



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

# ASPECTOS TECNOLÓGICOS DA PRODUÇÃO E MANUFATURA DE MATERIAIS: INFLUÊNCIA DE FATORES GEOPOLÍTICOS E ECONÔMICOS

EMANUEL VICENZO DE ARRUDA DALMEIDA

MONOGRAFIA APRESENTADA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA DE MATERIAIS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA - COM ÊNFASE EM  
MATERIAIS.

ORIENTADOR: PROF. DR. EDUARDO FRANCO DE MONLEVADE

São Paulo - SP

2022

## AGRADECIMENTOS

Não poderia começar meus agradecimentos, sem antes contar um pouco da minha história. Sou o primeiro da minha família a ser formado numa faculdade pública. Fui criado pelos meus avós e pais no interior de São Paulo, e a minha maior incentivadora dos estudos foi uma faxineira, analfabeta, que conseguia somente escrever os nomes dos netos na caderneta de telefone. Agradeço a Deus pelo propósito, pela saúde e pela oportunidade de estudar e se formar na Escola Politécnica, a melhor faculdade de engenharia da América Latina.

Sou grato pela minha mãe e pai, por todos os sacrifícios que eles fizeram junto comigo, durante todos esses anos. Aos verdadeiros amigos, por entenderem muitas vezes minha ausência, sabendo o que era minha prioridade e o momento que eu estava vivendo. E por último, mas não menos importante, sou grato a minha pessoa, por nunca ter desistido, por ter mantido o foco no propósito e por saber valorizar a importância de cada um dos professores, alunos, colegas e funcionários da Escola Politécnica. Espero um dia poder retribuir tudo que essa escola mudou na minha vida e na minha família.

*Ora et labora, Deus adest sine mora*

**São Bento abade**

“Reze e trabalhe, Deus se apresenta sem demora”

Lembre-se que o impossível está no controle de Deus, mas o possível está na minha mão de fazer!

## RESUMO

Sabe-se que a evolução tecnológica tem sido o desafio/meta para o crescimento da sociedade, porém tem-se o questionamento sobre quais as consequências da evolução, bem como os motivadores para o direcionamento do uso de uma nova tecnologia. Contudo, é possível perceber que a sede por descobertas muitas vezes acaba delimitando um futuro incerto e grandes consequências para a humanidade. As consequências muitas vezes são disfarçadas com ideias como melhoria de qualidade de vida, facilidade desempenhar funções, comodidade, ou simplesmente como requisito mínimo para sobrevivência. O chumbo, um dos metais mais utilizados da antiguidade, foi um dos grandes problemas para reflexão da extração e utilização inconsequente de metais pode acarretar para a sociedade. Apesar do conhecimento de sua toxicidade para a saúde humana, o grande aumento da utilização desse metal foi para indústria automobilista, onde ocorreram alarmantes acidentes com consequências vistas até os dias atuais. Posteriormente, a corrida por aprimoramentos da tecnologia de semicondutores impactou grandemente a maneira de funcionamento da sociedade, e por este motivo é considerada a terceira revolução industrial. A definição de potências, como vemos hoje, teve grande influência pela utilização desses materiais e, consequentemente, pelo avanço digital de cada país. Nesse sentido, a globalização trouxe uma maior proximidade de contato entre humanos, em diferentes regiões, e disseminação da informação, porém com o preço de dependência dessa tecnologia para sobrevivência. Atualmente, o mundo vivencia a época a revolução da indústria 4.0, ou seja, a era da automatização, robotização, interação virtual e até mudança de pensamento sobre a realidade e virtualização da interação entre seres humanos. Nesse sentido, a evolução tecnológica tem como parâmetro uma série de metais, chamados de elementos de terras raras, que possui incertezas em relação as consequências de sua utilização e extração. O desafio percebido para utilização desses elementos é a hegemonia política de produção, tal que a China, detém e regula tanto a produção, quanto distribuição desses metais. A corrida de países, além da China, para mineração, produção e comercialização desses elementos pode ser um dos acontecimentos notáveis dessa década do novo milênio, com condições que aumentam incentivos econômicos e até interferência política em depósitos naturais em países menos desenvolvidos.

