

**PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ENGENHARIA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**MARIA ALICE PINTO FERRAZ LUZ ARANHA**

**OTIMIZADOR DE ENERGIA EM TEMPO REAL COMO FERRAMENTA  
DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DESCARBONIZAÇÃO INDUSTRIAL:  
ESTUDO DE CASO EM UMA UNIDADE PETROQUÍMICA**

São Paulo

2023

**MARIA ALICE PINTO FERRAZ LUZ ARANHA**

**OTIMIZADOR DE ENERGIA EM TEMPO REAL COMO FERRAMENTA  
DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DESCARBONIZAÇÃO INDUSTRIAL:  
ESTUDO DE CASO EM UMA UNIDADE PETROQUÍMICA**

Monografia apresentada como exigência para obtenção do Título de Especialista em Energia Renovável, Geração Distribuída e Eficiência Energética, no Programa de Pós-Graduação Lato sensu do Programa de Educação Continuada em Engenharia (PECE), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo de Andrade Barreto.

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação-na-publicação

Pinto Ferraz Luz Aranha, Maria Alice

OTIMIZADOR DE ENERGIA EM TEMPO REAL COMO  
FERRAMENTA

DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DESCARBONIZAÇÃO  
INDUSTRIAL: ESTUDO DE CASO EM UMA UNIDADE  
PETROQUÍMICA / M. A. Pinto Ferraz Luz

Aranha -- São Paulo, 2023.

75 p.

Dedico este trabalho ao Fred.

## **AGRADECIMENTO**

Ao Professor Gustavo de Andrade Barreto, pela inspiração, orientação e suporte durante a execução desse trabalho.

Ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia que estruturou o curso e reuniu grandes mestres para compartilharem seus conhecimentos em diversas frentes que compõem o universo da Energia.

À Jessica, minha colega de trabalho, pelo tempo e conhecimento compartilhado para que eu pudesse concluir esse trabalho.

Ao Bruno Braz, pelo apoio e motivação ao longo do curso e na elaboração da monografia.

Aos colegas e novos amigos que encontrei durante o curso, pela colaboração durante os trabalhos e trocas de experiências sobre o tema.

À minha família e amigos, que sempre me incentivaram e contribuíram muito para o meu desenvolvimento.

Agradeço também a você que se interessou por essa monografia, meu desejo é que tenha uma excelente leitura!

*“Once you stop learning, you  
start dying.”*

Albert Einstein

## RESUMO

PINTO FERRAZ LUZ ARANHA, M. A. otimizador de energia em tempo real como ferramenta de eficiência energética e descarbonização industrial: estudo de caso em uma unidade petroquímica. 2023. 75 páginas. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2023.

Este trabalho tem por finalidade apresentar o estudo de caso da implementação de um otimizador de energia em tempo real (RTO) em uma unidade petroquímica de primeira geração no Brasil. Busca-se contextualizar os temas de consumo energético e eficiência energética das petroquímicas (cenários global e brasileiro), de forma a expor como os sistemas de automação e ferramentas baseadas em análises de dados (em todas as suas formas) podem contribuir para as estratégias de eficiência energética e redução das emissões de gases de efeito estufa dos setores considerados *hard-to-abate*. Nesse sentido, o trabalho descreve a implementação do sistema de otimização em tempo real como solução para gerenciamento e minimização dos custos e emissões de uma unidade petroquímica com sistema energético complexo e apresenta resultados significativos tanto em termos financeiros quanto na redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

**Palavras-chave:** Otimizador em Tempo Real. RTO. Eficiência Energética. Petroquímicas.

## ABSTRACT

This paper aims to present a case study on the implementation of a real-time energy optimizer (RTO) in a first-generation petrochemical unit in Brazil. The goal is to contextualize the topics of energy consumption and energy efficiency in petrochemicals (both globally and in Brazil), in order to demonstrate how automation systems and data-driven tools (in all their forms) can contribute to energy efficiency strategies and the reduction of greenhouse gas emissions in hard-to-abate sectors. In this regard, the paper describes the implementation of the real-time optimization system as a solution for managing and minimizing costs and emissions in a petrochemical unit with a complex energy system and has significant results both in financial terms and in reducing CO<sub>2</sub> emissions.

**Keywords:** Real-Time Optimizer.RTO. Energy Efficiency. Petrochemicals.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Como as tecnologias contribuem para as metas de neutralidade de carbono ....	16
Figura 2.1: Fontes de energia para produção de químicos primários.....	23
Figura 2.2: Produção de eteno por matérias-primas .....	24
Figura 2.3: Preços das matérias-primas .....	24
Figura 2.4: Direcionadores estratégicos para redução de emissões de GEE .....	26
Figura 2.5: Principais etapas de produção dos produtos petroquímicos básicos.....	27
Figura 2.6: Matriz energética do setor petroquímico brasileiro .....	29
Figura 2.7: Rendimento energético .....	30
Figura 2.8: Coeficiente de destinação de energia .....	31
Figura 2.9: Emissões de GEE, com e sem ações de eficiência energética.....	34
Figura 2.10: Linha do tempo das políticas e ações voltadas a Eficiência Energética no Brasil .....	35
Figura 2.11: Pirâmide da Automação Industrial.....	38
Figura 2.12: Camadas de Controle e tomada de decisão de uma planta industrial .....	39
Figura 2.13 : Tipos de análise de dados .....	41
Figura 2.14: Níveis de uso de dados e seus benefícios para as organizações .....	42
Figura 2.15: Pirâmide da automação no contexto da transformação digital .....	43
Figura 2.16: Resultado da pesquisa sobre uso de tecnologias digitais por setor .....	45
Figura 2.17: Componentes de um RTO .....	47
Figura 2.18: Classificação dos problemas de otimização e suas técnicas .....	48
Figura 2.19: RTO e APC na prática .....	49
Figura 2.20: Benefícios da implementação de RTO na indústria petroquímica .....	50
Figura 3.1: A cadeia petroquímica no Brasil .....	55
Figura 3.2: Visão geral da planta no EERTO .....	57
Figura 3.3: Configuração das variáveis de otimização e restrição.....	62
Figura 3.4: Processo de execução e fluxo de trabalho associado:.....	64
Figura 3.5: Exemplo de relatório do EERTO .....	65
Figura 3.6: Planilha de Fatores de Emissão .....	66
Figura 3.7: Amostra de dados .....	67
Figura 3.8: Visão geral do Power BI para análise de desempenho dos otimizadores .....	68
Figura 3.9: Gráfico de Desvios.....	69
Figura 3.10: Distribuição do Potencial de Ganho por período .....	70

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1: Diferenças entre APC e RTO.....	50
Tabela 3.1: Unidades de Engenharia .....	63

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACEEE	<i>American Council for an Energy-Efficient Economy</i>
APC	<i>Advanced Process Control / Controle Avançado de Processo</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CCUS	<i>Carbon Capture, Usage and Storage / Captura, Uso e Armazenamento de Carbono</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DER	<i>Distributed Energy Resources / Recursos Energéticos Distribuídos</i>
EaaS	<i>Energy as a Service / Energia como Serviço</i>
EE	Eficiência Energética
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERTO	<i>Energy Real-Time Optimizer / Otimizador de Energia em Tempo Real</i>
ESG	<i>Environmental, Social, and Governance / Ambiental, Social e Governança</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
EU	<i>European Union / União Europeia</i>
EJ	Exajoule
FE	Fator de Emissão
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HX	<i>Heat Exchanger / Trocador de Calor</i>
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
IEA	<i>International Energy Agency / Agência Internacional de Energia</i>
IoT	<i>Internet of Things / Internet das Coisas</i>
IP	<i>Integer Programming / Programação Inteira</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change / Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization / Organização Internacional de Normalização</i>
LP	<i>Linear Programming / Programação Linear</i>

MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i> / Programação linear Inteira Mista
MINLP	<i>Mixed Integer NonLinear Programming</i> / Programação Não-Linear Mista
MME	Ministério de Minas e Energia
MPC	<i>Model Predictive Control</i> / Modelo de Controle Preditivo
NDC	<i>Nationally Determined Contribution</i> / Contribuição Nacionalmente Determinada
NLP	<i>Non-Linear Programming</i> / Programação Não-Linear
NOx	Óxidos de Azoto
ODS	Objetivos De desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OT	<i>Operation Technology</i> / Tecnologia de Operação
PET	Polietileno Tereftalato
QP	<i>Quadratic Programming</i> / Programação Quadrática
RTO	<i>Real-Time Optimizer</i> / Otimização em Tempo Real
SOx	Óxidos de Enxofre
SQP	<i>Sequential Quadratic Programming</i> / Programação Quadrática Sequencial
TI	Tecnologia da Informação
VPP	<i>Virtual Power Plant</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	Motivações .....	16
1.2	Justificativa.....	17
1.3	Objetivos.....	19
1.4	Metodologia.....	19
1.5	Estrutura do Trabalho.....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
2.1	Consumo energético das indústrias petroquímicas.....	22
2.1.1	Panorama brasileiro do consumo energético do setor petroquímico .....	27
2.2	Eficiência energética .....	31
2.2.1	Cenário global .....	32
2.2.2	Cenário brasileiro .....	35
2.3	Automação e Controle de Processos: seu papel para a eficiência energética	
	37	
2.3.1	O papel da automação na estratégia de eficiência energética e descarbonização industrial .....	40
2.3.2	Transformação Digital .....	42
2.4	Otimizadores em tempo real .....	45
2.4.1	Conceitos Práticos de otimização em Tempo Real .....	48
2.4.2	Aplicação de RTO focada em Energia.....	51
2.4.3	Sequential Quadratic Programming (SQP).....	52
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>54</b>
3.1	Descrição do processo .....	54
3.2	Desafios da gestão energética.....	55
3.3	Modelagem e otimização .....	57
3.3.1	Variáveis de otimização .....	58
3.3.2	Função objetivo e Níveis de otimização .....	59
3.3.3	Configuração do Modelo.....	60
3.3.4	Fatores de emissão.....	65
3.4	Análise de Resultados .....	66
3.4.1	Amostra de dados.....	66

3.4.2	Análise dos dados.....	67
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>71</b>
4.1	Resultados Obtidos.....	71
4.2	Contribuições do Trabalho .....	72
4.3	Trabalhos Futuros .....	72
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>

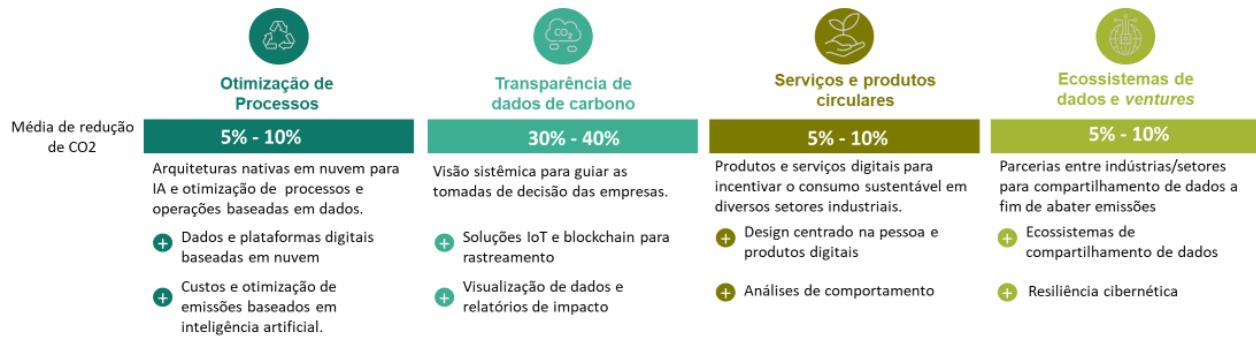
## 1 INTRODUÇÃO

O processo de transição energética para uma economia de baixo carbono tem sido um desafio mundial. Na última década, um conjunto de ações globais, como o Acordo de Paris de 2015 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS, 2017), junto a ações nacionais e locais, como a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês), têm contribuído para alcançar as metas de descarbonização do setor. A NDC brasileira de 2015 estabelece que o país deve reduzir as suas emissões em 37% até 2025 e 43% até 2030, em relação às emissões de 2005. Além disso, em 2021, o Brasil ainda se comprometeu a ampliar sua ambição para 50% de redução até 2030 e alcançar emissões líquidas neutras até 2050, ou seja, tudo que o país emitir deverá ser compensado com fontes de captura de carbono, como plantio de florestas, recuperação de biomas ou outras tecnologias (BNDES, 2023).

À medida que abordar a crise climática se torna uma discussão cada vez mais urgente, todos os setores de negócio devem apresentar planos de mitigação de seu próprio impacto ambiental. Isso inclui os setores industriais considerados “*hard-to-abate*”, os quais têm um uso intensivo de carbono e, até o momento, não apresentam alternativas claras e viáveis de baixa emissão. Esse é o caso do transporte rodoviário, das siderúrgicas, das indústrias de cimento e das indústrias químicas. A contribuição desses setores nas emissões mundiais de dióxido de carbono é de aproximadamente um terço (DELOITTE CENTER FOR INTEGRATED RESEARCH, 2021).

Nesse contexto, a tecnologia tem desempenhado um papel cada vez mais importante nas iniciativas de sustentabilidade, permitindo que empresas e governos tomem medidas significativas para redução do seu impacto ambiental. Um estudo da *Boston Consulting Group* (2021) mostra que o uso de tecnologias avançadas pode ser um acelerador para empresas que desejam alcançar suas metas Ambientais, Sociais de Governança, conhecidas como metas de ESG na sigla em inglês. Esse estudo apresenta que, para uma organização de aproximadamente oitenta mil pessoas, a combinação de automação de processos, transparências de dados de emissão de carbono, economia circular e modelos de negócios sustentáveis pode

reduzir as emissões em 45% a 70%. A Figura 1.1 mostra a contribuição de cada uma das quatro maneiras como a tecnologia pode acelerar a jornada para a neutralidade de carbono.



**Figura 1.1:** Como as tecnologias contribuem para as metas de neutralidade de carbono

Fonte: Boston Consulting Group (2021).

## 1.1 Motivações

O papel da área de automação e controle industrial tem sido fundamental na estratégia de otimização de processos, captura e gerenciamento de dados, que são a base para o desenvolvimento das soluções supracitadas. Isso se deve ao fato de que, ao longo do tempo, a automação vem se transformando, utilizando novas tecnologias e tornando-se cada vez mais sofisticada, com o desenvolvimento de sensores, atuadores e sistemas de controle e supervisão que permitem a criação de processos produtivos mais eficientes e seguros (TERESA RICCIO BARBOSA; MORENO MAMEDES, 2021).

A busca pela eficiência energética foi um dos principais motores da evolução da automação industrial. A partir dos anos 1970, com a crise do petróleo, a preocupação com a redução do consumo de energia se tornou mais evidente, e a automação se consolidou como uma das principais estratégias para alcançar esse objetivo. A implementação de sistemas de controle mais precisos e eficientes permitiu a redução do consumo de energia em diversas áreas industriais, como na siderurgia, na indústria química e na produção de papel.

Além da redução do consumo de energia, a automação também tem um papel fundamental na descarbonização industrial. Com a intensificação das discussões sobre as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a automação passou a ser vista como uma das principais ferramentas para alcançar esse objetivo. A adoção de tecnologias de controle de processos em malha fechada, de otimização de processos e de gestão da energia permitiram a redução significativa das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em diversos setores industriais.

As indústrias petroquímicas possuem um sistema energético complexo, baseado em vários níveis de pressão de vapor, caldeiras queimando diferentes combustíveis e unidades de cogeração que fornecem vapor e eletricidade para as unidades produtivas. O uso de diferentes combustíveis somado ao desequilíbrio entre a produção e consumo de gás, a importação e exportação de energia elétrica, além das questões ambientais, acarretam uma série de *trade-offs* no sistema energético das unidades industriais para uma operação que minimize o custo da energia e as emissões de gases de efeito estufa.

No entanto, como enunciado na seção introdutória deste trabalho, as tecnologias avançadas para otimização de processos são soluções que respondem à complexidade do sistema energético das indústrias petroquímicas. Este o caso dos sistemas de otimização e gerenciamento de energia em tempo real, fornecidos por grandes empresas do setor de automação industrial.

## 1.2 Justificativa

No intuito de buscar soluções que se beneficiem das novas tecnologias e que promovam o uso de fontes renováveis de energia e a redução das emissões de GEE nos setores considerados “*hard-to-abate*”, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos, principalmente aqueles focados na eletrificação e captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS, do inglês *Carbon Capture, Usage and Storage*).

