálogo, e não seria uma bomba exclusiva da companhia.
- Pontos Negativos:
 - Virtualmente mais caro que a opção 1, visto que seriam necessários maiores ajustes na instalação atual.
 - Necessária nova peça de estoque, não mantendo intercambiabilidade com as demais plantas de empresa.
 - Possíveis perdas em eficiência energética.

3.2.4 Diminuição do custo operacional

Umas das oportunidades encontradas de economia foi na etapa de ventagem, já que na mesma é realizado apenas o redirecionamento do fluxo para o tanque e não um enchimento de um tubo para testes.

Como não é realizado nenhum trabalho útil na etapa de ventagem, o comportamento ideal seria que não fosse gasto energia nessa etapa também. A figura 37 ilustra o que seria o comportamento ideal da etapa de ventagem.

Figura 37 – Comportamento ideal da TH



Fonte: Autor

Para conseguir alcançar o comportamento ideal, ilustrado na figura 37, seria necessário desligar os motores durante a etapa de ventagem. Porém, isso não é possível, pois na planta há a presença de cilindros pressurizadores que são responsáveis por fazer com que o fluido dentro do tubo chegue a pressões especificadas para cada teste. Com isso, para o funcionamento adequado dos mesmos é necessária a presença de água, o que não aconteceria caso a bomba fosse desligada. Por isso, esse comportamento foi descartado tendo em vista que não poderia ser alcançado por limitações da própria planta.

Logo, uma das formas de se obter uma melhor eficiência nessa etapa seria através do uso de um inversor de frequência para conseguir controlar a velocidade do motor em cada etapa. Em conversas com a equipe de engenharia mecânica foi especificado que o motor deveria diminuir sua velocidade de rotação, no máximo, até metade da velocidade nominal, para garantir o pleno funcionamento dos cilindros pressurizadores que necessitam de um fluxo de água constante.

Como um dos objetivos principais é a redução dos custos operacionais e visando um economia máxima na etapa de ventagem, a velocidade nessa etapa foi escolhida para ser a mínima possível, que seria a metade da velocidade nominal.

Para se descobrir a frequência a ser ajustada no inversor foi utilizada a fórmula 2.1 para ter a expressão da velocidade nominal.

$$n_{nominal} = \frac{120 \times f_{nominal}(1 - s)}{p} = \frac{120 \times 60(1 - s)}{4} \quad (3.3)$$

Como se deseja ter na etapa de ventagem uma velocidade que seja metade da velocidade nominal, então têm-se:

$$n_{ventagem} = \frac{n_{nominal}}{2} = \frac{\frac{120 \times 60(1 - s)}{4}}{2} = \frac{120 \times 30(1 - s)}{4} \quad (3.4)$$

Logo, pela fórmula 3.4 fica calculado que a frequência a ser configurada no inversor é de 30 Hz.

Utilizando as leis da variação, que relacionam parâmetros como vazão, potência e altura de queda em função da variação da velocidade de rotação, é possível calcular o quanto seria a redução de potência gerada pela redução da velocidade nominal [38]. A fórmula 3.5 mostra uma dessas leis relacionando potência a variação da velocidade.

$$P_2 = P_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 \quad (3.5)$$

A fórmula 3.5 é uma aproximação, que considera igualdade de rendimento com a variação da velocidade.

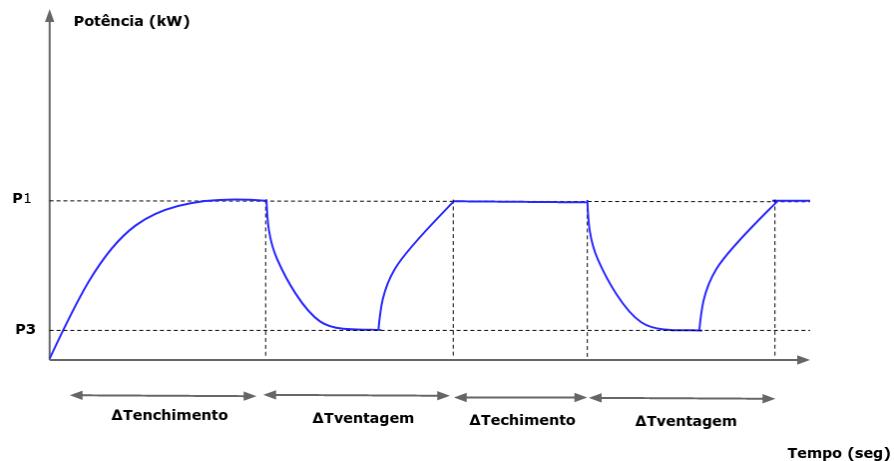
Como a velocidade $n_2 = 0,5n_1$, têm-se:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{0,5n_1}{n_1} \right)^3 = 0,125P_1 \quad (3.6)$$

Com isso, é esperado uma redução de 87,5% na potência, com a utilização do inversor, em comparação com a potência utilizada sem o uso do inversor.

Com base no que foi discutido é necessário então deixar o motor ligado na etapa de ventagem porém consumindo uma potência menor do que consome no cenário atual, assim conseguindo alcançar o objetivo que é reduzir os custos da planta. A figura 38 ilustra o comportamento que se deseja alcançar.

Figura 38 – Comportamento escolhido da TH



Fonte: Autor

4 Resultados e Discussões

4.1 Cenários

Para o teste hidrostático foram analisados 4 cenários, com o intuito de se obter o cenário mais vantajoso, levando em conta a premissas levantadas no inicio do projeto: ganho de eficiência operacional e redução do custo de produção.

Os quatro cenários estão listados na tabela 6.

Tabela 6 – Cenários analisados

Cenários	Descrição
1	Atual 175cv
2	Duas bombas 175cv em paralelo
3	Bomba de 350cv
4	Bomba de 300cv

A justificativa para cada um dos cenários está listada abaixo:

- Cenário 1 - O cenário 1 é o atual, usado como base de comparação para os demais cenários propostos.
- Cenário 2 - Se refere à utilização do motor reserva, também de 175cv para realização das operações com o funcionamento em paralelo.
- Cenário 3 - Adição de um estágio na bomba, de forma a aumentar a vazão com a utilização de um motor de 350cv
- Cenário 4 - Opção de menor potência entre os cenários propostos para o aumento de produtividade. Envolve a troca da bomba atual.

Como há uma limitação de vazão devido a válvula de 10.000 psi presente no circuito hidráulico, outros cenários com bombas maiores não foram analisados.

Em adição, foi levado em consideração o uso ou não de inversores de frequência em cada um destes cenários. A ideia de se considerar o uso de inversor para esses casos é verificar a possibilidade de reduzir o custo da fase de ventagem, controlando a velocidade de rotação do motor.

Considerações utilizadas nas análises estão presentes na tabela 7.

Tabela 7 – Dados utilizados no projeto

Dados	Valor
kWh (R\$)	0,38
Horas/dia	24
Dias/mês	26
Tubos/hora(atual)	19
Tubos/hora(demandado)	27

Podemos observar, na tabela 7, que foi adotada a produção de 27 tubos por hora, a fim de atender a demanda prevista pela empresa para os próximos projetos.

Dito isso, o objetivo é encontrar a configuração que produza, ao menos, 27 tubos por hora, com o menor custo operacional.