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	6
1.1 Primeira Revolução Industrial .....	7
1.2 Segunda Revolução Industrial .....	10
1.3 Terceira Revolução Industrial .....	12
1.4 Quarta Revolução Industrial .....	14
2. Chumbo .....	18
2.1 Utilização do Chumbo em Combustíveis: Tetraetilchumbo.....	23
2.2 Utilização do Chumbo em Soldas .....	30
3. Semicondutores .....	35
3.1 Escassez de produção global de Semicondutores .....	43
4. Terras Raras.....	45
5. Considerações Finais.....	53
6. Referências .....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Exemplos de inovação da primeira revolução industrial. Esquerda: representação de um motor a vapor. Direita: Representação de uma indústria de tecelagem .....	7
Figura 2- Exemplos de inovação da segunda revolução industrial. Esquerda: Foto de uma fábrica de automóveis. Direita: Foto de uma indústria de motores. ....	11
Figura 3- Esquemas representativos das melhorias advindas da terceira revolução industrial .....	13
Figura 4- Esquerda: Ilustração das tecnologias utilizadas atualmente. Direita: Exemplo de uma montadora de carros automatizada .....	15
Figura 5 - Exemplos da utilização do chumbo .....	18
Figura 6 - Tetraetilchumbo. Esquerda: exemplo de uma embalagem do produt. Direita: estrutura molecular .....	24
Figura 7- Esquema simplificado do funcionamento de um motor a quatro tempos.....	25
Figura 8 - Exemplo de uma PCB.....	33
Figura 9- Esquema de representação de um MOSFET .....	37
Figura 10 - Exemplos de Silício metálico e em formato de Wafer. ....	38
Figura 11 - Tendência de utilização dos metais de terras raras .....	48
Figura 12- Tendência de produção global de terras-raras, relatório da agência USGS, norte americana.....	51

## 1. Introdução

A história da humanidade é marcada por desafios que, uma vez solucionados, revolucionaram maneira de pensar em sociedade. Um exemplo bem comum desses acontecimentos é a descoberta do fogo. Estima-se que essa descoberta tenha acontecido 7 mil anos AC, no período neolítico, um ancestral imediato ao homem moderno, *Homo erectus*, tenha descoberto uma maneira de produzir fogo.

Essa descoberta ajudou a adequação de um lugar para formação de uma sociedade sedentária, tendo em vista a possibilidade de aquecimento e fonte de luz. Além disso, essa descoberta resolvia o problema de alimentação e proteção, uma vez que os homens primitivos se alimentavam de carne crua e sofriam ataques de animais com atividade noturna.

Uma das mais importantes revoluções da humanidade foi a revolução Neolítica [1]. Trata-se da revolução que marcou a mudança de modo de vida dos seres humanos, que passaram a ser sedentários contando com técnicas importantes para sobrevivência, como a produção de fogo, a agricultura, confecção de ferramentas de pedra polida e avanços técnicos em áreas como arquitetura, artes, escrita e cerâmica.

A grande importância desse tipo de revolução é dada pelo contexto que envolve sua necessidade, assim como pelas mudanças geradas na maneira de pensar da sociedade pós-revolução e próximos desafios. Nesse sentido a revolução neolítica foi marcada pela necessidade dos seres humanos de se estabelecerem em uma região (sedentarismo), com produção e processamento de comida (agricultura e utilização do fogo), confecção e manutenção de abrigos (ferramentas de pedra polida, arquitetura e cerâmica), e comunicação (desenvolvimento da escrita e artes), como exemplos.