Observa-se, no entanto, uma lacuna nos trabalhos recentes voltados à otimização em tempo real (RTO, do inglês *Real-Time Optimizers*) do sistema energético total de uma operação complexa, como são as das indústrias petroquímicas, com foco na busca pela eficiência energética e redução de gases de efeito estufa.

No Brasil, uma das maiores empresas do setor petroquímico vem otimizando os custos de energia das suas operações de craqueamento e, consequentemente, reduzindo as emissões de GEE na atmosfera, por meio de uma iniciativa pioneira no país. Tal tecnologia permite selecionar, de forma automática (quando aplicado em malha fechada) e em tempo real, as fontes de energia mais adequadas a serem geradas e consumidas por determinados equipamentos. A previsão é de que o conjunto de otimizadores de energia em tempo real em malha aberta e fechada reduza a emissão de aproximadamente três mil toneladas de CO<sub>2</sub> e diminua o consumo de gás natural em mais de mil toneladas por mês, além de promover maior estabilidade do processo em termos de geração e consumo de energia, agilidade na tomada de decisão e melhor adequação do uso de fontes de energia. Como a tecnologia também tem a funcionalidade de um simulador, é possível criar vários cenários operacionais para uma avaliação técnica e promover estudos para universidades e centros de pesquisa (BA DE VALOR, 2023).

A implementação de tecnologias como a exemplificada acima abre o espaço para que as empresas invistam em inovações para a transformação do setor. No caso das petroquímicas, onde a matéria-prima é primariamente proveniente do petróleo, a redução do custo de operação e aumento da margem dos produtos pode ser a chave para o investimento em economia circular e novos produtos e serviços digitais, que são caminhos viáveis ao setor em sua jornada para neutralidade de emissões de carbono.

### 1.3 Objetivos

Em vista do exposto, o presente trabalho tem como objetivo relatar a implementação de um otimizador de energia em tempo real como ferramenta de eficiência energética e descarbonização em uma unidade petroquímica de primeira geração. O foco principal será descrever a aplicação prática do otimizador de energia e analisar seus resultados em termos de melhoria do desempenho energético da unidade e redução das emissões de gases de efeito estufa.

Dessa forma, como objetivos específicos desse trabalho tem-se:

- Descrever a unidade petroquímica de primeira geração em estudo, incluindo seus processos industriais, consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa. Serão apresentados os desafios específicos enfrentados pela unidade em termos de eficiência energética e descarbonização.
- Apresentar o otimizador de energia em tempo real e descrever suas características, funcionalidades e capacidades.
- Descrever o processo de implementação do otimizador de energia em tempo real na unidade petroquímica. Serão descritas as etapas de instalação, integração com os sistemas existentes e treinamento necessário para operação adequada do otimizador.
- Analisar os resultados obtidos após a implementação do otimizador de energia em tempo real, destacando os ganhos em eficiência energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa alcançadas.
- Avaliar os benefícios econômicos e ambientais obtidos com a utilização do otimizador de energia em tempo real.

### 1.4 Metodologia

O método de pesquisa utilizado neste trabalho foi dividido em três etapas:

- Fundamentação teórica;

- Pesquisa sobre o panorama de consumo energético das indústrias petroquímicas;
- Desenvolvimento do estudo de caso e análise dos resultados.

A primeira etapa consistiu em realizar uma revisão da literatura para obter uma fundamentação teórica sólida. Essa revisão abrangeu estudos relacionados à eficiência energética e descarbonização industrial, bem como a relação entre sistemas de automação e controle de processos e a eficiência energética no setor petroquímico.

A segunda etapa envolveu uma pesquisa detalhada sobre o panorama do consumo energético das indústrias petroquímicas, com foco na unidade em estudo. Foram coletados dados e informações relevantes sobre o consumo de energia nesse setor, identificando os principais desafios e oportunidades para melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

A terceira etapa foi dedicada ao desenvolvimento do estudo de caso na unidade petroquímica de primeira geração. Para isso, foram utilizados dados de uma indústria brasileira, permitindo uma análise mais precisa e contextualizada.

Essas etapas metodológicas foram adotadas para garantir uma abordagem embasada teoricamente e fundamentada em dados reais, permitindo a compreensão dos desafios enfrentados pela indústria petroquímica em sua jornada para redução de consumo energético e redução de emissões e a avaliação dos benefícios proporcionados pela implementação do otimizador de energia em tempo real na unidade objeto do estudo.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

A fim de concluir as considerações introdutórias apresentadas no Capítulo 1, onde se buscou expor as motivações e relevância do tema, as justificativas e objetivos do trabalho, o método utilizado e os benefícios esperados, apresenta-se a estrutura deste trabalho, constituído de quatro capítulos:

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre os principais temas relacionados ao trabalho, tais como:

- O consumo energético das indústrias petroquímicas;
- Eficiência energética;
- Automação e controle de processos;
- Otimizadores em tempo real.

O Capítulo 3, dedicado ao estudo de caso, apresenta a descrição da unidade petroquímica onde o estudo foi desenvolvido, detalha a implementação do otimizador de energia em tempo real e apresenta os resultados obtidos com a solução objeto desse trabalho durante o ano de 2022.

Por fim, no Capítulo 4, são feitas as considerações finais e sugestões de trabalho futuros.

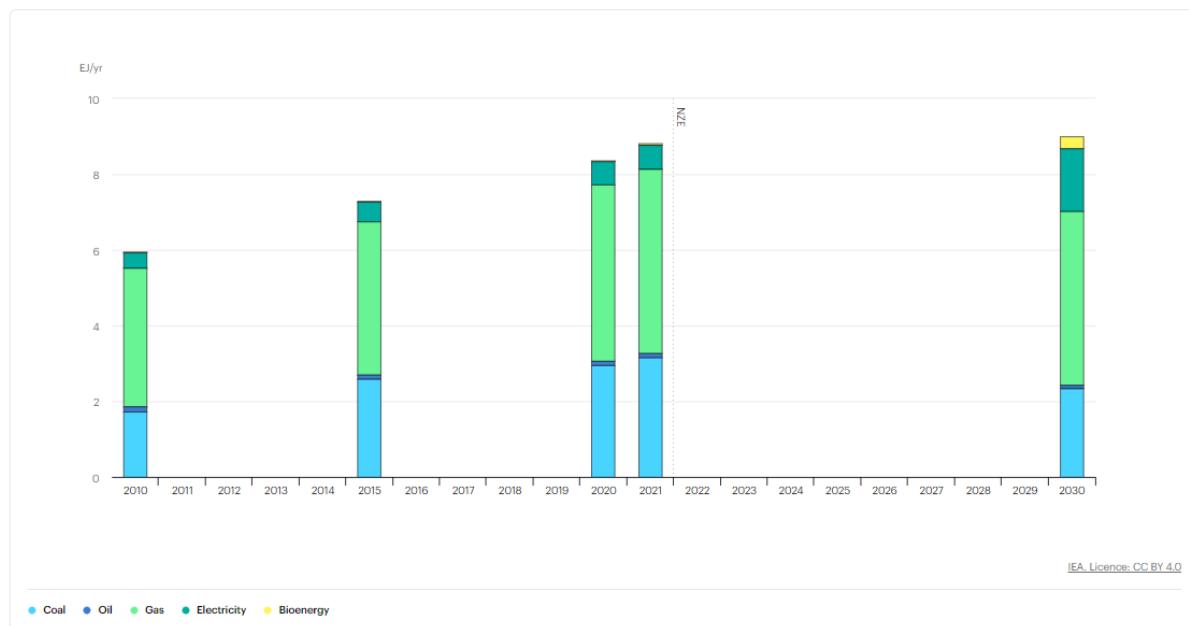
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dado o tema central do trabalho, que está relacionado ao uso de tecnologias de automação e controle de processos, como otimizadores em tempo real, para fins de eficiência energética e diminuição das emissões de gases de efeito estufa das indústrias petroquímicas, os tópicos essenciais a serem aqui revistos são:

- O consumo energético e as emissões de gases de efeito estufa das indústrias petroquímicas;
- O conceito de eficiência energética e seu papel na jornada para a neutralidade de carbono;
- A automação industrial no contexto da eficiência energética e redução de emissões de GEE;
- O conceito de Otimizadores em Tempo Real.

### 2.1 Consumo energético das indústrias petroquímicas

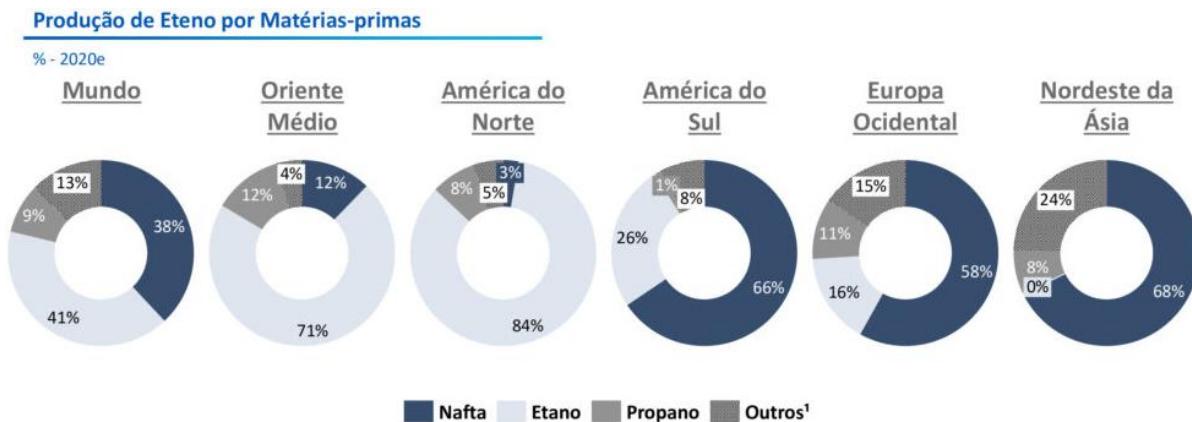
Segundo a *International Energy Agency* (2022), o setor químico é o maior consumidor de energia e o terceiro maior subsetor em termos de emissões diretas de CO<sub>2</sub>, uma vez que metade da energia do subsetor químico é consumida como matéria-prima, sendo o petróleo e o gás natural as mais utilizadas. Nos relatórios mais recentes da IEA, observa-se uma tendência de aumento desses componentes devido ao aumento da demanda, enquanto o consumo de energia deve diminuir a fim de atingir o cenário de neutralidade de emissões, conforme apresentado na Figura 2.1 (IEA, 2022).



**Figura 2.1:** Fontes de energia para produção de químicos primários

Fonte: IEA (2022).

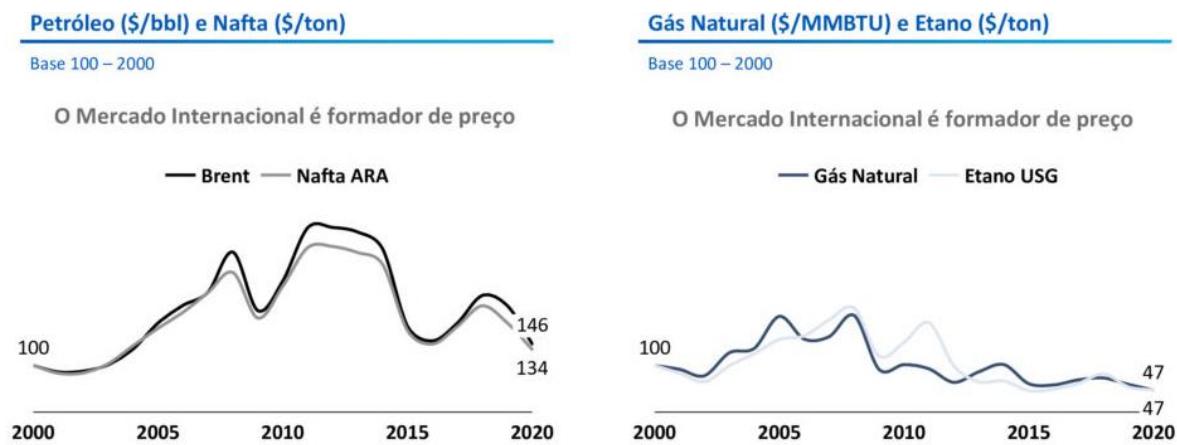
A indústria química baseada em carvão, prevalente na China, representa um grande desafio ambiental, uma vez que a intensidade de emissão é consideravelmente maior quando comparada às produções baseadas em gás natural. A Figura 2.2 mostra como a matriz de matéria-prima para produção de eteno (produto químico primário) muda de acordo com a região, evidenciando que o Oriente Médio e América do Norte são majoritariamente produtores de eteno com base etano e América do Sul, Europa Ocidental e Nordeste da Ásia tem como base a nafta (BRASKEM, 2023):



**Figura 2.2:** Produção de eteno por matérias-primas

Fonte: Braskem (2023).

Os preços das principais matérias-primas do setor petroquímico são definidos no mercado internacional e afetados principalmente por variações nos preços de petróleo e gás natural. Na Figura 2.3 é possível observar que o preço da nafta tem forte correlação com o preço do petróleo bruto, assim como o preço do etano segue variações no gás natural, com discrepâncias ocasionais relacionadas a condições específicas do mercado (BRASKEM, 2023):



**Figura 2.3:** Preços das matérias-primas

Fonte: Braskem (2023).

O consumo de energia de uma planta petroquímica geralmente é medido em termos de energia por unidade produção e pode variar dependendo de diversos fatores, tais como:

- Capacidade da planta;
- Processo de produção;
- Tecnologia utilizada;
- Índices de eficiência operacional.

A fim de garantir sua competitividade no mercado global, as empresas estão constantemente buscando aprimorar seus processos. No que diz respeito à energia, o foco está em encontrar maneiras cada vez mais eficientes, confiáveis e sustentáveis de produzir e operar seus serviços. Em busca de soluções para alcance das metas publicamente firmadas em linha com a Agenda 2030 da ONU (Organização das Nações Unidas) e com o Acordo de Paris, as empresas do setor petroquímico têm buscado o apoio de grandes consultorias para elaboração de suas estratégias de desenvolvimento sustentável. Em relação à estratégia para redução dos gases de efeito estufa, observa-se que o setor tem trabalhado em direcionadores divididos por escopo da emissão, sendo (BRASKEM, 2023):

- Escopo 1: emissões resultantes da operação da própria empresa;
- Escopo 2: emissões relacionadas à demanda de energia da empresa;
- Escopo 3: emissões indiretas que ocorrem na cadeia de valor.

A Figura 2.4 apresenta os principais direcionadores das ações para redução das emissões nos escopos 1,2 e 3, que são:



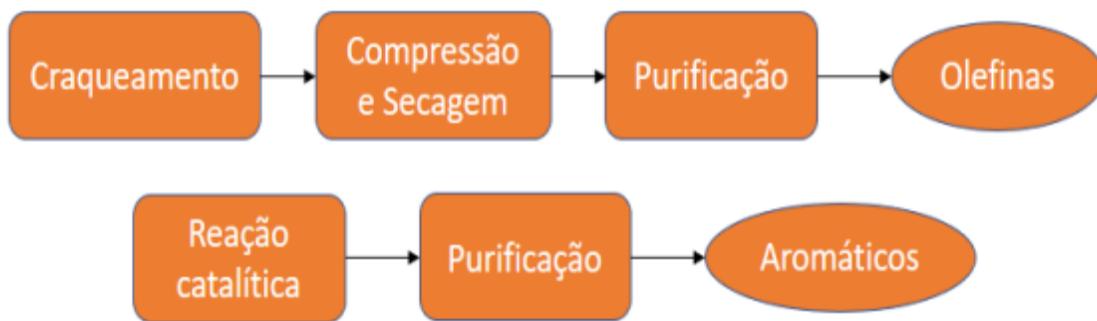
**Figura 2.4:** Direcionadores estratégicos para redução de emissões de GEE

Fonte: adaptado de Braskem (2023).

### 2.1.1 Panorama brasileiro do consumo energético do setor petroquímico

De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia (2023), o setor industrial é responsável por cerca de um terço do consumo total de energia elétrica no Brasil, e as indústrias petroquímicas estão entre as maiores consumidoras desse setor. O uso intensivo de energia elétrica e de combustíveis fósseis também resulta em emissões significativas de gases de efeito estufa, contribuindo para as mudanças climáticas globais.