4.2 Capacidade dos cenários

Primeiramente, foram levantados alguns dados sobre as características dos 4 cenários e a performance da planta para cada um deles. Os dados de potência e vazão foram fornecidos pela fabricante das bombas. Já os dados de performance da planta, como o tempo de ciclo, foram obtidos através das cronoanálises dos processos. O compilado desses dados está presente na tabela 8.

Tabela 8 – Métricas do sistema para cada um dos cenários propostos

	CENÁRIO			
	1	2	3	4
Potência nominal (cv)	175,000	350,000	350,000	300,000
Potência nominal (kW)	128,712	257,424	257,424	220,650
Vazão nominal (m^3/h)	550,000	858,000	820,000	900,000
Tempo de ciclo (h)	0,054	0,035	0,033	0,030
Tempo de enchimento ciclo (h)	0,027	0,020	0,019	0,017
Tempo de ventagem ciclo (h)	0,027	0,015	0,014	0,013
Quantidade ciclos/h	18,450	27,000	27,000	27,000
Tempo enchimento (h)	0,491	0,540	0,513	0,459
Tempo de ventagem (h)	0,502	0,405	0,378	0,351

Através das relações matemáticas a seguir, é possível ilustrar, de forma quantitativa, como os dados acima foram calculados.

$$N_{ciclos/h} = \frac{1}{T_{ciclo}} \quad (4.1)$$

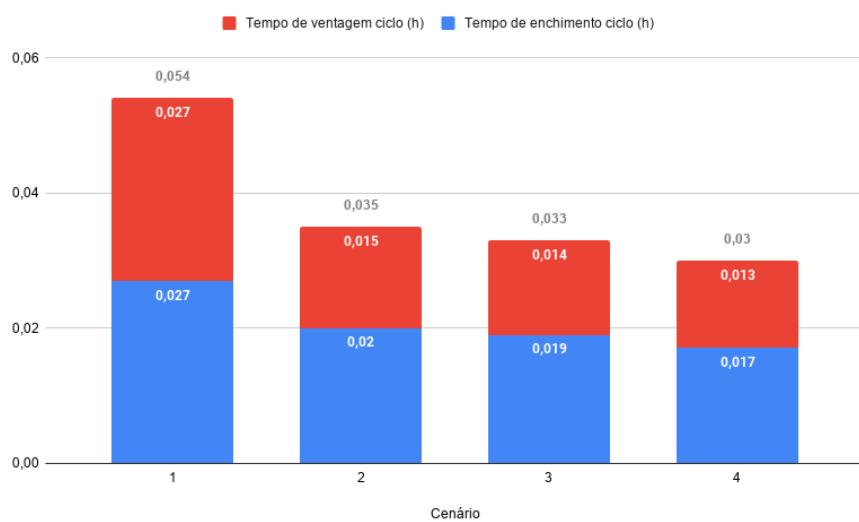
$$T_{ciclo/hora} = T_{ciclo} \times N_{ciclos/h} \quad (4.2)$$

$$T_{enchimento} = T_{enchimento/ciclo} \times N_{ciclos/h} \quad (4.3)$$

$$T_{ventagem} = T_{ventagem/ciclo} \times N_{ciclos/h} \quad (4.4)$$

Com os dados presentes na tabela 8 é possível fazer uma comparação entre os cenários. A figura 39 ilustra a divisão do tempo de ciclo entre a etapa de ventagem e enchimento para cada um dos cenários.

Figura 39 – Comparação do tempo de ciclo para cada cenário.



Fonte: Autor

É valido ressaltar que houve uma diminuição do tempo de ciclo dos cenário 2,3 e 4 em relação ao cenário atual em decorrência de todas as bombas terem uma potência maior que o mesmo.

É possível notar que o cenário 4 possui o menor tempo de ciclo e com isso o menor tempo de ventagem também. Logo, em uma etapa em que a energia ali empregada é gasta para não realizar teste em tubo algum, o cenário 4 consegue gastar menos tempo nessa etapa e, por conseguinte, ter um custo menor na mesma.

4.3 Custos Gerais

Como já se sabe a configuração e a capacidade do sistema para cada um dos cenários, agora serão analisados os custos operacionais. As tabelas 9 e 10 mostram os custos de cada um dos cenários para quando não há e quando há utilização do inversor, no sistema. Vale ressaltar, que para alguns cálculos realizados nas tabelas supracitadas foram utilizadas informações contidas nas tabelas 7 e 8.

4.3.1 Sem inversor

A tabela 9 traz um panorama geral do consumo energético e do custo para cada cenário sem o uso do inversor. Assim como os dados da tabela 8, na tabela 9, para os cenários 1, 2 e 4, foram realizados testes na planta e os dados de potência foram registrados, já para o cenário 3 foi feita uma estimativa com base no cenário 2 devido as suas características serem bem próximas.

Tabela 9 – Custo gerais dos cenários sem o uso de inversor

	CENÁRIO			
	1	2	3	4
Potência no enchimento (kW)	114,689	229,378	229,378	187,260
Potência na ventagem(kW)	135,303	270,606	270,606	227,045
Energia útil ciclo (kWh)	3,051	4,588	4,358	3,183
Energia perdida ciclo (kWh)	3,680	4,059	3,788	2,952
Energia útil por hora (kWh)	56,286	123,864	117,671	85,953
Energia perdida por hora (kWh)	67,901	109,596	102,289	79,693
Custo total ciclo(R\$)	R\$ 2,56	R\$ 3,29	R\$ 3,10	R\$ 2,33
Custo total hora (R\$)	R\$ 47,19	R\$ 88,71	R\$ 83,58	R\$ 62,95
Custo total dia (R\$)	R\$ 1.132,58	R\$ 2.129,15	R\$ 2.006,04	R\$ 1.510,69
Custo total mês (R\$)	R\$ 29.447,08	R\$ 55.357,94	R\$ 52.156,92	R\$ 39.277,85
Custo útil ciclo (R\$)	R\$ 1,16	R\$ 1,74	R\$ 1,66	R\$ 1,21
Custo útil hora (R\$)	R\$ 21,39	R\$ 47,07	R\$ 44,71	R\$ 32,66
Custo útil dia (R\$)	R\$ 513,33	R\$ 1.129,64	R\$ 1.073,16	R\$ 783,89
Custo útil mês (R\$)	R\$ 13.346,51	R\$ 29.370,65	R\$ 27.902,12	R\$ 20.381,07
Custo perdido ciclo(R\$)	R\$ 1,40	R\$ 1,54	R\$ 1,44	R\$ 1,12
Custo perdido hora (R\$)	R\$ 25,80	R\$ 41,65	R\$ 38,87	R\$ 30,28
Custo perdido dia (R\$)	R\$ 619,25	R\$ 999,51	R\$ 932,88	R\$ 726,80
Custo perdido mês (R\$)	R\$ 16.100,57	R\$ 25.987,29	R\$ 24.254,81	R\$ 18.896,78

As fórmulas utilizadas no cálculo dos campos das tabelas 9 podem ser observados na sequência:

$$E_{util/ciclo} = P_{enchimento} \times T_{enchimento/ciclo} \quad (4.5)$$

$$E_{perdida/ciclo} = P_{ventagem} \times T_{ventagem/ciclo} \quad (4.6)$$

$$E_{util/hora} = E_{util/ciclo} \times N_{ciclos/hora} \quad (4.7)$$

$$E_{perdida/hora} = E_{perdida/ciclo} \times N_{ciclos/hora} \quad (4.8)$$

$$C_{total/ciclo} = (E_{util/ciclo} + E_{perdida/ciclo}) \times C_{kWh} \quad (4.9)$$

$$C_{total/hora} = (E_{util/hora} + E_{perdida/hora}) \times C_{kWh} \quad (4.10)$$

$$C_{total/dia} = C_{total/hora} \times horas/dia \quad (4.11)$$

$$C_{total/mes} = C_{total/dia} \times dia/mes \quad (4.12)$$

E = Energia (kWh)

P = Potência (kW)

C = Custo (R\$)

N = Quantidade de ciclos

4.3.1.1 Análise do aumento da potência na etapa de ventagem

Na tabela 9 nota-se que a potência de ventagem é maior que a potência de enchimento.