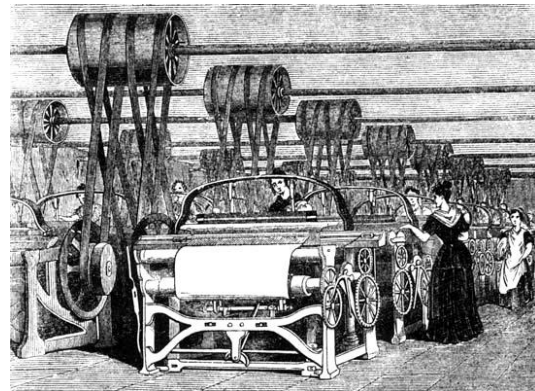
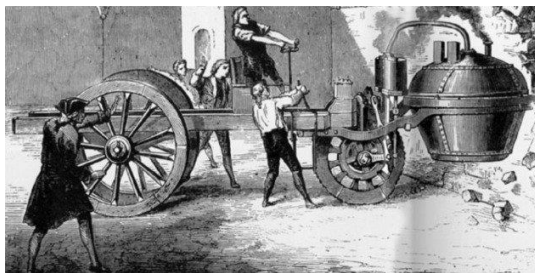
Esse processo de urbanização trouxe mudanças para humanidade, como por exemplo o crescimento populacional, surgimento de aristocracia e divisão social [2]. Desta maneira, é evidente que para o estudo de uma revolução, com seus aspectos de

materiais e manufaturas, é necessário entender o mínimo do contexto político motivacional e suas consequências. Nesse contexto, pode-se citar as próximas revoluções importantes da humanidade no sentido de produção industrial, com suas motivações e consequências.

### 1.1 Primeira Revolução Industrial

A primeira revolução industrial, ou apenas Revolução Industrial (1760 – 1820/1840), foi a mudança dos processos artesanais para novos processos de manufatura, Figura 1. Entre os grandes acontecimentos dessa revolução está a mudança para produção com uso de máquinas, fabricação de novos produtos químicos, avanço tecnológico da produção e utilização do ferro, utilização de energia vinda da água e do vapor e utilização do carvão.

Figura 1- Exemplos de inovação da primeira revolução industrial. Esquerda: representação de um motor a vapor. Direita: Representação de uma indústria de tecelagem



Fonte: <https://www.todamateria.com.br/revolucao-industrial/>

A revolução industrial começou na Grã-Bretanha e acabou se espalhando para países do continente europeu e EUA [3], [4]. Essa origem foi em grande parte por conta do potencial comercial que a Grã-Bretanha possui, muito por conta de sua influência

como país colonizador e influência também na exportação dos produtos para Índia, África e Américas e também pela crescente população que oferecia mão de obra mais qualificada e produtos manufaturados.

O período que antecede a revolução industrial é marcado por grande crescimento de produção da Grã-Bretanha, relacionado com a alta demanda comercial. Essa forte demanda fez com que o avanço tecnológico fosse impulsionado de maneira a aproveitar as condições específicas da época. Nesse contexto, destacam-se níveis elevados de produção agrícola; conhecimento gerenciais e empresariais; condições logísticas bem estabelecidas para transporte de matérias-primas e produtos; recursos naturais como carvão e ferro; estabilidade política e capital para investimento.

Dos avanços tecnológicos promovidos pela revolução industrial pode-se citar nas seguintes áreas [3]:

- Indústria Têxtil: O algodão foi uma das principais matérias primas com desenvolvimento tecnológico. Pode-se citar a utilização do descaroçador de algodão, aumentando a produção em 50 vezes; do tear elétrico, aumentando a produção em 40 vezes; e da fição mecanizada que aumentou a produção em cerca de 500 vezes. Esses valores são comparados com a eficiência de produção de um trabalhador e as máquinas eram alimentadas por vapor e/ou água. Também houve aumento de produtividade na tecelagem de lá e linho, mas não tão expressivas.

- Energia a Vapor: Um dos grandes avanços tecnológicos da época foi o aumento da eficiência dos motores a vapor. A eficiência desse tipo de motor aumentou com o menor consumo de combustível, além de uma melhora na relação potência/peso.

- Fabricação de ferro: A melhora da fabricação tanto de ferro gusa, quanto de ferro forjado, deve-se também ao fato do uso de carvão nas fornalhas. Houve melhora em várias



etapas de fabricação, com resultados de maior temperatura do forno, resfriamento e melhora até no pré-aquecimento, como por exemplo, o sopro-quente, que se refere ao pré-aquecimento do ar soprado, o que diminui consideravelmente o consumo de combustível e permitindo temperaturas mais altas em um processo metalúrgico.

