

# revistaIPT

TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

# 22

v. 7, n. 22, abr., 2023



## EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Transporte público na  
cidade de São Paulo

## APRENDIZADO DE MÁQUINA

Calcinação de coque  
verde de petróleo

## LOGÍSTICA DE OPERAÇÕES

Otimização baseada em  
programação matemática

**ipt**  
INSTITUTO DE  
PESQUISAS  
TECNOLÓGICAS

ENSINO TECNOLÓGICO



# revista IPT

TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

v.7, n.22, abril, 2023

Quadrimestral

## Editores-chefes

Eduardo Luiz Machado

Andreia Longuinho da Silva

José Maria de Camargo Barros

## Conselho Editorial

Eduardo Luiz Machado

Silas Derenzo

## Assistentes Editoriais

Augusto Max Colin

Bruno D. Francisco da Silva

Ester Garcia Ferreira da Silva

Flavio Sergio Jorge de Freitas

Hamilton Lelis Ito

João Antonio Rodrigues Garcia

Luiz Silviano

Silvia Megumi Mizoguti Padovani

ISSN 2526-5830

Copyright© IPT. Todos os direitos reservados. Todos os textos, imagens, gráficos, e outros materiais são protegidos por direitos autorais e outros direitos de propriedade intelectual pertencentes ao IPT. A reprodução dos textos da Revista IPT somente será permitida para fins didáticos e de pesquisa, desde que com a citação deste material. Proibida a reprodução total ou parcial, com intuito de lucro direto ou indireto, por qualquer meio ou processo.

### Créditos técnicos

#### DIAGRAMAÇÃO E ARTE:

Silvia Megumi Mizoguti Padovani

#### REVISÃO:

Eduardo Luiz Machado

José Maria de Camargo Barros

sapiens.ipt.br

revista@ipt.br

Av. Prof. Almeida Prado, 532  
Cidade Universitária - Butantã  
05508-901 - São Paulo - SP

ISSN 2526-5830

DOI: 10.29327/2152495.7.22



na capa  
@gettysignature

revista IPT  
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

#22

revista IPT  
T E C N O L O G I A E I N O V A Ç Ã O

## SUMÁRIO

### artigos técnicos

06

Implantação de ônibus com maior eficiência energética como evolução para o transporte público na cidade de São Paulo

Autores: Renato de França, Agenor de Toledo Fleury

27

Técnicas de programação matemática aplicadas ao problema de localização ótima de centros de distribuição em *e-commerce*

Autores: Willelberg dos Anjos Cruz, Marcel Joly

46

Estudo de caso: Efeitos da composição do material combustível volátil do coque verde de petróleo no perfil de temperatura de forno rotativo de calcinação

Autores: Francisco Matthews da Silva e Silva, Wagner Aldeia

83

Reciclagem ecológica de placas de circuito impresso

Autores: Luiz Francisco dos Santos Neto, Silas Derenzo

## CLIMA DE MUDANÇA

No momento em que esta vigésima segunda edição da 'Revista IPT, Tecnologia e Inovação' chega aos seus leitores, o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), das Nações Unidas, estará deliberando sobre quem presidirá a entidade nos próximos anos. Uma candidatura foi apresentada pelo governo brasileiro: a cientista Thelma Krug, do Inpe. Seria a primeira mulher e representante da América Latina a assumir o cargo. Ante as ameaças climáticas a candidatura é, em si, fato relevante. Por sinal, nesta edição foram selecionados artigos com foco em eficiência e processos que, na ponta, contribuirão para reduzir impactos ambientais.

A começar por 'Implantação de ônibus com maior eficiência energética como evolução para o transporte público na cidade de São Paulo', de Renato de França e Agenor de Toledo Fleury, ambos vinculados ao Mestrado Profissional em Processos Industriais do IPT. Os autores apresentam informações científico-tecnológicas para tomada de decisão sobre as melhores alternativas, visando substituir por ou adaptar a 'tecnologias limpas' os ônibus movidos a óleo diesel na cidade de São Paulo.

O artigo 'Técnicas de programação matemática aplicadas ao problema de localização ótima de centros de distribuição em e-commerce' propõe modelos de otimização, com base em técnicas de programação matemática, para apoiar decisões sobre localização de centros de distribuição de comércio eletrônico (e-commerce). São seus autores Willemborg dos Anjos Cruz e Marcel Joly, da Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo, ambos ligados ao Mestrado Profissional em Processos Industriais do IPT.

'Estudo de caso: Efeitos da composição do material combustível volátil do coque verde de petróleo no perfil de temperatura de forno rotativo de calcinação' é um artigo de Francisco Matthews da Silva e Wagner Aldeia, pesquisador do Laboratório de Processos Químicos e Tecnologia de Partículas do IPT, ambos ligados ao Mestrado Profissional em Processos Industriais do Instituto. Os autores apresentam um modelo por algoritmo de aprendizado de máquina do processo de calcinação de coque verde de petróleo em fornos rotativos, para simular a temperatura de saída dos gases do processo e estudar os efeitos do material combustível volátil.

Fecha esta edição o artigo 'Reciclagem ecológica de placas de circuito impresso', de Luiz Francisco dos Santos Neto e Silas Derenzo, pesquisador do Laboratório de Bionanomanufatura do IPT, ambos vinculados ao Mestrado Profissional em Processos Industriais do Instituto. Os autores apresentam processo alternativo de reciclagem, desmontando os componentes da placa e reaproveitando-a. Os componentes separados podem ir para reciclagem e recuperação de metais por empresas especializadas.

Boa leitura!

*Eduardo  
L. Machado*

Eduardo Luiz Machado  
Diretor Técnico em Ensino Tecnológico



## Artigo Técnico

# Implantação de ônibus com maior eficiência energética como evolução para o transporte público na cidade de São Paulo

*Implementation of buses with greater  
energy efficiency as an evolution for  
public transport in the city of São Paulo*

Renato de França<sup>a</sup>, Agenor de Toledo Fleury<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Mestrado em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

<sup>b</sup> Docente do Mestrado Profissional em Processos Industriais

\*e-mail: refranca@ipt.br

Palavras-chave: ônibus; híbrido; emissão, motores diesel, motores a etanol, biocombustíveis

*Keywords: bus; hybrid; emission, diesel engines, ethanol engines, biofuels*

## Resumo

Nas últimas décadas, houve um aumento significativo da emissão de gases na atmosfera terrestre, intensificando consideravelmente o efeito estufa. A alta concentração desses gases é consequência principalmente das diversas atividades industriais realizadas, em especial por meio da queima de combustíveis fósseis. O setor de transporte público urbano terrestre atualmente utiliza, predominantemente, óleo diesel como combustível, sendo considerado como um dos maiores responsáveis pela poluição por emissão de gases como o monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, enxofre, aldeídos e os materiais particulados nas grandes cidades. Nesse contexto, torna-se necessário modernizar os sistemas de transporte público urbano nas grandes cidades, impulsionando melhorias no desempenho energético e redução nos níveis de poluentes. Como alternativas existem a disposição tecnologias como ônibus movidos a etanol, elétricos e os híbridos. Neste artigo científico, propõe-se apresentar as principais diferenças entre ônibus menos poluente em relação à frota predominante atual, com informações para a tomada de decisão em relação às melhores alternativas, visando à substituição ou adaptação de ônibus movidos exclusivamente a óleo diesel por tecnologias limpas na cidade de São Paulo.

## Abstract

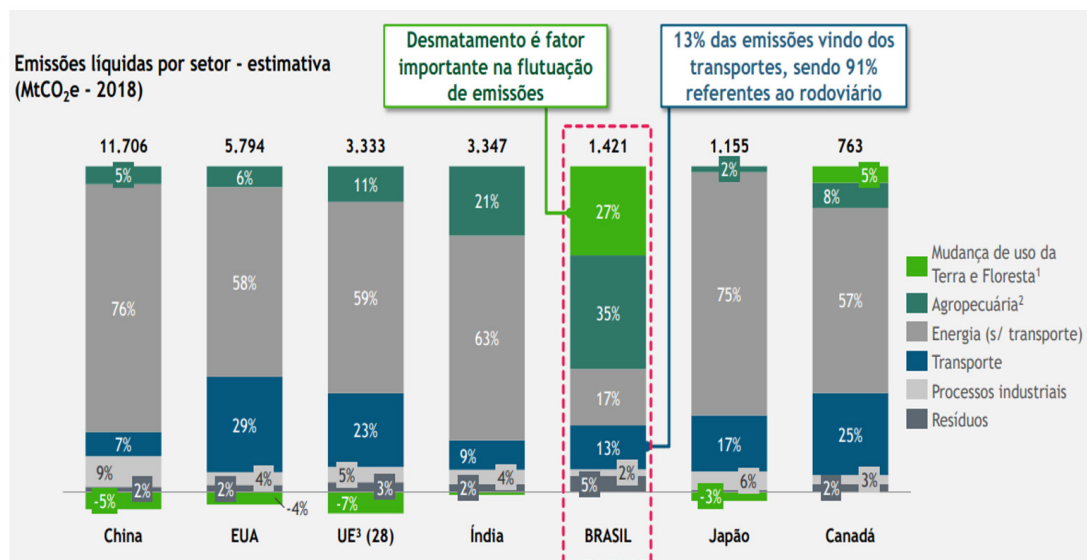
*In the last decades, there has been a significant increase in the emission of gases in the Earth's atmosphere, considerably intensifying the greenhouse effect. The high concentration of these gases is mainly a consequence of the various industrial activities carried out, especially through the burning of fossil fuels. The urban terrestrial public transport sector currently uses predominantly diesel oil as fuel, which is why it is considered one of the biggest responsible for pollution by emission of gases such as carbon monoxide, nitrogen oxides, sulfur, aldehydes and particulate materials in large cities. . In this context, it is necessary to modernize urban public transport systems in large cities, boosting energy performance and reducing pollutant levels. As alternatives, technologies such as ethanol, electric and hybrid buses are available. In this scientific article, it is proposed to present the main differences between less polluting buses with information for decision making in relation to the best alternatives, aiming at the replacement or adaptation of buses powered exclusively by diesel oil by clean technologies in the city of São Paulo.*

## 1 Introdução

A partir do século passado, houve um aumento progressivo da emissão de gases poluentes para atmosfera, principalmente em consequência da revolução industrial, com isso, contribuindo consideravelmente para o efeito estufa atual. O acúmulo desses gases está diretamente relacionado ao desmatamento e às diversas atividades industriais, assim como a queima direta de combustíveis fósseis. Como exemplo temos os veículos automotivos, que contribuem consideravelmente com o aumento da poluição do ar, através da queima de combustíveis renováveis (etanol e biogás) e não renováveis como gás natural, gasolina e principalmente o óleo diesel. Lembrando que tanto etanol e biogás, como o gás natural, emitem consideravelmente menos poluição.

O setor de transporte público automotivo utiliza predominantemente o óleo diesel como fonte de energia nos ônibus, para o transporte público de passageiros, estando entre os grandes responsáveis pela intensificação na emissão de gases, como o monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, enxofre, aldeídos e os materiais particulados. Apenas no ano de 2021 foram produzidos 14.060 ônibus no Brasil (ANFAVEA, 2022). Considerando a frota no transporte público apenas na cidade de São Paulo e região metropolitana são mais de 15.000 ônibus circulando diariamente.

Figura 1 - Emissões de CO<sup>2</sup> e participação do setor de transporte



Fonte: ANFAVEA, 2021

A **FIGURA 1** demonstra que o setor de transporte é responsável por 13% das emissões de CO<sup>2</sup> no Brasil, desse percentual 91% apenas em consequência do uso de combustíveis fósseis no transporte público rodoviário.

Este artigo apresenta os benefícios da implantação de ônibus com maior eficiência energética, por meio da inserção de ônibus movidos a etanol, puramente elétricos e/ou híbridos, em substituição aos ônibus tradicionais à combustão interna movidos a diesel.

Ônibus movidos a etanol, elétricos e híbridos se tornaram realidade em muitos países, inclusive no Brasil. Apesar de ainda contar com poucos modelos disponíveis no mercado, especialmente quando se fala em propulsão a etanol e híbrido. No que diz respeito aos ônibus elétricos, a infraestrutura é insuficiente para alimentação assim como os pontos de recarga. Mesmo assim o Brasil dispõe de um grande potencial para que esse cenário possa mudar rapidamente.

## 2 Características do transporte público urbano em São Paulo

O município de São Paulo corresponde ao núcleo central da região metropolitana, com 12.396.372 habitantes e 58,4% de toda região metropolitana (IBGE, 2021). Com área de 1.509 km<sup>2</sup>, é o maior centro econômico, financeiro e cultural do país, acolhendo sede de 60% das empresas multinacionais instaladas no Brasil.

O sistema de transporte público urbano transportou um total de 208 milhões de passageiros, sendo 117 milhões pelo subsistema estrutural e 91 milhões pelo subsistema local, apenas no mês de junho de 2019 (SPTrans, 2022).

### 2.1 Subsistema estrutural

Representa a macro acessibilidade do município integrando as diversas regiões da cidade. O serviço de transporte coletivo é organizado em torno de uma malha de ligações de natureza estrutural, com o objetivo de integrar a região urbana, unindo as diversas regiões entre si, ao centro e aos sub-centros regionais.

Além de ser elemento fundamental para a organização e racionalização do serviço de transporte, a malha de ligações estruturais agrega visibilidade e identidade ao sistema, transformando a circulação por meios coletivos na cidade mais simples para a população (SPTrans, 2022).

## 2.2 Subsistema local

É a regionalização dos deslocamentos na cidade, complementando as malhas de ligações estruturais, oferecendo menores percursos a pé e maior segurança para os usuários.

Visando privilegiar e agilizar o transporte público coletivo, São Paulo conta com 500 km de faixas exclusivas e 131,2 km de corredores exclusivos para ônibus. Os dados são da SPTrans, empresa que opera o sistema de transporte de ônibus na cidade.

- Faixa exclusiva de ônibus

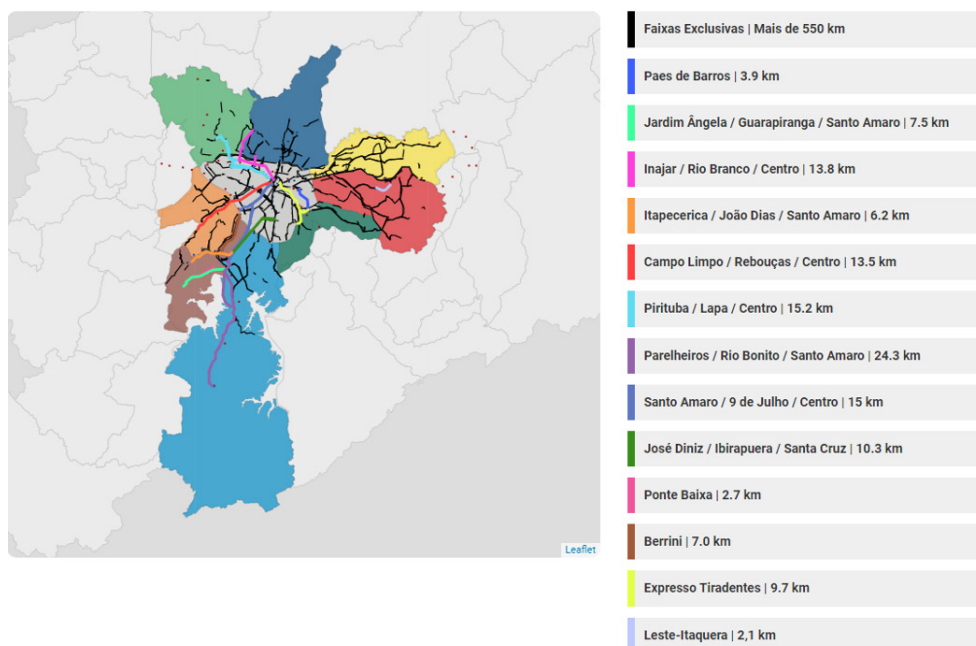
Fica à direita ou à esquerda da pista de uma avenida ou rua. Durante seu funcionamento, que muda de acordo com o local, fica proibida a circulação de carros, inclusive de táxis.

- Corredor de ônibus

Fica à esquerda da pista e possui paradas maiores. Táxis podem circular em qualquer dia e horário desde que estejam com passageiro.

A velocidade média dos veículos do sistema de transporte público urbano, em todos os corredores e nas faixas exclusivas, é monitorada e divulgada mensalmente, por meio dos relatórios informativos. Em agosto/2022 a velocidade média foi de 21,0 km/h e 22,0 km/h nas direções bairro/centro e centro/bairro respectivamente (SPTrans, 2022). As velocidades desenvolvidas pelos ônibus nos corredores são baixas, o que indica que as utilizações de ônibus elétricos e híbridos podem ser viáveis como solução para transporte público menos poluente.

Figura 2 - Corredores e Faixas Exclusivas



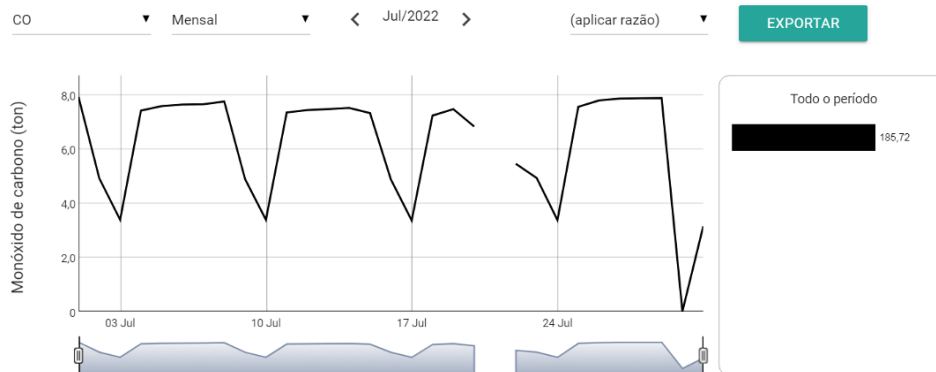
Fonte: SPTrans, 2022

A **FIGURA 2** apresenta o mapa com parte da região metropolitana de São Paulo e sua malha de corredores, faixas exclusivas de ônibus e suas principais linhas.

O Instituto de Energia e Meio Ambiente possui uma ferramenta chamada Monitor, que faz o monitoramento e estimativa das emissões de gases dos ônibus que compõem o sistema de transporte público do município de São Paulo. A ferramenta utiliza dados de GPS transmitidos por dispositivos instalados em todos os ônibus paulistanos; em 2019 contava com mais de 14 mil, constituindo uma das maiores frotas de transporte público do mundo. O Monitor busca indicar se as emissões de todos esses ônibus estão diminuindo em um ritmo constante alinhados as metas estipuladas na Política de Mudança do Clima do município de São Paulo. Além disso, é possível acompanhar a evolução de indicadores de qualidade e uso do serviço prestado como velocidade média, frota total de veículos, oferta de lugares, número de passageiros transportados e consumo de combustível (IEMA, 2022).

A **FIGURA 3** mostra o gráfico da ferramenta Monitor, com o índice de monóxido de carbono (CO), emitido pelos ônibus que circularam na cidade de São Paulo no mês de julho/2022.

**Figura 3 – Monóxido de carbono**



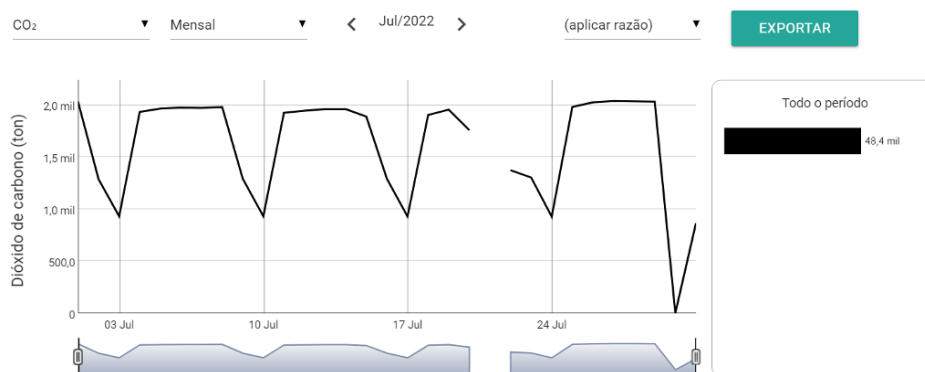
Fonte: IEMA, 2022

Com a circulação dos ônibus na cidade de São Paulo, apenas no mês de julho/2022, foram emitidas 185,72 toneladas de monóxido de carbono para atmosfera, conforme apresentado na **FIGURA 3**.