Isso pode ser explicado pela característica do circuito hidráulico do sistema de bombeamento, uma vez que tal estrutura possui diferentes medidas para as etapas de enchimento e ventagem. pelas perdas existentes no escoamento do fluído dentro da tubulação. Essas perdas são divididas em duas categorias [39]:

- Perdas de carga distribuídas ou Perdas maiores (h_l): A parede do tubo retilíneo que conduz o fluido causa uma perda de pressão que é distribuída ao longo de toda a extensão do tubo.

- Perdas de carga localizadas ou Perdas menores (h_{lm}): São causadas pelas diversas peças utilizadas na tubulação para o controle do fluxo de escoamento, como cotovelos, válvulas, curvas de gomo, entre outras.

Para se determinar a perda de carga total de um sistema basta somar as perdas de carga distribuídas com as perdas de carga localizadas.

As perdas maiores podem ser expressas por meio da equação de perda de carga de Darcy-Weisbach [40].

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (4.13)$$

Já as perdas menores podem ser escritas de acordo com a equação 4.14.

$$h_{lm} = K \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (4.14)$$

f = Coeficiente de perda de carga (é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa)

K = Coeficiente de perda localizada

L = Comprimento do tubo

D = Diâmetro do tubo

\bar{V} = Velocidade média do fluído

O coeficiente K pode ser determinado por cada peça utilizada na tubulação, um exemplo é a imagem 40 que traz o coeficiente K para alguns formatos de entrada de tubos.

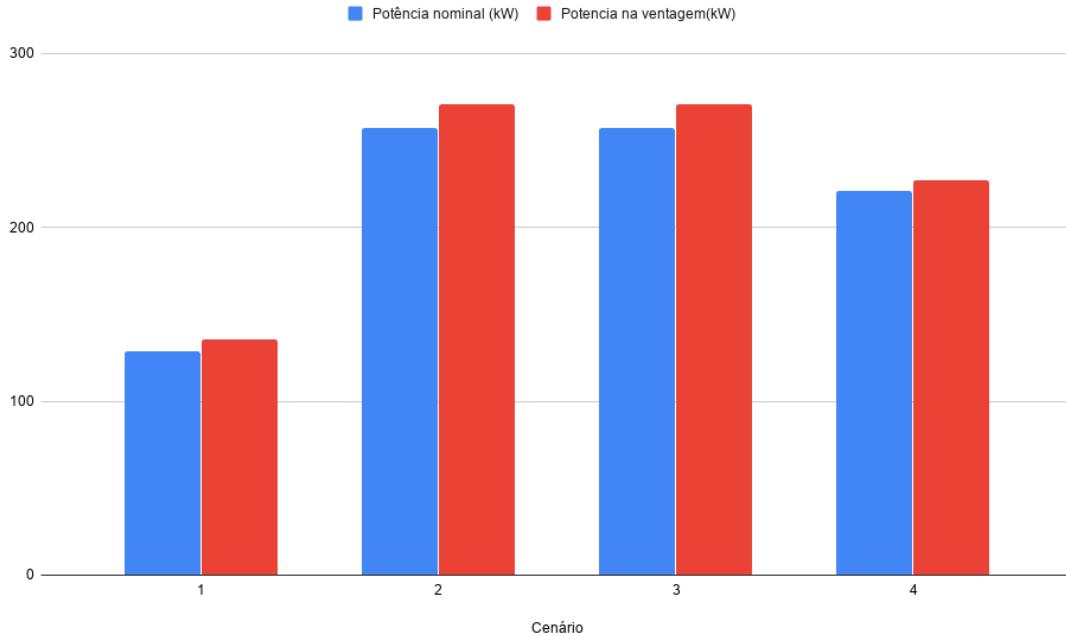
Figura 40 – Coeficientes de Perda localizada para Entradas de Tubos

Tipo de Entrada	Coeficiente de Perda Localizada, K^a			
Reentrante	 0,78			
Borda-viva	 0,5			
Arredondado	 r/D	0,02	0,06	$\geq 0,15$
	K	0,28	0,15	0,04

Fonte: Introdução À Mecânica Dos Fluídos [40], p.235

Comparando os dados de potência nominal de cada um dos cenários presentes na tabela 8 observa-se que a potência de ventagem supera a potência nominal em até 5% em todos os cenários. A figura 41 ilustra esse comportamento.

Figura 41 – Comparaçāo entre a potēcia nominal e de ventagem



Pelo esquemático presente nas figuras 34 e 35, nota-se que o caminho que o fluído tem que percorrer quando está na etapa de ventagem é diferente de quando está na etapa de enchimento. Na etapa de ventagem, além desse caminho ser maior e conter mais cotovelos e válvulas, ainda tem tubos de diâmetro menor do que os tubos que levam água diretamente para o teste. Com isso, há um aumento tanto das perdas de carga distribuídas quanto de carga localizada, o que gera um aumento geral das perdas na tubulação, implicando em um aumento da corrente no motor para compensar essa aumento das perdas. Logo, com o aumento da corrente há um aumento da potêcia em relação à etapa de enchimento, o que é mostrado na tabela 9.

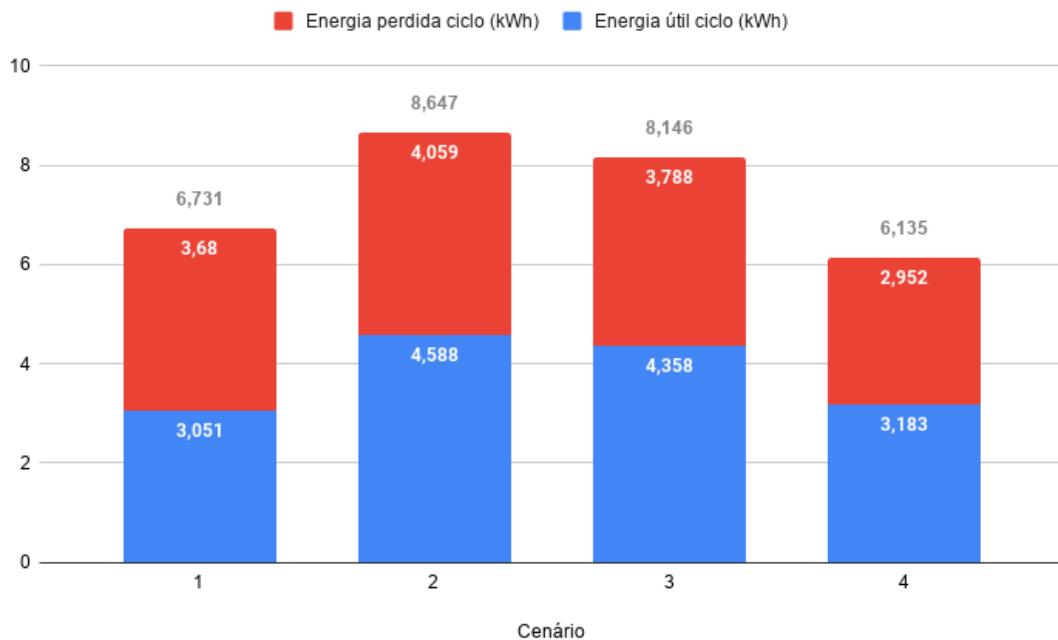
Dado que a etapa de ventagem possui o consumo de potêcia 5% acima da nominal, é possível inferir que o motor pode ter sua vida útil reduzida, uma vez que, operando com sobrecorrente, há sobreaquecimento, que tem por consequêcia a degradação dos condutores bem como dos demais elementos acoplados ao circuito.