- Invenção de Máquinas-ferramentas: Foram confeccionadas as primeiras máquinas-ferramentas da história, como grande exemplo do torno de corte de parafuso, máquina de perfuração de cilindros e a máquina de fresagem. A melhora na fabricação e precisão de peças é de extrema importância para a indústria.

De modo geral a revolução industrial teve impacto mundial no decorrer de sua evolução. Grande parte desse incentivo pela industrialização veio por conta da transformação das condições de vida dos países industriais em relação aos demais países da época. À medida que a demanda pelos produtos industrializados foi crescendo, houve um intenso deslocamento da população rural para as cidades com uma grande aglomeração urbana.

Porém, com o constante crescimento do setor industrial, foi necessária uma organização por parte dos trabalhadores para organização de direitos e deveres. Foi então que se iniciou a ideia de sindicalismo, para que então movimentos mais radicais como o ludismo (ideia contrária a substituição da mão de obra humana pelo maquinário) e o cartismo (operários que exigiam melhores condições de trabalho) fossem satisfeitos e os operários pudessem pleitear condições mais justas de trabalho.

Adicionalmente, com o aumento extraordinário de produção e deslocamento da população para centros urbanos, houve um rápido crescimento econômico. A partir da revolução industrial houve um rápido crescimento da *renda per capita* e a população começou a prosperar de maneira incrível, porém logo os efeitos da exploração da mão de obra começaram a enfraquecer essa evolução.

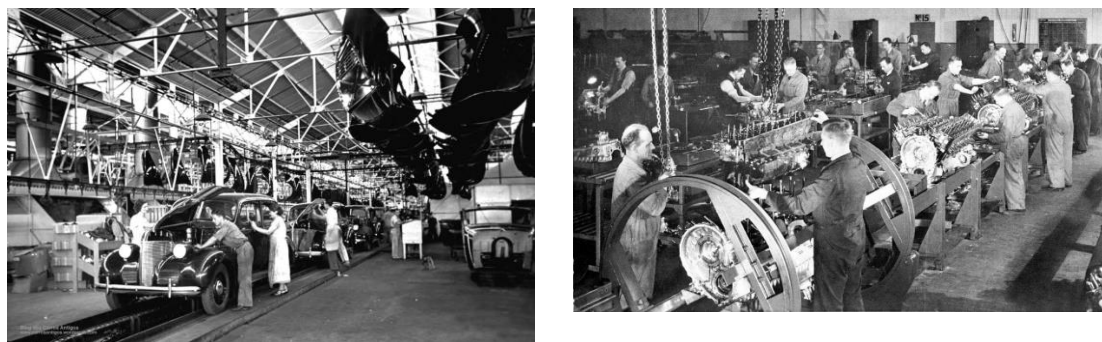
A saúde da população começou a arruinar-se, devido também ao aumento da aglomeração urbana e crescimento não planejado de moradias. A população começou a sofrer com epidemias, péssimas condições de habitação, deformações causadas por acidentes de trabalho, higiene e saneamento inadequados e péssima alimentação aliada a intensa rotina de trabalho.

Por fim, pode-se sintetizar a revolução industrial como uma alteração completa nos processos metalúrgicos e de materiais, em conjunto com uma transformação da condição político-social dos países. Esse aumento de poder dos países culminou em uma elevada expansão em relação aos países não industrializados, resultando em disputas de poder.

## 1.2 Segunda Revolução Industrial

A chamada segunda revolução industrial iniciou-se por volta da metade do século XIX (~1850) com seu término considerado após a segunda guerra mundial (1945) [5]. Esse período é marcado como revolucionário pelos avanços tecnológicos na utilização do petróleo como combustível, com consequências em outras áreas como a introdução de navios movidos a vapor, desenvolvimento e evolução do avião, surgimento das técnicas de automação, produção em massa de bens de consumo, processo de enlatamento de produtos (antecessor do processo de envase) e refrigeração e outras técnicas de preservação de alimentos, Figura 2.