O monóxido de carbono é um gás indolor e muito perigoso devido a sua grande toxicidade. Intoxicações agudas podem ser fatais (CETESB,2022).

Na **FIGURA 4** pode ser visto o gráfico da ferramenta Monitor, com o índice de dióxido de carbono emitido pelos ônibus que circularam na cidade de São Paulo para o mês de julho/2022.

**Figura 4 – Dióxido de carbono**

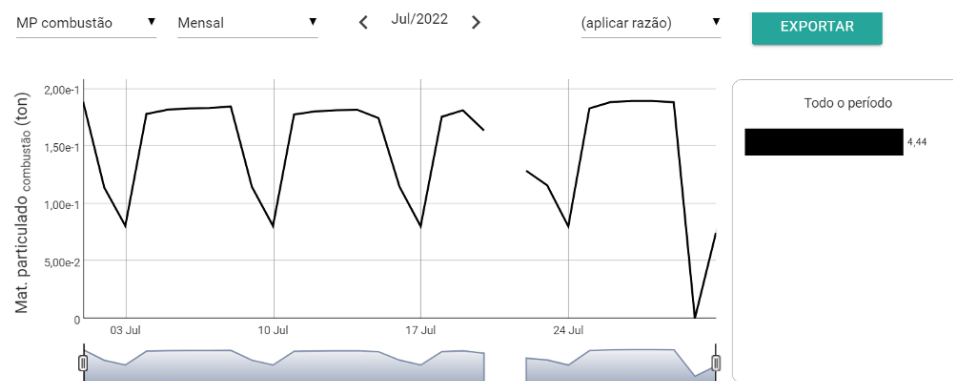


Fonte: IEMA, 2022

Em julho/2022 foram emitidas 48,4 toneladas de dióxido de carbono, como pode ser visto na **FIGURA 4**. Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que também é conhecido como gás carbônico, é um composto químico gasoso que em grande concentração provoca disfunções ao planeta através do aquecimento global aumentando o efeito estufa.

A quantidade de materiais particulados emitidos no mês de julho/2022 pode ser vista na **FIGURA 5**.

**Figura 5 – Material particulado**

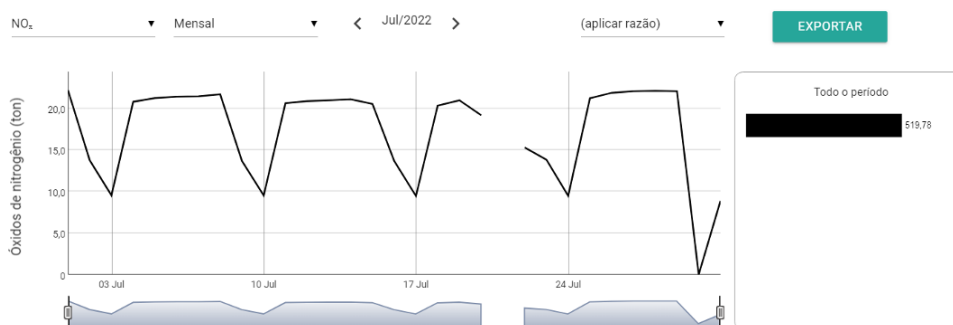


Fonte: IEMA, 2022

Conforme apresentado na **FIGURA 5**, no mês de julho/2022 foram emitidas 4,44 toneladas de material particulado para atmosfera terrestre pelos ônibus na cidade de São Paulo. Materiais particulados são partículas muito finas de sólidos ou líquidos suspensos no ar. Para ser considerado PM, suas dimensões variam desde 20 µm até menos de 0,05 µm.

A **FIGURA 6** mostra a quantidade de Óxidos de nitrogênio NO<sub>x</sub> emitidos na cidade de São Paulo em decorrência do uso de óleo diesel nos ônibus utilizados para transporte público.

**Figura 6 – Óxidos de nitrogênio**



Fonte: IEMA, 2022

Na **FIGURA 6** é possível constatar que no mês de julho/2022, foram emitidas 519,78 toneladas de óxido de nitrogênio. O óxido de nitrogênio é um poluente primário e um dos responsáveis pela formação das chuvas ácidas, e redução da camada de ozônio (REVISTA IPT, 2021).

O Artigo 50 da Lei sobre a Política de Mudança do Clima de São Paulo determina a redução gradual de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e material particulado (MP), gerados pelos ônibus da capital paulista. Através da lei, almeja-se que as emissões de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e MP da frota paulistana em 2027 atinjam uma redução em percentual de 50%, 80% e 90% respectivamente comparado aos índices emitidos no ano de 2016. Já os valores do ano de 2037 devem totalizar um decréscimo de 100% nas emissões de CO<sub>2</sub> e de 95% nas de NO<sub>x</sub> e MP, também em relação às emissões de 2016. Já os dados das medições de emissões de gases, podem ser consultados por qualquer pessoa a qualquer momento através da página da IEMA em Monitor de Ônibus SP. Espera-se que as informações trazidas pela ferramenta possam gerar debates e ações em direção ao aprimoramento do sistema de transporte por ônibus em São Paulo (IEMA,2022), que apesar de se tratar de um sistema de transporte público que atende à demanda da sociedade, precisa ser revisado a fim de implementar soluções com maior eficiência energética e que minimize os efeitos negativos com a queima de combustíveis fósseis.

### 3 Técnicas para utilização de etanol em motores diesel

O setor sucroalcooleiro Brasileiro é altamente estruturado e consolidado, tanto no que tange a produção quanto a distribuição. Isso credencia o etanol como uma alternativa de grande potencial para substituição na utilização de combustíveis fósseis, especialmente em ônibus do transporte público urbano, trocando o óleo diesel por etanol.

Como o etanol é constituído por moléculas polares e o óleo diesel por moléculas apolares, eles não se misturam com porcentagem maior que 3% de etanol. Portanto, torna-se necessária a utilização de substâncias que ocasionem a homogeneização necessária dos combustíveis, os chamados cossolventes que são substâncias de moléculas longas e que possuem afinidades químicas com compostos polares e apolares (PAUFERRO, 2012).

O abastecimento de motores diesel unicamente com etanol requer o uso de recuperadores de lubrificidade e aumento do número de cetano.

O número de cetano é uma propriedade importante do combustível para motores de ignição espontânea. É uma característica físico-química associada ao intervalo de tempo entre a injeção do combustível e sua ignição, quando exposta às condições de temperatura e pressão que ocorre na câmara de combustão.

Esse intervalo de tempo, ou seja, o atraso de ignição deve ser curto para que se garanta que a combustão ocorra de forma eficiente termicamente.

Os valores típicos do número de cetano para óleo diesel estão na faixa entre 40 e 55, considerando os parâmetros das câmaras de combustão dos motores diesel, enquanto o etanol tem número de cetano entre 5 e 15, o que provoca atrasos consideráveis na ignição em motores diesel. Para melhorar essa propriedade, são integrados aditivos.

Também é necessária a utilização de redutores de corrosão, para combater a ação do etanol sobre os componentes metálicos com os quais ocorre o contato. A corrosão ocorre principalmente por presença de cloretos, acetatos e água presentes no etanol hidratado.

O uso exclusivo de etanol reduz drasticamente a produção de poluentes na forma de material particulado, mas, como fator negativo, ocorre um significativo aumento de produção de aldeídos.

Os aditivos que aumentam o número de cetano geralmente são compostos nitrogenados, e aumentadores de lubrificidade, que normalmente são ésteres de cadeias longas ou policíclicos aromáticos, e podem ocasionar as produções de óxidos de nitrogênio e de hidrocarbonetos carcinogênicos.

Um projeto de inovação tecnológica permitiu o desenvolvimento de um aditivo nacional para o uso do etanol em veículos com motores a diesel, o Ultrafluid Eco. É um aditivo capaz de alterar as propriedades de ignição e lubrificidade do etanol, tornando possível usá-lo em motores sem causar danos a veículos de grande porte. O produto soluciona questões críticas do uso do etanol nesses motores, como a baixa lubrificidade, o ressecamento dos bicos injetores, o desgaste de peças e falhas do motor, aumentando sua vida útil (TN, 2022).

Ao longo do tempo, os motores com tecnologia ciclo diesel movidos a etanol aditivado foram aperfeiçoados com o desenvolvimento tecnológico, e atualmente apresentam alta confiabilidade, além de baixos níveis de emissões de poluentes. Os motores ciclo

Diesel movidos a etanol aditivado de terceira geração possuem padrão Euro 5 de emissão, sem qualquer tipo de pós-tratamento dos gases e escape.

Em 1993, a Suécia colocou em prática uma experiência tecnológica que hoje se apresenta como solução óbvia para a questão do transporte urbano e sua relação com o aquecimento global e a sustentabilidade. Trata-se do Projeto BEST - Bio Ethanol Sustainable Transport, ou Etanol para o Transporte Sustentável. Atualmente, são 600 ônibus rodando em várias cidades, principalmente em Estocolmo, motor a diesel que utiliza uma mistura com 95% de etanol e 5% do aditivo especial Sekab.

Segundo a Scania, a adaptação do motor ciclo Diesel ao uso do etanol aditivado não requer mudanças significativas. Entre estas mudanças estão o aumento da taxa de compressão do motor 28:1, enquanto nos motores ciclo Diesel convencionais, a taxa de compressão mais comum é de 18:1; maior capacidade volumétrica dos bicos injetores e a utilização de materiais com maior resistência ao etanol devido à corrosão (LASCALA, 2021).

O etanol possui menor valor energético por unidade de volume se comparado ao diesel, por isso, é necessária maior capacidade volumétrica dos injetores. Isto gera um maior consumo de combustível por quilômetro percorrido, em média 60% maior que o volume de diesel consumido por um motor equivalente para percorrer a mesma distância.

A **TABELA 1** apresenta uma comparação entre os teores de emissões de motor ciclo diesel movido a óleo diesel e o mesmo motor movido a etanol.

**Tabela 1 – Valores adotados para emissões equivalentes – Diesel vs Etanol para veículos pesados**

Combustíveis	Valores adotados para emissões equivalentes em g/km.pass				
	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	MP	HC
Diesel	70,4	0,83	0,61	0,04	0,13
Etanol	36	0,99	0,63	0,02	0,15

Fonte: LASCALA, 2011

A **TABELA 2** contém dados que indicam que o motor ciclo diesel movido a etanol aditivado (DC9 E02) é similar ao motor diesel convencional (DC 17 270) movido a óleo diesel. Importante ressaltar que o motor movido a etanol apresenta padrão Euro 5, o que garante uma maior eficiência no quesito emissões de poluentes.

Tabela 2 – Comparação entre o DC9 E02 e DC9 17

FABRICANTE	SCANIA	SCANIA
Motor	DC9 E02 270 Euro 5	DC9 17 270 Euro 4
Combustível	Etanol	Diesel
Volume deslocado	8.9 litros	8.9 litros
Ordem de Disparo	1-2-4-5-3	1-2-4-5-3
Cilindros	5 em linha	5 em linha
Cabeçotes Individuais	5	5
Válvula por cilindro	4	4
Diâmetro x Curso	127 mm x 140 mm	127 mm x 140 mm
Taxa de compressão	28:1	17:1
Controle de injeção	Scania PDE	Scania PDE
Potência máxima a rev/min	198 kW a 1900 rpm	198 kW a 1800 rpm
Torque máximo a rev/min	1200Nm a 1100-400 rpm	1250Nm a 1100-400 rpm
Capacidade do cárter	37 litros	37 litros

Fonte: Adaptado de LASCALA, 2011

## 4 Ônibus elétrico

Dentre os modelos de ônibus puramente elétricos temos os trólebus e os movidos exclusivamente a bateria. Ambas as soluções são consideradas sustentáveis e alternativas para mitigar as emissões de poluentes decorrentes do transporte de passageiros tradicional movido a diesel.

- **TRÓLEBUS** - Foram projetados para contornar as restrições de locomoção dos bondes elétricos da época, pois com os trólebus era possível desviar dos obstáculos na via e o seu custo de implantação era baixo, considerando que já havia infraestrutura elétrica para os bondes. Diferente dos bondes elétricos que rodavam sobre trilhos, os trólebus rodam por meio de pneus de borracha sobre o asfalto. Eles são alimentados através de hastes, chamadas de alavancas localizadas na parte superior da carroceria, as quais ficam parcialmente ou permanentemente conectadas ao fio da rede elétrica do local por onde ele está passando. Ao contrário do funcionamento dos bondes elétricos, que utilizam a energia que chega através de um fio da rede de distribuição e a reconduz pelos trilhos, os trólebus, por meio de suas alavancas, recebem a energia por um fio, e a devolvem por outro, que corre em paralelo, sobre o veículo. No Brasil, os primeiros trólebus apareceram na cidade de São Paulo em 1949.

Figura 7 – Trólebus produzido no Brasil pela empresa Eletra.



Fonte: Eletra, 2019

Mesmo após mais de 7 décadas de operação, atualmente temos 201 trólebus percorrendo as ruas da cidade, segundo a Empresa Ambiental Transportes Urbanos S. A, responsável pela gestão do Serviço de Transporte Coletivo Público de Passageiros. A empresa Eletra produziu os primeiros trólebus no Brasil conforme mostrado na **FIGURA 7**.

Evidentemente que a realidade atual é bem diferente dos anos 40, inclusive com o aumento da criminalidade, diante disso para analisar a viabilidade do uso ou expansão dos trólebus na cidade, torna-se necessário considerar a questão do elevado número de furtos de cabos na cidade de São Paulo. Segundo a Companhia de Engenharia de Tráfego (CET), o furto de cabos elétricos na cidade de São Paulo subiu 47% no primeiro semestre de 2022, em comparação ao mesmo período do ano de 2021. A empresa municipal afirmou que precisou reinstalar 231 quilômetros de fiação elétrica no primeiro semestre de 2022.

- **ÔNIBUS MOVIDO A BATERIA** - Os ônibus elétricos são alimentados por um conjunto de baterias, que são abastecidas através das chamadas EVSE (Electric Vehicle Supply Equipment), que em português significa estação de recarga de veículos elétricos. As estações são equipamentos de alta potência responsáveis por fornecer carga às baterias que alimentarão os ônibus durante seu percurso. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou em junho de 2013 a norma ABNT

NBR IEC 61851-1:2013, que rege os “Sistemas de recarga condutiva para veículos elétricos”. Esta norma estabelece o procedimento técnico 49 - Diretrizes para a recarga de veículos elétricos com tensões alternadas normalizadas de até 1.000 V e para tensões contínuas de até 1.500 V. Porém, a dificuldade de carregar um carro elétrico no Brasil vai muito além de encontrar locais adequados para plugar o veículo na tomada. Também é preciso torcer para que a estação conte com os tipos de conectores e plugues compatível para o seu carro. Isso porque não existe até o momento consenso sobre um padrão a ser adotado pelas montadoras de carros elétricos para plugues e conectores, e esse não é um problema exclusivo do Brasil, mas sim do mundo todo. Atualmente, existe ao menos seis tipos de plugues/conectores que estão disponíveis no mercado. Alguns são preferidos pelas montadoras europeias, outros mais utilizados pelas marcas americanas, japonesas ou chinesas. Isso sem falar na Tesla, que criou seu próprio conector, o Tesla Charging.

Em relação aos modelos de ônibus elétricos disponíveis no Brasil, temos o Access da fabricante Volare. Ele é um miniônibus 100% elétrico com produção nacional em parceria com a BYD. Sua autonomia é de 200 quilômetros. A montadora Agrale chegou a desenvolver um ônibus híbrido (diesel-elétrico), mas apenas como protótipo, não possui ônibus elétricos e nem híbridos circulando no país. Já a Scania, que acredita em uma matriz mista de combustíveis alternativos, tem na Europa veículos híbridos e elétricos, mas no Brasil, atualmente, tem apostado em outras alternativas, como ônibus movidos a etanol, operando em São Paulo, e na tecnologia biometano/GNV, com um modelo fazendo demonstrações pelo Brasil.

## 4.1 Baterias

A bateria é uma das principais peças do veículo. É ela que armazena a energia utilizada pelo motor automotivo no momento da partida, além de fornecer energia para os componentes elétricos como os faróis, luzes internas, buzina, rádio, vidros, etc. Isso ocorre mesmo quando o motor não está em funcionamento.

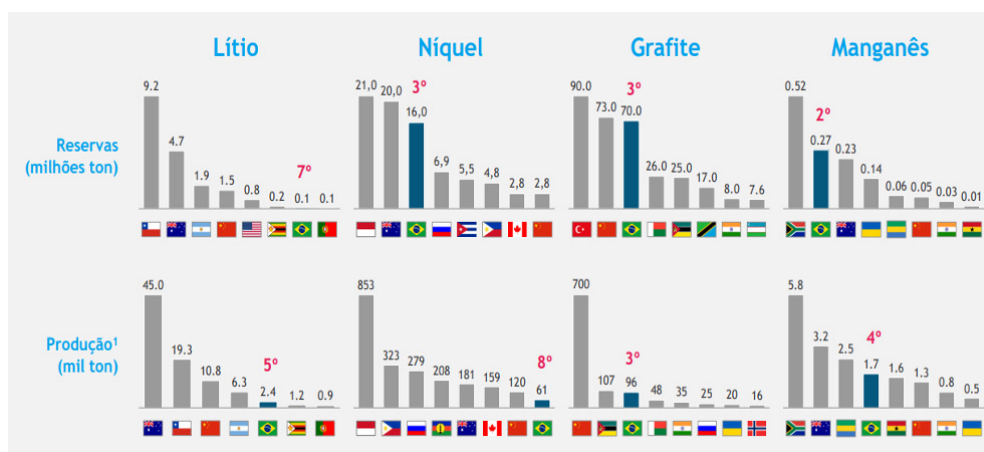
As baterias automotivas são dispositivos capazes de transformar energia química em energia elétrica e vice-versa. Nos veículos, elas armazenam energia sob a forma química e a convertem na forma elétrica para o uso quando necessário. O processo de conversão entre os dois tipos de energia é reversível, o que permite que as baterias sejam recarregadas diversas vezes. A recarga da bateria é feita pelo alternador, que gera energia elétrica por meio da rotação do seu eixo. É importante destacar que o

veículo precisa estar ligado para que o alternador exerça sua função. Quando se fala em veículos híbridos e elétricos a bateria exerce uma função primordial, ela, em geral, é diferente das utilizadas tradicionalmente. Como as baterias passam a ser responsáveis por outras funções, como o próprio funcionamento do motor, demanda uma capacidade de energia cada vez maior.

A expectativa é que até 2027 os carros elétricos sejam mais baratos quando comparados aos motores a combustão que utilizam combustíveis fósseis. Pelo menos é isso que aponta um levantamento feito pela BloombergNEF (New Energy Finance) para o Transport & Environment (T&E). Isso em decorrência ao impulso dado pelas grandes potências mundiais, na corrida pela redução de emissão de gases poluentes na atmosfera, já colocaram data para o fim da comercialização de carros com motor a combustão com o objetivo de reduzir a emissão de poluentes. A pesquisa mostra que as vans elétricas leves serão mais baratas que as movidas a diesel em 2025, enquanto as mais pesadas só alcançarão esse nível em 2026. A Federação de Distribuição de Veículos Automotores (FENABRAVE), relata que a queda do preço das baterias será fundamental para o crescimento da produção dos veículos elétricos e que as baterias de íons lítio terão seus menores preços entre 2025 e 2029. A próxima década trará uma grande mudança de comportamento no que se refere aos veículos de transporte particular ou em massa (REVISTA IPT, 2021).

A indústria brasileira de baterias automotivas ainda é concentrada na produção de baterias de chumbo-ácido, embora algumas empresas trabalhem com tecnologias mais modernas como a de níquel e lítio conforme mostrado na **FIGURA 8**, que melhoram o desempenho de seus produtos.

**Figura 8 – Tipos de baterias e reservas de matérias primas disponíveis**



Fonte: Anfavea, 2021

Atualmente apenas duas empresas produzem baterias de lítio no Brasil: a Companhia Brasileira de Lítio (CBL) e a AMG Brasil. Mas há várias empresas com projetos de mineração em andamento. Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), os alvarás de pesquisa publicados, de todos os minérios, saíram de 5.285 em 2020 para 10.098 em 2021.

Já as baterias de níquel, em 2019 o projeto Araguaia recebeu a Licença de Instalação (LI). Em 2020, a produção beneficiada do níquel no Brasil foi da ordem de 77.100 toneladas de níquel. Os projetos da Horizonte Minerals e da Brazilian Nickel serão os próximos a entrar em produção no Brasil.