4.3.1.2 Análise geral

Os cenário 2, 3 e 4 atendem o objetivo de aumento da capacidade produtiva, como pode ser verificado na tabela 8. Portanto, as análises a seguir seguirão focadas no gasto energético, a fim de se determinar possíveis soluções em eficiência energética.

A figura 42 traz a comparação entre a energia útil e perdida por ciclo para cada um dos cenários.

Figura 42 – Energia por ciclo por cenário, sem inversor.

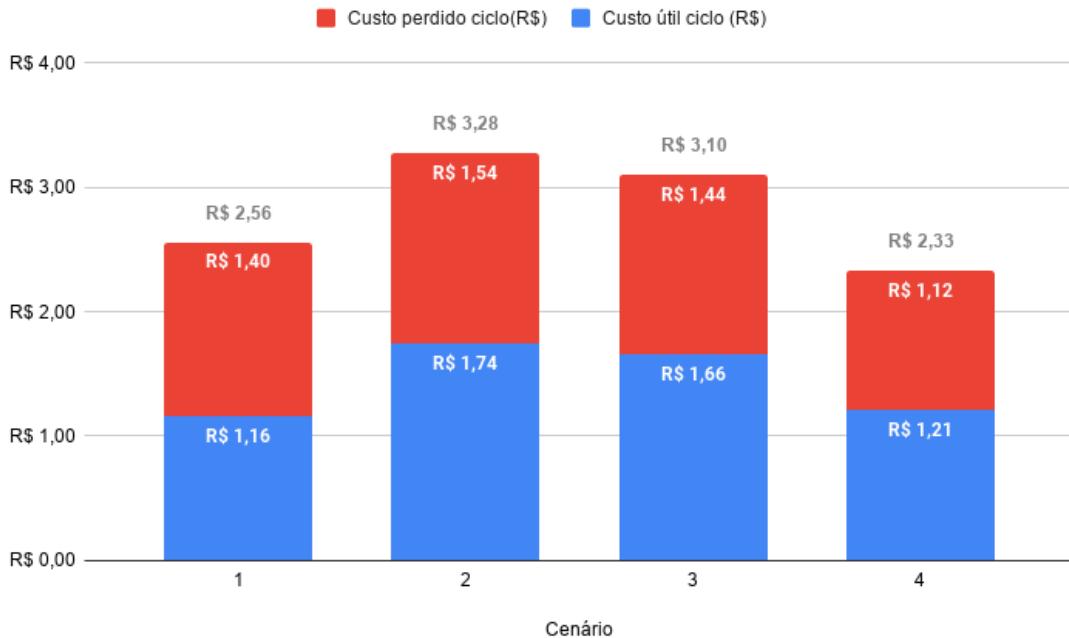


Fonte: Autor

Analizando os dados é possível notar que o cenário 1 usa menos energia na etapa de enchimento do que os outros cenários, e o cenário 4 é o que usa menor energia na etapa de ventagem. No geral, somando a energia gasta nas duas etapas, o cenário 4 é o que tem menor uso de energia por ciclo, sendo capaz de produzir a demanda esperada de 27 tubos por hora.

Isso se reflete no custo por ciclo, que é mostrado na figura 43, utilizada para dar visibilidade no montante financeiro gerado pelos cenários.

Figura 43 – Custo por ciclo por cenário, sem inversor.



Fonte: Autor

Como já projetado pela figura 42, o cenário 4 é o que tem o menor custo por ciclo já que é o que gasta menos por ciclo também. Essa economia em relação ao cenário atual é cerca de 9%, ou seja, com o cenário 4 há um aumento de produção em comparação ao cenário atual, de 18,45 tubos para 27 tubos por hora, e além disso, estaria se economizando cerca de 9%. Em comparação, com os cenários 2 e 3 o cenário 4 tem um custo cerca de 29% e 25%, respectivamente, menor. Com isso, o cenário 4 consegue entregar tanto um aumento de produção quanto um custo por ciclo menor que os cenários propostos, cumprindo assim os principais objetivos determinados para este projeto.

4.3.2 Com inversor

A tabela 10 traz um panorama geral dos gastos de energia e custo para cada cenário com o uso do inversor. Os dados da potência no enchimento permanecem os mesmos haja vista que o inversor não irá alterar o comportamento desta etapa, já a potência na ventagem irá sofrer mudanças pela atuação do inversor, e essas mudanças foram estimadas com base nas leis da variação explicada na seção 3.2.4.

Tabela 10 – Custo gerais dos cenários com o uso de inversor.

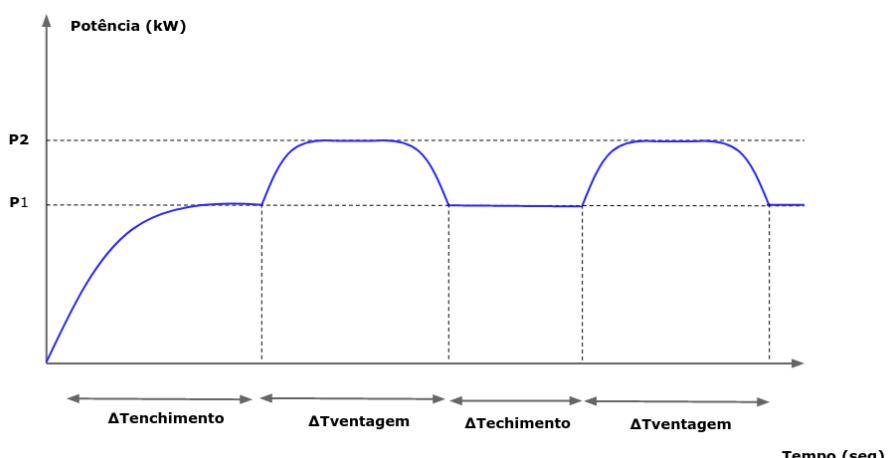
	CENÁRIO			
	1	2	3	4
Potência no enchimento (kW)	114,689	229,378	229,378	187,260
Potência na ventagem(kW)	16,913	33,826	33,826	28,381
Energia útil ciclo (kWh)	3,051	4,588	4,358	3,183
Energia perdida ciclo (kWh)	0,460	0,507	0,474	0,369
Energia útil por hora (kWh)	56,286	123,864	117,671	85,953
Energia perdida por hora (kWh)	8,488	13,699	12,786	9,962
Custo total ciclo(R\$)	R\$ 1,33	R\$ 1,94	R\$ 1,84	R\$ 1,35
Custo total hora (R\$)	R\$ 24,61	R\$ 52,27	R\$ 49,57	R\$ 36,45
Custo total dia (R\$)	R\$ 590,73	R\$ 1.254,58	R\$ 1.189,77	R\$ 874,74
Custo total mês (R\$)	R\$ 15.359,08	R\$ 32.619,06	R\$ 30.933,97	R\$ 22.743,17
Custo útil ciclo (R\$)	R\$ 1,16	R\$ 1,74	R\$ 1,66	R\$ 1,21
Custo útil hora (R\$)	R\$ 21,39	R\$ 47,07	R\$ 44,71	R\$ 32,66
Custo útil dia (R\$)	R\$ 513,33	R\$ 1.129,64	R\$ 1.073,16	R\$ 783,89
Custo útil mês (R\$)	R\$ 13.346,51	R\$ 29.370,65	R\$ 27.902,12	R\$ 20.381,07
Custo perdido ciclo(R\$)	R\$ 0,17	R\$ 0,19	R\$ 0,18	R\$ 0,14
Custo perdido hora (R\$)	R\$ 3,23	R\$ 5,21	R\$ 4,86	R\$ 3,79
Custo perdido dia (R\$)	R\$ 77,41	R\$ 124,94	R\$ 116,61	R\$ 90,85
Custo perdido mês (R\$)	R\$ 2.012,57	R\$ 3.248,41	R\$ 3.031,85	R\$ 2.362,10