Figura 2- Exemplos de inovação da segunda revolução industrial. Esquerda: Foto de uma fábrica de automóveis. Direita: Foto de uma indústria de motores.



Fonte: <https://conhecimentocientifico.com/segunda-revolucao-industrial/>

Considerando um ponto de visto socio-tecnológico não há grandes mudanças que dissociem a primeira e segunda revoluções industriais, porém essa revolução é marcada pelo crescimento de duas grande potencias, Alemanha e EUA, em relação as duas já existentes, França e o Reino Unido. Na metalurgia, o avanço tecnológico no processamento do aço, resultando no barateamento do produto com melhor transporte e custo de produção é marcante para os países Europeus. Enquanto isso nos EUA, essa revolução é geralmente associada a eletrificação proposta por Nikola Tesla e Thomas Edison e o gerenciamento científico de Frederick Winslow Taylor.

Nessa época, a tecnologia das maquinas a vapor evoluía com suas aplicações [6]. Com a prensa móvel movida a vapor inventada no período da primeira revolução, permitiu-se a invenção da máquina de fazer papel. Desta maneira, a comunicação passava a ser feita em madeira e não mais dependente de outros produtos como algodão e linho. A partir da tecnologia do motor a vapor oi desenvolvido o motor a combustão interna com rápida disseminação para vários países, e pioneirismo do processo de produção em massa de Henry Ford para a confecção de automóveis.

Apesar do consumo muito grande materiais como ferro e carvão durante a primeira revolução industrial, tem-se o petróleo com combustível marcante da segunda

revolução. Dessa forma, houve um aumento incrível de potência e eficiência dos motores a combustão e máquinas industriais, gerando assim um grande crescimento de industriais do ramo com uma alta geração de oportunidades de trabalho.

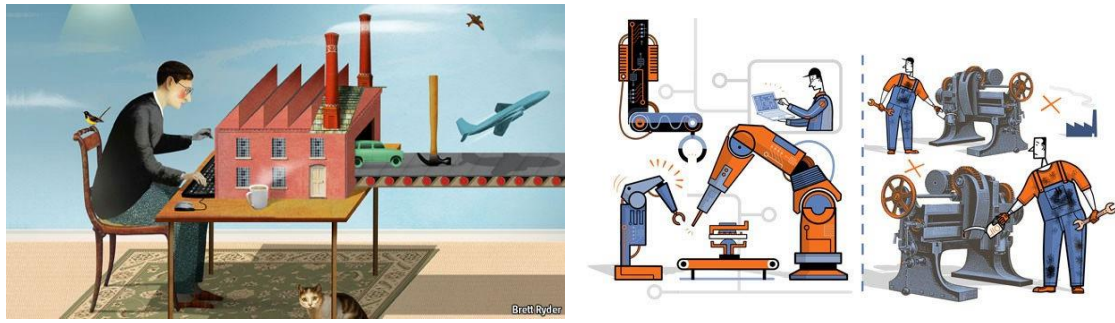
Apesar da nomeação desse produto como “ouro negro”, o petróleo passou de matéria-prima milagrosa para um produto com um futuro escasso. Foi na década de 70, que se descobriu a característica de recurso natural não-renovável, o que gerou algumas restrições quanto a seu uso, preço e posterior início de crises. Com a estimativa de 100 anos para escassez de petróleo, o preço atingiu valores muito elevados, fazendo com que países procurassem alternativas. Uma das alternativas foi a produção de etanol para utilização como combustível, tal que existem exemplos da produção desse produto a partir do milho/beterraba (EUA) e aqui no Brasil da cana-de-açúcar.

Apesar da marcante característica de migração de área rural para cidades da primeira revolução industrial, houve durante a segunda revolução um aumento ainda mais expressivo gerando o êxodo rural [7]. Essa migração aumentou ainda mais os problemas destacados para a primeira revolução industrial, intensificando o processo de lutas de classes e melhores condições de trabalho, além de trazer problemas de saúde pública para resolução dos governos.