## 5 Ônibus híbrido

Diferente dos veículos convencionais com motor a combustão interna, o veículo elétrico híbrido ou simplesmente HEV, trata-se de um veículo que tem duas fontes de energia para movimentá-lo. Normalmente são veículos que usam o motor elétrico como uma fonte alternativa de energia, assim conseguem aumentar a potência, melhorar a eficiência e consequentemente a economia de combustível, além da redução na emissão de poluentes. Os veículos híbridos funcionam com um motor de combustão interna. Porém, também são capazes de converter energia em eletricidade, que é estocada em suas baterias até que o motor elétrico seja acionado e entre em funcionamento, tracionando o veículo, economizando a energia requerida pelo motor de combustão interna. Isso se deve a regeneração da energia devido a frenagem, o que ocorre nas descidas e paradas, mostrando ser mais eficiente nos centros urbanos. O motor elétrico é usado quando o motor a combustão interna está com baixa eficiência, isto é, quando está acelerando, subindo ladeira ou em baixa rotação. Alguns tipos de veículos híbridos também são capazes de, numa parada, desligar o motor e assim que o pedal de embreagem é acionado o motor é religado, economizando energia estocada. Diferente dos veículos elétricos, os veículos híbridos não precisam ser conectados a fontes externas de eletricidade, são alimentados através de energia vinda da combustão interna e dos freios regenerativos. A combinação de duas fontes de energia é mais eficiente que o motor de combustão interna ou o motor puramente elétrico. Veículos híbridos podem ser configurados com diversas combinações, agregando o que o motor de combustão interna tem de melhor e o mesmo ocorre com o motor elétrico auxiliar, reduzindo o consumo de combustível sem prejudicar a dirigibilidade e o desempenho (QUEIROZ, 2006). Quando combinamos o motor a etanol híbrido, podemos ter uma relação ideal entre eficiência energética e emissão de poluentes.

## 5.1 Topologias dos carros híbridos

Os carros híbridos são classificados basicamente em três tipos de topologias, híbridos série, híbridos paralelo e híbrido série-paralelo.

- **HÍBRIDO SÉRIE** - Nesse tipo de topologia apenas o motor elétrico é responsável por gerar tração. Já o motor a combustão interna funciona como um extensor de autonomia. O motor a combustão interna é acoplado a um gerador elétrico que fornece eletricidade às baterias e ao sistema de propulsão, composto pelo motor elétrico que traciona o veículo. Quando as baterias estão totalmente carregadas, o veículo opera como um elétrico puro, quando o veículo trabalha abaixo de um determinado estado de carga ou em altas rotações, entra em funcionamento o motor a combustão exercendo a função auxiliar através do gerador e do motor elétrico. Se o motor a combustão gerar potência acima do necessário para o funcionamento do veículo, o excesso é aproveitado para recarregar as baterias.
- **HÍBRIDOS PARALELOS** - Nesse tipo de topologia o motor elétrico e o motor a combustão interna geram tração para mover as rodas do carro. Por isso, pode se dizer que os dois funcionam paralelamente. O motor elétrico trabalha com o gerador responsável por carregar a bateria conforme a necessidade. Geralmente, o motor elétrico é conectado ao eixo dianteiro, e o eixo traseiro é movido pelo motor a combustão interna.

Também é possível configurar para que ambos exerçam tração no mesmo eixo, mas isso torna o sistema mais complexo, pois exige controladores eletrônicos mais sofisticados o que encarece significativamente o sistema.

- **HÍBRIDO SÉRIE-PARALELO** - Considerando as topologias aqui apresentadas, é a que possui a estrutura mais elaborada quando se refere à construção de VHE. Devido ao elevado grau de interação entre os trens de potência, é necessário a utilização de motor gerador, embreagens e transmissões planetárias (EHSANI, *et al*, 2007). Além disso, possui um conjunto eletrônico que avalia constantemente as condições do veículo, e, com isso, ele decide qual é o melhor momento de se usar o motor a combustão ou o motor elétrico.

## 6 Comparativo

Como demonstrado neste artigo, existem diversas tecnologias que podem ser implementadas como solução para o transporte público urbano na cidade de São Paulo. Para comparar as diversas tecnologias disponíveis no mercado, torna-se necessário considerar aspectos fundamentais com desempenho técnico, economia de combustível e níveis de emissões de gases poluentes. A **TABELA 3** apresenta uma avaliação dos benefícios ambientais de cada tipo de tecnologia veicular.

**Tabela 3 - Dados de referência para cálculo de benefícios ambientais**

TECNOLOGIA VEICULAR	EMISSÕES					
	Nox (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	MP (g/km)	CO <sub>2</sub> (g/km)	Sox (g/km)
DIESEL	12,31	2,19	0,16	0,30	1461,00	0,00470
ETANOL	5,58	0,00	0,43	0,04	270,00	0
HÍBRIDO	9,76	0,60	0,10	0,03	1386,00	0,00470
TRÓLEBUS	0,00	0,00	0,00	0,00	148,00	0
ELÉTRICO	0,00	0,00	0,00	0,00	82,00	0

Fonte: EMTU, 2014

Uma questão preponderante para análise de viabilidade na implantação de soluções para transporte público urbano com maior eficiência energética é o fator financeiro conforme **TABELA 4**. O investimento para aquisição de ônibus elétricos e híbridos ainda é muito elevado, mas se houver a utilização dessas tecnologias em grande escala, os custos tendem a se tornar mais acessíveis para as empresas.

**Tabela 4 - Valor de aquisição dos veículos para cada tipo de tecnologia**

TECNOLOGIA VEICULAR	R\$
DIESEL	540,000
ETANOL	600,000
HÍBRIDO	700,000
TRÓLEBUS	850,000
ELÉTRICO	2,000,000

Fonte: EMTU, 2014

## 7 Conclusões

De acordo com este artigo é inquestionável a necessidade de modernização do transporte público na cidade de São Paulo. Foram apresentadas algumas alternativas de tecnologias disponíveis no mercado para o transporte público de São Paulo, porém devido ao seu grande porte seria recomendado não apenas uma solução, mas sim, a implantação de uma matriz de soluções contendo os ônibus movidos a etanol, ônibus híbridos e os elétricos. Com isso, torna-se possível a extinção de ônibus movidos a óleo diesel nas ruas.

É possível concluir que o sistema de transporte público urbano da cidade de São Paulo deve, inicialmente, adotar a utilização de ônibus movidos a etanol, ou ônibus híbrido, levando-se sempre em conta a otimização da eficiência energética. Seguindo na mesma linha, tanto o gás natural como o biogás também podem contribuir com a diminuição da poluição e dependência energética em alguns centros urbanos. Em paralelo, será necessário, com políticas públicas adequadas, realizar a modernização e expansão de infraestrutura elétrica para a implantação gradual e migrar para os ônibus elétricos, que serão, senão na totalidade, mas certamente a tecnologia adotada para a maioria das frotas automobilísticas urbanas mundiais de transporte individual e também transporte público, inclusive em São Paulo.

## 8 Referências

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil**. São Paulo: ANFAVEA, 2021. Disponível em: <[https://anfavea.com.br/docs/apresentacoes/APRESENTA%  
c3%87%c3%83O-ANFAVEA-E-BCG.pdf](https://anfavea.com.br/docs/apresentacoes/APRESENTA%c3%87%c3%83O-ANFAVEA-E-BCG.pdf)>. Acesso em: 10 ago. 2021.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Fixa de informação toxicológica – Monóxido de Carbono**. São Paulo: CETESB, 2022. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Monoxido-de-Carbono.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2022.

Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo. **Estudo Comparativo de Tecnologias Veiculares de Tração Aplicáveis a Ônibus Urbanos**. São Paulo. EMTU 2014. Série CADERNO TÉCNICOS. Volume 15. Disponível em: <<https://www.emtu.sp.gov.br/ftp/Caderno%20Tecnico%20-%20Vol%2015.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – **Cidades e Estados. São Paulo**. IBGE 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-paulo.html>> Acessado em: 11 de agosto de 2022.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Monitor de Ônibus SP**. São Paulo: IEMA, 2022. Disponível em: <<http://energiaeambiente.org.br/onibus-sp>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

LASCALA, T.L. S. **Externalidades da substituição do diesel pelo etanol no transporte público urbano da região metropolitana**. Tese de doutorado – Escola Politécnica/Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PAUFERRO, M. T.O. **Uso do etanol como combustível para motores diesel: Uma discussão sobre a viabilidade**. Monografia MBA – Escola de Engenharia, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2012.

QUEIROZ, J. F. **Introdução do veículo híbrido no Brasil: Evolução tecnológica aliada à qualidade de vida**. Dissertação de (mestrado) - Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

REVISTA IPT. **Oxi-combustão – uma alternativa para a indústria.** São Paulo: Revista IPT/ Tecnologia e Inovação. Edição: v.5, n.17, ago., 2021. Disponível em: <<https://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/138>>. Acesso em: 11 de ago. 2022.

SÃO PAULO TRANSPORTE S/A. **Corredores e Faixas Exclusivas.** São Paulo: SPTrans, 2022. Disponível em: <<https://www.sptrans.com.br/corredores-e-faixas-exclusivas/>>. Acesso em: 09 ago. 2022.

TN Benicio biz editors. **Aditivo químico possibilita uso de etanol em motores a diesel.** Rio de Janeiro: TN, 2022. Disponível em: <<https://tnpetroleo.com.br/noticia/aditivo-quimico-possibilita-uso-de-etanol-em-motores-a-diesel/>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

DOI:10.29327/2152495.7.22-4



## Artigo Técnico

# Técnicas de programação matemática aplicadas ao problema de localização ótima de centros de distribuição em e-commerce

*Mathematical programming techniques applied to the logistics distribution centers location problem in e-commerce*

Willelberg dos Anjos Cruz<sup>a\*</sup>, Marcel Joly<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> Mestrado em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, S.A., São Paulo, Brasil.

<sup>b</sup> ARSESP- Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo

<sup>c</sup> Docente do Mestrado Profissional em Processos Industriais

\*e-mail: wil\_mec@hotmail.com

**Palavras-chave:** centros de distribuição, otimização, programação matemática, logística de operações, e-commerce.

**Keywords:** distribution centers, optimization, mathematical programming, operations logistics, e-commerce.

## Resumo

Este artigo propõe modelos de otimização baseados em técnicas de programação matemática para apoiar decisões estratégicas relativas à localização ótima de novos centros de distribuição que venham a operar no modelo de comércio eletrônico (*e-commerce*). Em particular, o problema estudado enfoca a logística de distribuição de alimentos frescos comercializados diretamente através da Internet. O objetivo é minimizar o custo integrado da operação logística considerando restrições operacionais (e.g., disponibilidade de recursos) e comerciais (e.g., nível de serviço) tipicamente presentes nesta área de negócio. Especificamente, modelos de otimização baseados em programação linear inteira-mista (*mixed-integer linear programming*, MILP) bem como as técnicas de solução são aqui propostos e implementados em linguagem de alto nível através de uma plataforma comercial de modelagem algébrica (GAMS). A metodologia proposta provou-se eficiente computacionalmente para a resolução de cenários realísticos do problema endereçado, revelando-se, ainda, uma abordagem promissora para consideração em pesquisa futura orientada à otimização estratégica, tática e operacional do negócio. Além disso, a capacidade dessa metodologia de abordar outros problemas logísticos semelhantes pode tornar este trabalho atraente para um público mais amplo.

## Abstract

*This article presents optimization models based on mathematical programming techniques aimed to support strategic decisions regarding the optimal location of new distribution centers in e-commerce. In particular, the problem focuses on the distribution logistics of fresh food sold directly over the Internet. The objective is to minimize the integrated cost of the logistics operation regarding operational (e.g., resource availability) and commercial (e.g., service level agreements) constraints which are typically present in the real-world problem. Specifically, optimization models based on mixed-integer linear programming (MILP) as well as their solution techniques are proposed here and implemented in high-level language by using a commercial modeling platform (GAMS). The methodology proposed proved to be computationally efficient for solving realistic instances of the problem, also proving to be a promising approach for consideration in future research directed towards tactical and operational decision support. Moreover, the ability of this methodology to be extended to address other similar logistic problems can make this work appeal to a broader audience.*

## 1 Introdução

No Brasil, o incremento significativo do uso de tecnologias de comércio eletrônico, o *e-commerce*, produziu, como uma consequência, o aumento da concorrência no mercado de varejo. E diversos fatores indicam que essa tendência irá aumentar de forma acentuada nos próximos anos. Atualmente, a parcela das vendas de varejo por meio do *e-commerce* é da ordem de 9,3% do total de vendas registradas no país. Conforme revelado pelo índice McC-Enet, em anos recentes o *e-commerce* tem crescido cerca de 70% no Brasil (E-COMMERCEBRASIL, 2021). Vale ressaltar que o recente e expressivo aumento de vendas via plataformas tecnológicas baseadas na Internet foi ainda exacerbado após o início da pandemia do COVID-19. Não obstante, recentes pesquisas de mercado indicam que há um potencial para que, nos próximos anos, 20% de toda venda do varejo seja realizada através de alguma plataforma tecnológica, ou seja, a expectativa é de que a quantidade de vendas do varejo brasileiro através do *e-commerce* evolua para o dobro do que é verificado hoje (E-COMMERCEBRASIL, 2021).

Atualmente, há diversas empresas que atuam no *e-commerce* brasileiro, como, por exemplo, Magazine Luiza, Lojas Americanas, Mercado Livre, Amazon e Shopee. O rol dessas empresas tem se expandido de forma permanente ao longo dos anos, visto que, como mencionado, o potencial mercadológico do país ainda oferece oportunidades relevantes a serem exploradas, não apenas em razão da dimensão geográfica e do tamanho da população, mas também em razão da mudança cultural quanto à forma de comprar, processo este ainda catalisado pela pandemia COVID-19.

Não supreendentemente, a quantidade de investimento em tecnologias e infraestruturas para implantação e operacionalização deste modelo de comercialização no país é também crescente há anos. Como exemplo, a atual maior empresa varejista *online* da América Latina, Mercado Livre, investiu R\$ 17 bilhões no Brasil em 2022.

Dessa forma, as empresas que atuam em *e-commerce* direcionam suas políticas estratégicas ao ganho de participação no mercado (*market share*) e, para isso, buscam sempre oferecer diversidade de produtos conjugada aos menores preços e à maior velocidade na entrega. Esses são os principais fatores que determinam o resultado da disputa entre empresas pelos consumidores (CNNBRASIL, 2021).

Por sua vez, tais fatores elevam a complexidade dos processos de tomada de decisão inerentes à definição das políticas estratégicas, táticas e operacionais das empresas atuantes na área. Diversidade de portfólio de produtos implica diversidade de tipos de armazéns, pois, para cada tipo de mercadoria, deve existir um centro de distribuição

(CD) com características específicas. Por outro lado, atendimento a prazos de entregas e a operação a preços competitivos impõem a necessidade da adoção de estratégias inteligentes para a definição da localização da armazenagem (CHAKRABORTY, RAY E DAN (2013)).

Não obstante, a complexidade do problema é ainda exacerbada por outros aspectos inerentes ao modelo de comércio eletrônico que, no particular caso do mercado de varejo de alimentos, é esperado haver um aumento ainda mais expressivo da demanda via *e-commerce* (CNNBRASIL, 2021). Um dos motivos para tanto é a recorrência do público consumidor, ou seja, pessoas que compram alimentos através do *e-commerce* tendem a, e em poucos dias, voltar a comprar alimentos pela Internet (ZHANG, XIONG, HE E QU (2017)). Essa recorrência contribui para vendas de outros produtos que não são alimentos, visto que, quanto mais pessoas entram com maior frequência na plataforma, maior a probabilidade de vendas do portfólio.

Este estudo foca o setor de alimentos, o qual ainda deve ser categorizado em congelados, refrigerados e secos, classificação esta que depende da temperatura de armazenagem dentro do CD. Por esta razão, esse setor necessita de CDs refrigerados que operem sob diferentes temperaturas, implicando, assim, maiores custos de investimentos em construção e, também, maiores custos operacionais.

Neste sentido, o emprego de modelos matemáticos de otimização para prover suporte à tomada de decisão sobre a localização ótima de novos CDs de alimentos perecíveis (refrigerados, congelados e secos) considerando, também, a otimização do tamanho da infraestrutura para atendimento à demanda prevista e a otimização dos recursos necessários para o transporte das mercadorias emerge como uma alternativa interessante para empresas de *e-commerce* envolvidas com análises de investimentos visando ampliação da sua atuação no mercado. De fato, como ressaltam ZHANG, XIONG, HE E QU (2017), otimizar variáveis de negócio relacionadas a mercado e demanda, custos logísticos e de armazenagem são importantes para tomadas de decisões mais assertivas. Endereçado ao tratamento deste complexo problema de pesquisa operacional, e considerando o estado-da-arte das técnicas e tecnologias computacionais de apoio à tomada de decisão, este artigo propõe o emprego de técnicas de programação matemática para a produção de uma metodologia hábil a prover respostas ótimas às decisões que tipicamente estão envolvidas em projetos de investimentos em infraestrutura dedicados à ampliação da logística de distribuição de empresas cujo modelo de negócio esteja alicerçado no *e-commerce*.

## 2 Descrição do problema

No âmbito deste estudo, o ponto de partida da cadeia logística em discussão é o CD, que é o local onde há toda infraestrutura necessária para armazenar o estoque de alimentos frescos que deve ser distribuído. A operação dos CDs deve observar as seguintes regras de negócio:

- Cada novo CD a ser construído deverá atender a demanda completa de uma ou mais localidades. Neste estudo em particular, as localidades serão representadas por bairros de um mesmo município;
- Há um limite superior para o número de novos CDs que podem ser construídos visando ao atendimento pleno da demanda de todos os bairros;
- Um mesmo bairro não poderá abrigar dois CDs, e
- Cada bairro deverá ser atendido por apenas um único CD, ou seja, caso dois (ou mais) novos CDs venham a ser criados, apenas um deles poderá atender a demanda de um dado bairro.

As regras de negócio relacionadas aos CDs ainda consideram que essas estruturas prediais poderão ser compradas ou alugadas, com seu tamanho dependendo da demanda a ser por ele atendida.

A expedição de produtos a partir de um CD contempla duas possibilidades de transporte:

- Entrega do produto do CD direto ao consumidor utilizando veículos de distribuição, que são veículos menores (e.g., veículos do tipo “Fiorino” ou “van”). Essa operação é chamada de D2C (*direct to consumer*), e
- Transferência dos alimentos do CD para uma estrutura de transbordo (ponto de *crossdocking* (CR)). Um CR pode existir ou não, sendo esta uma decisão estratégica a ser tomada. Tal suprimento será realizado com veículos de transferência, que são veículos maiores como, por exemplo, carretas. A partir desta estrutura de transbordo, os produtos são transferidos para diversos veículos menores, Fiorinos ou vans, que serão utilizados para distribuição final aos consumidores.

Os veículos de transferência do CD para a estrutura de transbordo, comumente são denominados veículos MM (*middle-mile*), e os veículos normalmente menores que chegam até o comprador comumente são denominados veículos de última milha, ou seja, veículos LM (*last-mile*), terminologias internacionais, que também são usualmente adotadas no Brasil. Veículos LM poderão sair diretamente do CD e também dos CRs. Os diferentes veículos empregados para o transporte de mercadorias estão ilustrados na **FIGURA 1**.

**Figura 1. Veículos utilizados para transferência de mercadorias. (a) carreta empregada para o transbordo de produtos entre os CDs e CRs; (b-c) veículos utilizados para distribuição última milha (veículos tipo Fiorino ou van), ou seja, para atendimento ao consumidor final.**



(a)



(b)



(c)

Fonte: elaborado pelos autores

Caso a decisão estratégica indique a construção de um CR, sua operação deverá satisfazer ao seguinte conjunto de regras de negócio:

- Um mesmo CR poderá atender à demanda de mais de um bairro, porém um mesmo bairro não poderá ser atendido por dois (ou mais) CRs;
- Cada CR será atendido por um único CD;
- Caso a demanda de um bairro seja atendida por um CR, esse mesmo bairro não poderá ser atendido diretamente pelo CD. Ou seja, toda demanda desse determinado bairro será atendida unicamente por um CR;
- Não haverá estoque de alimentos nos CRs, ou seja, serão estruturas apenas para transbordo de alimentos, e

- Há um limite superior para o número de CRs que poderão ser construídos. Neste sentido, a premissa considerada é de que tal limite corresponda ao dobro do limite superior estabelecido para o número de novos CDs.
- Um mesmo bairro não poderá abrigar mais de um CR, tampouco um CR e um CD. Dessa forma, o bairro onde estará abrigado um CD necessariamente será diferente de um bairro onde estará abrigado um CR;
- Cada bairro poderá ser atendido por apenas um CD quando houver entregas diretamente do CD para o consumidor ou um CR quando houver pontos de transbordos. Não necessariamente é obrigatória a demanda passar por um CR, poderá ser feita operação D2C (*direct to consumer*);

Especificamente no problema em estudo, o transporte de produtos deve também satisfazer ao conjunto complementar de regras de negócio:

1- A capacidade máxima dos veículos *last-mile* são:

- a. Fiorinos: 10 pedidos, e
- a. Vans: 30 pedidos.