Vale lembrar que os campos da tabela 10 foram calculados de acordo com as fórmulas 4.5 a 4.12.

4.3.2.1 Análise do efeito do inversor no sistema

Com os dados presentes na tabela 9, é possível verificar que a potência na ventagem é maior que a potência no enchimento e assim traçar o comportamento atual da planta, que é ilustrado na figura 44.

Figura 44 – Comportamento atual da TH



Fonte: Autor

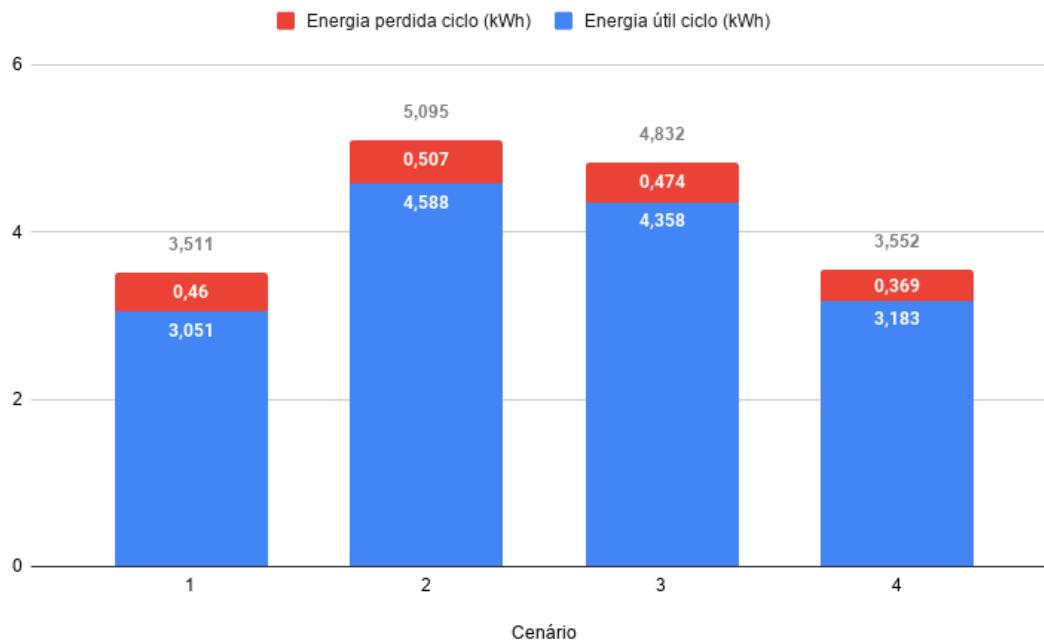
Como já explicado na seção 3.2.4 a estimativa feita é que seja gerada uma diminuição de 87,5% da potência na ventagem, com a redução da velocidade de rotação do motor nesta etapa pela metade, e durante a etapa de enchimento o inversor seja mantido em 60 Hz, assim mantendo a mesma potência com ou sem o uso do inversor. Logo o sistema passa a se comportar como a figura 38. Os dados presentes na tabela 10 trazem uma visão mais quantitativa da figura 38, permitindo assim que seja possível calcular a viabilidade da solução com o inversor.

4.3.2.2 Análise geral

Como observado na comparação da potência na ventagem entre as tabelas 9 e 10 é notado que há uma queda expressiva quando se usa o inversor. Outro ponto a se ressaltar é que com a redução da potência na ventagem nenhum dos cenários precisa operar acima da potência nominal dos seus respectivos motores.

A figura 45 traz a comparação entre a energias útil e perdida por ciclo, onde é possível notar que a energia perdida por ciclo teve uma redução considerável.

Figura 45 – Energia por ciclo por cenário, com inversor.



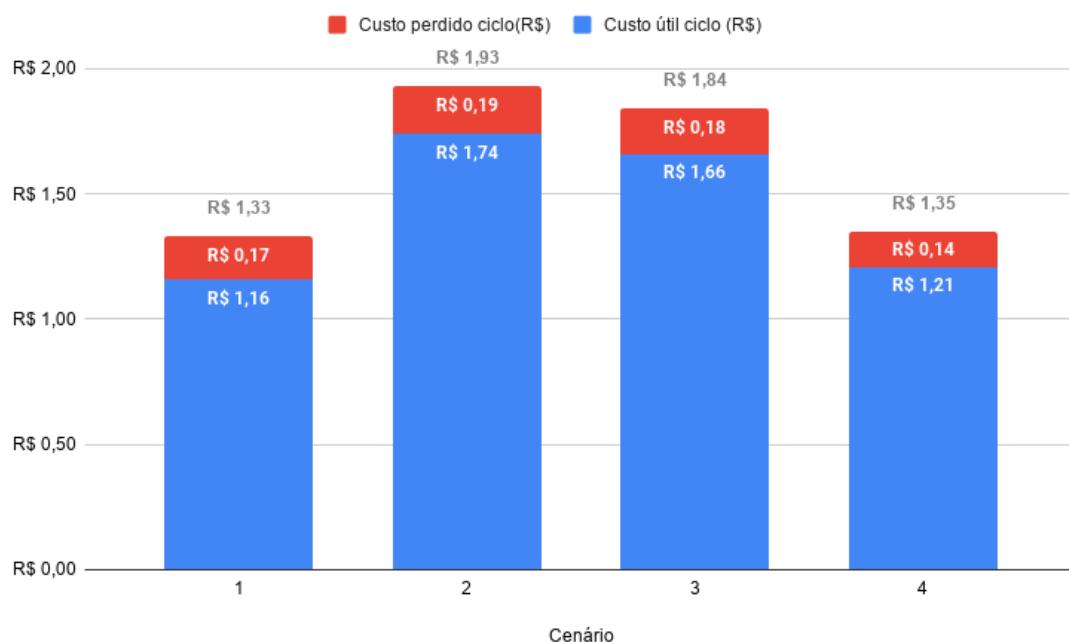
Fonte: Autor

Enquanto antes da implantação do inversor a etapa ventagem representava, em média, mais de 50% do total de energia gasta por ciclo em alguns casos, com a instalação do inversor esse custo diminuiu em 5 vezes, para cerca de 10% da energia total gasta por ciclo.