### 1.3 Terceira Revolução Industrial

A terceira revolução industrial (1950 ~ 1970), também chamada Revolução Digital, é marcada pelo aumento de utilização de computadores digitais, desenvolvimento da eletrônica digital e consequentemente da automação industrial [8]–[10]. A característica marcante dessa revolução é a utilização de circuitos lógicos digitais, que revolucionaram o entendimento de comunicação, automação e produtividade industrial, bem como o uso industrial e cotidiano do computador, Figura 3.

Figura 3- Esquemas representativos das melhorias advindas da terceira revolução industrial



Fonte: <https://www.economist.com/leaders/2012/04/21/the-third-industrial-revolution>

O pioneiro da criação das bases teóricas da teoria da digitalização é Clause Shannon, em seu artigo de 1948 “*A Mathematical Theory of Communication*”. Essa teorização permitiu a mudança da era analógica para a digital e a possibilidade de transmissão e arquivamento de informações de uma forma muito mais eficiente.

Um predecessor da famosa rede de alcance mundial (do inglês, *World Wide Web* - WWW), surgiu em 1960 e foi a ARPANET, criada pela agência norte americana ARPA, para a comunicação e conexão dos dados a outros computadores da época, interligando bases militares e universidades. A rede WWW, popularmente conhecida como internet, teve início em 1990, e foi criada pela Organização Europeia para a Investigação Nuclear (do francês, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire - CERN), o maior laboratório de física de partículas do mundo, localizado em Meyrin, no cantão de Genebra, na fronteira Franco-Suíça.

O grande problema advindo da revolução digital é a comparação entre inclusão e exclusão digital. Comparável as condições de empregadores e empregados das primeiras revoluções industriais, atualmente quem possui acesso à internet é considerado incluído digitalmente, tendo benefícios de aprendizagem, comunicação e facilidade de crescimento tanto pessoal quanto profissional. Essa inclusão está atrelada a compra de computadores e instrumentos digitais, tais como os celulares.

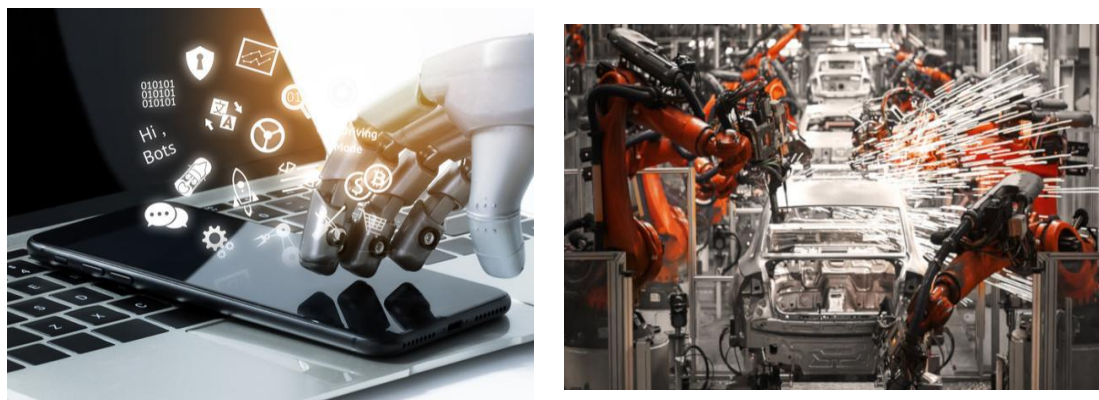
Por outro lado, parte da população que não tem condições de adquirir tais produtos digitais fica à mercê de políticas públicas de inclusão. Esse distanciamento digital tem influência direta no mercado de trabalho, uma vez que a exigência de proficiência na área de tecnologia é crescente e cada vez mais obrigatória.