A demanda energética das indústrias petroquímicas no Brasil é alta, já que essas indústrias utilizam uma grande quantidade de energia para processar matérias-primas e produzir uma variedade de produtos químicos. Além disso, a maior parte da energia utilizada nas indústrias petroquímicas brasileiras é proveniente de fontes não renováveis, como o petróleo e o gás natural. A Figura 2.5 apresenta as principais etapas envolvidas na produção das Olefinas (eteno, propeno, buteno e butadieno, usado na produção de polímero de maior valor agregado, como polietileno de baixa densidade e plastificantes) e Aromáticos (benzeno, tolueno e xileno, que são usados para produção de PET – Polietileno Tereftalato).



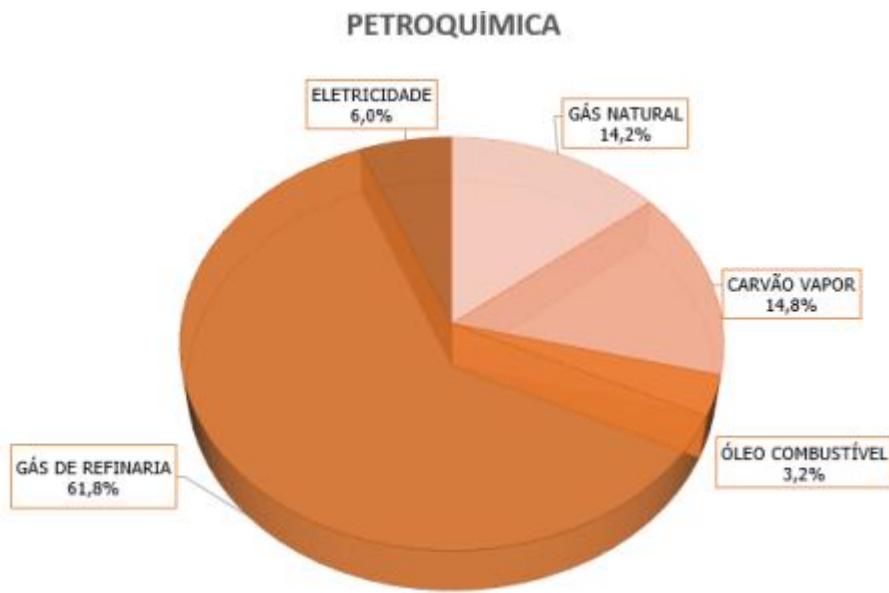
**Figura 2.1:** Principais etapas de produção dos produtos petroquímicos básicos

Fonte: EPE (2018).

Um relatório sobre Análise da Eficiência Energética no Segmento Químico Brasileiro (EPE, 2018) apresenta as finalidades energéticas presentes nas etapas do processo de produção de químicos básicos descritos na Figura 6. São elas:

- Força Motriz: Presente em todas as etapas, através de motores para funcionamento de máquinas;
- Aquecimento Direto: Presente na etapa de craqueamento nos fornos;
- Calor de Processo: Presente na área de utilidades para geração de vapor que é utilizado na reação, purificação e acionamento de motores turbinados;
- Refrigeração: Presente no ciclo de refrigeração para fracionamento dos produtos, etapa de purificação;
- Iluminação: Presente em todas as etapas, através das lâmpadas usadas para iluminação local.

A energia térmica representa 94% do consumo energético total do setor petroquímico, quanto o consumo de energia elétrica é de aproximadamente 6%. Nesse processo, na etapa de craqueamento das moléculas, ocorre uma grande produção de gases de combustão a alta temperatura, que são utilizados para a geração de vapor que será consumido nas demais etapas do processo e no acionamento de compressores, bombas e ventiladores. Outro reaproveitamento térmico comumente utilizado é o consumo dos próprios gases de processo gerados como co-produtos e também o consumo das frações mais pesadas condensadas no resfriamento. Esses combustíveis compõem aproximadamente 69% dos energéticos térmicos consumidos. O gás natural é utilizado como combustível complementar nos fornos e caldeiras. Além desses energéticos anteriormente mencionados a indústria petroquímica, diferente dos outros subsegmentos analisados no setor químico, faz uso de carvão na composição da sua matriz energética. A energia elétrica é utilizada majoritariamente no acionamento de motores elétricos e iluminação, perfazendo 6%, conforme mostra a Figura 2.6 (EPE, 2018):



**Figura 2.2:** Matriz energética do setor petroquímico brasileiro

Fonte: EPE (2018).

Neste segmento existem muitos acionamentos a vapor, devido à grande quantidade de energia reaproveitada do processo de reforma catalítica, fazendo com que a quantidade de cargas elétricas seja reduzida. Nesse cenário pode-se indicar como os maiores equipamentos consumidores de energia elétrica (EPE, 2018):

- Bomba de água de refrigeração;
- Bomba de água de alimentação de caldeiras;
- Ventiladores de ar das caldeiras;
- Compressores de fluidos refrigerantes na etapa de compressão;
- Bombas de calor.

Nota-se que as cargas elétricas são na maioria na área de utilidades, justificado pela necessidade de se manter a unidade de geração de eletricidade própria operando quando há um problema operacional na unidade de reforma catalítica, uma vez que essa etapa fornece maior parte do volume de vapor utilizado nos acionamentos.

Os principais equipamentos que consomem energia térmica são:

- Bombas e compressores turbinados, em todas as etapas de produção, mas principalmente nas etapas de compressão e resfriamento;
- Refervedores das colunas de destilação na etapa de separação.

O resultado do estudo do subsegmento petroquímico realizado pela EPE (2018) mostra que o consumo específico médio de energia elétrica é de 0,00680 tep/t (79,0285 kWh/t de nafta, variando de 47,3529 a 119,6165 kWh/t de nafta) e de 0,10586 tep/t de nafta (4,4322 GJ/t de nafta, variando de 1,5083 a 6,8917 GJ/t de nafta) em energia térmica, estimados por média ponderada pela produção de cada planta. Adicionalmente, o estudo apresenta (Figura 2.7) o rendimento energético, a partir das principais fontes de energia, da primeira transformação de energia do processo produtivo:

FONTES DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	80,0%	70,0%	65,0%	-	-	-
Carvão vapor	-	79,9%	-	64,9%	-	-	-
Óleo combustível		86,0%	-	64,9%	-	-	-
Gás de refinaria	-	79,9%	63,8%	64,9%	-	-	-
Eletricidade	89,2%	-	-	-	60,0%	-	-

**Figura 2.7:** Rendimento energético

Fonte: EPE (2018).

Já a Figura 2.8, mostra os coeficientes de destinação dos energéticos, ou seja, a distribuição da energia por uso final:

FONTES DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	53,0%	33,7%	13,2%	-	-	-
Carvão vapor	-	80,0%	-	20,0%	-	-	-
Óleo combustível		80,0%	-	20,0%	-	-	-
Gás de refinaria	-	53,1%	33,7%	13,3,%	-	-	-
Eletricidade	97,0%	-	-	-	3,0%	-	-

**Figura 2.8:** Coeficiente de destinação de energia

Fonte: EPE (2018).

As indústrias petroquímicas brasileiras têm tomado medidas para reduzir seu consumo energético e suas emissões de gases de efeito estufa. Uma das estratégias adotadas é a melhoria da eficiência energética, por meio da implementação de tecnologias mais eficientes e da adoção de práticas de gestão energética. Além disso, as empresas têm investido em fontes de energia renovável, como a energia solar e a biomassa, para reduzir sua dependência de fontes não renováveis.

## 2.2 Eficiência energética

Os aspectos relacionados ao uso consciente de recursos, especialmente água e energia, ganharam uma importância crescente devido à demanda em constante crescimento e às limitações das fontes disponíveis. Como resultado, a sociedade tem se empenhado cada vez mais em adotar ações e iniciativas que visam melhorar a eficiência dos diversos processos utilizados no cotidiano da população mundial. Alguns fatores relevantes a serem mencionados incluem:

- Aumento de custos da energia elétrica e mudanças da estrutura tarifária;
- Crescimento de processos de certificação de edificações;
- Mudanças climáticas.

Podem-se definir por ações de eficiência energética toda e qualquer ação que promova a redução do consumo de energia, mantendo-se o mesmo nível de serviço prestado. Pode-se afirmar que as ações para o aumento da eficiência energética promovem aumentos na razão entre o nível de energia produzida e o nível de energia consumida. Essas ações de eficiência energética concentram-se normalmente nos estágios de operação e manutenção de sistemas e podem promover em conjunto com a redução do consumo dos insumos (energia, água, gás, etc.), reduções nos custos de operação e/ou manutenção (menos reparos e aumento da eficiência dos sistemas e/ou equipamentos) final as ações para melhoria da eficiência energética podem resultar também em aumento de lucratividade associados à melhoria de qualidade e de confiabilidade dos processos. Nesse sentido, técnicas vêm sendo desenvolvidas para avaliação e gestão da energia, permitindo o controle das demandas principalmente em uma instalação comercial ou industrial final essas técnicas são consolidadas, dando origem a normas que são mundialmente empregadas como a família de normas ISO 14000 e ISO 50001 (HERNANDEZ NETO et al., 2021).

### **2.2.1 Cenário global**

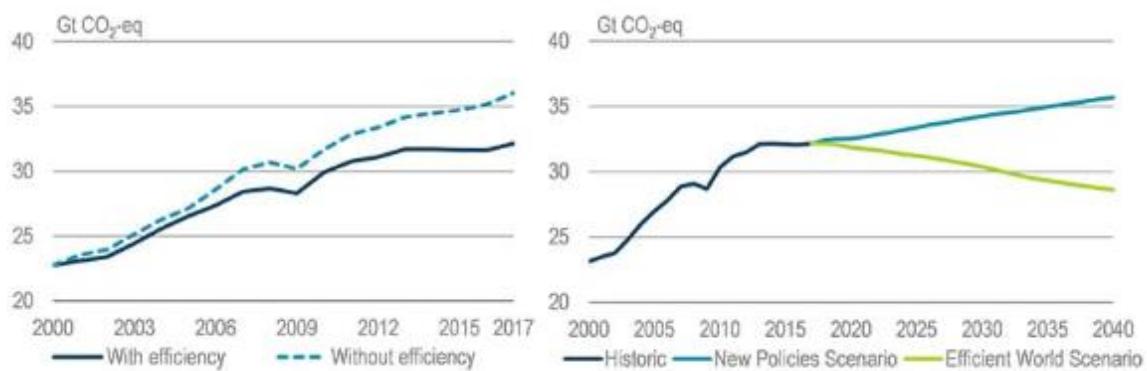
O relatório de Eficiência Energética publicado pela IEA (2022) traz reflexões sobre a segurança energética e a importância da eficiência energética nesse cenário de crise global do setor de energia desencadeada pela guerra entre Ucrânia e Rússia e pela pandemia da Covid-19. A inflação do preço da energia varia entre países, a depender da matriz energética, do nível de eficiência energética e estrutura da economia, além de políticas públicas de taxação dos combustíveis e estratégias de apoio governamental para pagamento de contas. Em alguns países da União Europeia, o preço da conta de energia para o consumidor final chegou a ter um aumento de 39% em outubro de 2022. Em relação ao setor industrial, pode-se destacar as seguintes informações (IEA, 2022):

- O consumo global de energia pelo setor industrial aumentou desde o início da pandemia, chegando a 165 Exajoules (EJ) em 2021, em linha com a tendência histórica de crescimento, passando de 33% em 2000 para 38% da demanda total de energia em 2022. As indústrias químicas, de aço e cimento, representam aproximadamente 60% da demanda de energia industrial, sendo a China responsável por 70 a 90% da produção dessas *commodities*.
- O setor industrial, principalmente, de químicos, aço e cimento, é responsável por aproximadamente 9,4 Gt de emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera e não estão apresentando resultados satisfatórios para atingimento da neutralidade de emissões de gases de efeito estufa até 2050. Para atingir tal meta, estima-se que esses setores tenham que aumentar a eficiência energética a uma taxa de 3% ao ano.
- Em 2021, houve aumento de 30% nos investimentos de *Venture Capitals* em *startups* em estágio inicial focadas no desenvolvimento de tecnologias de eficiências energética, representando 1,1 bilhão de dólares. O aumento foi liderado principalmente por empresas que estão avançando em redes inteligentes e nos conceitos de otimização do fluxo de energia integrado.
- No cenário das *startups* de energia limpa, a digitalização é essencial para impulsionar novas ideias e modelos de negócios baseados em ferramentas digitais, como energia como serviço (*Energy as a Service - EaaS*) e agregação de usinas virtuais (*Virtual Power Plants - VPP*) para recursos energéticos distribuídos (*Distributed energy resources - DER*). Essa tendência está criando oportunidades para empresas tradicionais de energia, serviços públicos e setores como indústria, transporte e construção, impulsionados pela inovação e acesso a dados.
- A União Europeia (UE) lançou em 2022 o plano RePowerEU a fim de acelerar a transição para energia limpa e alcançar a dependência de combustíveis fósseis russos até 2030, sendo a Eficiência Energética (EE) um dos três pilares centrais do plano. A diretiva de EE é aumentar de 9% para 13% a meta de economia de energia em toda a EU, dobrando a taxa de implementação de bombas de calor entre 2023 e 2027 e acelerando a eletrificação nas indústrias.

A eficiência energética tem um papel fundamental no combate às mudanças climáticas, sendo uma tarefa ainda mais urgente devido ao recente aumento das emissões e pelo tempo limitado para atingir as metas de mitigação, conforme apresentado no relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2018.

Dentre os benefícios associados à Eficiência Energética, destacam-se as reduções diretas de emissões GEE pela diminuição do uso de combustíveis fósseis e as reduções indiretas, relacionadas com o aumento da eficiência na geração de energia elétrica.

A Figura 2.9 compara as emissões de gases de efeito estufa em cenários com e sem ações de eficiência energética e o efeito das novas políticas nesse aspecto. À esquerda tem-se a representação gráfica baseada num modelo criado em 2018 para estimar o impacto das ações de eficiência energética nas emissões de carbono equivalente na atmosfera, evidenciando o efeito positivo de tal prática. Na mesma escala, à direita, está a projeção feita para o estudo “*Efficient World Scenario*” que mostra que as ações relacionadas a EE são indispensáveis para atingir as metas de redução de emissões.



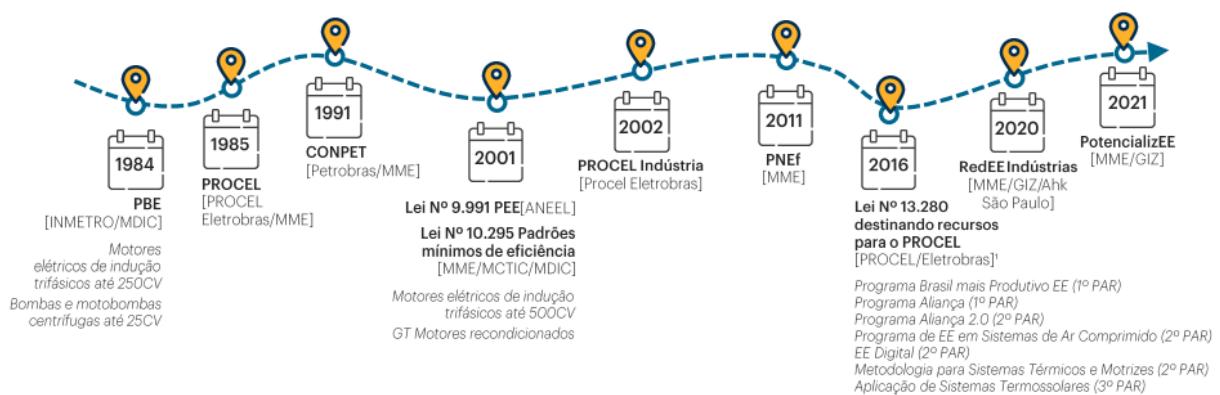
**Figura 2.9:** Emissões de GEE, com e sem ações de eficiência energética

Fonte: IEA (2022).

## 2.2.2 Cenário brasileiro

No Brasil, apesar das preocupações em promover a eficiência energética, os avanços em comparação com outros países demonstram que ainda há muito a ser feito para alcançar níveis ideais no uso de energia. De acordo com o *American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE)* o Brasil ocupa a 19<sup>a</sup> posição geral em um ranking de 25 países avaliados em termos de políticas e esforços para promover a eficiência energética em 2022 (SUBRAMANIAN et al., [s.d.]).