O cenário 1 agora tem a menor energia total gasta por ciclo, enquanto antes era o cenário 4. Isso se dá pelo cenário 1 ser o que usa menos energia útil por ciclo, e como a mesma foi mantida constante entre os cenários sem e com inversor, a redução da energia perdida permitiu com que o cenário 1 chegasse nesse número.

Isso se reflete no custo por ciclo que são todos menores em comparação aos dados sem o uso do inversor. A figura 46 ilustra bem essa diferença.

Figura 46 – Custo por ciclo por cenário, com inversor.



Fonte: Autor

Dos cenários observados o cenário 1 é o que teria menor uso de energia por ciclo, porém, não sendo capaz de atingir o objetivo relacionado a produtividade, produzindo apenas 18,45 tubos/hora em comparação aos 27 necessários. Logo, o cenário que tem melhor projeção de gasto de energia é o cenário 4, que consegue entregar a produção necessária para o projeto, conta com o menor uso de energia na etapa de ventagem, além de ter um custo total 30% menor em comparação ao cenário 2 e de 27% menor em comparação ao cenário 3.

4.4 Escolha do cenário

Como foi mostrado nas análises dos cenários, com ou sem o uso do inversor, o cenário que conseguiu cumprir os objetivos do projeto de forma completa, foi o cenário 4 em ambos os casos, como é possível observar na figura 47:

Figura 47 – Análise de fatores para a escolha do cenário

Cenário	Instalação	Desempenho	Economia	
2	✗	✗	+	✓ Excelente
3	✗	+	+	⊕ Bom
4	✓	✓	✓	✗ Ruim

Fonte: Autor

O cenário 2 não seria possível de se viabilizar, uma vez que não se teria motores reserva para que fosse garantido o funcionamento do sistema em caso de imprevistos. Outro ponto, é que por se tratar de um motor antigo, não seria possível, sem reduzir a vida útil, a utilização de inversores de frequência.

Para o cenário 3, foi verificado que existem limitações da edificação em decorrência no tamanho e peso do motor de 350cv.

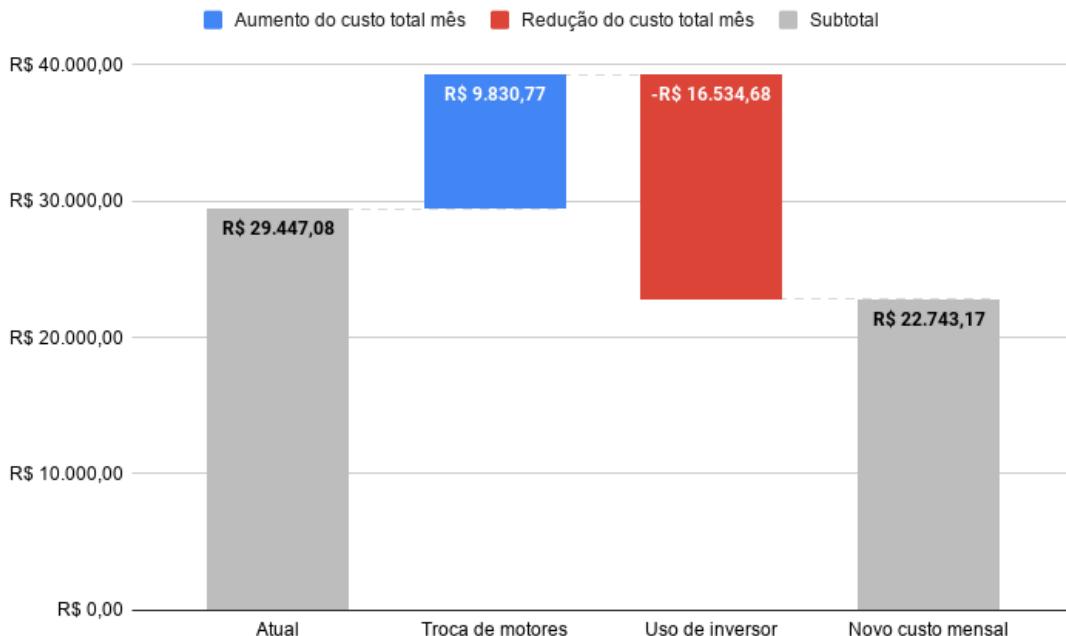
O cenário 4 fornece uma economia de até 30% em comparação aos cenários 2 e 3, além de possibilitar maior capacidade produtiva, caso seja necessário o aumento da produção. Por conta dos pontos elencados anteriormente, foi realizada a análise econômica para a sua instalação.

4.5 Análise de viabilidade econômica

Será levado em conta, para essa análise de viabilidade o *payback* simples, que é um indicador financeiro que revela o tempo necessário para recuperar o capital empregado, ou seja, o prazo de retorno do investimento [41]. Logo, considerando que um investimento terá que ser feito na planta, o cálculo tem como objetivo determinar quanto tempo os custos se pagariam apenas com a economia que será feita com as melhorias. Outro ponto a se ressaltar é que esse indicador é simples de calcular o que permite uma aplicação mais fácil do mesmo.

A figura 48 mostra o quanto cada uma das mudanças do cenário 4 impactam no custo total mensal, em comparação com o cenário atual.

Figura 48 – Visualização do impacto econômico de cada mudança sugerida pelo cenário 4 em comparação com o cenário atual



Fonte: Autor

É possível notar que a troca do motor resulta em um aumento de quase R\$ 10.000,00 no preço pago por mês na energia. Em contrapartida, o uso do inversor reduz em mais de R\$ 16.000,00 o preço da energia, o que mostra o tamanho da oportunidade presente na etapa de ventagem.

Para o levantamento dos custos de implantação, foram consultadas as fabricantes do motor e do inversor e uma empresa terceira para realizar a instalação dos componentes. Vale ressaltar, que a empresa exige que todo motor tenha um reserva, com isso, os valores presentes na tabela 11 correspondem à compra e instalação de 2 motores e 2 inversores.

Tabela 11 – Custos de implantação do cenário 4

Motor(R\$)	R\$ 239.684,70
Inversor (R\$)	R\$ 83.034,54
Materiais (R\$)	R\$ 119.856,89
Instalação (R\$)	R\$ 25.000,00
Investimento (R\$)	R\$ 467.576,13

Para o cálculo da economia que seria gerada com essa instalação, foi utilizado como base a diferença entre o valor atual gasto mensalmente na planta com o valor estimado que será gasto mensalmente com a aplicação da solução. A tabela 12 compila esses dados.

Tabela 12 – Economia gerada pelo cenário 4

Custo atual por mês	R\$ 29.447,08
Custo estimado por mês	R\$ 22.743,17
Economia	R\$ 6.703,91

A tabela 13 traz uma visão geral do investimento necessário para aplicar a solução, assim como o tempo em que ela se paga, com isso, mostrando o *payback* simples do cenário 4.