Em relação ao desenvolvimento metalúrgico e de materiais da era digital, pode-se citar os processos de automação e a utilização de circuitos integrados (CI, ou então *chip*, *microchip* ou *nanochip*, do inglês). Esses CIs são circuitos miniaturizados compostos principalmente por dispositivos semicondutores, tal que há o depósito do semicondutor em um substrato fino. Esse assunto será posteriormente discutido nesse trabalho, assim como as implicações industriais e geopolíticas de sua utilização.

#### 1.4 Quarta Revolução Industrial

A quarta revolução industrial, ou também chamada de indústria 4.0, é tratada como a rápida evolução de mudanças da tecnologia no século XXI, Figura 4. Esse termo se tornou bastante popular devido a literatura científica e deve-se a mudanças não somente em melhoras de eficiência, mas também expressa mudanças no capitalismo industrial. Grande parte dessa mudança está na mistura de mundos físico, digital e biológico, com tecnologias como inteligência artificial, edição genética e robótica avançada [11]–[14].

Figura 4- Esquerda: Ilustração das tecnologias utilizadas atualmente. Direita: Exemplo de uma montadora de carros automatizada



Fonte: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/terceira-revolucao-industrial.htm> e <https://itforum.com.br/noticias/a-4a-revolucao-industrial-e-a-ascensao-dos-humanos/>

A mudança social, política e econômica pode ser ainda maior quando comparada com as outras revoluções. Comparando-se a Era digital (final da década de 90 e início dos anos 2000) tem-se uma incorporação de uma conectividade nunca vista mudando a interação humana e percepção de uso, por exemplo, com a tecnologia do Metaverso. Podem ser citadas algumas tecnologias revolucionárias [14]:

- i. Impressora 3D: Tecnologia de fabricação que permite a criação de objetos 3D usando uma serie de aditivos ou tecnologia de camadas baseadas em projetos digitais.
- ii. Inteligência artificial: Área de ciência da computação que desenvolve a criação de máquinas inteligentes que podem trabalhar e reagir como seres humanos. Nessa área tem-se ainda a criação de robôs colaborativos (do inglês, *Cobotic*) que auxiliam humanos em um ambiente de trabalho compartilhado.
- iii. Realidade aumentada: Ambiente interativo e baseado em realidade que é gerado por um computador para representar a experiencia mais realista possível em comparação ao mundo real.
- iv. Robótica: Uso de robôs na fabricação industrial.

v. *Big data and analytics*: Estratégia de avaliação de grande volume de dados para análise e verificação de tendências, sem que haja perda do significado original de dados.

vi. *Blockchain*: Banco de dados que contempla a autenticação de mecanismos digitais, mantendo uma lista completa e não adulterada de registros em crescimento contínuo, usando tecnologia de criptografia.

vii. Serviço de Nuvem: Qualquer serviço de tecnologia da informação que é feito de maneira remoto, por meio de um outro computador em nuvem.

viii. Nanotecnologia: Manipulação de átomos e moléculas com intuito de fabricação produtos em macro escala.

ix. Internet das coisas: Conexão de objetos utilizados no cotidiano com o mundo digital. Também pode ser relacionado aos processos industriais auxiliando a robotização e eficiência de fabricação.

x. Drone (Unmanned aerial vehicle): Definição de veículo aéreo não tripulado, é uma aeronave que pode ser controlada em 3 eixos e não precisa de pilotos. Possui várias utilizações, tanto civil quanto militar, expandindo a maneira de exploração do espaço aéreo.

Das revoluções descritas, a indústria 4.0 é a que ainda está em implementação, e desta forma, é incerto o quanto essas mudanças afetarão a sociedade e até mesmo, o quanto essas mudanças efetivamente poderão ser aplicadas [14]. Contudo, sabe-se que existem desafios para aplicação dessas mudanças e esses podem ser resumidos em algumas áreas específicas como a política. O desafio político de implementação consiste na falta de regulação, padronização das práticas modernas e maneira de certificação de qualidade. Além de problematização legal pouco clara e falta de legislação para segurança de dados.