Os esforços governamentais para a eficiência energética no Brasil têm sido predominantemente reativos, ocorrendo em resposta a episódios específicos de dificuldades no fornecimento de energia. Não houve um planejamento de longo prazo bem estruturado nessa área. A legislação de eficiência energética no país foi impulsionada por eventos como os choques do petróleo na década de 70, a crise de financiamento internacional nos anos 80 e, mais recentemente, o racionamento de energia elétrica em 2001. A Figura 2.10 apresenta a linha do tempo das políticas e ações relacionadas a Eficiência Energética no Brasil (EPE, 2022):



**Figura 2.10:** Linha do tempo das políticas e ações voltadas a Eficiência Energética no Brasil

Fonte: EPE (2022).

Além disso, a implementação de programas e políticas de eficiência energética envolve a atuação de várias instituições, exigindo uma interação

significativa entre elas. No entanto, esse arranjo institucional tem se mostrado complexo e pouco eficiente para o desenvolvimento de iniciativas mais abrangentes e efetivas. É importante destacar que, apesar de os programas e financiamentos disponíveis no país terem se concentrado principalmente no setor residencial, a indústria, como maior consumidora de energia, apresenta um imenso potencial para a implementação de medidas de eficiência energética (SCHUTZE; HOLZ, 2021).

Como destaque do Relatório de Indicadores do Atlas da Eficiência Energética no Brasil do ano de 2022 (EPE, 2022) em relação ao setor industrial, tem-se as seguintes informações:

- Entre 2000 e 2021, o consumo energético do setor industrial brasileiro aumentou a uma taxa de 1,6% ao ano.
- Em relação à oferta energética por fonte, houve aumento da participação do gás natural, passando de 5,4% em 2000 para 13,3% em 2021.
- Em relação às fontes renováveis, destacam-se o aumento da participação da energia eólica (adicionando 6,2 milhões de tep. à matriz) e da lixívia (10,1 milhões de tep.).
- Criação do Programa PotencializEE e RedeEE Indústrias, que incentivam a modernização de parques industriais por meio da melhoria contínua de processos e uso de equipamentos mais eficientes.
- Reconhecimento do papel da eficiência energética como vetor de competitividade da indústria brasileira e como potencializadora de ganhos em inovação tecnológica no país.

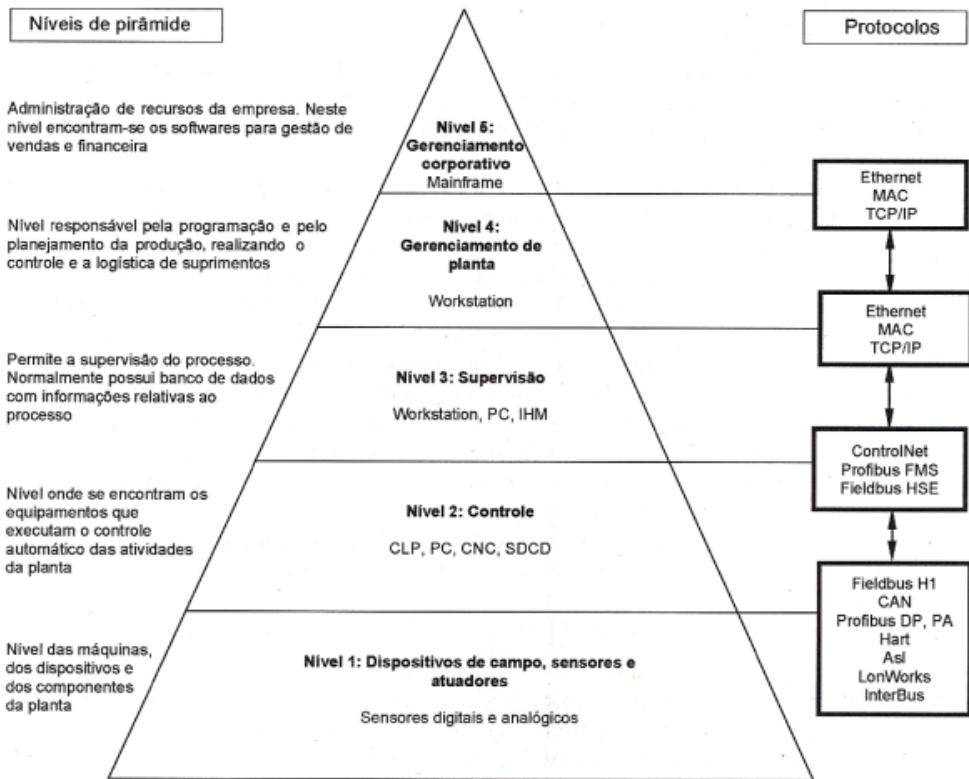
## 2.3 Automação e Controle de Processos: seu papel para a eficiência energética

Segundo Moraes e Castrucci (2015, p.12), “a palavra ‘automation’ foi inventada pelo *marketing* da indústria de equipamentos na década de 1960. Atualmente, entende-se por automação qualquer sistema apoiado em computadores, que substitua o trabalho humano em favor da segurança das pessoas e da qualidade dos produtos da rapidez da produção ou da redução de custos assim aperfeiçoando os complexos objetivos das indústrias e dos serviços”. No entanto, na visão dos autores, é um equívoco assumir que automação resulta tão-somente do objetivo de reduzir custos de produção final, pois essa decorre mais de necessidades tais como maior nível de qualidade, expressa por especificações numéricas de tolerância, maior flexibilidade de modelos para o mercado, maior segurança pública e dos operários, menores perdas materiais e de energia, mais disponibilidade e qualidade da informação sobre o processo e melhor planejamento e controle da produção.

A Figura 2.11 apresenta a chamada “Pirâmide de Automação”, que ilustra os cinco níveis de automação geralmente encontrados numa planta industrial, que visam atender às necessidades supracitadas:

- Nível 1: é o nível das máquinas, dispositivos e componentes (chão-de-fábrica).
- Nível 2: é o nível dos controladores digitais, dinâmicos e lógicos, e de algum tipo de supervisão associada ao processo. Aqui se encontram concentradores de informação sobre o Nível 1, e as interfaces Homem-Máquina (IHM).
- Nível 3: permite o controle do processo produtivo da planta; normalmente é constituído por banco de dados de informações dos índices de qualidade da produção, relatórios e estatísticas de processo, índice de produtividade, algoritmos de otimização da operação produtiva.
- Nível 4: é o nível responsável pela programação e pelo planejamento da produção, realizando o controle e a logística dos suprimentos.
- Nível 5: é o nível responsável pela administração dos recursos da empresa, em que se encontram os softwares para gestão de vendas e gestão

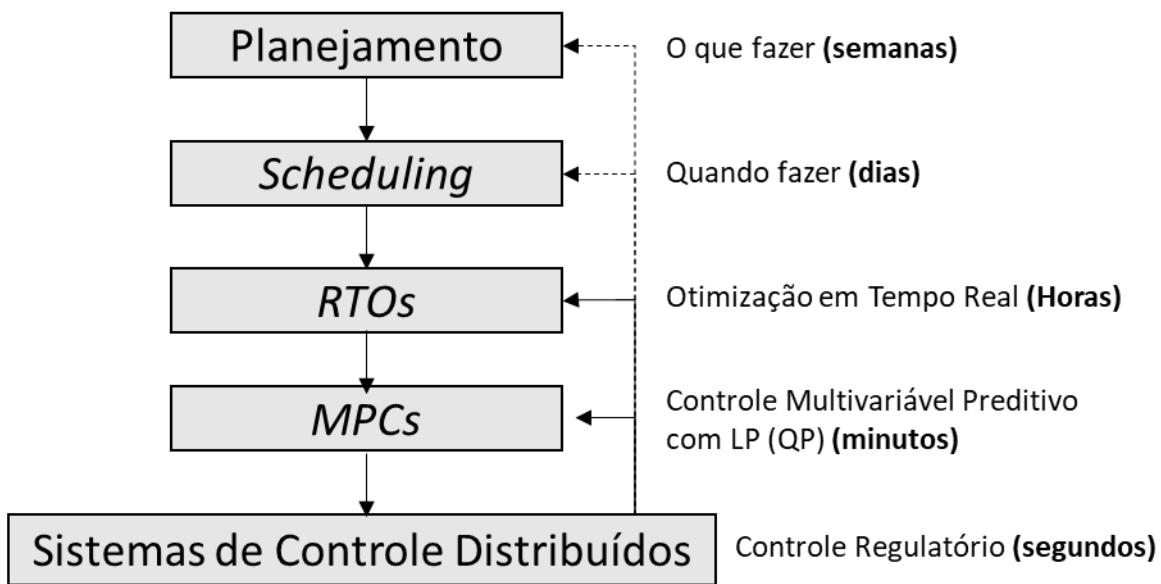
financeira; é também onde se realizam a decisão e o gerenciamento de todo o sistema.



**Figura 2.11: Pirâmide da Automação Industrial**

Fonte: Moraes e Castrucci (2015).

Observa-se, portanto, que a disciplina da engenharia de automação está diretamente relacionada ao controle e tomada de decisão de uma planta industrial. Nesse contexto, Darby et al. (2011) elaboraram uma representação hierárquica dessas camadas de controle e tomada de decisão, enfatizando o refinamento sucessivo nas escalas de tempo de cada camada, além das escalas espaciais variadas, da otimização em toda a planta na parte superior ao controle regulatório na parte inferior, conforme apresentado na Figura 2.12:



**Figura 2.12:** Camadas de Controle e tomada de decisão de uma planta industrial

Fonte: adaptado de Darby et al. (2011).

A transição de um mundo em que os processos eram completamente manuais e apoiados em papel para um mundo em que a tecnologia caminha rapidamente rumo aos conceitos da indústria 4.0, tem provocado uma série de mudanças nos processos produtivos, facilitando a coleta e integração de dados de fontes distintas, cujo principal objetivo é atingir maiores níveis de eficiência operacional, produtividade e automatização. Com a crescente disponibilidade de dados, o advento da internet das coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) e a computação em nuvem, novas abordagens orientadas a dados para otimização de processos industriais vem ganhando visibilidade e aplicações (GOPALUNI et al., 2020).

### **2.3.1 O papel da automação na estratégia de eficiência energética e descarbonização industrial**

Dentre as aplicações das novas tecnologias orientadas a dados, estão as iniciativas relacionadas a descarbonização industrial, com objetivos de habilitar processos de produção mais eficientes e sustentáveis.

Ao usar sistemas de automação e controle de processo, as indústrias podem otimizar seus processos de produção para reduzir o consumo de energia e o desperdício, o que, por sua vez, reduz a pegada de carbono de suas operações. Por exemplo, sistemas de controle automatizados e alimentados com dados em tempo real, são capazes de monitorar e ajustar a temperatura, pressão e vazões a fim de garantir que o processo de produção esteja operando com a máxima eficiência, reduzindo assim a quantidade de energia necessária para produzir uma determinada quantidade de produto.

No caso do setor petroquímico, os sistemas de controle de processo são projetados para otimizar o desempenho dos processos químicos contínuos, monitorando e ajustando os principais parâmetros do processo em tempo real. Isso ajuda a reduzir o consumo de energia e aumentar a eficiência de várias maneiras. As aplicações de baseadas em dados, chamadas no setor como *analytics* são, portanto, viabilizadas pelos dados e informações capturados e trabalhados nos sistemas de automação presentes nos cinco níveis da pirâmide apresentada anteriormente.

As análises podem ser divididas em cinco tipos de acordo com o valor adicionado no processo e a complexidade de implementação, conforme mostra a Figura 2.13 (ACÁCIO DE ANDRADE, 2022):

- Análise descritiva: descreve e resume dados de forma objetiva, identificando padrões e características;
- Análise de diagnóstico: adiciona à análise descritiva as causas do fenômeno descrito;
- Análise preditiva: utiliza modelos e algoritmos para prever futuros eventos com base no histórico de dados e padrões identificados;

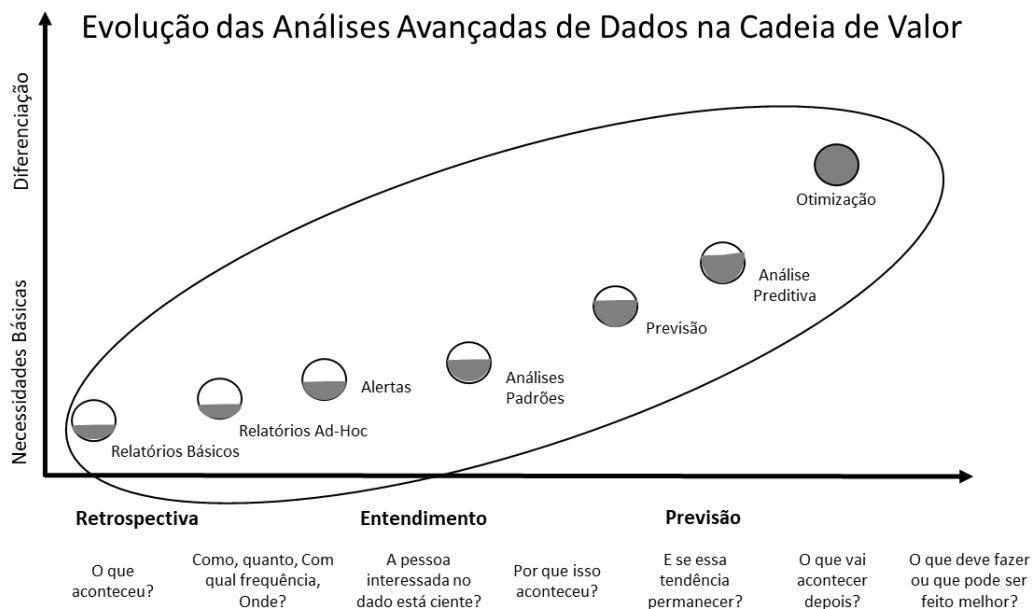
- Análise prescritiva: recomenda ações baseadas nas análises supracitadas a fim de otimizar resultados.



**Figura 2.13:** Tipos de análise de dados

Fonte: Acácio de Andrade (2022).

Observa-se diferentes níveis de maturidade no uso de dados nas organizações, desde uso para construção de relatórios simples, suprindo uma necessidade básica dos usuários, até aplicações de otimização, que em muitos casos pode ser uma vantagem competitiva das organizações no setor no qual estão inseridas, como apresentado na Figura 2.14 (ACÁCIO DE ANDRADE, 2022):



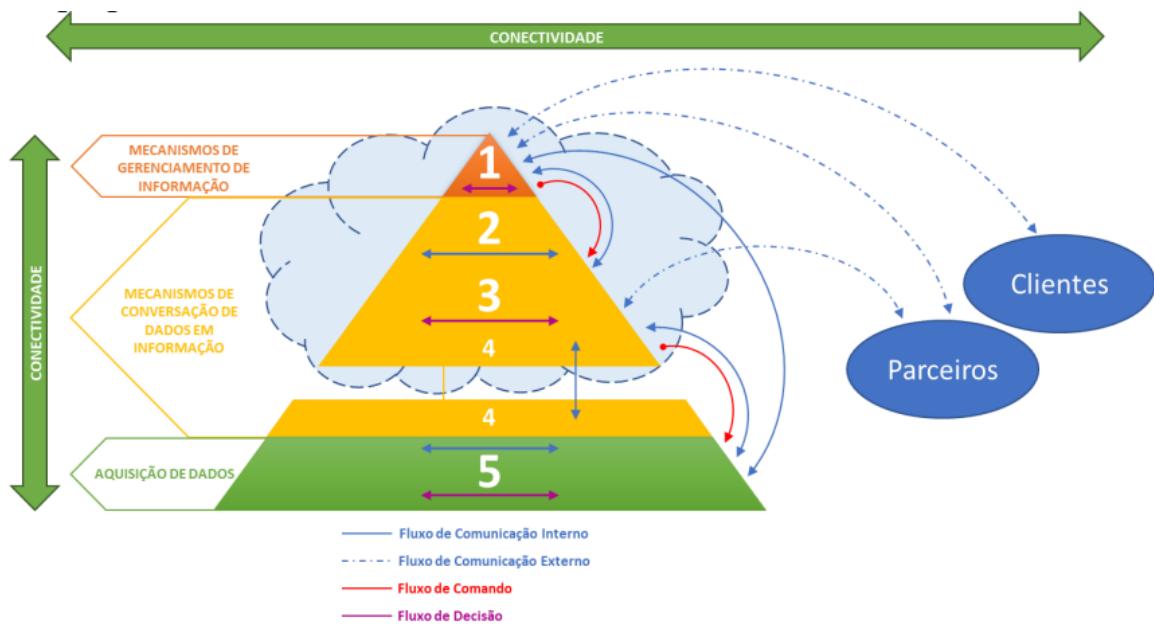
**Figura 2.14:** Níveis de uso de dados e seus benefícios para as organizações

Fonte: Acácio de Andrade (2022).