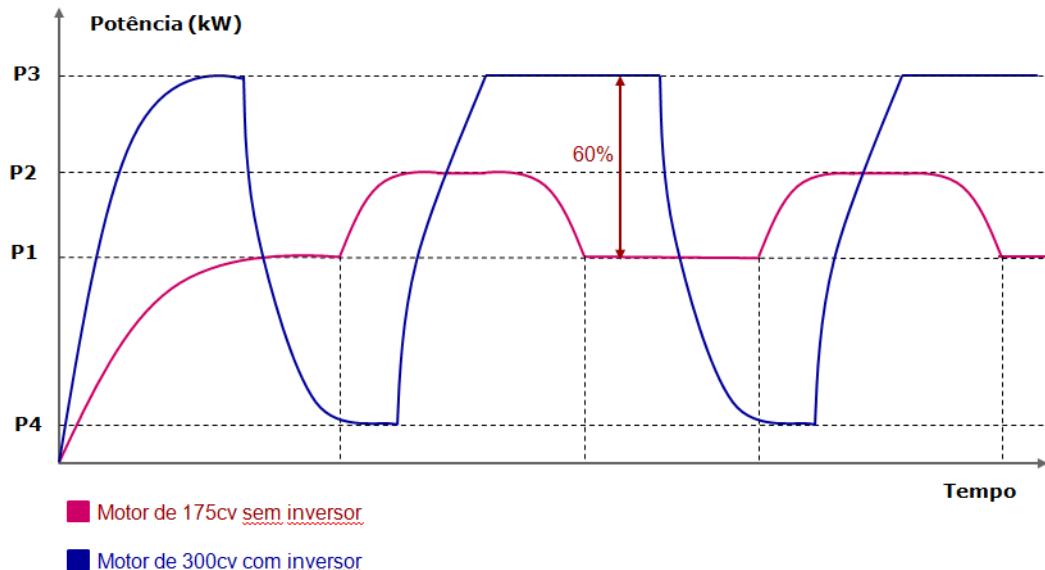
Tabela 13 – Payback simples do cenário 4

Motor(R\$)	R\$ 239.684,70
Inversor (R\$)	R\$ 83.034,54
Materiais (R\$)	R\$ 119.856,89
Instalação (R\$)	R\$ 25.000,00
Investimento (R\$)	R\$ 467.576,13
Economia/mês (R\$)	R\$ 6.703,91
Retorno (mês)	69,75
Payback (ano)	5,81

Tendo em vista o *payback* de 5 anos e 10 meses mostrado na tabela 13 e considerando que irá se aumentar a produção da planta, mesmo assim o investimento irá se pagar apenas com a economia advinda da etapa de ventagem. Como, em geral, não é de se esperar que um aumento de produção se pague apenas com economia energética, a solução 4 se mostra eficaz. Além disso, com as manutenções adequadas e armazenamento em local adequado, que são bem plausíveis de considerar que serão feitas tendo em vista a infraestrutura da empresa, os motores e inversores podem ter uma vida útil maior do que o tempo necessário para se realizar o *payback* [42].

Dito isso, o novo perfil de trabalho em comparação com o cenário atual é descrito pela figura 49. Nele é possível notar que o tempo de ciclo é menor no cenário 4 do que no cenário atual. Além disso, a potência utilizada na etapa de enchimento é maior no cenário 4 do que no cenário atual. Em contrapartida, na etapa de ventagem a potência é menor no cenário 4 do que no cenário atual. Assim, a figura 49 traduz o comportamento geral estimado para o cenário 4.

Figura 49 – Cenário atual x cenário 4 com inversor.



Fonte: Autor

5 Conclusão

No decorrer do trabalho foi possível observar que com adoção dos meios modernos de aquisição e processamento de dados, é possível reunir informações suficientes que fazem a tomada de decisão um processo racional e pautado em informações precisas do modelo que se estuda. A Indústria 4.0, assim como as revoluções industriais do passado, revolucionou o modelo de produção. Da queima do carvão ao processamento de zettabytes, a humanidade se vê, cada vez mais cercada de monitoramentos e aparatos tecnológicos.

No que diz respeito ao ganho de produtividade, o projeto encontrou um cenário capaz de entregar a capacidade necessária para o objetivo da companhia. Serão produzidos, ao menos, 27tubos/h, um ganho de aproximadamente 9 tubos em uma hora. Vale ressaltar, que o estudo levou em consideração apenas a produção dos tubos de 35". Dado que a companhia produz uma vasta gama de dimensões de tubos, seria necessário realizar análises por períodos maiores, para produção de diferentes tubos e especificações.

Do ponto de vista econômico, os cálculos apresentados podem não refletir, em detalhes, todos os possíveis custos envolvidos, haja vista que o método de *payback* simples não leva em consideração a depreciação dos equipamento e também não foram incluídos custos adicionais, como a modificação nos painéis e alterações na edificação. Em adição, o tempo de retorno do investimento diz respeito a um cenário de produção constante, durante o período de quase 6 anos. No entanto, a previsão é que o projeto dure apenas 2 anos, o que poderia impactar o tempo exato de retorno financeiro.

Para análises futuras, sugere-se, também, um estudo aprofundado da estrutura hidráulica do teste hidrostático. A eficiência enérgica não está presente somente em elementos elétricos mas em qualquer sistema em que haja gasto energético. O fato de se gastar mais energia em momentos em que não há a realização de enchimento dos tubos, deixa evidente que a estrutura mecânica atual não está corretamente dimensionada.

A indústria 4.0 permite com que não seja necessária a aquisição de peças sobressalentes. Com o monitoramento dos padrões de funcionamento, bem como de análises preditivas, seria possível monitorar a saúde dos equipamentos e ter o controle de quando seria necessária a troca dos mesmos. Do ponto de vista do trabalho, a compra de um inversor e de um motor reserva, eleva, significativamente, o custo inicial do projeto, o que poderia, a partir de uma decisão corporativa, não ser agradável aos planos da companhia. Analisar regimes contratuais com fornecedores e se cercar de elementos da indústria 4.0 poderiam atenuar alguns custos de aquisição, instalação e armazenamento deixando o investimento mais atrativo.

Evidenciou-se que o uso de *drives* de velocidade para o controle da rotação de motores elétricos são indispensáveis para se garantir uma produção escalável e sustentável. Na aplicação sugerida, viu-se uma redução de mais de 40% do consumo energético.

Por fim, pode-se concluir que o investimento em tecnologias modernas e eficientes são capazes de trazer ganhos econômicos, o que garante o funcionamento das empresas e emprego às populações. Além disso, há a redução significativa dos impactos que as companhias, sobretudo a indústria, oferecem ao meio ambiente e às pessoas da comunidade.

Referências

- [1] “Emc digital universe - 2014 - the digital universe of opportunities: Rich data and the increasing value of the internet of things.” <https://www.emc.com/leadership/digital-universe/2014iview/executive-summary.htm>. Acessado: 2020-08-16. Citado na página 14.
- [2] “Worlwide data created.” <https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/>. Acessado: 2020-08-16. Citado na página 14.
- [3] A. DRATH, R.; HORCH, “Industrie 4.0: Hit or hype?,” *IEEE industrial electronics magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 56–58, 2014. Citado na página 14.
- [4] Y. N. Harari, *Sapiens: Uma breve história da humanidade*. Harper, 2011. Citado na página 17.
- [5] “Revolução industrial.” <https://mundoeducacao.uol.com.br/historiageral/revolucao-industrial-2.htm>. Acessado: 2020-08-16. Citado na página 17.
- [6] U. Dombrowsk, “Mental strain as field of action in the 4th industrial revolution.,” *Elsevier*, pp. 100–105, 2014. Citado na página 18.
- [7] “A specialized form of cyber physical system for industrie 4.0.” <https://core.ac.uk/download/pdf/82468497.pdf>. Acessado: 2020-03-17. Citado na página 18.
- [8] M. Hermann, “Design principles for industrie 4.0 scenarios: A literature review.,” *Technische Universität Dortmund*, 2015. Citado na página 18.
- [9] “Indústria 4.0 pode economizar r\$ 73 bilhões ao ano para o brasil.” <https://www.abdi.com.br/postagem/industria-4-0-pode-economizar-r-73-bilh~oes-ao-ano-para-o-brasil>. Acessado: 2020-03-17. Citado na página 18.
- [10] “Definição do programa nacional de conservação de energia elétrica.” <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID=%7B921E566A-536B-4582-AEAF-7D6CD1DF1AFD%7D#:~:text=As%20a%C3%A7%C3%B5es%20do%20Procel%20contribuem,para%20um%20Brasil%20mais%20sustent%C3%A1vel>. Acessado: 2020-08-16. Citado na página 19.
- [11] “Afinal o que é um sistema distribuído.” <https://pplware.sapo.pt/informacao/afinal-o-que-e-um-sistema-distribuido/>. Acessado: 2020-03-17. Citado na página 19.