Esses dois tipos de veículos estarão disponíveis nos CDs e nos CRs. Não há limite máximo de disponibilidade destes veículos, ou seja, assume-se que a quantidade disponível de Fiorinos e Vans é irrestrita. Custos de transporte de cada tipo de veículo:

- a. Fiorino: R\$ 2,70/km, e
- a. Vans: R\$ 3,00/km.

2- A capacidade dos veículos de transferências (carretas) é de 300 pedidos. Neste caso, o valor de transferência de cada pedido é fixo em R\$ 8,00 por pedido e independe da distância percorrida pela carreta. Isso se deve ao fato de que a transferência é feita por carretas que normalmente percorrerão poucos km e que, portanto, o tempo parado para carga e descarga é muito superior ao tempo dispendido no transporte.

Caso seja utilizada estrutura de transbordo, é necessário um galpão logístico para essa operação. Por hipótese, neste caso há apenas a possibilidade de locação, com valor fixo de R\$ 30.000 por mês independentemente do tamanho da estrutura.

Tendo como função objetivo minimizar o custo logístico total para atendimento exato da demanda prevista, o modelo de otimização contém as seguintes variáveis de decisão:

1. Quantidade e localização dos CDs;
2. Quantidade e localização dos CRs;
3. Modelo de negociação para implantação de cada CD, qual seja, locação ou aquisição da estrutura, e
4. Seleção do tipo de veículo LM para distribuição final (Van ou Fiorino).

Tais decisões impactarão a composição do custo total da operação logística, que, conforme mostra a experiência acumulada, é fortemente dependente dos custos de transporte. No tocante a isso, graus de liberdade relevantes do problema em questão são as decisões relacionadas à opção de se utilizar uma estrutura de transbordo (transporte de transferência + transporte de distribuição + custo de locação do galpão logístico para transbordo) ou de empregar uma estratégia que desconsidere operações de transbordo, de modo a atender a demanda prevista diretamente a partir do(s) CD(s) utilizando apenas transporte de distribuição. Essa decisão deverá considerar o objetivo de obter o menor custo possível, sendo, por hipótese, o mesmo diretamente proporcional às distâncias de percurso envolvidas no transporte.

### 3 Nomenclatura Empregada no Modelo Matemático

O modelo matemático proposto utiliza a nomenclatura abaixo.

#### Índices e conjuntos

$i$  conjunto de bairros.

#### Parâmetros

BUY( $i$ ) preço do  $m^2$  no bairro " $i$ " para compra de imóvel (em R\$);  
 RENT( $i$ ) preço do  $m^2$  no bairro " $i$ " para aluguel de imóvel (em R\$ por mês);  
 DEM( $i$ ) demanda diária pelo produto no bairro " $i$ ".

#### Variáveis Binárias

$Y_{cd}(i)$  valor =1 se o bairro " $i$ " for escolhido para abrigar um CD e valor = 0 caso contrário;  
 $Y_{cross}(j)$  valor =1 se o bairro " $j$ " for escolhido para abrigar um ponto de *cross-docking* e valor =0 caso contrário;  
 $Y_a(i)$  valor =1 se o CD baseado no bairro " $i$ " utilizara imóvel alugado e valor = 0 caso contrário;

$Y_c(i)$	valor =1 se o CD baseado no bairro “i” utilizara imóvel comprado e valor = 0 caso contrário;
$Y_{ik}(i,k)$	valor =1 se o CD baseado no bairro “i” for designado para atender a demanda do bairro “k” e valor =0 caso contrário;
$Y_{ij}(i,j)$	valor =1 se o CD baseado no bairro “i” for designado para suprir o <i>crossdocking</i> do bairro “j” e valor =0 caso contrário;
$Y_{jk}(j,k)$	valor =1 se o <i>crossdocking</i> baseado no bairro “j” for designado para atender a demanda do bairro “k” e valor =0 caso contrário.

### Variáveis Positivas

$ta(i)$	tamanho em m <sup>2</sup> do CD alugado baseado no bairro “i”;
$tc(i)$	tamanho em m <sup>2</sup> do CD comprado baseado no bairro “i”;
$ca(i)$	custo de aluguel em R\$ para instalar o CD no bairro “i” (10 anos de aluguel) (R\$);
$cc(i)$	custo de compra de um imóvel para instalar o CD no bairro “i” (R\$);
$ct$	custo total de transporte (CD>>Cross + Cross>>Cliente + CD>>Cliente) (R\$);
$ca\_cross$	custo total de aluguel gasto com galpões de <i>crossdocking</i> (R\$);
$fc(i,j)$	quantidade de produtos transferida do CD localizado no bairro “i” para o <i>crossdocking</i> localizado no bairro “j” (total ao longo do horizonte de planejamento);
$ff\_cd(i,k)$	quantidade de produtos transferida do CD localizado no bairro “i” para o cliente localizado no bairro “k” por meio de Fiorino (total ao longo do horizonte de planejamento);
$fv\_cd(i,k)$	quantidade de produtos transferida do CD localizado no bairro “i” para o cliente localizado no bairro “k” por meio de Van (total ao longo do horizonte de planejamento);
$ff\_cr(j,k)$	quantidade de produtos transferida do <i>crossdocking</i> localizado no bairro “j” para o cliente localizado no bairro “k” por meio de Fiorino (total ao longo do horizonte de planejamento);
$fv\_cr(j,k)$	quantidade de produtos transferida do <i>crossdocking</i> localizado no bairro “j” para o cliente localizado no bairro “k” por meio de Van (total ao longo do horizonte de planejamento);
$ct\_cross$	custo de transporte entre pontos de <i>crossdocking</i> e clientes (fiorino + van) (em R\$) (total ao longo do horizonte de planejamento);
$ct\_cd$	custo de transporte entre CD e clientes (fiorino + van) (em R\$) (total ao longo do horizonte de planejamento);
$ct\_cd\_cross$	custo de transporte entre CD(s) e pontos de <i>crossdocking</i> (em R\$) (total ao longo do horizonte de planejamento);

ct\_cd\_cliente custo de transporte entre CD(s) e clientes (em R\$) (total ao longo do horizonte de planejamento).

#### Constantes

HD	horizonte de planejamento em dias (10 anos x 365 dias);
HM	horizonte de planejamento em meses (10 anos x 12 meses);
AP	área m <sup>2</sup> necessária para estocar uma unidade do produto no CD;
BigM	constante BigM para modelagem do tamanho do CD;
CAP_Fiorino	capacidade do Fiorino (número de produtos);
CAP_Van	capacidade da Van (número de produtos);
C_car	custo de transporte por carreta (R\$ por produto);
C_Fiorino	custo de transporte do Fiorino (R\$ por km);
C_Van	custo de transporte da Van (R\$ por km);
C_ALUG_CROSS	custo de locação para galpão <i>crossdocking</i> (R\$ por mês).
NMCDS	limite superior para a quantidade de novos CDs que poderão ser construídos.

## 4 Modelo matemático

Nesta seção, o modelo matemático proposto é apresentado.

A função objetivo é minimizar o custo logístico total, considerando os custos de compra ou locação do CD, custos totais de transporte (custo de transporte de transferência entre o CD e pontos de transbordos CR e custo de transporte final de até os clientes) e custos de locação do(s) ponto(s) de transbordo(s) CR, sempre atendendo toda demanda existente.

Matematicamente, a função objetivo é definida por (4.1 a):

#### Minimizar:

CUSTO = *custo de transporte total + custo de compra do CD no bairro "i" considerando o tamanho que o CD deverá ter para atender a demanda + custo de aluguel do CD no bairro "i" considerando o tamanho que o CD deverá ter para atender a demanda + custo total de aluguel dos galpões CR*

$$CUSTO = z = \sum_i (cc_i + ca_i) + ct + ca\_cross \quad (4.1a)$$

Para atender a uma determinada demanda em uma região, cada bairro “i” poderá abrigar, no máximo, NMCDS novos CDs. Isto é imposto pelas restrições (4.2 a). Importante observar que a própria variável binária  $Ycd(i)$  também atua como a restrição no sentido de que, em cada bairro “i”, o número de CDs implantados seja um número inteiro.

$$\sum_i Ycd_i \leq NMCDS \quad (4.2 a)$$

Poderão existir no máximo quatro CRs conforme estabelecido em (4.2 b).

$$\sum_j Ycross_j \leq 2 * NMCDS \quad (4.2 b)$$

Por outro lado, se em um determinado bairro “i” deve existir um novo CD, essa nova estrutura será um imóvel alugado ou comprado, conforme imposto em (4.2 c).

$$Ya_i + Yc_i = Ycd_i, \forall i \quad (4.2 c)$$

O custo de locação do CR no bairro “j” em que a estrutura será instalada está computado em (4.2 d). Aqui, considera-se que o aluguel será pago mensalmente durante todo horizonte de tempo considerado, qual seja, 10 anos.

$$ca\_cross = \sum_j (Ycross_j) * C\_ALUG\_CROSS * HM \quad (4.2 d)$$

Importante notar que, se um bairro “i” não abriga um CD, então não há fluxo de produtos do bairro “i” para qualquer outro bairro “k” e tampouco há fluxo a qualquer CR no bairro “j”. Estas condições lógicas são impostas pelas equações (4.2 e) e (4.2 f), respectivamente.

$$Yik_{i,k} \leq Ycd_i, \forall (i,k) \quad (4.2 e)$$

$$Yij_{i,j} \leq Ycd_i, \forall (i,j) \quad (4.2 f)$$

Considerando o mesmo racional mencionado anteriormente, se em um bairro “j” não há um CR, conseqüentemente não existe fluxo de produtos do CD para o bairro “j”, tampouco do bairro “j” ao bairro dos consumidores “k”, condições existentes nas equações (4.2 g) e (4.2 h).

$$Y_{ij,k} \leq Y_{cross_j}, \forall(i,j) \quad (4.2 g)$$

$$Y_{ik,j,k} \leq Y_{cross_j}, \forall(j,k) \quad (4.2 h)$$

A quantidade de produto transferida entre dois nós da rede logística poderá ser maior que zero quando for permitido haver fluxo entre estes dois nós. Essa restrição é escrita conforme apresentada nas equações (4.2 i), (4.2 j), (4.2 k), (4.2 l) e (4.2 m).

$$ff\_cd_{i,k} \leq Y_{ik,i,k} * BigM, \forall(i,k) \quad (4.2 i)$$

$$fv\_cd_{i,k} \leq Y_{ik,i,k} * BigM, \forall(i,k) \quad (4.2 j)$$

$$fc_{i,j} \leq Y_{ij,j} * BigM, \forall(i,j) \quad (4.2 k)$$

$$ff\_cr_{j,k} \leq Y_{jk,j,k} * BigM, \forall(j,k) \quad (4.2 l)$$

$$fv\_cr_{j,k} \leq Y_{jk,j,k} * BigM, \forall(j,k) \quad (4.2 m)$$

Como premissa de negócio, foi considerado que cada bairro “k” deverá ser atendido por um único CD instalado em algum bairro “i”. Esta hipótese está representada em (4.2 n).

$$\sum_i Y_{ik,i,k} \leq 1, \forall k \quad (4.2 n)$$

Foi considerado, cujo racional foi o mesmo usado para CDs, que cada bairro “k” deverá ser atendido por um único CR instalado em algum bairro “j” conforme estabelecido em (4.2 o).

$$\sum_j Y_{jk,j,k} \leq 1, \forall k \quad (4.2 o)$$

O tamanho do CD instalado no bairro “i” deverá ser projetado a partir da quantidade de produto distribuída a partir desse CD mensalmente, ou seja, será considerado como estoque de segurança o estoque equivalente a 30 dias de demandas diárias, como em (4.2 p).

$$\sum_k (ff\_cd_{i,k} + \frac{fv\_cd_{i,k}}{120}) = ta_i + tc_i, \forall i \quad (4.2 p)$$

A demanda de cada cliente localizado no bairro “k” deverá ser atendida por produtos recebidos de pontos de *crossdocking* CRs e, eventualmente, diretamente de um CD localizado no bairro “i”, como imposto em (4.2 q).

$$\sum_j (ff\_cr_{j,k} + fv\_cr_{j,k}) + \sum_i (ff\_cd_{i,k} + fv\_cd_{i,k}) = DEM_k * HD, \forall k \quad (4.2 q)$$

As variáveis de tamanho do CD instalado no bairro “i” deverão ser nulas caso se opte por não ter CD neste bairro, como computado em (4.2 r) e (4.2 s).

$$ta_i \leq Ya_i * BigM, \forall i \quad (4.2 r)$$

$$tc_i \leq Yc_i * BigM, \forall i \quad (4.2 s)$$

Considerando que não haverá armazenagem nos CRs, ou seja, essas estruturas servirão apenas como pontos de transbordos. Assim, todo fluxo de produtos que chega em um CR deverá ser entregue aos clientes por eles atendidos, conforme (4.2 t).

$$\sum_i fc_{i,j} = \sum_k (ff_{-cr_{j,k}} + fv_{-cr_{j,k}}), \forall j \quad (4.2 t)$$

Entre os pontos de transbordos CRs e os clientes, serão utilizados veículos Vans e Fiorinos, cujos custos de transportes entre esses pontos são computados em (4.2 u). É possível também realizar o transporte do CD para os clientes, ou seja, operação D2C utilizando também Vans e Fiorinos, cujos custos de transportes estão definidos em (4.2 v).

$$\begin{aligned} & \sum_{j,k} \left[ \left( \frac{fv_{-cr_{j,k}}}{CAP_{Fiorino}} \right) * DIST_{j,k} \right] * C_{Fiorino} + \sum_{j,k} \left[ \left( \frac{fv_{-cr_{j,k}}}{CAP_{Van}} \right) * DIST_{j,k} \right] * C_{Van} \\ & = ct_{cross} \end{aligned} \quad (4.2 u)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i,k} \left[ \left( \frac{ff_{-cd_{i,k}}}{CAP_{Fiorino}} \right) * DIST_{i,k} \right] * C_{Fiorino} + \sum_{i,k} \left[ \left( \frac{fv_{-cd_{i,k}}}{CAP_{Van}} \right) * DIST_{i,k} \right] * C_{Van} \\ & = ct_{cd} \end{aligned} \quad (4.2 v)$$

Os custos de transportes de mercadoria entre os CDs e CRs são calculados através de (4.2 w).

$$\sum_{i,j} (fc_{i,j}) * C_{car} = ct_{cd\_cross} \quad (4.2 w)$$

Assim, o custo total de transporte fica quantificado por (4.2 x).

$$ct = ct_{cross} + ct_{cd\_cross} \quad (4.2 x)$$

O custo de aluguel do CD depende do bairro “i” em que o CD será instalado e depende também do tamanho que o CD deverá ter para atender a demanda pelo mesmo. Importante destacar que o aluguel será pago mensalmente o período de planejamento. Esse custo de aluguel está computado em (4.2 y).

$$ca_i = RENT_i * HM * ta_i, \forall i \quad (4.2 y)$$

De forma semelhante à equação anterior, custo de compra do CD depende do bairro “i” em que o empreendimento será instalado e também do tamanho que o mesmo deverá ter para atender a demanda, conforme modelado em (4.2 z).

$$cc_i = BUY_i * tc_i, \quad \forall i \quad (4.2 z)$$

## 5 Resultados obtidos no problema

A solução de uma instância do problema é apresentada nesta seção. Neste experimento computacional, foi considerado um horizonte de planejamento de dez anos. Foi assumido que, no máximo, dois novos CDs podem ser construídos para viabilizar toda a operação logística. Um único produto foi considerado assumindo-se, ainda, que o espaço requerido para sua armazenagem no CD é de 1 m<sup>2</sup> por unidade do produto.

A parametrização da instância é apresentada a seguir. A TABELA 5.1 tabula as distâncias entre os quinze bairros modelados neste estudo. Ressalte-se que estas distâncias são, via de regra, constantes. Contudo, elas podem sofrer alterações quando há obras, desvios ou eventos similares que, por modificar a extensão dos percursos a serem realizados, obrigam o replanejamento das operações diárias.

### Constantes

HD	horizonte de planejamento em dias (10 anos x 365 dias)	=3650
HM	horizonte de planejamento em meses (10 anos x 12 meses)	=120
AP	área, em m <sup>2</sup> , necessária para estocar uma unidade do produto no CD	=1
BigM	constante BigM para modelagem do tamanho do CD (m <sup>2</sup> )	=1012
CAP_Fiorino	capacidade do Fiorino (número de produtos)	=10
CAP_Van	capacidade da Van (número de produtos)	=30
C_car	custo de transporte por carreta (R\$ por ordem)	=8
C_Fiorino	custo de transporte do Fiorino (R\$ por km)	=2.7
C_Van	custo de transporte da Van (R\$ por km)	=3
C_ALUG_CROSS	custo de locação para galpão <i>crossdocking</i> (R\$ por mês)	=30000

Tabela 5.1 Distância (em km) entre os centros dos bairros "i" e "j" (parâmetro DIST(i,j)).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	5	20	12	38	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400
2	5	0	6	8	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
3	20	6	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
4	12	8	20	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	38	15	40	5	0	30	60	80	100	120	140	160	180	200	220
6	40	30	60	10	30	0	5	10	15	20	40	55	70	85	100
7	50	45	80	15	60	5	0	1	2	3	4	5	6	7	8
8	60	60	100	20	80	10	1	0	2	4	8	10	12	14	16
9	70	75	120	25	100	15	2	2	0	90	105	120	135	150	165
10	80	90	140	30	120	20	3	4	90	0	160	180	200	220	240
11	90	105	160	35	140	40	4	8	105	160	0	40	45	50	55
12	100	120	180	40	160	55	5	10	120	180	40	0	180	200	220
13	200	135	200	45	180	70	6	12	135	200	45	180	0	85	100
14	300	150	220	50	200	85	7	14	150	220	50	200	85	0	8
15	400	165	140	55	220	100	8	16	165	240	55	220	100	8	0

Fonte: autor

Já a TABELA 5.2 apresenta os valores venais, em R\$ por m<sup>2</sup>, para aquisição dos imóveis nos quinze bairros considerados (parâmetros BUY(i)), bem como os respectivos valores de locação, em R\$ por m<sup>2</sup> (parâmetro RENT(i)). Ainda são apresentados nesta tabela os valores de demanda diária por produtos em cada um dos bairros, demanda esta que deve ser exatamente atendida (DEM(i)).

Tabela 5.2 Valores venais, de locação e demanda diária prevista por produtos para cada bairro.

	Valor venal (R\$/m <sup>2</sup> )	Valor de locação (R\$/m <sup>2</sup> )	Demanda prevista (produtos/dia)
Bairro	(Parâmetro BUY(i))	(Parâmetro RENT(i))	(Parâmetro DEM(i))
1	2000	20	120
2	500	7	207
3	1000	10	100
4	11000	110	500
5	7000	33	330
6	2600	12	3200
7	5900	19	1900
8	3500	27	270
9	4000	41	41
10	7000	23	835
11	2100	5	455
12	300	2	200
13	8000	66	660
14	6300	50	90
15	4000	48	48

Fonte: autor

O modelo MILP foi resolvido com o emprego do método *Branch and Bound* baseado em LP implementado no solver CPLEX (IBM, 2017). O modelo contém 2.183 equações e 1.926 variáveis das quais 735 são variáveis binárias. O modelo de otimização foi resolvido em 0,328 segundos em um computador pessoal com processador Intel(R) Celeron(R) CPU B815 1.60GHz e 6 GB de memória RAM, produzindo, como principais decisões estratégicas, as relacionadas abaixo:

- A implantação de dois bairros abrigar centros de distribuição, quais sejam, bairros 2 e 12. Especificamente, a implantação do CD no bairro 2 deve se dar pela aquisição de um imóvel com a dimensão de  $1,3557 \times 105 \text{ m}^2$ , enquanto que no bairro 12 a implantação do CD deve ser através de locação de um imóvel com dimensão de  $1,3684 \times 105 \text{ m}^2$ , e
- A implantação de um único CR no bairro 7.
- Para operacionalizar a distribuição dos produtos, tanto dos CDs diretamente para clientes (operação D2C) assim como dos CRs para os clientes, devem ser utilizadas exclusivamente vans.