### 2.3.2 Transformação Digital

Com o avanço no desenvolvimento e uso de novas tecnologias, como internet das coisas e computação em nuvem, entre outras, a automação industrial vem se transformando, tornando-se cada vez mais conectada e habilitando novas funcionalidades que apoiam o controle e tomada de decisão das organizações.

Nesse sentido, observa-se uma tendência de maior integração entre as tecnologias de operação (OT, do inglês *Operation Technology*) e tecnologias da informação (TI). Essa transformação é também conhecida como convergência OT-IT e está mudando a clássica pirâmide da automação apresentada nessa seção do trabalho, conforme apresentado na Figura 2.15 (ACÁCIO DE ANDRADE, 2022):



**Figura 2.15:** Pirâmide da automação no contexto da transformação digital

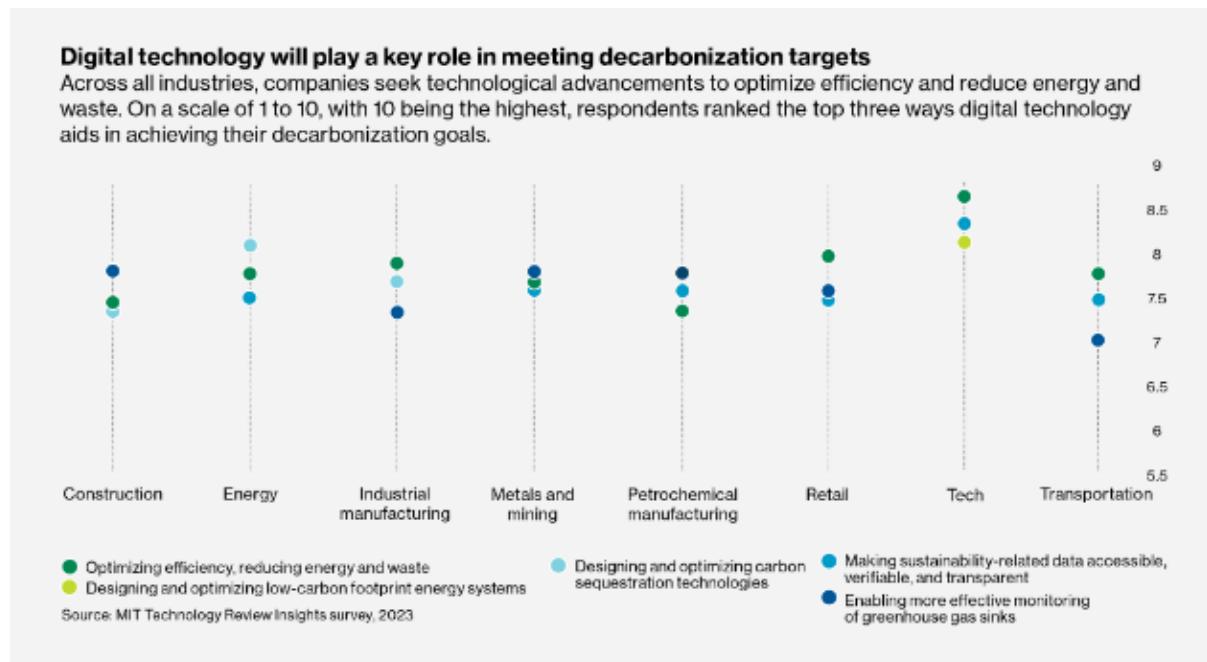
Fonte: Acácio de Andrade (2022).

Dado esse contexto, as tecnologias digitais são apontadas como fatores importantes para a transformação do setor de energia, cujos direcionadores, conhecidos como os 4Ds (digitalização, descentralização, democratização do acesso à energia e descarbonização), impulsionam a adoção de tecnologias de forma cada vez mais intensiva, e trazem desafios aos modelos de negócios que essa indústria sempre adotou até então. Especificamente no setor petroquímico, onde a variação do preço do barril a nível global, geopolítica conturbada entre importantes países produtores de petróleo e questões regulatórias impactam os resultados, a tecnologia passa a ser uma das principais ferramentas para a obtenção de vantagens competitivas, ou mesmo sobrevivência para as organizações atuantes nessa cadeia de valor (IBP, 2022).

Uma pesquisa conduzida pelo *Massachusetts Institute of Technology (MIT) Technology Review Insights* (2023), que contou a participação de 350 executivos de grandes organizações globais em oito setores e nove especialistas do assunto, destaca que:

- A digitalização é fundamental para a transição energética, sendo consideradas importantes para: otimização da eficiência e reduzir consumo e desperdício de energia; construção e optimização de tecnologias de captura de carbono; acesso e transparência de dados sobre sustentabilidade; monitoramento de emissões de gás; design e otimização de sistemas de baixa pegada de carbono.
- Para muitas indústrias, a maior alavanca de descarbonização é a economia circular.
- A inovação a partir de soluções digitais depende de parcerias com especialistas em tecnologias.
- As atitudes em relação à adoção de tecnologia e inovação variam de setor para setor e de região para região e a segurança cibernética é um dos motivos encontrados.
- Uma cultura digital é necessária para compreender e enfrentar os desafios da descarbonização.

A Figura 2.16 apresenta destaques da pesquisa mencionada acima (MIT TECHNOLOGY REVIEW INSIGHTS, 2023):



**Figura 2.16: Resultado da pesquisa sobre uso de tecnologias digitais por setor**

Fonte: MIT Technology Review Insights (2023).

## 2.4 Otimizadores em tempo real

Diante de um mercado cada vez mais competitivo e com uma crescente preocupação com a sustentabilidade, eficiência energética e segurança, a otimização *on-line* de processos está se tornando cada vez mais importante.

Na literatura, os Otimizadores em Tempo Real, também chamado de Otimizadores *On-Line*, são definidos como “um processo de trabalho no qual as variáveis de decisão são ajustadas iterativamente usando um modelo do sistema e/ou medições de processo em tempo real com a finalidade de minimizar custos operacionais e satisfazer as restrições do processo” (DUTTA, 2016, p.1, tradução nossa). Por utilizarem técnicas de análises avançadas e algoritmos para continuamente otimizarem processos e sistemas em tempo real, podem ser considerados uma aplicação de *analytics*, conforme descrito na seção 2.3.1.

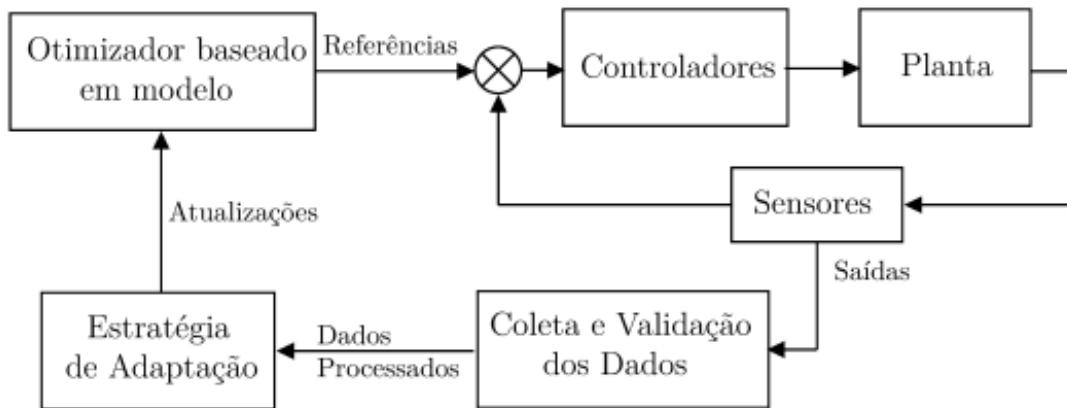
As implementações tradicionais de RTO são baseadas num modelo que calcula os *setpoints* em estado estacionário por meio da resolução de um problema de otimização numérica em estado estacionário e envolve os seguintes componentes:

- Dados atuais do processo;
- Condições operacionais e especificações da unidade industrial;
- Instrumentação e controle da planta;
- Restrições (equipamentos, processo e ambientais);
- Função Objetivo, que considera: preços de produtos, matérias-primas e utilidades.

Tipicamente, os *setpoints* atualizados pelo modelo são (REJOWSKI JUNIOR, 2018):

- Propriedades e composições;
- Vazões;
- Temperaturas;
- Pressões.

Visto que o funcionamento do RTO depende de uma modelo rigoroso de processo, o primeiro passo para a implementação desse tipo de ferramenta é a coleta de dados para definição do modelo. O problema de otimização é então baseado nesse modelo, que calcula entradas ótimas em relação a um objetivo econômico a partir de diferentes premissas operacionais, tais como preço dos insumos, restrições de equipamentos e ambientais. A partir dessa definição inicial, o sistema irá coletar continuamente novos dados de processo e automaticamente utilizá-los na estratégia de adaptação escolhida. É importante destacar que os dados em tempo real passam por um processo de validação, tipicamente na forma de verificação de limites aceitáveis ou por meio de técnicas estatísticas de reconciliação e detecção de erros grosseiros (BAGAJEWICZ, 2000). A Figura 2.17 mostra os principais componentes de um RTO e suas relações no processo de otimização:



**Figura 2.17:** Componentes de um RTO

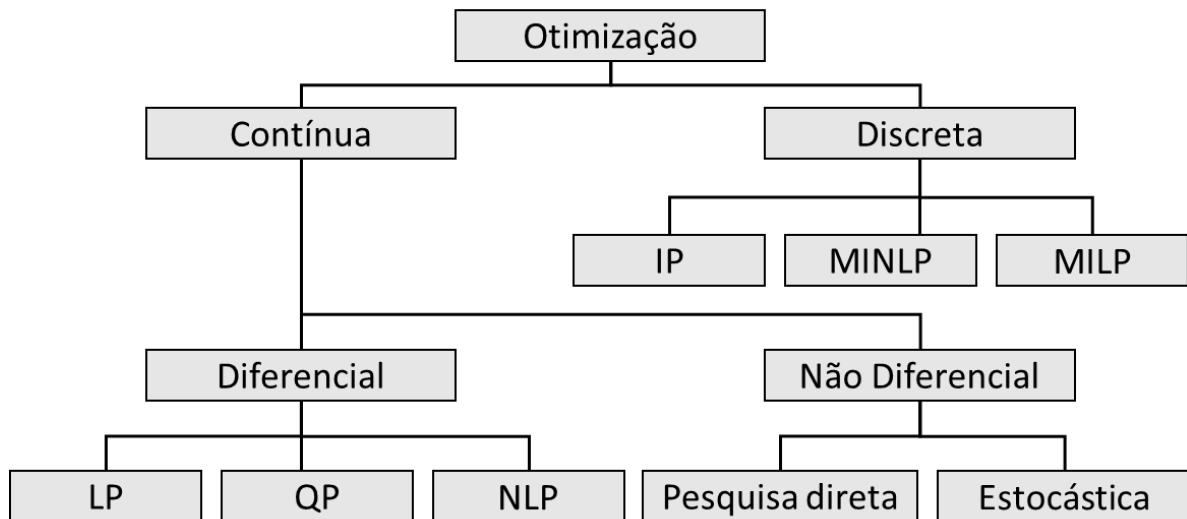
Fonte: adaptado de Bagajewicz (2000).

Os problemas de otimização podem ser classificados em contínuos ou discretos, a depender da natureza das variáveis de decisão e existem diferentes técnicas utilizadas para resolução de cada um dos tipos problemas de otimização (DUTTA, 2016):

- Otimização contínua: se as variáveis de decisão no problema de otimização são números reais (temperatura, pressão, concentração, vazão etc.) então a otimização é contínua. As técnicas utilizadas para esse tipo de problema são:
  - Programação Linear (LP, do inglês *Linear Programming*);
  - Programação Quadrática (QP, do inglês *Quadratic Programming*);
  - Programação Não-Linear (NLP, do inglês *Non-Linear Programming*);
- Discreta: quando as variáveis de decisão são números inteiros/discretos (disponibilidade de um equipamento, por exemplo), então a otimização é discreta. Para esses problemas, as técnicas tipicamente utilizadas são:
  - Programação Inteira (IP, do inglês *Integer Programming*);
  - Programação Não-Linear Mista (MINLP, do inglês *Mixed Integer Non-Linear Programming*);

- Programação linear Inteira Mista (MILP, do inglês, *Mixed Integer Linear Programming*).

A Figura 2.18 resume a classificação dos problemas de otimização e suas técnicas de resolução:



**Figura 2.18:** Classificação dos problemas de otimização e suas técnicas

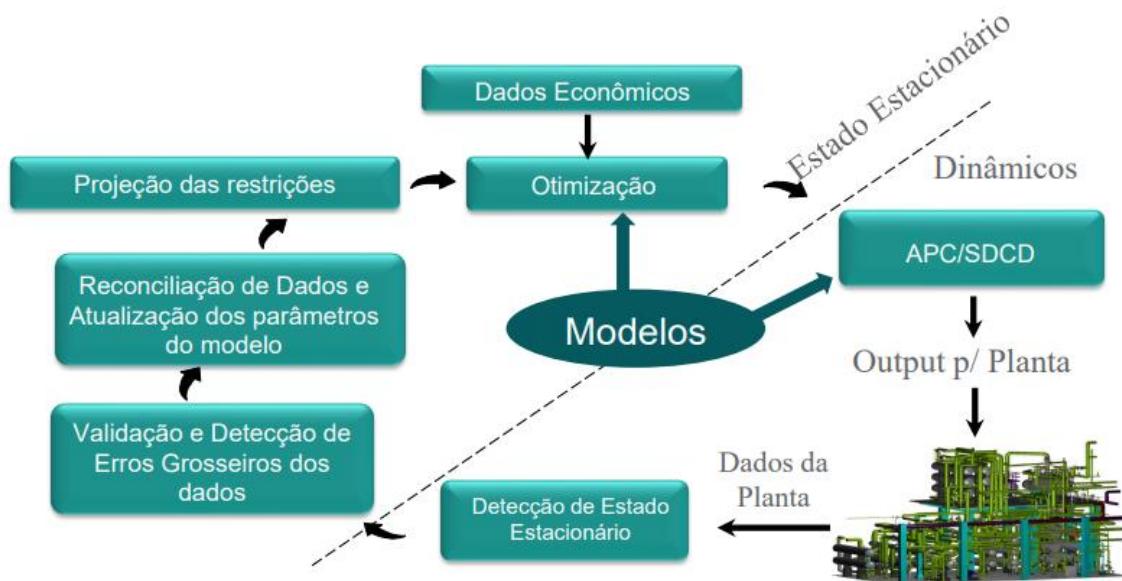
Fonte: adaptado de Dutta (2016).

Ao longo dos anos, o RTO evoluiu significativamente, impulsionado pelo avanço no poder computacional, algoritmos de otimização e pela crescente necessidade de operação sustentável e econômica.

#### 2.4.1 Conceitos Práticos de otimização em Tempo Real

Na prática, a aplicação de RTO está associada ao Controle Avançado de Processos (APC, do inglês *Advanced Process Control*) e faz-se necessário diferenciar as duas ferramentas. A Figura 2.19 apresenta o ciclo típico da aplicação de RTO em funcionamento conjunto com APC.

A principal diferença é que a aplicação típica de um APC não é capaz de capturar as não-linearidades dos processos de produção, sendo necessário atuar em conjunto com RTO para ponderar os *trade-offs* de processos complexos (REJOWSKI JUNIOR, 2018).



**Figura 2.19:** RTO e APC na prática

Fonte: Rejowski Junior (2018).

A Tabela 2.1 resume as principais diferenças das duas aplicações:

**Tabela 2.1: Diferenças entre APC e RTO**

APC	RTO
<p>Modelos lineares Empíricos</p> <p>Sem dados econômicos reais</p> <p>Exemplos de objetivos para unidades de processos contínuos que produzem mais de um produto:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximização do rendimento do produto mais rentável;</li> <li>• Maximização da carga da unidade.</li> </ul>	<p>Modelos não-lineares</p> <p>Modelos baseados em princípios termodinâmicos e físico-químicos</p> <p>Com dados econômicos reais</p> <p>Exemplo de objetivos para unidades de processos contínuos que produzem mais de um produto:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximização do lucro</li> </ul>

Fonte: adaptado de Rejowski Junior (2018)

As ações típicas de uma aplicação de RTO são:

- Atualização de *targets*/metas de variáveis selecionadas do APC, levando a operação para o ponto ótimo;
- Alteração do perfil de produção para ser o mais “lucrativo” possível.