- [12] A. S. T. e Maarten van Steen, *Sistemas Distribuídos, Princípios e Paradigmas. 2 ed.* Pearson Prentice Hall, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- [13] “Sistemas distribuídos introdução.” professor.ufabc.edu.br/~afrancisco.massetto/sd/01-Aula1-Intro.pdf. Acessado: 2020-07-27. Citado na página 20.
- [14] “Client-server model.” https://en.wikipedia.org/wiki/Client%E2%80%93server_model. Acessado: 2020-07-31. Citado na página 21.
- [15] “Exemplos de arquiteturas de software.” https://www.marcosmonteiro.com.br/mm/Cursos/Redes/Exemplos_de_Arquiteturas_de_Software.pdf. Acessado: 2020-08-01. Citado na página 22.
- [16] “Extract, load and transform.” https://en.wikipedia.org/wiki/Extract,_load,_transform. Acessado: 2020-08-01. Citado na página 23.
- [17] “Extract, transform and load.” https://en.wikipedia.org/wiki/Extract,_transform,_load. Acessado: 2020-08-01. Citado na página 23.
- [18] “Ftp: O que é ftp, como funciona e qual melhor ftp.” <https://www.hostinger.com.br/tutoriais/ftp-o-que-e-como-funciona>. Acessado: 2020-03-17. Citado na página 24.
- [19] J. F. K. e Keith W. Ross, *Redes de computadores e a Internet : uma abordagem top-down*. Pearson Prentice Hall, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- [20] H. F. K. e. S. S. Abraham Silberschatz, *Sistema de Banco de Dados*. Elsevier, 1994. Citado na página 25.
- [21] “Conceitos fundamentais de banco de dados.” <https://www.devmedia.com.br/conceitos-fundamentais-de-banco-de-dados/1649>. Acessado: 2020-03-17. Citado na página 26.
- [22] “Tipos de banco de dados.” <https://getti.net.br/entenda-os-motivos-para-voce-investir-em-um-bom-banco-de-dados/>. Acessado: 2020-07-29. Citado na página 26.
- [23] “Conceitos acid para banco de dados.” <https://www.4linux.com.br/o-que-e-banco-de-dados-acid>. Acessado: 2020-07-29. Citado na página 27.
- [24] “Pcs and fibre optic infrastructure.” <https://www.iba-ag.com/en/pcs-and-fibre-optic-infrastructure/>. Acessado: 2020-03-17. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

- [25] “Field and drive buses.” <https://www.iba-ag.com/en/field-and-drive-buses/>. Acessado: 2020-03-17. Citado na página 29.
- [26] “Mobile data acquisition.” <https://www.iba-ag.com/en/mobile-data-acquisition/>. Acessado: 2020-03-17. Citado na página 31.
- [27] “Iba pda.” <https://www.iba-ag.com/en/ibapda/>. Acessado: 2020-03-17. Citado na página 33.
- [28] “Iba analyzer.” <https://www.iba-ag.com/en/ibaanalyzer/>. Acessado: 2020-08-04. Citado na página 35.
- [29] “Cartilha de sustentabilidade sebrae.” http://sustentabilidade.sebrae.com.br/Sustentabilidade/Para%20sua%20empresa/Publica%C3%A7%C3%B5es/WEB%20-%20Cartilha%20Efici%C3%A3ncia%20Energ%C3%A9tica_15x21cm4.pdf. Acessado: 2020-08-16. Citado na página 37.
- [30] U. B. Fernandes, *Análise econômica na especificação do motor*. CBEE/ABEE, 2009. Citado na página 37.
- [31] F. J. T. E. Ferreira, *Strategies to Improve the Performance of Three-Phase Induction Motor Driven Systems*. University of Coimbra, 2008. Citado na página 37.
- [32] “Troca de motores como indutora de competitividade na indústria brasileira.” <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%7D&Team=¶ms=itemID=%7B3BABCE8B-A76C-4042-B985-2526F1F6FEC4%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>. Acessado: 2020-08-16. Citado na página 37.
- [33] “Guia de aplicação de motores elétricos.” <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acessado: 2020-08-16. Citado 7 vezes nas páginas 39, 40, 41, 42, 43, 44 e 45.
- [34] “Apostila de acionamentos elétricos.” <https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-basica>. Acessado: 2020-08-16. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.
- [35] M. H. F. Costa, “Análise comparativa da utilização de dois equipamentos para partida direta de motores trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo: Inversores de frequência x chaves de partida estática(soft-starter),” *Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais*, pp. 32–36, 2014. Citado na página 40.

- [36] R. S. Coutinho, “Simulação de bombas com velocidade de rotação variável no epanet,” *SCIELO*, p. 798, 2017. Citado na página 45.
- [37] “Eficiência energética em sistemas de bombeamento.” <https://bucket-gw-cni-static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/LivroBombeamento.pdf>. Acessado: 2020-08-16. Citado na página 45.
- [38] “Semelhança aplicada às máquinas hidráulicas.” http://paginapessoal.utfpr.edu.br/eduardomg/maquinas-de-fluxo/materia/Cap.8_Semelhanca.pdf. Acessado: 2020-09-11. Citado na página 60.
- [39] “Análise de perdas em escoamentos dentro de tubulações.” http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/APOSTILA_MH/AT087-Aula07_CALCULO%20PERDA%20CARGA.PDF. Acessado: 2020-08-28. Citado na página 66.
- [40] R. W. F. e Philip J. Pritchard e Alan T. McDonald, *Introdução À Mecânica Dos Flúidos - 8^a Ed.* LTC, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 67.
- [41] “Payback simples: o que é e como calcular.” <https://www.capitalresearch.com.br/blog/investimentos/payback-simples/#:~:text=0%20que%20%C3%A9%20payback%20simples&text=0u%20seja%3A%20equivale%20ao%20prazo,%20de%20retorno%20de%20aplica%C3%A7%C3%B5es>. Acessado: 2020-09-11. Citado na página 74.
- [42] “Perguntas mais frequentes - weg.” <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/contact/faq?page=173#:~:text=Qual%20%C3%A9%20a%20vida%20%C3%BAtil,condi%C3%A7%C3%B5es%20e%20frequ%C3%A1ncia%20da%20manuten%C3%A7%C3%A3o>. Acessado: 2020-09-11. Citado na página 76.