## 6 Conclusões

Este estudo foi endereçado à análise de um problema de otimização logística do transporte e distribuição de produtos comercializados através do modelo de e-commerce. Objetivando reduzir a discrepância entre o modelo matemático e o problema real, foi priorizada a implementação de modelagem detalhada enfocando, porém não se restringindo, à:

- Representação do custo de transporte de transferência entre CDs e CRs com objetivo de reduzir custos de última milha, e
- Representação de diferentes tipos de veículos de última milha (vans e Fiorinos) com valores de transportes diferentes de modo que se produzam orientações otimizadas sobre quais modais de veículos devem ser utilizados de modo que a operação seja realizada ao menor custo possível assegurando-se atendimento a toda demanda prevista.

A abordagem proposta produz orientações preciosas para uma operação logística com menor custo possível, aqui compreendidas decisões de natureza econômica sobre a

localização ótima de centros de distribuição e de pontos de transbordos para diferentes cenários de custos e de demandas ao longo do horizonte de planejamento. Especificamente, o sistema de modelagem GAMS foi considerado para a implementação do modelo e do método de solução, o qual consistiu do método *Branch and Bound* baseado em programação linear (solver CPLEX).

Os resultados produzidos demonstram que, além de suportar o processo de tomada de decisões relativas ao planejamento de cenários futuros (auxiliando, assim, os gestores na execução de suas atividades de otimização estratégica), a metodologia também pode representar a base para a derivação de outras soluções, como ferramentas para análise tática ou operacional do negócio. Claramente, para este fim seriam necessários maiores investimentos em modelagem, a fim de capturar aspectos salientes do problema na escala de curto ou médio-prazos.

Com o modelo proposto também é possível obter, rapidamente, orientações estratégicas em função de mudanças nos cenários macroeconômicos bem como nas condições de contorno que definem o problema. Outras análises também relevantes para a realidade do sistema modelado, tais como aquelas considerando diferentes valores de custo por metro quadrado dos imóveis em cada bairro e variações na demanda de cada bairro, podem ser executadas de modo a se obter preciosas orientações estratégicas que podem apoiar decisões em outras camadas de negócio, seja no plano tático ou operacional para diversos cenários de operação logística.

Contudo, o presente estudo possui limitações diversas. Dentre elas, cita-se o caráter determinístico da abordagem adotada que, inevitavelmente, dificulta a análise de eventos estocásticos que são inerentes ao problema endereçado. Por exemplo, sabe-se que demandas de alimentos no *e-commerce* são sazonais, variam diariamente durante a semana e ficam sujeitas ao impacto de outros fatores, como feriados. Ou seja, há incertezas relevantes associadas ao sistema real e esses fatores não estão sendo considerados no modelo estudado. Neste sentido, a adoção de parâmetros constantes para representar grandezas de natureza estocástica implica uma simplificação do problema logístico real de modo que o analista de otimização deve sempre analisar cuidadosamente a resposta obtida, por meio de análises de sensibilidade com relação à parametrização da instância base considerada.

Ainda assim, é possível concluir que o modelo proposto pode, potencialmente, ser de grande relevância para apoio à tomada de decisão em operações logísticas de sistemas reais de distribuição de alimentos no *e-commerce*.

Por fim, ressalte-se que extensões desta pesquisa são inúmeras. Sofisticação da modelagem matemática para representar comportamentos não lineares do sistema constitui uma extensão natural deste desenvolvimento. Isso poderia, por exemplo, ser o caso da operação do sistema considerando limites superiores para o tempo de entrega dos produtos. Aqui, haveria um compromisso ótimo a ser explorado entre os custos dos recursos necessários (carretas, vans e Fiorinos, bem como outros recursos tampouco modelados neste trabalho, como recursos humanos) e os benefícios auferidos com o pleno atendimento às novas restrições. Para tanto, ganhos de escala (e.g., na contratação de recursos) potencialmente existem e, neste caso, também deverão ser considerados. Considerando a elevada dimensão dos problemas reais quando analisados sob a ótica integrada do planejamento e da operação logística, outra linha de desenvolvimento promissora é a adoção de estruturas de solução hierarquizadas. Aqui, a solução sucessiva de problemas específicos endereçando aspectos salientes de cada camada de negócio (planejamento estratégico/planejamento tático/programação operacional) emerge como uma alternativa interessante para a produção de soluções de boa qualidade em tempos computacionais aceitáveis.

## 7 Referências

CHAKRABORTY, Romita; RAY, Ankita; DAN, Pranab K. **Multi criteria decision making methods for location selection of distribution centers**. International Journal Of Industrial Engineering Computations, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 491-504, 1 out. 2013. Growing Science. <http://dx.doi.org/10.5267/j.ijiec.2013.06.006>.

CNNBRASIL (2021). MAGALU, B2W, **MERCADO LIVRE: QUEM VAI VENCER A CORRIDA DA ENTREGA MAIS RÁPIDA**. São Paulo, 04 fev. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/magalu-b2w-mercado-livre-quem-vai-vencer-a-corrida-da-entrega-mais-rapida/>. Acesso em: 21 ago. 2021.

E-COMMERCEBRASIL (2021). **E-COMMERCE BRASILEIRO CRESCE 73,88% EM 2020, REVELA ÍNDICE MCC-ENET**. São Paulo, 02 fev. 2021. Disponível em: <https://www.ecommercebrasil.com.br/noticias/e-commerce-brasileiro-cresce-dezembro/>. Acesso em: 21 ago. 2021.

EXAME (2021). **MAGAZINE Luiza entregará alimentos da BRF em até um dia útil**. 2021. Disponível em: <https://exame-com.cdn.ampproject.org/c/s/exame.com/negocios/magazine-luiza-entregara-alimentos-da-brf-em-ate-um-dia-util/amp/>. Acesso em: 04 set. 2021.

IBM (2017) CPLEX **User's Manual**. IBM Corporation. Available at: [www.ibm.com/](http://www.ibm.com/)

O GLOBO (2021). **DISPUTA PARA SER 'O MAIS RÁPIDO' AINDA NÃO ACABOU**. São Paulo, 30 jul. 2021. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2021/07/30/disputa-para-ser-o-mais-rapido-ainda-nao-acabou.ghtml>. Acesso em: 21 ago. 2021.

ZHANG, Hao; XIONG, Ying; HE, Mingke; QU, Chongchong. **Location Model for Distribution Centers for Fulfilling Electronic Orders of Fresh Foods under Uncertain Demand**. Scientific Programming, [S.L.], v. 2017, p. 1-13, 2017. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2017/3423562>.

DOI:10.29327/2152495.7.22-3



## Artigo Técnico

### Estudo de caso: Efeitos da composição do material combustível volátil do coque verde de petróleo no perfil de temperatura de forno rotativo de calcinação

*Case of study: Effects of green  
petroleum coke's volatile combustible  
matter composition in the temperature  
profile of a calcination Rotary kiln*

Francisco Matthews da Silva e Silva<sup>\*ab</sup>,  
Wagner Aldeia<sup>cd</sup>

<sup>a</sup> Mestrado Profissional em  
Processos Industriais Instituto  
de Pesquisas Tecnológicas  
do Estado de São Paulo  
S.A., São Paulo-SP, Brasil.

<sup>b</sup> Engenheiro Químico

<sup>c</sup> Docente do Mestrado  
Profissional em  
Processos Industriais

<sup>d</sup> Laboratório de Processos  
Químicos e Tecnologia  
de Partículas, Instituto de  
Pesquisas Tecnológicas do  
Estado de São Paulo S.A.,  
São Paulo-SP, Brasil.

\*e-mail: fm.dsilva2@gmail.com

Palavras-chave: calcinação de  
coque; modelagem; aprendizado  
de máquina; planejamento de  
experimento; forno rotativo.

*Keywords: coke calcination;  
modeling; machine learning; design  
of experiments; rotary kiln*

## Resumo

Um modelo por algoritmo de aprendizado de máquina do processo de calcinação de coque verde de petróleo em fornos rotativos foi desenvolvido, para simular a temperatura de saída dos gases do processo e estudar os efeitos da composição do material combustível volátil (VCM). O modelo foi criado a partir do algoritmo de árvore de decisão CART e interpretado através do planejamento fatorial (DOE) das onze (11) variáveis e em dois (02) níveis. O modelo desenvolvido apresentou excelente aderência, com  $R^2$  de 85,37% e, através do planejamento fatorial, foi possível determinar que as frações do VCM volatilizados entre 270 °C e 590 °C possuem o significativo efeito na temperatura de saída dos gases, de +9,48%, quando atribuídos junto à vazão de injeção de ar terciário.

## Abstract

*A green petroleum coke calcination process model in Rotary kilns was developed to simulate the exit gas temperature and study the effects of volatile combustible matter (VCM) composition. The model was developed by the decision tree algorithm CART and interpreted through factorial design (DOE) of eleven (11) variables and two (02) levels. The developed model presented excellent adherence, with  $R^2$  of 85.37% and through the factorial experiment was possible to determine that the VCM fractions volatilized between 270 °C and 590 °C has significant effect in the exit gas temperature, of +9.48%, when assigned with tertiary air injection flow.*

## 1 Introdução

O alumínio é amplamente utilizado na indústria de eletrônicos, aeroespacial, automotiva, alimentícia e construção civil, totalizando uma produção mundial de 67,2 milhões de toneladas métricas em 2021 (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2021). O processo produtivo do alumínio primário consiste na redução do óxido de alumínio (alumina) através da aplicação de corrente elétrica, com um consumo de 14 a 38 MWh por tonelada de alumínio produzido, face o consumo teórico de 6,23 MWh por tonelada (MILOVANOFF; POSEN; MACLEAN, 2020; YU, B. *et al.*, 2021; FORTIN; KANDEV; FAFARD, 2012; OBAIDAT M. *et al.*, 2018). Para tanto, são confeccionados anodos de carbono, compostos de piche, entre 13% e 15% em massa, e coque calcinado de petróleo, que são responsáveis pela transferência da energia elétrica (ou elétrons)

para a cuba de produção de alumínio. Este último, o coque calcinado de petróleo, é um sólido de alto teor de carbono, entre 97% e 99%, obtido a partir da calcinação de coque verde de petróleo.

No processo de calcinação, o coque verde de petróleo é aquecido em temperatura entre 1100 °C e 1350 °C, e mantido nessas condições entre 1 e 36 horas, dependendo da tecnologia empregada. No ocidente, a tecnologia mais difundida é a de fornos rotativos (*Rotary kilns*), nos quais o coque é calcinado através da queima do material combustível volátil (Volatile combustible matter, VCM) residual do coque verde, pela injeção de ar ou queima direta de combustível, que pode ser gás natural ou óleo de xisto (EDWARDS, L., 2015).

O controle do processo de calcinação de coque em fornos rotativos é influenciado por diversas variáveis, entre elas a umidade, a granulometria e o material combustível do coque verde. Entretanto, o controle de anomalias no forno é um processo altamente sensível, dependendo da visualização interna, assim como o acompanhamento do perfil de temperatura. A perda do controle de temperatura do forno pode ocasionar a degradação precoce do material refratário do forno, perda na consistência da qualidade do coque calcinado e, em casos mais graves, paradas inesperadas devido ao deslocamento longitudinal excessivo do forno, uma vez que a variação da posição da zona de maior temperatura do forno irá movimentar o forno na mesma direção, podendo assim “travar” o forno em função do contato dos anéis de apoio em superfícies estáticas.

Em função da complexidade do processo de calcinação, experimentos em escala industrial são altamente restritos, podendo afetar a campanha do forno e os compromissos de produção, impossibilitando assim maiores conhecimentos das variáveis de influência no perfil de temperatura do forno, para posterior formulação de novas estratégias de controle do processo, assim como melhores modelos de previsão. Desta forma, com o início da difusão de ferramentas de aprendizado de máquina (*Machine Learning*, ML), abordagens complementares com métodos estatísticos clássicos, como o Experimento fatorial (em inglês *Design of Experiments*, DOE), podem abrir novas possibilidades de estudos sobre as influências não definidas em processos industriais (FREIESLEBEN, J.; KEIM, J.; GRUTSCH, M., 2020).

O presente estudo tem como objetivo determinar os principais efeitos entre as diferentes frações do material combustível do coque verde de petróleo no perfil de temperatura de fornos rotativos, através da modelagem da temperatura de saída dos gases do forno (variável resposta,  $y$ ), com as variáveis de manipulação do forno ( $x$ ) e seis faixas de volatilização do material combustível ( $m$ ). A modelagem do processo de calcinação utilizada

é baseada no algoritmo de regressão *CART* (*Classification and Regression Trees*, Árvores de Classificação e Regressão, em tradução livre), criado a partir do banco de dados de processo e de qualidade da matéria-prima, e a interpretação dos efeitos individuais e combinados das variáveis acima citadas através de Experimento Fatorial Fracionado, 1/16, de dois fatores e onze variáveis (211).

## 2 Procedimento metodológico

### 2.1 Banco de dados

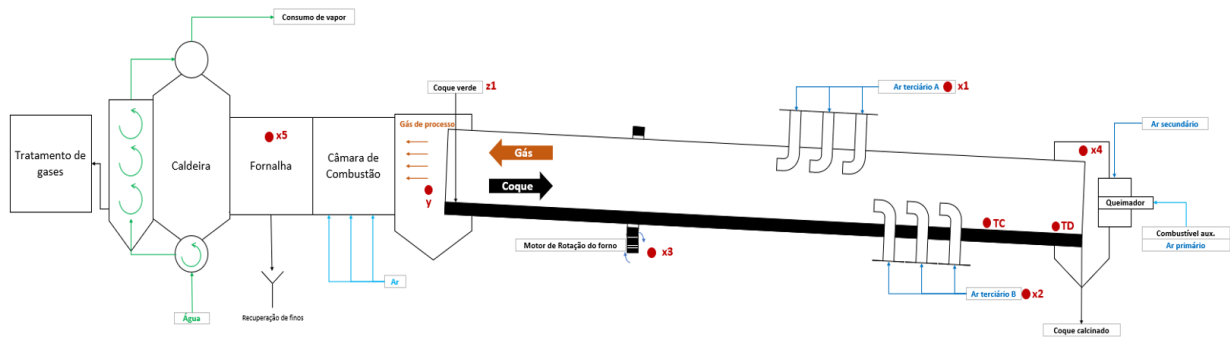
A média horária dos dados históricos utilizados para a modelagem do processo de calcinação foi obtida a partir de 1829 h de operação (já removidos períodos de parada, partida e mau funcionamento de instrumentos) de uma unidade de calcinação de coque verde, através do software *Osisoft PI Datalink*, de uma unidade com capacidade de processamento de 30 t/h de coque verde, comprimento superior a 50 m e diâmetro superior a 2 m, em que a espessura do material refratário varia ao longo do comprimento do forno, composto de concreto aluminoso de baixo cimento, variando entre 200 e 350 mm de espessura, fixado através de âncoras em “v”, soldadas no costado metálico. Na **TABELA 1** é possível observar as variáveis do forno utilizadas para a modelagem do processo e, na **FIGURA 1**, é possível observar o fluxograma do forno rotativo de calcinação de coque verde, com destaque às variáveis observadas na **TABELA 1**.

**Tabela 1 - Variáveis do forno utilizadas para a modelagem do processo**

Variável	Abreviação	Unidade	Tipo
Temperatura de saída dos gases	TSG	°C	Variável de processo
Rotação do ar terciário A	x1	RPM	Variável manipulada
Rotação do ar terciário B	x2	RPM	Variável manipulada
Rotação do forno	x3	RPM	Variável manipulada
Pressão da fornalha	x4	mmCA g	Variável manipulada
Pressão interna do forno	x5	mmCA g	Variável manipulada

Fonte: elaborado pelos autores

Figura 1 - Fluxograma simplificado de um forno de calcinação de coque verde de petróleo



Fonte: elaborado pelos autores

O histórico das diferentes frações de material combustível volátil do coque verde foi obtido no banco de dados do analisador termogravimétrico macro *Leco TGA 701*, de 534 lotes de coque verde processados no intervalo das 1829 h de operação, em que as misturas de diferentes fontes (refinarias) de coque verde realizadas são denominadas *blends*. O método de medição do material combustível volátil foi o *ASTM D7582 Standard Method for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis*. A perda em massa do material combustível do coque, volatilizado a partir de 110 °C foi utilizado no presente estudo e subdividido em intervalos de 160 °C, definido em função da temperatura isenta de água (110 °C) e a primeira fração de valor comercial (270 °C, faixa do óleo diesel). Desta forma foram definidos quatro intervalos de perda em massa entre 110 e 270 °C (m1), 270 e 430 °C (m2), 430 e 590°C (m3), 590 e 750 °C (m4), 750 e 910 °C (m5) e 910 e 950 °C (m6). Por fim, todo o tratamento de dados, incluindo o fracionamento do material combustível volátil liberado durante o aquecimento, foi realizado através de *scripts Python*, módulos *pandas* e *numpy*.

## 2.2 Modelagem e interpretação do modelo

Com os dados históricos filtrados e organizados, se utilizou o *software Minitab 21* para modelar o processo, através do módulo de árvores de classificação e regressão (*Classification and Regression Trees, CART*) e projetado um experimento fatorial, do tipo  $2^{11}$ , com as 11 variáveis em estudo (sendo 5 variáveis do forno e 6 do material combustível

do coque verde), em que os limites inferiores e superiores foram definidos a partir do primeiro e terceiro quartil do conjunto de dados, respectivamente. Na **TABELA 2** é possível observar os *ranges* utilizados, por variável.

**Tabela 2 - Intervalos utilizados no experimento fatorial**

Variável	Q1	Q3
x1 (vazão de ar terc. A, em RPM)	1236.46	1480.56
x2 (vazão de ar terc. B, em RPM)	1247.88	1520.95
x3 (rotação do forno, em RPM)	2.10	2.31
x4 (pressão da fornalha, em mmCA)	-6.04	-4.08
x5 (pressão do cabeçote do forno, em mmCA)	-2.96	-1.75
m1 (VCM. 110 a 270°C, em % massa)	0.06	0.15
m2 (VCM. 270 a 430°C, em % massa)	0.66	0.81
m3 (VCM. 430 a 590°C, em % massa)	2.78	2.92
m4 (VCM. 590 a 750°C, em % massa)	3.33	3.59
m5 (VCM. 750 a 910°C, em % massa)	2.02	2.29
m6 (VCM. 910 a 950°C, em % massa)	0.60	0.66

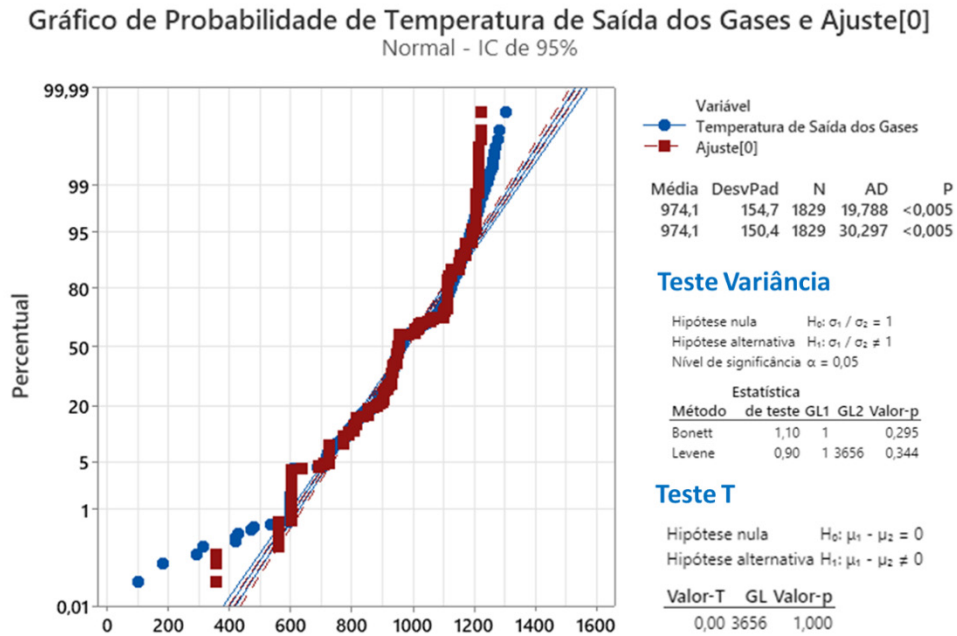
Fonte: elaborado pelos autores

## 3 Resultados e discussão

### 3.1 Modelo CART e Experimento Fatorial

Foi possível observar uma excelente aderência do modelo pelo método CART, com  $R^2$  de 94,43% para o conjunto de dados de treinamento (1280 pontos/horas, que representam 70% do total de dados, selecionados de forma aleatória) e 85,37% para o conjunto de dados de teste (549 pontos/horas, que representam 30% do total de dados), além da média e desvio padrão estatisticamente igual aos dados medidos, conforme observado na **FIGURA 2**, e na **TABELA 3** é possível observar o resumo dos resultados do modelo.