Segundo Rejowski Junior (2018), os benefícios típicos da aplicação em unidades petroquímicas são mostrados na Figura 2.20:

Unidade Petroquímica	Benefícios por tonelada	Tamanho típico da unidade, ktpa	Benefícios Típicos, \$MM/ano
Etileno	8 - 12	465	3,7 - 5,6
Polietileno	5 - 10	400	2,0 - 4,0
Polipropileno	5 - 10	250	1,2 - 2,5
Estireno	5 - 10	300	1,5 - 3,0
Caprolactama	20 - 30	100	2,0 - 3,0
Cumeno e Fenol	6 - 8	250	1,3 - 1,7

**Figura 2.20:** Benefícios da implementação de RTO na indústria petroquímica

Fonte: adaptado de Rejowski Junior (2018).

#### 2.4.2 Aplicação de RTO focada em Energia

De acordo com Marchetti et al. (2020), as aplicações de RTO são majoritariamente estudadas e aplicadas em processos químicos.

No caso de refinarias, plantas químicas e petroquímicas, os principais gastos são com energia (seguido das matérias-primas) e, portanto, as reduções desses custos se tornaram essenciais para os negócios. Nessas unidades produtivas, os sistemas de energia são complexos e envolvem análise de custo de emissões e limites regulatórios, que adicionam um fator adicional de complexidade no desafio de redução dos custos com energia (RUIZ e RUIZ, 2009).

Como os sistemas de utilidades e de energia geralmente são as principais fontes de emissões de  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  e  $\text{CO}_2$ , o controle dessas emissões e a gestão de créditos e quotas está diretamente relacionado com o gerenciamento de energia.

A fim de lidar com a complexidade do gerenciamento de energia e emissões dessas unidades, muitas organizações implementam softwares de otimização em tempo real, que fornecem recomendações sobre as condições ótimas de operação numa abordagem integral, incluindo sistemas de utilidades, vapor, combustíveis, eletricidade, água de alimentação das caldeiras, condensados e emissões.

Um dos grandes fornecedores desse tipo de solução, também conhecida no mercado como Otimizador de Energia em Tempo Real (ERTO, do inglês *Energy Real-Time Optimizer*), apresenta casos de sucesso da implementação da ferramenta em grandes unidades petroquímicas. Essa mesma ferramenta foi utilizada para o estudo de caso apresentado nesse trabalho, cuja técnica de resolução do problema de otimização adotada é a Programação Quadrática Sequencial (SQP, do inglês *Sequential Quadratic Programming*).

### 2.4.3 Sequential Quadratic Programming (SQP)

O SQP é um método numérico utilizado na resolução de problemas de minimização (ou maximização) com restrições envolvendo funções não-lineares. O SQP é baseado na estratégia de encontrar a solução para um problema complexo por meio da resolução de uma sequência de problemas mais simples, cujas soluções converjam para a procurada. Em outras palavras, dado um problema que consiste na minimização de uma função sujeita a um conjunto de restrições, uma sequência de subproblemas é construída e a função objetivo é substituída por uma aproximação quadrática e as restrições são substituídas por aproximações lineares (NUNES e DINIZ-EHRHARDT, 2010).

Em termos matemáticos, a formulação do problema de otimização pode ser descrita matematicamente pela seguinte expressão:

Minimize  $f(x)$

Sujeito à:  $g_j(x) \leq 0 \quad j = 1 \dots p$

$h_k(x) = 0 \quad k = 1 \dots q$

$x^l \leq x_i \leq x^u \quad i = 1 \dots n$

onde  $x$ ,  $f(x)$ ,  $g(x)$ ,  $h(x)$ ,  $x^l$  e  $x^u$  representam, respectivamente, o vetor das variáveis de decisão, a função objetivo, os vetores das restrições de desigualdade e igualdade, os limites inferiores e superiores dos vetores das variáveis de decisão. Além disso,  $p$ ,  $q$  e  $n$  representam, respectivamente, o número das restrições de desigualdade e igualdade das variáveis de decisão e  $j$ ,  $k$  e  $i$  são os índices das coordenadas dos vetores.

Silva (2009) resume as principais etapas envolvidas em um algoritmo SQP:

- SQP 1: estabelecer uma solução inicial  $X_0$ ;
- SQP 2: configurar uma aproximação inicial para a matriz Hessiana dos termos quadráticos da função objetivo;
- SQP 3: resolver o subproblema para encontrar a direção de busca  $d$ ;

- SQP 4: realizar uma busca linear para determinar o tamanho do passo  $\alpha$  na direção  $d$ ;
- SQP 5: atualizar a solução, remetendo-a para a posição indicada;
- SQP 6: verificar a convergência do algoritmo SQP;
  - 6.1: se o mínimo local for encontrado, o processo termina;
  - 6.2: caso contrário, atualiza-se a matriz Hessiana e volta para o passo SQP 3.

No contexto do RTO, o SQP é usado para resolver problemas de otimização em que as variáveis de decisão e as restrições estão sujeitas a mudanças ao longo do tempo. O objetivo é encontrar uma solução ótima que maximize o desempenho do sistema, levando em consideração as restrições operacionais. O SQP é adequado para problemas de otimização em tempo real, pois é um método iterativo que pode lidar com mudanças rápidas nas condições operacionais. Ele permite atualizar continuamente a solução ótima à medida que novos dados são adquiridos ou as restrições são modificadas.

É importante ressaltar que, em otimizadores em tempo real, a velocidade de convergência e a capacidade de lidar com restrições operacionais são fatores críticos. Portanto, a escolha de técnicas eficientes e robustas, como o SQP, é fundamental para garantir um desempenho satisfatório do sistema de otimização em tempo real.

Em resumo, o SQP é utilizado em otimizadores em tempo real para ajustar os parâmetros de um sistema industrial, considerando uma função objetivo e restrições operacionais. Ele permite encontrar soluções ótimas de forma iterativa, levando em conta as condições e limitações do processo. A aplicação do SQP nesses sistemas contribui para melhorar o desempenho, aumentar a eficiência e reduzir os custos operacionais.

### 3 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é apresentado o estudo de caso da implementação de uma ferramenta de otimização em tempo real (RTO) com o objetivo de minimizar o custo da matriz energética e as emissões de gases de efeito estufa por meio de recomendações de atuações operacionais em uma unidade petroquímica de primeira geração.

#### 3.1 Descrição do processo

A cadeia petroquímica é organizada em empresas de primeira, segunda e terceira geração, com base na transformação de diversas matérias-primas. As empresas de primeira geração são responsáveis pela produção dos petroquímicos básicos, através da transformação da nafta de petróleo, do etano, ou do condensado de petróleo, por meio de um processo de craqueamento térmico. Na sequência, as empresas de segunda geração recebem os petroquímicos básicos e, através de processos de polimerização, os transformam em petroquímicos intermediários (resinas termoplásticas, elastômeros, fibras etc.). Por fim, as empresas de terceira geração transformam os petroquímicos intermediários em produtos finais, como embalagens, componentes plásticos para indústria em geral, entre outros (EPE, 2018).



**Figura 3.1:** A cadeia petroquímica no Brasil

Fonte: EPE (2018).

O estudo deste trabalho foi realizado em uma empresa petroquímica de primeira geração, que é subdividida em duas unidades de olefinas, uma unidade de aromáticos e uma unidade de fornecimento das utilidades. Nas unidades de Olefinas, a nafta petroquímica, principal matéria-prima, passa pelo processo de craqueamento térmico e é convertida majoritariamente nos seguintes petroquímicos básicos: eteno, propeno, hidrogênio, metano, etano, propano, butano, butenos, butadieno e gasolina. Após o craqueamento térmico, os petroquímicos básicos são separados e purificados em diversas etapas de destilação fracionada.

### 3.2 Desafios da gestão energética

O processo descrito acima é energointensivo e baseado em vários níveis de pressão de vapor, possui caldeiras que queimam diferentes combustíveis e unidades de cogeração que fornecem vapor e eletricidade para as unidades produtivas.

O uso de diferentes combustíveis somado ao desequilíbrio entre a produção e consumo de gás, a importação e exportação de energia elétrica, além das questões

ambientais, acarretam uma série de *trade-offs* no sistema energético das unidades industriais para uma operação que minimize o custo da energia e as emissões de gases de efeito estufa.

As ações da empresa para alcançar as metas e compromissos relacionados à Agenda 2030 foram divididas em cinco categorias:

- eficiência operacional;
- descarbonizar calor e energia;
- promover otimização de design em toda a cadeia de suprimentos;
- melhorar logística e armazenamento;
- investir em remoção e compensação de gases de efeito estufa (GEE).

Este trabalho focou na análise de uma das soluções que faz parte de um conjunto de iniciativas relacionadas à categoria de Eficiência Operacional, que é a implementação de um sistema de otimização de energia em tempo real (ERTO) a fim de endereçar a complexidade da gestão dos sistemas de energia e emissões de uma de suas unidades petroquímicas. Os objetivos dessa solução são:

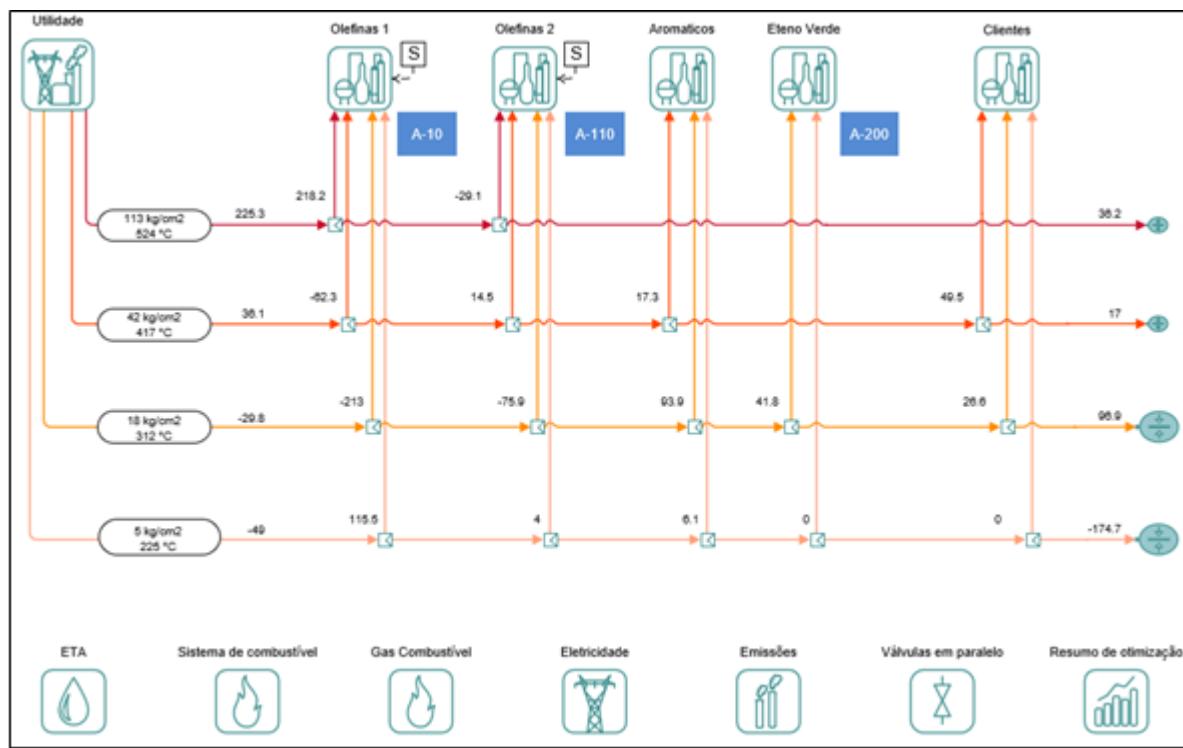
- Monitorar e otimizar em tempo real os sistemas energéticos (elétrico, vapor, combustível e condensado);
- Alcançar a melhor performance a partir da disponibilidade dos recursos, considerando as restrições operacionais e de emissões;
- Obter um conjunto de recomendações disponíveis, mostrando quais alterações podem ser efetuadas para operar o sistema de energia a um custo mínimo;
- Acompanhar o potencial de economia e redução de emissões (*gap*) ou economia e reduções não atingidas ao longo do tempo;
- Realizar simulação de cenários (análises “E se?”);
- Auditar os sistemas de energia com dados validados continuamente.

### 3.3 Modelagem e otimização

Para essa unidade petroquímica, o sistema foi desenvolvido para otimizar os seguintes sistemas:

- Rede de vapor;
- Água de alimentação das caldeiras e condensados;
- Rede de energia elétrica;
- Rede de combustíveis.

A Figura 3.2 mostra a visão geral dos *headers* de vapor conectados às diferentes unidades e áreas: Utilidades, Olefinas 1, Olefinas 2, Aromáticos e Eteno Verde, além de alguns consumidores externos específicos (Clientes):



**Figura 3.2:** Visão geral da planta no ERTO

Fonte: elaboração da autora.

Além disso, foram criadas oito subplantas para representar os sistemas de condensado, combustíveis e elétricos, além de algumas informações adicionais sobre trocadores de calor (HXs), emissões (Emissões) e detalhes de otimização (válvulas em paralelo e resumo de otimização).

### 3.3.1 Variáveis de otimização

As seguintes partes dos equipamentos são itens acionáveis obtidos a partir do modelo do sistema de otimização:

- Combustíveis das caldeiras:
  - Combustíveis queimados nas caldeiras
- Geração de energia:
  - Turbina a vapor
  - Turbina a gás
- Consumo de energia:
  - Substituição de turbinas e motores.
  - Otimização de extração em grandes turbinas a vapor (compressores).
- Condensados:
  - Condensado vendido (condensado para ETA – Estação de Tratamento de Água).

O modelo é executado a cada trinta minutos, realizando uma otimização global e propondo alterações nas variáveis (itens acionáveis) de otimização mencionadas acima:

- Combustível: o uso de combustíveis sólidos (mistura pré-definida de carvões), líquidos (dois tipos diferentes de óleo combustível) e gasosos (gás combustível, GLP e gás natural) estão incluídos no modelo. O combustível para geração de vapor é considerado durante a otimização, afetando o

consumo de combustível. A injeção de gás natural ou GLP na rede de gás combustível também é incluída como variável de otimização.

- Vapor/Água de Alimentação/Condensado: a produção de vapor e seu uso são otimizados, analisando os custos dos combustíveis e da água utilizada nas caldeiras, crédito de condensado vendido e a energia consumida pelos equipamentos substituíveis.
- Energia: a potência total consumida pelos pares ou grupos de equipamentos substituíveis e grandes turbinas a vapor (compressores) é mantida constante, enquanto a forma como ela é fornecida é otimizada por meio da seleção dos equipamentos ou do gerenciamento da extração em grandes turbinas a vapor.

### 3.3.2 Função objetivo e Níveis de otimização

Neste estudo de caso, a função objetivo é a minimização do custo total de operação, e é calculado da seguinte forma:

$$\text{Custo Total} = \text{Custo de Combustíveis} + \text{Custo de Energia} + \text{Outros Custos}$$

Na variável “outros custos” estão inclusos os seguintes custos:

- Água desmineralizada (água de reposição);
- Tratamento químico para água desmineralizada;
- Custo de emissão de CO<sub>2</sub>.

Vale destacar que o custo de emissão do CO<sub>2</sub> pode ser incorporado de diferentes maneiras na função objetivo, dependendo se a cota foi excedida ou se as emissões acumuladas estão abaixo da cota, em um determinado momento e ao longo de um período contábil específico (geralmente um ano).

Na implementação do sistema de otimização apresentado neste trabalho, para cada tonelada de CO<sub>2</sub> emitida, é atribuído um preço. Essa abordagem pode não ser totalmente realista do ponto de vista contábil, a menos que a planta tenha excedido a cota de emissões de CO<sub>2</sub>. No entanto, ela garante que a otimização esteja

sempre focada em minimizar as emissões de CO<sub>2</sub>. Essa abordagem pode influenciar os resultados da otimização nos casos em que exista um compromisso entre o uso de um combustível mais caro com menos emissões de CO<sub>2</sub> e um combustível mais barato com mais emissões de CO<sub>2</sub>. Na verdade, ela penalizará o combustível mais barato.

O problema de otimização é resolvido por meio de um modelo não-linear baseado em SQP, método descrito no capítulo anterior.

As variáveis de decisão foram distribuídas nos seguintes níveis:

- Nível 1: controle de pressão (produção das caldeiras, válvulas redutoras de pressão, condensação e ventilação);
- Nível 2: variáveis contínuas, como potência de cogeração, importação e exportação de energia de/das diferentes fontes, alimentação de fornos de processos FG/FO, gerenciamento de turbinas de extração-condensação, etc.
- Nível 3: variáveis de decisão discretas, como substituições de turbinas/motores.
- Nível 4: pares de turbinas e motores de potência relativamente baixa que não têm um grande impacto na otimização. Também, equipamentos que podem ser manipulados, mas, devido a razões operacionais (por exemplo, segurança ou produtividade), é preferível que sejam definidos neste nível, embora possam ter um impacto econômico. Algumas substituições de "bombas críticas" também são definidas neste nível de otimização.

### 3.3.3 Configuração do Modelo

Para melhor entendimento da implementação do ERTO e como foram realizadas as análises posteriores, algumas definições são importantes, tais como:

- Visão geral da estrutura dos dados utilizados na solução
- Convenções de nomenclatura;
- Unidades de engenharia;

- Relatórios
- Processo de Trabalho.

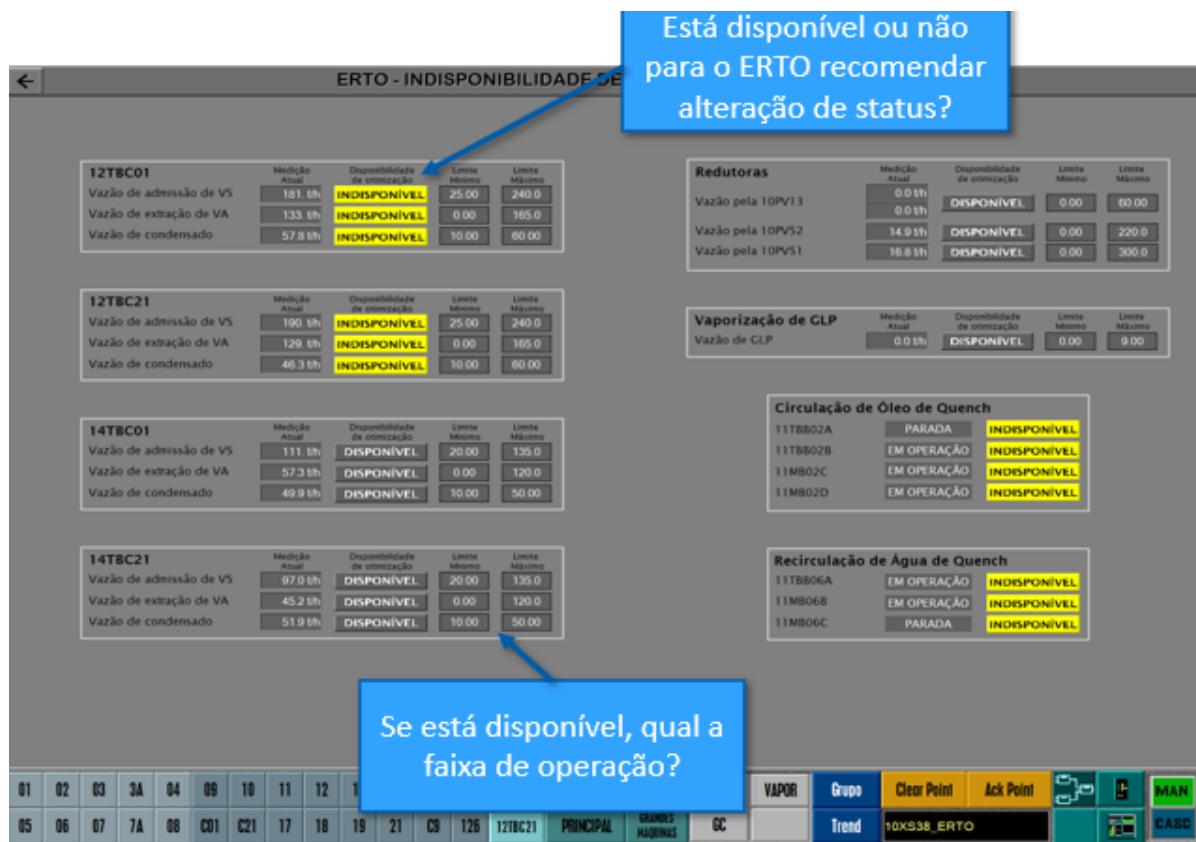
#### Dados:

O ERTO é alimentado por cerca de novecentas variáveis de processo, as quais são usualmente chamadas de *tags* no contexto do historiador de dados, onde ficam armazenadas. São exemplos de *tags* as seguintes variáveis de processo que são consumidas pela ferramenta:

- Vazões de vapor;
- Pressão;
- Temperatura;
- Vazão de gás combustível;
- Composição do gás;
- Valores de aquecimento do gás combustível;
- Percentual de O2 e temperatura nas chaminés das caldeiras;
- Preços de combustíveis, vapor e energia elétrica.

Foram criadas novas *tags* no historiador local para armazenamento dos valores ótimos retornados pelo ERTO, possibilitando assim as análises dos ganhos gerados pela implementação da ferramenta.

Além disso, foram configuradas no modelo as variáveis de otimização e as variáveis de restrição, com seus respectivos atributos: unidade de engenharia, status, limites mínimos e máximos, nível de otimização, conforme apresentado na Figura 3.3:



**Figura 3.3:** Configuração das variáveis de otimização e restrição

Fonte: elaboração da autora.

As unidades de engenharia usadas em todo o fluxo de dados são as seguintes:

**Tabela 3.1: Unidades de Engenharia**

<b>Tipo</b>	<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>
Gerais	Flow	t/h
	Pressure	kg/cm <sup>2</sup>
	Temperature	°C
	Enthalpy	kcal/kg
	Mechanical Power	kW
	Electric Power	kW
	Heat Flow	MW
	Gas Turbine Heat Rate	MW/MW
Combustíveis	Gas Volume	kNm <sup>3</sup> /h
	Gas Density	kg/Nm <sup>3</sup>
	Heating Value (Volume)	kcal/Nm <sup>3</sup>
	Liquid Volume	m <sup>3</sup> /h
	Liquid Density	kg/m <sup>3</sup>
Emissões	Heating Value (Mass)	kJ/kg
	Mass	t/h
	Mass/Duty	kg/GJ
	Mass/Volume	mg/m <sup>3</sup>
	Concentration (Mass)	mass %
	Concentration (Volume)	vol %

Fonte: elaboração da autora

#### Processo de execução e fluxo de trabalho associado:

Como mencionado anteriormente, o sistema foi implementado em malha aberta, o que significa que as recomendações não são automaticamente implementadas, elas dependem da validação das equipes de engenharia e da ação da equipe operação. Portanto, foi desenvolvido um fluxo de trabalho associado ao uso da ferramenta, representado na Figura 3.4.

O otimizador de energia em tempo real (ERTO) é executado automaticamente a cada trinta minutos, com dados atualizados e todas as recomendações (valores ótimos) são escritas numa *tag* de saída e armazenadas no historiador de dados local.

Quando as recomendações de otimização são emitidas, o relatório é então enviado para a equipe de Engenharia de Utilidades, responsável por realizar a análise inicial de viabilidade. Em seguida, a Engenharia de Produção fica responsável por implementar as recomendações junto à equipe de Operação. Caso a ação não seja implementada, a Operação deve atualizar as telas de disponibilidades e limites.



**Figura 3.4:** Processo de execução e fluxo de trabalho associado

Fonte: elaboração da autora.

Os relatórios enviados aos engenheiros são organizados em abas e contém as recomendações de otimização. São elas:

- Itens acionáveis: mostra somente as ações a serem tomadas, entre otimizadores contínuos e discretos (trocas);
- Resumo de Otimização: apresenta detalhes sobre a otimização, com todas as considerações de custos, vazões etc.
- Trocas, Condições de Operação, Eficiência das Turbinas, Caldeiras e Fornos e Otimizadores e Restrições são as demais abas, nas quais é possível obter detalhes sobre as trocas, considerações para determinar condições atuais de operação, eficiência e disponibilidade de equipamentos, entre outros.

A Figura 3.5 apresenta um exemplo de relatório, no qual é possível observar um caso em que uma das recomendações (trocas turbina/motor) é desligar motores e ligar turbinas a vapor.

Itens Acionáveis					OTIMIZAÇÃO: OK SQP = 3
Resumo Económico - Solução Global		Simulação	Otimização	Economia	
Custo		R\$ 22380 per hr	R\$ 22127 per hr	R\$ 253 per hr R\$ 2.21 MM per year	
				Delta	
<b>Caldeiras</b>					
<b>46GV02</b>					
Carvão	t/h	18.0	20.0	↑	2.0
<b>Turbogeradores</b>					
<b>47TBG01</b>					
Geração de energia	MW	13.3	14.8	↑	1.5
Fluxo de extração (VA)	t/h	84.2	80.3	↓	-3.9
<b>47TBG02</b>					
Geração de energia	t/h	13.6	14.0	↑	0.4
Fluxo de extração (VA)	t/h	84.0	91.0	↑	7.0
<b>Compressores</b>					
<b>14TBC01</b>					
Fluxo de extração (VM)	t/h	106.0	104.9	↓	-1.0
<b>14TBC21</b>					
Fluxo de extração (VM)	t/h	74.0	75.4	↑	1.4
<b>Outros itens</b>					
<b>Água desmineralizada / condensado</b>					
Condensado para ETA	t/h	552.9	560.4	↑	7.5
<b>Trocas Turbina/Motor</b>					
<b>48B01</b>					
48TBB01B - VA a VB	t/h	Desligada	Ligada	↑	17.4
48MB01E - MOTOR	kW	Ligado	Desligado	↓	-1156.0
<b>48B57</b>					
48TBB57D - VM a VB	t/h	Desligada	Ligada	↑	13.3
48MB57E - MOTOR	kW	Ligado	Desligado	↓	-514.7

« < > » | [Itens Acionáveis](#) | [Resumo de Otimização](#) | [Trocas](#) | [Condições de Operação](#) | [Eficiência das Turbinas](#) | [Caldeiras e Fornos](#) | [Otimizadores e Restrições](#) |

**Figura 3.5:** Exemplo de relatório do ERTO

Fonte: elaboração da autora.

### 3.3.4 Fatores de emissão

Cada combustível tem um Fator de Emissão (FE) associado e foram adicionados ao modelo do ERTO, assim como um custo de emissão definido pela empresa.

Os FE são classificados em:

- Fatores de emissão combustível de fontes estacionárias;

- Fatores de emissão combustível de fontes móveis;
- Fatores de emissão de energia elétrica;
- Fatores de emissão de vapor.

Os valores de FE e custo de emissão de CO<sub>2</sub> são atualizados periodicamente pela empresa e refletidos no ERTO. Um exemplo de FE utilizado é apresentado na Figura 3.6:

TABELA 2. Fatores de emissão hidrocarbonetos - FONTES ESTACIONÁRIAS

Prestador	Unidade de medida (UN)	CÁLCULO DO FATOR DE EMISSÃO					Fonte	Última Atualização	2020	2021	2022	2023
		%C (t CO <sub>2</sub> /UN)	CO <sub>2</sub> (t CO <sub>2</sub> /UN)	CH <sub>4</sub> (t CH <sub>4</sub> /UN)	N <sub>2</sub> O (t N <sub>2</sub> O/UN)	CO <sub>2</sub> e (t CO <sub>2</sub> e/UN)						
C4 Bruto	t	87,05%	5,1911	0,0000495	0,0000050	5,1938; Inventário de Emissões 2019/04/05/2023		3,19	3,19	3,19	3,19	
Carvão Vapor 3700 kcal / kg	t		1,2000	0,0000147	0,0000220	1,2062; Energia e PBGHG, 2022; 04/05/2023		1,71	1,71	1,71	1,21	
Carvão Vapor 4200 kcal / kg	t		1,3700	0,0000168	0,0000251	1,3771; Energia e PBGHG, 2022; 04/05/2023		1,71	1,71	1,71	1,38	

**Figura 3.6:** Planilha de Fatores de Emissão

Fonte: elaboração da autora.

## 3.4 Análise de Resultados

Esta seção dedica-se à análise dos resultados obtidos com o sistema de otimização de energia em tempo real na petroquímica objeto desse trabalho durante o ano de 2022.

### 3.4.1 Amostra de dados

Como mencionado anteriormente, todos os dados envolvidos na otimização são armazenados no historiador local. Dessa maneira, foram extraídos dados referentes ao período de 04 de janeiro de 2022 a 3 de novembro de 2022 de todas as variáveis de interesse para análise dos resultados obtidos nesse intervalo.

A Figura 3.7 apresenta a maneira como esses dados foram tabelados. Na primeira coluna está o *timestamp* e nas colunas que seguem estão os valores das *tags* para aquele instante, sendo a primeira linha dedicada ao cabeçalho (*timestamp* e nome das *tags*):

	A	B	C	D	E
1	timestamp	111F01_EFICIENCIA.PV	111F02_EFICIENCIA.PV	111F03_EFICIENCIA.PV	111F04_EFICIENCIA.PV
171	01/04/2022 12:31	9184854,00	9.012.064	9.074.644	9.102.921
172	01/04/2022 13:01	9.127.509	8.916.527	9.055.000	9.096.404
173	01/04/2022 13:31	9.114.256	8.929.829	8.998.902	9.025.293
174	01/04/2022 14:01	9.120.918	8.898.877	8.969.489	9.032.775
175	01/04/2022 14:31	9.117.042	8.893.168	8.945.210	9.021.958
176	01/04/2022 15:01	9.118.172	8.897.103	8.950.137	9.021.172
177	01/04/2022 15:31	9.123.068	8.900.305	8.954.068	9.025.831
178	01/04/2022 16:01	9.124.822	8.908.822	8.955.822	9.020.609
179	01/04/2022 16:31	9.120.073	8.904.037	8.951.073	9.010.402
180	01/04/2022 17:01	9.121.630	8.904.900	8.952.832	9.020.731
181	01/04/2022 17:31	9.110.765	8.901.843	8.948.000	9.012.843
182	01/04/2022 18:01	9.102.889	8.897.482	8.949.260	9.008.235
183	01/04/2022 18:31	9.136.677	8.954.155	8.997.364	9.055.503
184	01/04/2022 19:01	9.100.882	8.904.323	8.953.088	9.015.088

**Figura 3.7:** Amostra de dados

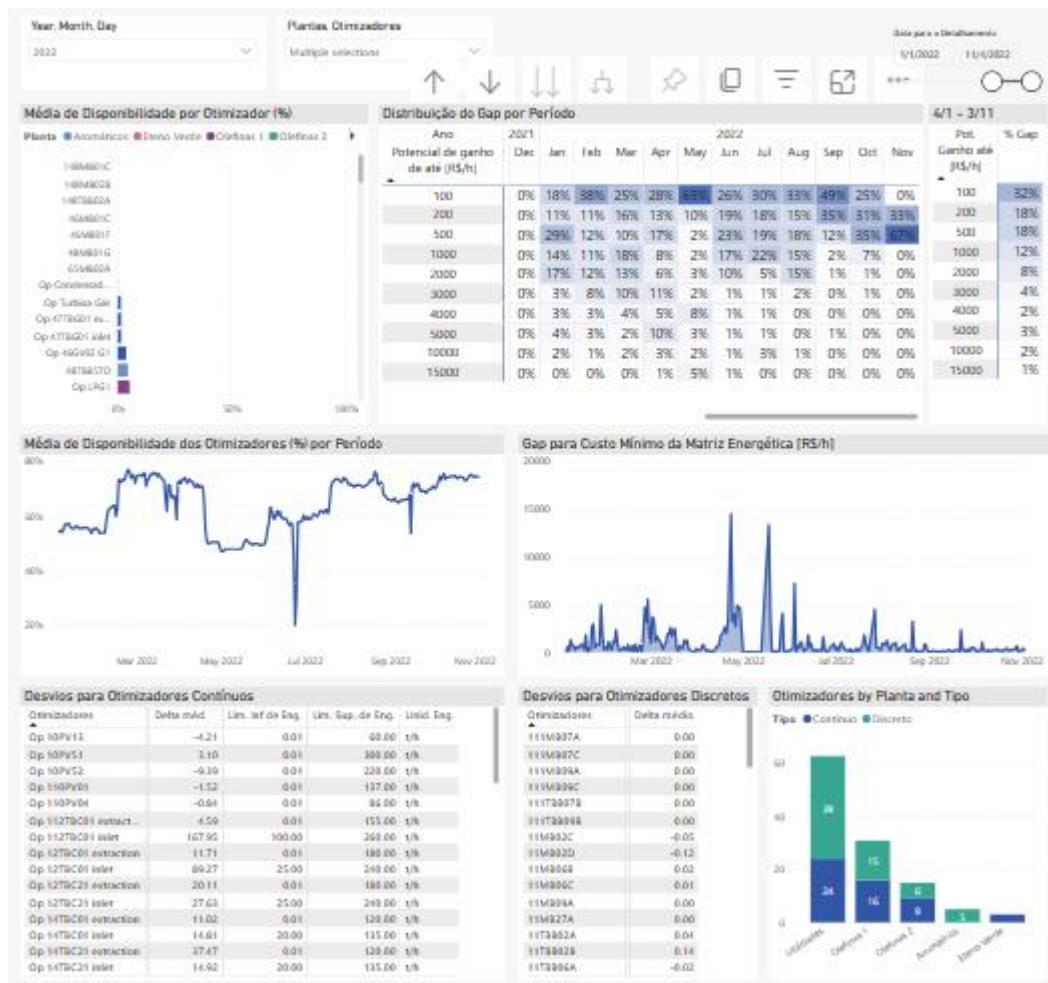
Fonte: elaboração da autora.