Figura 2 - Teste T e de variância para duas amostras - Temperatura de saída dos gases medido e simulado (Ajuste [0])



Fonte: elaborado pelos autores

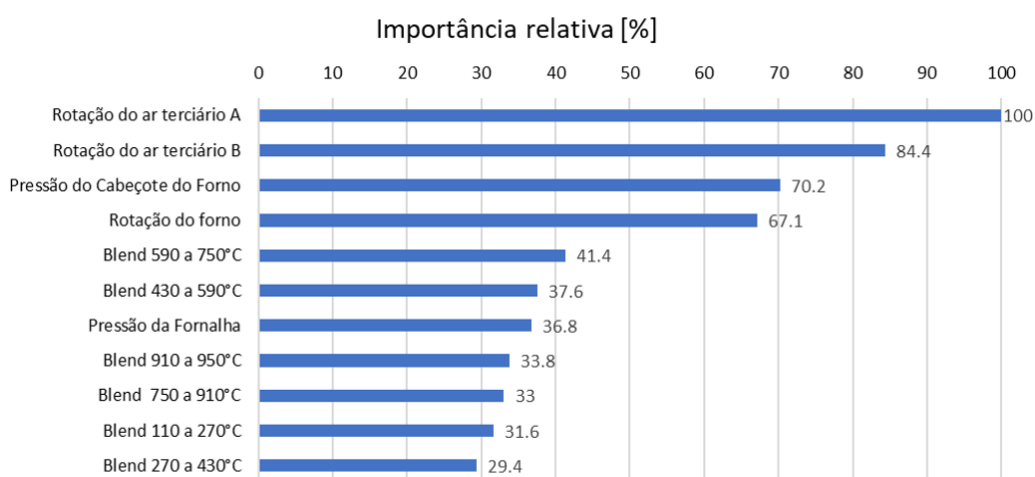
Tabela 3 - Resumo dos resultados do modelo CART

Estadística	Treinamento (1280 pontos)	Teste (549 pontos)
R <sup>2</sup>	94.43%	85.37%
Raiz do quadrado médio do Erro (RMSE)	36.52	59.17
Quadrado médio do erro (MSE)	1333.61	3501.36
Desvio absoluto médio (MAD)	20.68	29.95
Erro percentual absoluto médio (MAPE)	2.48%	3.67%

Fonte: elaborado pelos autores

Em termos de importância relativa, o modelo é capaz de demonstrar as principais variáveis que impactam a temperatura de saída dos gases, conforme observado na operação do forno e na literatura (FARAGO, F. J., SOOD, R.R., STOKES, D.M., 1976; PERRON, J., BUI, R.T, NGUYEN, H.T., 1992a; PERRON, J., BUI, R.T, NGUYEN, H.T., 1992b BUI, R.T, PERRON, J., READ, M., 1993; ZHANG, Z., WANG, T., 2010a; ZHANG, Z., WANG, T., 2010b), sendo possível dividir em dois grupos, de alta importância relativa, que são as variáveis relacionadas à operação do forno (vazão de ar terciário A, B, pressão do cabeçote do forno e rotação do forno) e as variáveis de baixa importância relativa, que são as diferentes frações do material combustível volátil e variáveis de operação da caldeira de recuperação, conforme se pode observar na **FIGURA 3**.

**Figura 3 - Gráfico de barras da importância relativa das variáveis preditoras da temperatura de saída dos gases**



Fonte: elaborado pelos autores

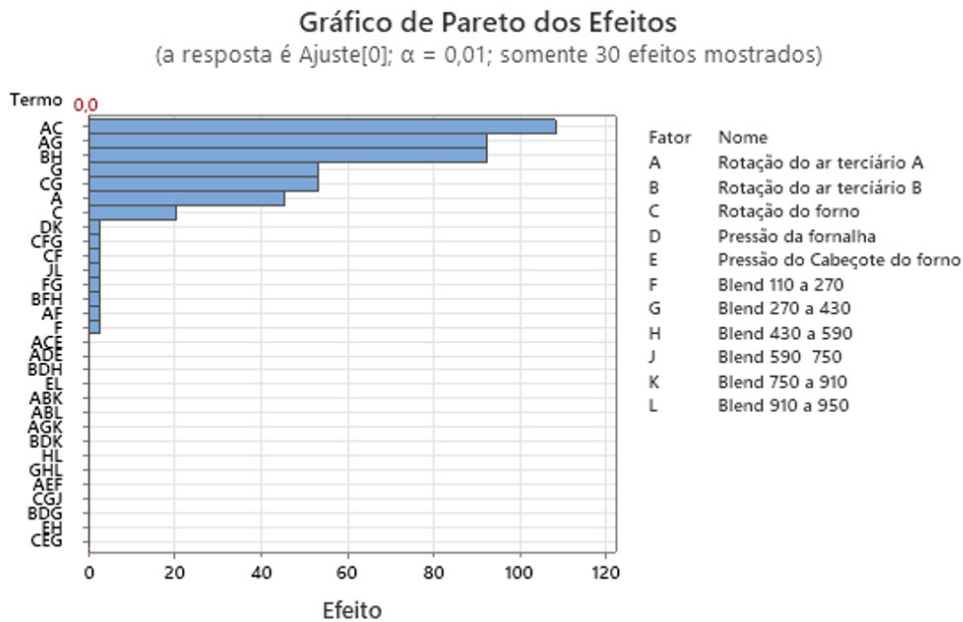
Todavia não foi possível, através da interpretação dos resultados do modelo, determinar as interações entre variáveis, fazendo-se necessário complementar a interpretação através do Experimento Fatorial.

## 3.2 Experimento Fatorial e principais efeitos

Diferentemente dos resultados preliminares da modelagem por CART, com o planejamento de experimento foi possível interpretar e determinar as principais interações entre

variáveis e os seus respectivos efeitos na temperatura de saída dos gases. Na **FIGURA 4**, são demonstrados os principais efeitos na temperatura de saída dos gases do forno rotativo de calcinação. Os principais efeitos são discutidos individualmente nas próximas seções.

**Figura 4 - Gráfico de Pareto dos efeitos na temperatura de saída dos gases**



PEP de Lenth = 1,316960E-14

Fonte: elaborado pelos autores

### 3.2.1 Efeito da vazão do ar terciário A (x1) e rotação do forno (x3) – “AC”

O principal fator de influência na temperatura de saída dos gases do forno de calcinação é a combinação da vazão (observado a partir da rotação do motor elétrico do ventilador de injeção de ar) do ar terciário mais próximo da alimentação do forno (A, x1), com a rotação do forno (x3), quando elevados do menor nível para o maior, com efeito de +108,27 °C (+11,11 %), conforme observado na operação do forno e em estudos anteriores (FARAGO, F. J., SOOD, R.R., STOKES, D.M., 1976; PERRON, J., BUI, R.T, NGUYEN, H.T., 1992a; PERRON, J., BUI, R.T, NGUYEN, H.T., 1992b BUI, R.T, PERRON, J., READ, M., 1993; ZHANG, Z., WANG, T., 2010a; ZHANG, Z., WANG, T., 2010b). Além disso, quando se busca a elevação da vazão de alimentação de coque

verde do forno, a vazão de ar terciário e rotação do forno são elevados de forma paralela e gradativa, se buscando o controle da zona de calcinação na região dos tubos de ar terciário e, em função disto, possui o maior efeito observado na temperatura de saída dos gases.

### **3.2.2 Efeito da vazão do ar terciário A (x1) e a fração do VCM entre 270 e 430 °C (m2) – “AG”**

O segundo fator de maior influência na temperatura de saída dos gases do forno de calcinação é a interação entre a vazão do ar terciário A (x1) com o material combustível volátil do coque verde volatizado entre 270 e 430 °C (m2), com efeito de +92,36 °C (+9,48 %), quando elevados do menor para o maior nível. Pode-se observar assim, que o ar de combustão injetado no forno na região mais próxima da alimentação tende a reagir com o volátil mais leve do coque verde, ao se considerar a fração de 110 a 270 °C com baixo impacto na operação do forno, uma vez que possuem menor concentração entre as frações estudadas. Analogamente, uma vez que a injeção do ar terciário A é responsável pela mistura dos voláteis com o oxigênio de reação e, ainda nessa região, a combustão é iniciada, a interação entre as duas variáveis confirmam o observado em escala industrial, assim como nas simulações de Zhang e Whang (2010a; 2010b). Além do mais, coque verde com maior teor de voláteis, na faixa de 270 a 430 °C, necessitam de mais ar terciário na primeira região de injeção, uma vez que o presente experimento retrata a operação do forno de calcinação e logo, no período de estudo, foi necessário aumentar a vazão de ar terciário A, para a manutenção/controle do posicionamento da zona de calcinação.

### **3.2.3 Efeito da vazão do ar terciário B (x2) e a fração do VCM entre 430 e 590 °C (m3) – “BH”**

Semelhante ao discutido na seção anterior, há significativa influência na temperatura de saída dos gases entre a vazão do ar terciário B (x2) com o material combustível do coque verde desprendido do sólido entre 430 e 590 °C (m3), com efeito de +92,36 °C (+9,48 %) na temperatura de saída dos gases, quando se aumenta as variáveis do menor para o maior nível. Logo, coque verde com maior teor de voláteis entre 430 e 590 °C, necessita de mais ar terciário na região para a manutenção/controle da temperatura de saída dos gases. Além disso, a região dos tubos de ar terciário B é considerada a região

em que se posiciona de forma ideal a zona de calcinação e, ao se comparar a mediana e a amplitude do material combustível de 430 a 590 °C das diferentes fontes de coque verde, as que possuem menor mediana e maior estabilidade na presente fração, tornam-se as fontes mais estáveis para operação do forno.

### **3.2.4 Efeito da rotação do forno (x3) e a fração do VCM entre 270 e 430 °C (m2) e efeito isolado da rotação do forno (x3) – “CG” e “C”**

Similar ao discutido nas seções anteriores, há significativo efeito na temperatura de saída dos gases entre a rotação do forno (x3) e a fração do material combustível entre 270 e 430 °C (m2), quando se eleva as presentes variáveis do menor para o maior nível, com efeito de +53,09 °C (+5,45 %) na temperatura de saída dos gases. Tal efeito pode ser explicado nas manobras de partida e/ou elevação de carga da unidade, em que a vazão de alimentação de coque verde do forno é elevada gradativamente, junto à rotação do forno e, assim que atingidas as temperaturas internas desejadas, a mistura de coque verde é alterada, pois é normalmente utilizado apenas uma fonte de coque para a partida das unidades de calcinação.

Analogamente, há significativo efeito isolado da rotação do forno (x3) na temperatura de saída dos gases, com efeito de +20,24 °C (+2,08 %), sendo este explicado conforme Bui, Perron e Read (1993), em que a zona de calcinação irá se “espalhar” pelo comprimento do forno, elevando assim a temperatura de saída dos gases.

### **3.2.5 Efeito isolado do VCM entre 270 e 430 °C (m3) – “G”**

Há significativo efeito isolado da fração entre 270 e 430 °C do VCM na temperatura de saída dos gases, quando elevado do menor nível para o maior nível, com efeito de +53,09 °C (+5,45 %). A elevação da temperatura de saída dos gases se deve ao ajuste do perfil de temperatura do forno em função do aumento do material combustível volátil do coque na região em que se inicia a combustão no interior do forno, e pela variação normal dentro de uma mesma batelada ou pela adição de uma fonte de maior concentração de voláteis.

### 3.2.6 Efeito isolado da vazão do ar terciário A (x1) – “A”

A vazão do ar terciário A (x1) possui significativa influência na temperatura de saída dos gases, com efeito de  $-45,38\text{ °C}$  ( $-4,66\%$ ), quando o mesmo é elevado do menor para o maior nível. A elevação da vazão de ar terciário A ocasionando na redução da temperatura de saída dos gases demonstra o deslocamento da zona de calcinação para a descarga do forno, efeito que pode ser explicado em função de dois fenômenos. O primeiro deles é de excesso de ar de combustão na zona de mistura e início da combustão do material combustível e, o segundo fenômeno, de pressurização do forno que, quando combinados, ocasionam o deslocamento da zona de calcinação para a descarga. Logo, a elevação da vazão de ar terciário deve ser cuidadosamente realizada, pois a presente manobra pode gerar o efeito contrário ao que normalmente se busca nesse tipo de operação, de deslocamento da zona de calcinação em direção à alimentação do forno ou aumento da temperatura de calcinação.

## 4 Conclusões

É possível concluir que as principais variáveis de influência no perfil de temperatura de fornos rotativos de calcinação do coque verde são as frações volatilizadas entre  $270\text{ e }430\text{ °C}$  (m2) e entre  $430\text{ e }590\text{ °C}$  (m3), entretanto com a interdependência com a vazão de ar terciário A e B, respectivamente. O efeito calculado na temperatura de saída dos gases, para ambas as variáveis, foi de  $+92,3\text{ °C}$ , ao se elevar as variáveis do menor nível para o maior nível.

O método complementar de regressão CART e DOE proporcionou resultados qualitativos satisfatórios, pois foi possível confirmar efeitos já conhecidos no processo de calcinação em fornos rotativos e na literatura, como a relação entre a rotação do forno e a vazão de ar terciário. De forma inédita, foi possível observar a correlação entre os hidrocarbonetos volatilizados entre  $270\text{ e }430\text{ °C}$  e entre  $430\text{ e }590\text{ °C}$ , junto à rotação do ar terciário A e B, com a temperatura de saída dos gases do forno. O modelo do processo de calcinação por regressão CART resultou em uma correlação com  $R^2$  de  $85,37\%$  e desvio absoluto médio de  $29,5\text{ °C}$ , para o modelo com 11 variáveis, e uma correlação com  $R^2$  de  $84,53\%$  e desvio absoluto médio de  $32,85\text{ °C}$ , para o modelo com 5 variáveis, filtradas a partir do DOE, além de médias estatisticamente exatas aos resultados medidos em campo, nos dois modelos, comprovando-se assim um excelente método para previsão do comportamento do processo. Entretanto, se observou uma modelagem excessivamente generalista para a aplicação, pois, ao se complementar

ao método de DOE, os resultados de diferentes experimentos derivaram em valores iguais de resposta na temperatura de saída dos gases, fazendo assim com que os efeitos calculados fossem exatamente iguais.

Logo, para a melhoria e continuidade da pesquisa, se sugere:

- A modelagem do processo de calcinação com diferentes algoritmos de aprendizado de máquina, como neural networks, random forest etc;
- A análise crítica minuciosa dos dados, de forma a se remover por completo os dados em períodos de falhas dos instrumentos e períodos transientes pós parada do processo;
- A utilização de um analisador termogravimétrico micrométrico, para maior precisão na determinação da perda em massa dos voláteis do coque, além da perda de massa e composição dos voláteis através de espectrometria de massa;
- A alteração das faixas de temperatura do material combustível volátil do coque verde da análise termogravimétrica, de tal forma a se identificar a temperatura de início da volatilização dos hidrocarbonetos, assim como outras faixas de voláteis de interesse comercial;
- Adicionar a variável granulometria do coque verde na análise, uma vez que há efeito na velocidade liberação de material combustível volátil;
- Explorar o método em diferentes processos industriais, não apenas calcinação de coque verde em fornos rotativos.

## 5 Referências

BRIEMAN, L. *et al.* Classification and Regression Trees. 1ªed. **CRC Press**, 2017

BUI, R. T.; PERRON, J.; READ, M. **Model-based optimization of the operation of the coke calcination kiln**. Carbon, v. 31, n. 7, p. 1139-1147, 1993.

DONTSOVA, T.V. *et al.*; Simulation of the Control System of the Coke Calcination in Tubular Rotary Kilns. **Russian Metallurgy (Metally)**, v. 2020, n. 13, p. 1600-1606, 2020.

DUDEK, M., TIEKE, O. **Method of producing petroleum coke calcinate**. Depositante: Wintershall Aktiengesellschaft. US n. 4176010. Depósito: 18 julho 1977, Concessão: 27 novembro 1979.

EDWARDS, L. The History and Future Challenges of Calcined Petroleum Coke Production and Use in Aluminum Smelting. **Jom**, [S.L.], v. 67, n. 2, p. 308-321, 2015.

ELKANZI, E.M., MARHOON, F.S., JASIM, M.J.; Rate-based Simulation of Coke Calcination in Rotary Kilns. **Proceedings** [...]. Roma: SCITEPRESS, 2012, p. 5-10.

FARAGO, F.J., SOOD, R.R., STOKES, D.M. **Method of calcining coke in a Rotary kiln**. Depositante: Alcan Research and Development Ltd. US n.3966560. Depósito: 6 maio 1974. Concessão: 29 julho 1976

FISCHER, W.K., PERRUCHOUD R. C. Influence of Coke Calcination Parameters on Petroleum Coke Quality. **Light Metals**, 1985, p. 811-826

FORTIN, H.; KANDEV, N.; FAFARD, M. **FEM analysis of voltage drop in the anode connector induced by steel stub diameter reduction**. Finite Elements In Analysis And Design, [S.L.], v. 52, p. 71-82, 2012.

FREIESLEBEN, J.; KEIM, J.; GRUTSCH, M. Machine learning and Design of Experiments: alternative approaches or complementary methodologies for quality improvement?. **Quality And Reliability Engineering International**, [S.L.], v. 36, n. 6, p. 1837-1848, 2020.

GRIFFINS, J.A., MARSH, H. Surface Structures in Carbons from Petroleum and Botanical Sources. **Carbon**, Baden-Baden, v.80, p. 17-20, 1981.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **IAI Statistical Report**. Londres, 2021. <{ HYPERLINK. Disponível em: "<https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>" }> Acesso em: 27 mar. 2020.

JENA, M., DEHURI, S. Decision Tree for Classification and Regression: A State-of-the Art Review. **Informatica**. [S.L.], v.44, n. 4, 2020.

LOH, W.Y. Fifty Years of Classification and Regression Trees. **International Statistical Review**. [S.L.], v.82, n. 3, p. 329-348, 2014.

MILOVANOFF, A.; POSEN, I. D.; MACLEAN, H. L. Quantifying environmental impacts of primary aluminum ingot production and consumption: a trade: linked multilevel life cycle assessment. **Journal Of Industrial Ecology**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 67-78, 2020.

OBAIDAT M. *et al.* Energy and Exergy Analyses of Different Aluminum Reduction Technologies. **Sustainability**. [S.L.], v. 10, n. 4, p.1216, 2018.

PERRON, J.; BUI, R. T.; NGUYEN, H. T. Modélisation d'un four de calcination du coke de pétrole: I. Le modèle. **The Canadian Journal Of Chemical Engineering**. Quebec, p. 1108-1119, 1992a.

PERRON, J.; BUI, R. T.; NGUYEN, H. T.. Modélisation d'un four de calcination du coke de pétrole: II. Simulation du procédé. **The Canadian Journal Of Chemical Engineering**. Quebec, p. 1120-1131, 1992b.

SILVA, E.P.; **Modelos matemáticos empíricos para a densidade real e aparente do coque calcinado de petróleo a partir de dados industriais**. 2008. 141 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Processos Industriais – Otimização e Desenvolvimento de Processos) – Coordenadoria de Ensino Tecnológico, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2008.

YU, B. *et al.* Technological development pathway for a low-carbon primary aluminum industry in China. **Technological Forecasting And Social Change**, [S.L.], v. 173, p. 121052, 2021.

ZHANG, Z.; WANG, T. Simulation of Combustion and Thermal-Flow Inside a Petroleum Coke Rotary Calcining Kiln - Part I: Process Review and Modeling. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, [S.I], v. 2, 2010a.

ZHANG, Z.; WANG, T. Simulation of Combustion and Thermal-Flow Inside a Petroleum Coke Rotary Calcining Kiln - Part II: Analysis of Effects of Tertiary Airflow and Rotation. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, [S.I], v. 2, 2010b.

DOI:10.29327/2152495.7.22-3



## Artigo Técnico

# Reciclagem ecológica de placas de circuito impresso

*Ecological recycling of  
printed circuit boards*

Luiz Francisco dos Santos Neto<sup>a</sup>,  
Silas Derenzo<sup>bc\*</sup>

<sup>a</sup> Mestrado em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, Brasil

<sup>b</sup> Docente do Mestrado Profissional em Processos Industriais

<sup>c</sup> Laboratório de Bionanomanufatura, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, Brasil.

\*e-mail: [derenzo@ipt.br](mailto:derenzo@ipt.br)

Palavras-chave: reciclagem; resíduo; eletroeletrônico; sustentabilidade.