### 3.4.2 Análise dos dados

Para facilitar o estudo, foi utilizada a ferramenta Microsoft Power BI, onde foi possível fazer as seguintes análises:

- Disponibilidade dos otimizadores;
- Desvio: diferença entre Atual e Ótimo;
- Distribuição do potencial de ganho (*gap*) por período;
- Totalização do ganho financeiro no período estudado.

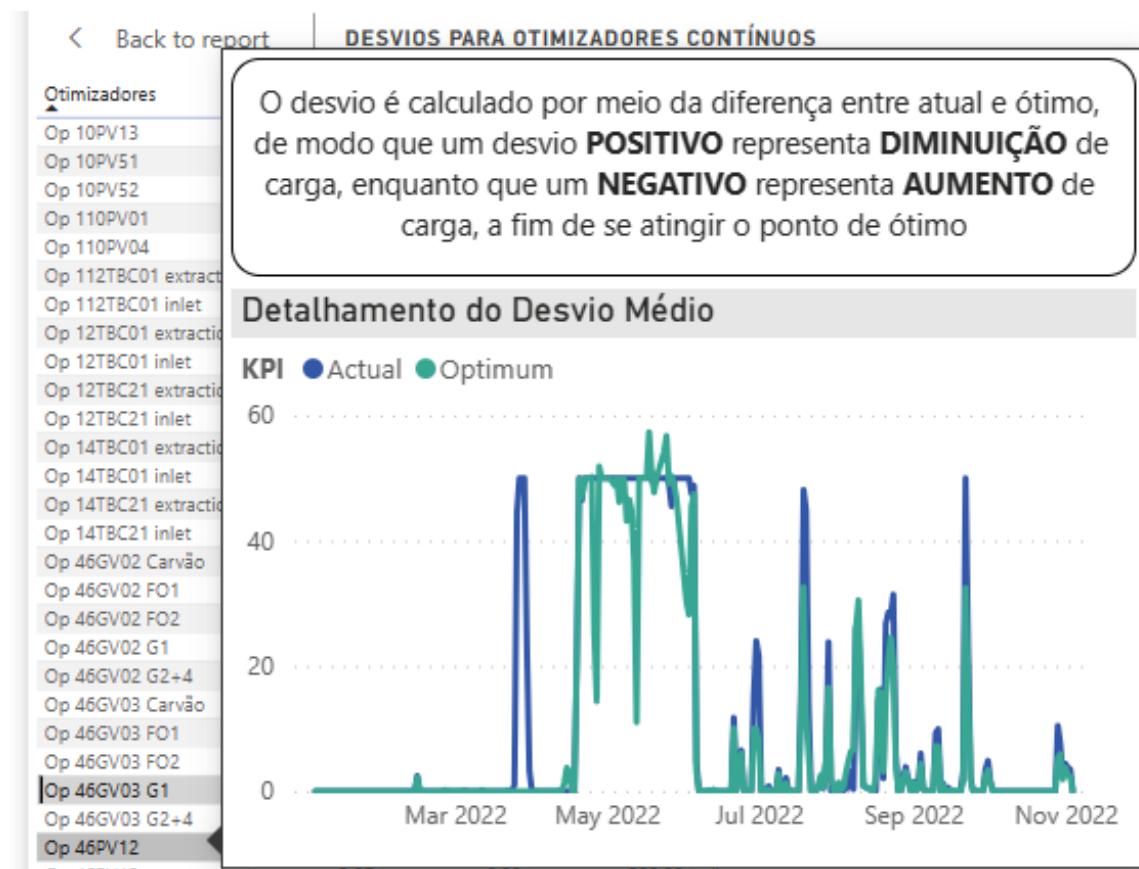
A Visão geral do painel de análise do ERTO é apresentada na Figura 3.8:



**Figura 3.8:** Visão geral do Power BI para análise de desempenho dos otimizadores

Fonte: elaboração da autora.

Além disso, também foi possível, a partir da análise da diferença entre atual e ótimo da tags relacionadas aos combustíveis, obter a redução de CO<sub>2</sub> associada aos benefícios da ferramenta.



**Figura 3.9:** Gráfico de Desvios

Fonte: elaboração da autora.

Focando no ganho econômico, a distribuição do potencial de ganho da ferramenta representa o percentual de otimizações com ganhos potenciais de 100 a 15000 reais por hora recomendados pela ferramenta. Observa-se, pela Figura 3.10, que 50% dos ganhos são de recomendações para ganho de até 200 reais por hora:

Distribuição do Gap por Período													4/1 - 3/11		
Ano	2021		2022											Pot. Ganho até [R\$/h]	% Gap
Potencial de ganho de até [R\$/h]	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov			
100	0%	18%	38%	25%	28%	65%	26%	30%	33%	49%	25%	0%	100	32%	
200	0%	11%	11%	16%	13%	10%	19%	18%	15%	35%	31%	33%	200	18%	
500	0%	29%	12%	10%	17%	2%	23%	19%	18%	12%	35%	67%	500	18%	
1000	0%	14%	11%	18%	8%	2%	17%	22%	15%	2%	7%	0%	1000	12%	
2000	0%	17%	12%	13%	6%	3%	10%	5%	15%	1%	1%	0%	2000	8%	
3000	0%	3%	8%	10%	11%	2%	1%	1%	2%	0%	1%	0%	3000	4%	
4000	0%	3%	3%	4%	5%	8%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	4000	2%	
5000	0%	4%	3%	2%	10%	3%	1%	1%	0%	1%	0%	0%	5000	3%	
10000	0%	2%	1%	2%	3%	2%	1%	3%	1%	0%	0%	0%	10000	2%	
15000	0%	0%	0%	0%	1%	5%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	15000	1%	

**Figura 3.10:** Distribuição do Potencial de Ganho por período

Fonte: elaboração da autora.

Considerando o delta médio e as recomendações implementadas no período analisado, os ganhos econômicos associados à implementação do ERTO nessa unidade foram de 5,2 milhões de reais.

Em relação às emissões de CO<sub>2</sub>, analisando o delta dos combustíveis e considerando o fator de emissão de cada um, houve uma redução média de 4,7 t/h nas emissões.

## 4 CONCLUSÕES

### 4.1 Resultados Obtidos

A implementação do otimizador de energia em tempo real demonstrou resultados significativos tanto em termos financeiros quanto na redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Ao analisar os dados obtidos durante o estudo, ficou evidente que a aplicação dessa ferramenta proporcionou eficiência energética e contribuiu para a descarbonização industrial.

Financeiramente, os resultados foram promissores, com redução dos custos operacionais relacionados ao consumo de energia. A otimização em tempo real permitiu uma gestão mais precisa e eficiente dos recursos energéticos, resultando em economias significativas para a unidade petroquímica de primeira geração analisada.

Além disso, a implementação do otimizador de energia teve um impacto direto na redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Através do monitoramento contínuo e da adaptação dos processos em tempo real, foi possível identificar e corrigir ineficiências, minimizando as emissões de gases de efeito estufa. Essa redução contribui para a meta de descarbonização industrial, alinhando a unidade petroquímica com as diretrizes estabelecidas pelos acordos internacionais e compromissos ambientais.

Por fim, a aplicação do otimizador de energia em tempo real demonstrou ser uma ferramenta eficaz para alcançar a eficiência energética e a descarbonização industrial. Os resultados financeiros positivos e a redução significativa das emissões de CO<sub>2</sub> confirmam os benefícios dessa abordagem. Recomenda-se que outras empresas do setor considerem a adoção de ferramentas similares para otimizar seu consumo de energia e contribuir para a transição para uma economia de baixo carbono.

## 4.2 Contribuições do Trabalho

As principais contribuições deste trabalho foram:

- Revisão da literatura com foco nos dados mais recentes sobre consumo energético do segmento petroquímico;
- Agregar a importância dos dados e dos sistemas de automação nas estratégias de eficiência energética e descarbonização industrial;
- Conceituar a eficiência energética como um processo (ao invés de resultado).

## 4.3 Trabalhos Futuros

Um estudo futuro poderá demonstrar o efeito do fechamento da malha de otimização de matriz energética em tempo real. Poderão ainda ser explorados outros aspectos da solução, como outras maneiras de contabilizar as emissões de CO<sub>2</sub> e comparação entre ferramentas de mercado e soluções de desenvolvimento interno.

## REFERÊNCIAS

ACÁCIO DE ANDRADE, Alexandre. **Gestão de utilidades: Uso de Sistemas Supervisórios e afins para Gestão de Utilidades.** 2022. 50 slides.

BA de VALOR. **Nova tecnologia aplicada em unidade da Braskem na Bahia otimiza consumo de energia.** [S. I.], 29 abr. 2023. Disponível em: <https://badevalor.com.br/nova-tecnologia-aplicada-em-unidade-da-braskem-na-bahia-otimiza-consumo-de-energia/>. Acesso em: 28 jun. 2023

BAGAJEWICZ, M. A. **A brief review of recent developments in data reconciliation and gross error detection/estimation.** Latin American Applied Research, v.30, n.4 p. 335-342, 2000.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO (Brasil). Painel NDC: nossa contribuição para as metas de redução de emissões do Brasil. *In: Painel NDC - nossa contribuição para as metas de redução de emissões do Brasil.* [S. I.], 14 mar. 2023. Disponível em: <https://www.bnDES.gov.br/wps/portal/site/home/desenvolvimento-sustentavel/resultados/emissoes-evitadas>. Acesso em: 5 maio 2023.

BOSTON CONSULTING GROUP - BCG. How Tech Offers a Faster Path to Sustainability. **BCG - Leading in the New Reality** : Climate & Sustainability | Digital Transformation, [s. I.], 14 out. 2021. Disponível em: <https://www.bcg.com/publications/2021/how-technology-helps-sustainability-initiatives>. Acesso em: 5 maio 2023.

BRASSEM. MATÉRIAS-PRIMAS. *In: O SETOR PETROQUÍMICO.* [S. I.], 2023. Disponível em: <https://www.braskem-ri.com.br/a-companhia/o-setor-petroquimico/>. Acesso em: 26 jun. 2023.

DARBY, Mark L.; NIKOLAOU, Michael; JONES, James; NICHOLSON, Doug. RTO: An overview and assessment of current practice. **Journal of Process Control**, [s. I.], v. 21, p. 874-884, 18 maio 2011. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2011.03.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152411000540>. Acesso em: 18 jun. 2023.

TUFF, Geoff; HELMI, Tarek; WELLMAN, Blake; ARAMENT, Michal; PANKRATZ, Derek; NOVAK, David R. Getting from hard-to-abate to a low-carbon future: Ecosystem approaches for the toughest climate challenges. **DELOITTE CENTER FOR INTEGRATED RESEARCH**: Deloitte Insights, [s. l.], 14 nov. 2021. Disponível em: <https://www.deloitte.com/global/en/our-thinking/insights/topics/business-strategy-growth/industrial-decarbonization-hard-to-abate-sectors.html>. Acesso em: 05 mai. 2023.

DUTTA, Suman. Optimization in Chemical Engineering. **Cambridge University Press**, [s. l.], 2016. DOI 978-1-107-09123-8. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/308725162\\_Optimization\\_in\\_Chemical\\_Engineering](https://www.researchgate.net/publication/308725162_Optimization_in_Chemical_Engineering). Acesso em: 29 jun. 2023.

**EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Análise da Eficiência Energética no Segmento Químico Brasileiro**, 2018.

**EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Atlas da Eficiência Energética Brasil 2022**. Relatório de Indicadores, 2022.

GOPALUNI, R. Bhushan; TULSYAN, Aditya; CHACHUAT, Benoit; HUANG, Biao; MING LEE, Jong; AMJAD, Faraz; DAMARLA, Seshu Kumar; KIM, Jong Woo; LAWRENCE, Nathan P. Modern Machine Learning Tools for Monitoring and Control of Industrial Processes: A Survey. **IFAC-PapersOnLine**, [s. l.], v. 53, n. 2, p. 218-229, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.126>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896320303827>. Acesso em: 5 maio 2023.

HERNANDEZ NETO, Alberto; IOSHIMOTO, Eduardo; SEIJI YAMADA, Eduardo; KATO, Enio Akira; NEVES, Letícia de Oliveira. Eficiência Energética. In: SIMÕES MOREIRA, José Roberto (org.). **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. cap. 16, p. 395-425. ISBN 978-85-216-3735-6.

**INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS – IBP. Cartilha de convergência OT-IT [recurso eletrônico] / Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás**. Comissão de Tecnologia e Inovação – Rio de Janeiro: IBP, 2022.

**INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. Energy Efficiency 2022**, 2022.

**INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE- IPCC. Special Report**. Global Warming of 1.5°C. October 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

MARCHETTI, A.; CHACHUAT, B.; BONVIN, D. Modifier adaptation as a feedback control scheme. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, ACS Publications, 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA -MME. **Informações Energéticas do Brasil**, Brasília, 2023.

MIT TECHNOLOGY REVIEW INSIGHTS. Digital technology: The backbone of a net-zero emissions future. **MIT Technology Review**, [S. l.], 8 mar. 2023. HUMANS AND TECHNOLOGY, p. 1-1. Disponível em:

<https://www.technologyreview.com/2023/03/08/1069473/digital-technology-the-backbone-of-a-net-zero-emissions-future/>. Acesso em: 28 jun. 2023.

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio. **Engenharia de Automação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 347 p. ISBN 978-85-216-1532-3.

NUNES, Fernanda Teles; DINIZ-EHRHARDT, Maria Aparecida. **Programação quadrática sequencial e condições de qualificação**. [S. l.: s. n.], s.d. Disponível em: <https://www.ime.unicamp.br/sites/default/files/pesquisa/relatorios/rp-2010-17.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2023.

REJOWSKI JUNIOR, Rubens. **Conceitos Práticos de Otimização em Tempo Real**. 2018. 41 slides.

RUIZ, Diego; RUIZ, Carlos. EMISSIONS AND ENERGY. **AN INTEGRAL APPROACH USING AN ON-LINE ENERGY MANAGEMENT AND OPTIMIZATION MODEL**, [S. l.], p. 3-20, 1 jul. 2009. Disponível em: [https://web-material3.yokogawa.com/2009\\_ERTC\\_Annual\\_Sustainable\\_Refining\\_Soteica.pdf](https://web-material3.yokogawa.com/2009_ERTC_Annual_Sustainable_Refining_Soteica.pdf). Acesso em: 30 jun. 2023.

SILVA, M. F. **Estratégias de Aproximação para a Otimização Estrutural**. Dissertação – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2009.

TERESA RICCIO BARBOSA, ANDREA; MORENO MAMEDES, IGOR. **UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DO USO DA AUTOMAÇÃO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL**. In: ENGENHARIA mecânica: a influência de máquinas, ferramentas e motores no cotidiano do homem 2. [S. l.: s. n.], 2021. cap. 18, p. 234-244. ISBN 978-65-5983-117-3. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/post/uma-revisao-sistematica-do-uso-da-automacao-na-eficiencia-energetica-no-brasil>. Acesso em: 5 maio 2023.