*Keywords: recycling; residue; electronics; sustainability.*

## Resumo

Em função da alta velocidade de obsolescência atual dos equipamentos eletrônicos, é gerado um grande volume de resíduos eletrônicos, sendo que a maior parte é descartada inadequadamente, incluindo milhões de placas fenólicas eletrônicas. A China e os Estados Unidos lideram a produção desses resíduos, ficando o Brasil na sexta posição, com mais de 4 milhões de toneladas anuais. Grande parte destas placas são queimadas visando a recuperação de metais, sendo a maioria a céu aberto. Estas placas contêm substâncias retardadoras de chamas, sendo resistentes ao calor e por isso, ao serem incineradas, liberam gases altamente tóxicos. Assim toda e qualquer contribuição ao reuso das placas pode se tornar um caminho aberto para mitigar o problema. Neste trabalho apresenta-se um processo de reciclagem alternativo, onde se desmontam os componentes da placa, reaproveita-se a própria placa, e os componentes que foram separados da placa são vendidos para reciclagem e recuperação dos metais para empresas especializadas. Foram avaliados os processos hidrometalúrgicos e de termodesmontagem das placas. O primeiro utiliza um ataque com ácido para soltar os elementos das placas por períodos entre 2 e 6 horas. Este processo revelou-se inadequado por exigir em geral dois ataques consecutivos para soltar as peças, gerando uma mistura contendo sais metálicos que exigem tratamento posterior. A desmontagem termomecânica utilizada neste artigo é mais simples e utiliza um forno no qual foi adaptado um suporte especial, onde a placa eletrônica é colocada com os componentes voltados para baixo, a 180 °C (que é o ponto de fusão da solda de estanho) e os componentes começam a se soltar lentamente. No entanto, se a temperatura subir acima de 210 °C, os componentes são facilmente liberados. A placa fenólica livre pode então ser reutilizada para fazer outros objetos. No caso deste trabalho, foram feitos cadernos e chaveiros, que são peças de design futurista, de grande aceitação no mercado.

## Abstract

*Due to the current high obsolescence velocity of electronic equipment, a large volume of electronic waste is generated, most of which is disposed inappropriately, including millions of electronic phenolic boards. China and the United States lead the production of these residues, with Brazil in sixth position, with more than 4 million tons per year. Most of these slabs are burned for the recovery of metals, most of them in the open air. These boards contain flame-retardant substances, being resistant to heat and therefore when incinerated release highly toxic gases. Thus, any and all contributions to the reuse*

*of these boards can become an open path to mitigate the problem. This work presents an alternative recycling process, where the components of the board are disassembled, the board itself is reused and the components that were separated from the board are sold for recycling and recovery of metals by specialized companies. The hydrometallurgical and thermodisassembly processes of the plates were evaluated. The first uses an acid etch to loosen the elements from the plates for periods between 2 and 6 hours. This process proved to be inadequate because it generally required two consecutive attacks to loosen the parts, generating a mixture containing metal salts that require further treatment. The thermo-mechanical disassembly used in this article is simpler and uses an oven in which a special support has been adapted, where the electronic plate is placed with the components facing down, at 180 °C (which is the melting point of the tin weld) and the components begin to loosen slowly. However, if the temperature rises above 210 °C the components are easily released. The free phenolic plate can then be reused to make other objects. In the case of this work, notebooks and keychains were made, which are pieces of futuristic design, of great acceptance in the market.*

## 1 Introdução: Os Fundamentos e a Natureza do Problema

A sociedade depende cada vez mais de produtos eletrônicos no seu dia a dia. Em paralelo, observa-se o aumento da obsolescência desses produtos como fruto do desenvolvimento tecnológico da indústria (HINZ E AOKI, 2013). O consumo descontrolado, segundo alguns autores (BAUMAM, 2021; HARARI, 2018; HOBBSAWN, 2012), acarreta o esgotamento de recursos em certos lugares, e podem causar mudanças climáticas.

Como resultado, houve um incremento significativo na produção de resíduos eletrônicos. Estima-se que o volume de resíduo eletrônico global deverá alcançar 120 milhões de toneladas por volta do ano 2050, sendo quase 300% maior que em 2017 (PACE, 2019), tornando-se, assim, um dos maiores problemas da sociedade atual (Hinchliffe et al. 2020)

Em função da gravidade do problema, a Organização das Nações Unidas (ONU) criou um programa só para medir a quantidade de resíduo eletrônico no mundo, o 'Global e-waste monitor'. Segundo o E-Waste Monitor, (BALDÉ et al. 2017), os três maiores geradores de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEs) são China, Estados

Unidos e Japão. O Brasil ocupa a sexta posição mundial, gerando anualmente mais de 4 milhões de toneladas deste resíduo.

Diversas leis e normas regulam o destino do resíduo eletrônico e abrangem leis estaduais, nacionais e normas internacionais, sendo as diretivas europeias - WEEE (EUROPEAN PARLIAMENT, 2012) as mais rígidas, regulando o descarte de resíduos eletrônicos de uma variedade enorme de equipamentos e por isso são referência para o mundo. No Brasil a legislação foi promulgada em 2010 através da Política Nacional de Resíduos Sólidos -PNRS (BRASIL, 2010), que prevê a destinação correta e as regras para o reaproveitamento e reciclagem de resíduos eletrônicos. Segundo o artigo 33 da PNRS as empresas geradoras de resíduos eletrônicos devem desenvolver estratégias, criar políticas, postos de coleta e por meio de divulgação nos meios de comunicação, incentivar os consumidores a irem aos postos de coleta para que os produtos voltem para as empresas após o uso final pelos clientes, como celulares, computadores, tablets e notebooks entre outros.

Apesar de toda a legislação, a maioria das placas de circuito eletrônicos descartadas no mundo não são adequadamente recicladas e, quando o são, utilizam o processo de pirólise com a intenção de recuperar os metais contidos no interior do resíduo eletrônico. Esta é uma prática que pode liberar gases tóxicos na atmosfera se for realizada pela queima a céu aberto, prática comum na China e Índia, sendo que também ocorrem no Brasil e nos EUA. O envio indevido desses resíduos aos aterros contamina o solo e as águas (McCANN e WITTIMANN, 2015, p. 47,48; KAWAMOTO e FIORATI, 2019; SPITZBART *et al.* 2016; UNEP, 2019).

Os resíduos eletrônicos são os próprios aparelhos eletrônicos e suas partes (como as baterias), que são descartados quando param de funcionar, ou até mesmo quando estão funcionando, registra a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2019). Importante ressaltar que este artigo não trata de reciclagem de baterias, estas são destinadas a empresas especializadas.

O termo “Resíduo de Equipamento Eletroeletrônico”, (REEE) ou apenas resíduos eletrônicos (ABDI, 2019) é utilizado por se considerar que resíduo se difere do lixo, pois o resíduo ainda tem valor para reciclagem, enquanto o lixo seria um rejeito a ser disposto em aterros ou outra disposição adequada. (CALDERONI, 1996, *apud* MAGERA, 2012, p. 58)

No relatório “*Global E-Waste Monitor*” de 2020, Forti *et al.* (2020 p.23) relatam que o percentual de reciclagem é muito baixo, apenas 17,4 % do resíduo eletrônico mundial

foi corretamente reciclado. O restante foi exportado a países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento. segundo estudo da Organização Internacional do Trabalho e a ONU (OIT, 2012 *apud*. LETRA, 2013).

Segundo Hinchliffe *et al.* (2020, p.15), na Índia os métodos informais de reciclagem chegam a 95% de todos os processos de reciclagem de eletrônicos do país. As práticas são rudimentares, sendo o aterro em lixões e a queima a céu aberto, com o objetivo de recuperar os metais presentes nas placas, as principais (SOBRINHO *et al.* 2019, p. 2; BALDÉ *et al.* 2017 pg. 4; McCANN e WITTMANN, 2015, p. 47,48; HINCHLIFFE *et al.* 2020 p.4; RODRIGUES, 2012 p.23; SPITZBART, *et al.* 2016 p. 4; MARS *et al.* 2014, p.14 -28).

Sepulveda *et al.* (2010 p. 6 e p.11) salientam que, ao incinerar as placas PCI'S, placas fenólicas e poliméricas dos REEs, ocorre a liberação de toxinas, sendo que pelo ar as toxinas se espalham mais rápido e podem contaminar uma região inteira. A combustão de retardadores de chamas poli-bromados presentes libera p-dioxinas e furanos, entre muitos outros compostos tóxicos (McCANN e WITTMANN, 2015, p. 47,49,56; SEPULVEDA *et al.* 2010 p. 6; PACE, p.13, 2019; EPA, 2022; EPA, 2021, ATSDR, 2021). A inalação dessas toxinas pode causar câncer e diversos tipos de doenças, conforme registram também as agências americanas “*Environmental Protection Agency*” (EPA, 2022) “*Agency for Toxicity Substances and Disease Registry*” (ATSDR, 2021).

Diante deste cenário, um dos principais desafios da sociedade é a busca por novos processos. Reciclar de forma correta os resíduos eletrônicos é também uma oportunidade para empreendedores verdes criarem empregos verdes, e gerar renda (Oliveira e Martins, 2018 Spitzbart *et al.*, 2016, Rodrigues; 2012). Reciclar, além de ser benéfico ao meio ambiente, é uma forma de incentivar a economia circular, de reaproveitar metais, plásticos e outros materiais valiosos, conduzindo-os de volta pra cadeia de produção.

Os cinco processos de reciclagem encontrados na literatura são focados na recuperação dos metais presentes. Pouca atenção se dá no reuso das placas de circuitos. São eles:

**PIROMETALURGIA** - Veith (2005) discorre com propriedade sobre pirometalurgia que é um processo de separação de metais dos plásticos e demais materiais após a queima (pirólise, incineração, fundição em diversos tipos de fornos como em forno de arco elétrico ou em alto-forno). Apresenta um elevado consumo de energia, Argumentam e completam Cui e Zhang (2008), sendo que esta é a metodologia principal tradicional para a reciclagem de placas de circuito impresso, sendo corroborada por Park e Fray (2009) como a tecnologia mais tradicional para a recuperação de metais que não sejam ferrosos e metais que sejam preciosos de placas de circuito impresso e outros eletrônicos.(VEITH, 2008).

**HIDROMETALURGIA** – É um processo de recuperação de metais por reações de dissolução do material em soluções lixiviantes, ácidas ou alcalinas (Kasper, 2011). Assim, os processamentos hidrometalúrgicos são processos que envolvem a interface líquido/sólido. Em geral, ocorre a lixiviação da sucata pelo agente lixivante, que pode ser ácido ou alcalino com a consequente dissolução dos metais (OLIVEIRA, 2010).

**ELETROMETALURGIA** - O processamento eletrometalúrgico é uma operação de refinação para se obter o metal puro ao final da reciclagem. A partir de eletrólitos aquosos ou sais fundidos é implementado o processo eletroquímico (VEIT, 2005). Ou seja, a eletrometalurgia é realizada após a hidrometalurgia. De acordo com Oliveira (2010), a eletro-obtenção consiste na eletrólise (com ânodo insolúvel, inerte) de uma solução aquosa de um sal de metal (sulfato, cloreto, etc.), obtida por extração do solvente ou lixiviação do minério ou concentrado. A eletrometalurgia possui uma alta gama de aplicações que variam da microeletrônica à recuperação de metais e revestimentos. Atualmente, a maior parte do cobre, do ouro, do níquel e do zinco é processada, recuperada, ou refinada por este processo.

**BIOMETALURGIA** - Segundo Oliveira (2012) a biometalurgia é uma técnica que utiliza interações entre os micro-organismos e minerais para recuperar metais valiosos. Com base nos processos biológicos tem sido possível recuperar, por exemplo, alumínio, cobre, níquel, e, principalmente ouro. Para realizar a biolixiviação dos metais contidos nos rejeitos eletrônicos, o processo é dividido em duas etapas: os organismos são cultivados na ausência de sucata eletrônica e, posteriormente sucata eletrônica é adicionada, em diferentes concentrações aos micro-organismos formados para solubilização de metais. Apesar do baixo custo, é um processo lento e necessita que o metal esteja em uma forma que fique exposto para o possível ataque biológico (OLIVEIRA, 2012). Na sucata eletrônica na maioria das vezes os metais não estão expostos ao ataque microbiano, o que dificulta o uso desta técnica.

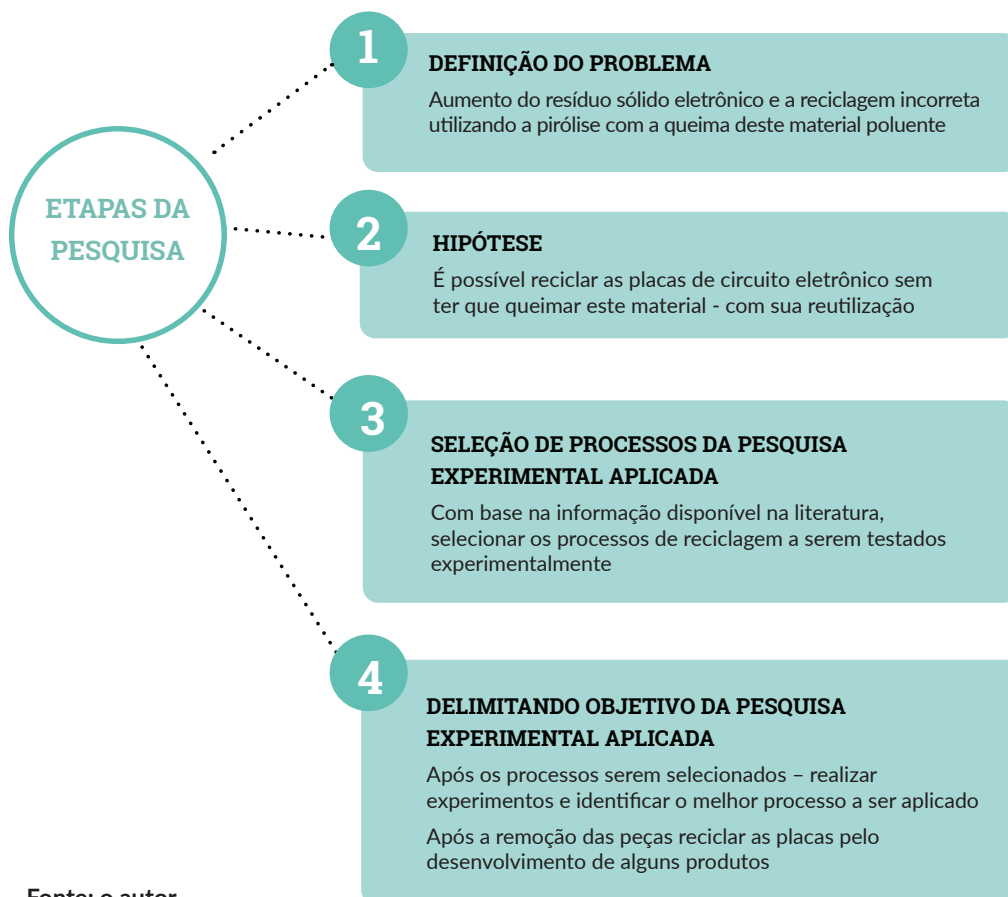
**DESMONTAGEM MECÂNICA E TERMODESMONTAGEM** - A tecnologia de junção está relacionada com o modo como os componentes são conectados ao substrato ou placa de resina. Engloba dois aspectos: a tecnologia de solda e os encaixes mecânicos, como os encaixes para pentes de memória RAM (BRANDSTOTTER, *et al.* 2004). O primeiro aspecto envolve informações sobre a liga de solda, principalmente quanto à sua composição e temperatura de fusão. Nos equipamentos fabricados a partir do ano 2000, a solda contém apenas estanho (não contém chumbo), e o estanho tem ponto de fusão baixo, cerca 183 ° graus Celsius. Quanto ao segundo aspecto, a desmontagem de fixações mecânicas, como encaixes, permite uma separação muito rápida e fácil, em função da forma como são presos os pentes de memória. Segundo Rubin (2013),

após a remoção das partes encaixadas, procede-se à centrifugação das placas com os componentes virados para baixo, para que possam sofrer ação da gravidade e a solda virada para cima, em uma centrífuga aquecida a 210° graus Celsius (**FIGURA 13**). Enquanto a solda se liquefaz, os componentes vão se soltando, assim sendo se separando da placa de circuito eletrônico.

## 2 Procedimento Metodológico

Como o método piro metalúrgico gera gases que devem ser tratados, o que encarece o processo, optou-se por avaliar, com base na literatura, quais outros métodos poderiam ser aplicados para se realizar a reciclagem das placas. O desenvolvimento seguiu as etapas conforme **FIGURA 1**:

**Figura 1 - Etapas da pesquisa**



Fonte: o autor

Considerando-se que a eletrometalurgia é um processo de recuperação dos metais que só pode ser realizado após o ataque químico, ou seja, após o processo hidro metalúrgico, o mesmo foi descartado. Também o processo biotecnológico de recuperação de metais foi desconsiderado em função de dois fatores limitantes: o processo é lento e exige que o metal deva estar em uma forma que fique exposto para o possível ataque biológico, gerando assim muitas incertezas para o desenvolvimento em curto prazo.

Dessa forma, foram selecionados para estudo o processo hidro metalúrgico e o processo de desmontagem mecânica e termodesmontagem.

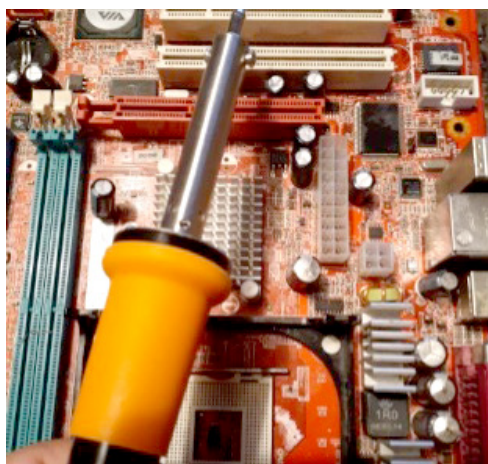
## 2.1 Processo Metalúrgico

No processo hidro metalúrgico para a separação da placa em seus componentes soldados, utilizou-se ácido clorídrico, na concentração 33%. Para tanto foi utilizado o produto comercial Marca Renko. Para a imersão das placas.

## 2.2 Desmontagem Mecânica

No processo de desmontagem mecânica utilizou-se um ferro de solda. Neste processo os componentes soldados na placa eram retirados um por um (ver FIGURA 2).

Figura 2 - Ferro de solda e placa de circuito impresso



Fonte: o autor

### 2.3 Desmontagem Termomecânica

O desenvolvimento foi baseado no trabalho de Rubin (2013), em que as placas foram aquecidas a uma temperatura superior ao ponto de fusão do estanho, que é 183 °C em uma centrífuga desenvolvida especialmente para este fim, de modo que as peças que se soltassem e fossem removidas da placa por ação da força centrífuga.

No presente trabalho optou-se por utilizar uma estufa de aquecimento simples. O aquecimento foi realizado em uma estufa da marca ICAMO, modelo ST 200, capaz de operar a até 320°C. Neste processo foi desenvolvido um suporte feito especialmente para este fim, de modo a poder encaixar a placa suspensa pelas bordas com as peças viradas para baixo (ver **FIGURA 3**), permitindo que caíssem pela ação da gravidade quando soltas.

A partir das placas sem seus componentes foi possível se desenvolver alguns produtos, como será visto mais adiante.

**Figura 3-** Placa suspensa pelas bordas acomodada no interior da estufa



Fonte: o autor

## 3 Resultados e Discussão

### 3.1 Processo hidrometalúrgico

A placa de circuito impresso foi mergulhada em uma bandeja contendo o ácido, como mostram as FIGURAS 4 (a) e (b), permanecendo por um período mínimo de duas horas, podendo ficar até 6 horas. Após a imersão da placa por algumas horas, ao retirá-la da solução ácida, a mesma era lavada. Os componentes se soltam da placa suavemente ao simples puxar com a mão.

Figura 4- Placa recém-mergulhada em solução de ácido clorídrico



a) Placa recém mergulhada em solução de HCL



b) Ácido clorídrico corroendo a solda após alguns minutos

Fonte: o autor

O ataque hidrometalúrgico pode a princípio ser utilizado, porém a placa não fica totalmente livre dos componentes, de modo que o processo tem que ser repetido para a completa remoção das peças. Embora simples, o processo é lento, necessitando de no mínimo duas imersões, envolvendo riscos de acidentes na manipulação, antes de se poder remover os componentes eletrônicos da placa. A **FIGURA 5** apresenta exemplos de capacitores removidos da placa pela ação do ácido.

**Figura 5: Capacitores soltos da placa pela ação do ácido**



Fonte: o autor

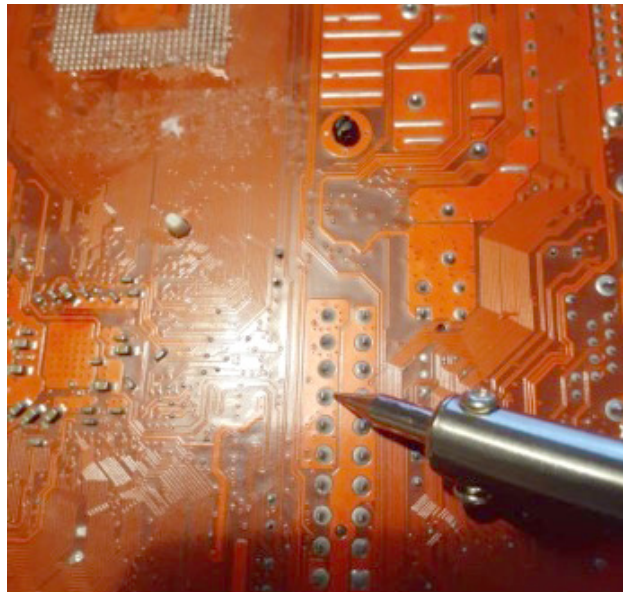
Este processo gera uma solução ácida contendo uma mistura de cloretos dos metais presentes, exigindo um tratamento mais complexo para a recuperação dos metais presentes e o descarte adequado dos seus resíduos. Assim, o processo foi abandonado.

### 3.2 Processo Termomecânico utilizando Ferro de Solda

O processo de remoção das peças presentes na placa utilizando um ferro de solda permite retirar todas as peças, que podem ser enviadas à reciclagem. A **FIGURA 6** apresenta um momento de remoção na qual a placa ainda está com algumas peças soldadas.

Este processo é ambientalmente mais adequado do que o da remoção de peças com ácido. No entanto, o processo de remoção de peças uma a uma é muito lento e para limpar uma placa é preciso trabalhar cerca de 12 horas, ou seja, mais de um dia útil. Este fato inviabiliza o seu uso.

Figura 6 - Ferro de solda soltando item por item



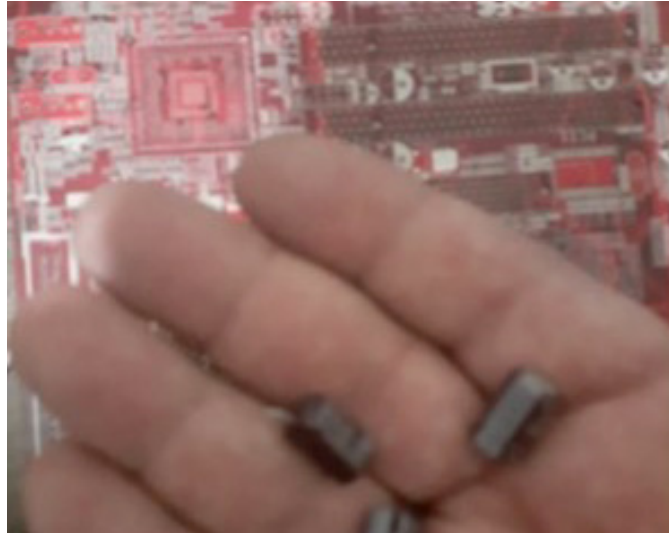
Fonte: o autor

### 3.3 Processo Termomecânico utilizando Estufa

Como indicado por Rubin (2013), a temperatura mínima para a fusão do estanho de solda é de 183 °C., no entanto, nesta temperatura nem todas as peças da placa se soltam facilmente, devido a irregularidades no aquecimento de todo o corpo. Assim, a temperatura de tratamento térmico foi aumentada paulatinamente até se obter uma condição adequada de operação, encontrando-se na prática, que é necessário se aquecer a 210° graus Celsius para que o estanho se torne totalmente liquefeito e estando a placa com os componentes virados para baixo, estes se desprendam e caíam pela ação da gravidade.

O estanho é retirado da placa com uma espátula enquanto está liquefeito e é colocado em um recipiente separado para que seja destinado a empresas de reciclagem. Essas condições permitem que o processo seja bastante rápido, demandando cerca de 5 minutos para poder retirar a placa da estufa. A **FIGURA 7** apresenta os componentes desprendidos da placa e a **FIGURA 8** apresenta a placa limpa, pronta para ser processada para ser utilizada como capa de cadernos, cadernetas, etc.

Figura 7 - Componentes desprendidos da placa



a) amostra

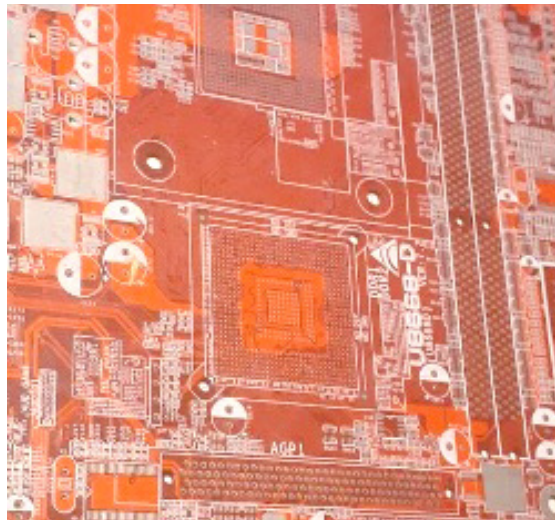


b) todas as peças removidas

Fonte: o autor

Os metais que estão nas placas de circuito impresso estão encapsulados no interior dos componentes eletrônicos, necessitando de uma reciclagem específica. Esses componentes são vendidos a empresas de reciclagem especializada na reciclagem de materiais eletrônicos sucateados.

**Figura 8 - Placa livre, sem os componentes eletrônicos**



**Fonte: o autor**

As placas limpas podem então ser utilizadas para confeccionar as peças comercializáveis, como cadernos, blocos de notas, chaveiros. Neste trabalho a placa foi usada para fabricar cadernos e uma linha de produção foi desenvolvida para manufaturar os cadernos e cadernetas em série (**FIGURA 9**), evitando a combustão das mesmas.

**Figura 9 – caderno feito com placa de circuito impresso**



**Fonte: o autor**

O processo de fabricação de chaveiros é mais simples. Os chaveiros (FIGURA 10) utilizam a placa contendo a memória RAM, que é cortada, furada e recebem a argola de chaveiro.

**Figura 10: Chaveiro feito de pente de memória RAM**



**Fonte: o autor**

Assim, foram criados até o momento três produtos que utilizam as placas de fenolite, em novos produtos, reciclando-as de modo a evitar que as mesmas sejam incineradas. Embora o alcance do projeto em relação ao volume de placas descartadas seja muito pequeno, ele é uma contribuição a sua reutilização.

Outro fato curioso é que como é um produto de design eco-sustentável, tem um apelo comercial forte junto ao público ligado ao meio ambiente, que paga para contribuir e ampliar a reciclagem.

Com isso, até o momento foram comercializados mais de mil chaveiros feitos de pente de memória RAM. Destaca-se também a aquisição de 100 cadernos em 2015 realizado por uma empresa de informática como brinde de final de ano.

Tanto o caderno grande quanto a caderneta são reaproveitáveis, uma vez que após o uso as folhas podem ser substituídas pelo proprietário, utilizando a mesma capa.

## 4 Conclusão

A literatura apontou cinco métodos de reciclagem dos resíduos eletrônicos, sendo que o objetivo da maioria deles é a recuperação dos metais. Pouco se fala do uso dos polímeros contidos nas placas.

Dos três processos estudados o hidrometalúrgico foi descartado por gerar um resíduo contendo cloretos de vários metais numa mesma solução, o que requer um processo mais trabalhoso para recuperar os metais individualmente e ainda exigir um tratamento final dos resíduos.

O processo de desmontagem com ferro de solda foi descartado, pois, embora eficiente, é lento e trabalhoso, demandando cerca de 12 horas para remover as peças das placas, evidenciando assim uma baixa produtividade.

A desmontagem termomecânica baseada num processo de centrifugação a quente foi adaptada neste trabalho para uma forma mais simples de remoção das peças. Nela coloca-se a placa de circuito eletrônico com as peças viradas para baixo em um suporte especial dentro de uma estufa e procede-se o aquecimento da mesma. Constatou-se que trabalhando a uma temperatura acima do ponto de fusão do estanho é possível soltar os componentes da placa e que operando a 210 °C são necessários apenas 5 minutos para que os componentes se soltem das placas, sendo coletados numa bandeja. Os componentes são então direcionados a um reciclador especializado na recuperação dos metais.

Após raspagem dos resíduos de estanho, as placas foram limpas e, diferentemente da maioria dos casos de reciclagem, as mesmas foram utilizadas como capas de cadernos, cadernetas e chaveiros, abrindo um novo campo de reutilização das mesmas, com uma nova função.

Embora não resolva o problema dos resíduos de componentes eletrônicos devido ao volume de material a ser reutilizado, esta é uma contribuição que poderá resultar em novas aplicações para as placas de circuito eletrônico, evitando a sua queima poluente. Por exemplo, além de serem aplicados na confecção de chaveiros, cadernetas se está pesquisando fabricar displays porta cartões de visita entre outros utensílios em estudo.

## 5 Referências

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL - ABDI Disponível em: <http://www.abdi.com.br>. Acesso em: 04 jan. 2019.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY - (ATSDR). **Consulta home Page: PBDEs Poly brominated Diphenyl Ethers**. Disponível em: <<https://www.n.cdc.gov/TSP/substances/ToxSubstance.aspx?toxid=183>>. Acesso em: 15 Jan. 2022.

BALDÉ, C. P.; FORTI V.; GRAY, V.; KUEHR, R.; STEGMANN, P. **The Global E-waste Monitor** – 2017, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. 2017. Disponível em: <[https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GlobalEwaste\\_Monitor\\_2017\\_\\_electronic\\_single\\_pages\\_.pdf](https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GlobalEwaste_Monitor_2017__electronic_single_pages_.pdf) > acesso em 20 jan 2022.

BAUMAN, Z. **Modernidade líquida: Nova Edição**. Rio de Janeiro, Ed. Zahar, 2021.

BRANDSTOTTER, M. **Case study of a printed–wire–board concerning (re-design for environment)**. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, v. 27,n. 1, p. 26–32, 2004.

BRASIL. Lei nº 12.305. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, PNRS. **Diário Oficial da União**: seção I, Brasília, DF, 2010. 03/08/ 2010.

CUI, J., ZHANG, L. (2008). **Metallurgical recovery of metals from electronwaste: A review**. Journal of Hazardous Materials. 2008

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Consulta home Page: What is Dioxin?** 2021. Disponível em: <<https://www.epa.gov/dioxin/learn-about-dioxin#caa>> Acesso em: 15 fev 2022.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Consulta home Page: Backyard-Burning**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/dioxin/dioxins-produced-backyard-burning>>. Acesso em: 10 fev 2022.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Consulta home Page: PBDE Penta BDE Penta bromo diphenyl ethers**. 2022. Disponível em: <<https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/polybrominated-diphenyl-ethers-pbdes#concern>> Acesso em: 15/01/2022

EUROPEAN PARLAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION - EPCEU. European Directive WEEE 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012. **Official Journal of the European Union**, L197/38. 2012.

FORTI, V., BALDÉ, C.P., KUEHR, R., BEL, G. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities**, flows and the circular economy potential. United Nations University (UNU)/ United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam. 2020. Disponível em: <[https://www.itu.int/en/ITUDE/Environment/Documents/Toolbox/GEM\\_2020\\_def.pdf](https://www.itu.int/en/ITUDE/Environment/Documents/Toolbox/GEM_2020_def.pdf)>. Acesso em 15 fev. 2019.

HARARI, Y. **21 lições Para o Século 21**. Ed. Companhia das Letras, 2018.

HINCHLIFFE, D.; GUNSILIUS, E.; WAGNER, M.; HEMKHAUS, M.; BATTEIGER, A.; RABOW, E.; RADULOVIC, VERENA.; CHENG, C.; FAUTEREAU, B. D.; OTT, D.; AWASTHI, A. K. **Case Studies and approaches to building partnerships between the informal and the formal sector for sustainable e-waste management**. Solving The E-Waste Problem - STEP. 2020. Disponível em: <[https://step-initiative.org/files/\\_documents/publications/Partnerships-between-the-informal-and-the-formal-sector-for-sustainable-e-waste-management.pdf](https://step-initiative.org/files/_documents/publications/Partnerships-between-the-informal-and-the-formal-sector-for-sustainable-e-waste-management.pdf)>. Acesso em: 25 nov. 2021.

HINZ, G.; AOK, Y.S. O Mundo do Consumo:do Consumismo Para um Consumo Consciente. 2013. **Revista Cadernos pde: Os Desafios da Escola Pública Paranaense na Perspectiva do Professor pde**. Governo do Estado do Paraná. 2013 Disponível em:< [http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/cadernospde/pdebusca/producoes\\_pde/2013/2013\\_uem\\_geo\\_artigo\\_gislaine\\_hinz.pdf](http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/cadernospde/pdebusca/producoes_pde/2013/2013_uem_geo_artigo_gislaine_hinz.pdf) >. Acesso em: 25 jun. 2019.

HOBSBAWN, E. **A Era Dos Extremos**, 20 Edição, Companhia das Letras, 2012.

KAWAMOTO, L. E.; FIORATI, J. J. **A Gestão de E-waste Como Instrumento Para a Cooperação Internacional: uma análise integrada entre os direitos do comércio internacional, ao desenvolvimento e ao meio ambiente**. UNESP. 2019. Disponível em:<[https://www.researchgate.net/publication/354142332\\_A\\_gestao\\_de\\_ewaste\\_como\\_instrumento\\_para\\_a\\_cooperacao\\_internacional\\_uma\\_analise\\_integrada\\_entre\\_os\\_direitos\\_do\\_comercio\\_internacional\\_ao\\_desenvolvimento\\_e\\_ao\\_meio\\_ambiente](https://www.researchgate.net/publication/354142332_A_gestao_de_ewaste_como_instrumento_para_a_cooperacao_internacional_uma_analise_integrada_entre_os_direitos_do_comercio_internacional_ao_desenvolvimento_e_ao_meio_ambiente)> Acesso em: 22 Nov. 2021.

LETRA, L. **80% Dos Resíduos Vão Para Países em Desenvolvimento.** OIT-ONU News. 2013. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2013/01/1426261-oit-80-do-lixo-eletronico-global-segue-para-paises-em-desenvolvimento>>. Acesso em 20 Fev. 2021.

KASPER, A. C. **Caracterização e Reciclagem de Materiais Presentes Em Sucatas de Telefones Celulares.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

McCANN, D; WITTMANN, A. E-waste Prevention, **Take-back System Design and Policy Approaches.** United Nations University - UNU. Bonn, Germany. 2015. Disponível em: <<http://collections.unu.edu/view/UNU:6129>> Acesso em: 08 nov. 2018.

MAGERA, M. **Os caminhos do lixo.** São Paulo: Ed Átomo, 2012.

MARS, C.; MANGOLD, J.; NAFE, C. **Recommendations for Standards Development for Collection, Storage, Transport and Treatment of E-waste.** Solving The E-Waste Problem STEP. 2014 Disponível em: <[https://stepinitiative.org/files/\\_documents/whitepapers/StEP\\_WP\\_Standard\\_20140602.pdf](https://stepinitiative.org/files/_documents/whitepapers/StEP_WP_Standard_20140602.pdf)> . Acesso em: 20 nov. 2021.

OLIVEIRA, J. G.; MARTINS, G. M. A Obsolescência Programada Diante do Desafio Atual da Sustentabilidade. 2018. Direito e sustentabilidade. **In: CONGRESSO NACIONAL DO CONPEDI PORTO ALEGRE, 27.** Anais Eletrônicos [ ... ] 2018. Disponível em:<<http://site.conpedi.org.br/publicacoes/34q12098/00o9mby0/b5TMaOXMQDq-06bEC.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

OLIVEIRA, C R. **Alternativas tecnológicas para tratamento e reciclagem do lixo de informática,** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, P. C. **Valorização de placas de circuito Impresso por hidrometalurgia.** 2012. Tese (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa,2012.

PACE -PLATFORM FOR ACCELERATING THE CIRCULAR ECONOMY. THE E-WASTE COALITION. A New Circular Vision for Electronics: Time for a Global Reboot. Geneva, Suíça: World Economic Forum, 2019, p. 6. **Proceedings...** E-book. Disponível em: <[http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_A\\_New\\_Circular\\_Vision\\_for\\_Electronics.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf)>. Acesso em: 25 Jan. 2019.

PARK, Y. J.; FRAY, D. J. **Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards.** Journal of Hazardous Materials p. 162, 2009. Disponível em: [http://westca.org/photo/201403/2009\\_young\\_jun\\_park\\_recoveryofhighpuritypreciousmetalsfromprinted-circu\\_retrieved-2014-03-22\\_.pdf](http://westca.org/photo/201403/2009_young_jun_park_recoveryofhighpuritypreciousmetalsfromprinted-circu_retrieved-2014-03-22_.pdf). Acesso em: 20 jul. 2019.

RODRIGUES, A.C. **Fluxo domiciliar de geração e destinação de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos no município de São Paulo- SP. p. 23** Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) Faculdade de Saúde Pública – Universidade de São Paulo. 2012. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde12032012113745/publico/AngelaCRodrigues.pdf> Acesso em: 15 jan. 2022.

RUBIN, R S. **Métodos de desmontagem de placas de circuito impresso.** Tese de Doutorado em Engenharia de Produção. USP, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde03082016165434/publico/Ricardo.> Acesso em: 15 jan. 2022.

SEPULVEDA, A. *et al.* A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipments during recycling: examples from china and India. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 30, p. p. 6, p.11. 2010. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.611.3030&rep=rep1&type=pdf> > Acesso em: 20 jan. 2022.

SOBRINHO, C. I. F.; LUGARESI, M.; NOTARI, D. L.; SILVA, S. D. A. **Resíduos eletroeletrônicos: uma revisão sistemática da literatura.** RICA, Revista interdisciplinar de ciência aplicada, Vol.4 Nº 7, 2019. Curso de Ciência da Computação, Universidade de Caxias do Sul. Disponível em: <https://sou.ucs.br/revistas/index.php/ricaucs/article/download/73/68/81>>. Acesso em 20 Fev. 2021.

SPITZBART, M.; HERBECK, E.; SCHLUEP, M. **Business Plan Calculation Tool for Manual Dismantling Facilities.** United Nations Industrial Development Organization. World Resources Forum. STEP – UNU. 2016. Disponível em: [https://www.stepinitiative.org/files/\\_documents/green\\_papers/Step\\_GP\\_BCT\\_final.pdf](https://www.stepinitiative.org/files/_documents/green_papers/Step_GP_BCT_final.pdf)>. Acesso em 15 jun. 2019.

UNITED NATIONS ENVIROLMENTAL PROGRAME - UNEP. 2019. **O Mundo Produzirá 120 Milhoes de Toneladas de Lixo Eletrônico.** Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/press-release/mundo-produzira-120-milhoes-de-toneladas-de-lixo-eletronico>> Acesso em 20 Fev. 2019.

VEIT, H. M. **Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

VEIT, H. M.; *et al.* Utilização de processos mecânicos e eletroquímicos para reciclagem de cobre de sucatas eletrônicas. UFRS. **Revista Escola de Minas**. 2008.

DOI:10.29327/2152495.7.22-1



Para obter mais informações  
sobre os mestrados profissionais

Entre em contato com Adilson ou Mary pelo e-mail  
mestrado@ipt.br  
ou ligue para (11) 3767.4673

Sobre os cursos de especialização,  
curta duração e educação corporativa

Entre em contato com Andrea pelo e-mail  
cursos@ipt.br  
ou ligue para (11) 3767-4226

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo  
Av. Prof. Almeida Prado, 532  
Cidade Universitária - São Paulo - SP  
CEP 05508-901 - Brasil


Central de Relacionamento com o Cliente  
(11) 3767-4102 / 4456 / 4091

Ensino Tecnológico  
(11) 3767-4673 | mestrado@ipt.br

 <https://www.instagram.com/iptensinotecnologico/>

 <https://bit.ly/FacebookEnsinoTecnologicoIPT>

 <https://bit.ly/LinkedinEnsinoTecnologicoIPT>

 <https://www.youtube.com/@cursosipt>



[sapiens.ipt.br](https://sapiens.ipt.br)

# revista IPT

TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Confira em nosso site todas as edições da revista

<https://bit.ly/revistaIPT>



**ipt**  
INSTITUTO DE  
PESQUISAS  
TECNOLÓGICAS  
ENSINO TECNOLÓGICO