Existem também um desafio organizacional, tal que um dos primeiros passos é o melhor desenvolvimento da segurança digital. Apesar de ser uma área de crescente desenvolvimento tecnológico, muitas empresas ainda esbarram em desafios quase que diários de coibir ataques cibernéticos, afetam tanto a população em geral quando indústrias específicas. Outro ponto é a confiabilidade e estabilidade de comunicação entre máquinas (do inglês, *machine-to-machine*) com rápido e estável tempo de resposta. Ainda se tem desafios na proteção do conhecimento de processo (do inglês, *know-how*) e insuficiente mão-de-obra qualificada para gerenciamento dos sistemas.

Em termos econômicos os desafios da indústria 4.0 são os altos custos de implementação, limitando a tecnologia a grandes grupos empresariais, adaptação de modelo de negócios e ainda insegurança nos benefícios de implementação. Por fim, na área social existem preocupações na questão de privacidade de dados, grande preocupação com a redundância de profissionais de TI e medo de substituição mão-de-obra pela robotização.

Por fim, é importante considerar que toda revolução industrial gerou muitas polêmicas para os trabalhadores de uma maneira geral. Apesar de ser uma preocupação válida, entende-se atualmente que em qualquer mudança, principalmente industrial, há a necessidade de reciclagem de conhecimento. Profissionais de todo o mundo tentam entender a chegada dessa nova era e dispõe de previsões para os acontecimentos, para ilustrar essa incerteza deixo aqui uma frase do escritor/professor israelense Yuval Harari em um artigo no “The Guardian” [15]:

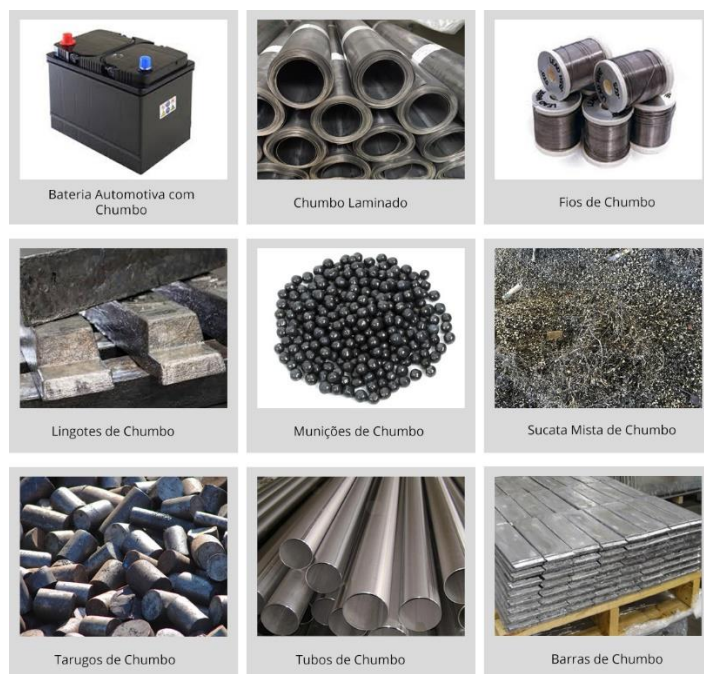
“O problema não é criar novos empregos. O problema crucial é criar novos empregos que os humanos desempenham melhor do que os algoritmos. Consequentemente, até 2050

uma nova classe de pessoas poderá emergir - a classe inútil. Pessoas que não estão apenas desempregadas, mas inúteis (não-empregáveis).” \*Tradução pessoal.

## 2. Chumbo

O chumbo, Figura 5, é um metal pesado que é mais denso que a maioria dos materiais comuns, sendo um elemento químico com o símbolo Pb (do latim *plumbum*) e o número atômico 82. O chumbo tem o segundo maior número atômico de todos os elementos estáveis e a maior massa atômica. Sua densidade relativamente alta lhe dá um grande volume, o que contribui para sua utilidade em balas, mas também significando um valor relativamente caro. O chumbo é normalmente encontrado como um mineral PbS, porém também está presente como um metal livre em alguns meteoritos e em alguns estados de oxidação do cobre[16]–[18].

Figura 5 - Exemplos da utilização do chumbo



Fonte: <https://cenarecicladora.com.br/chumbo/>

O principal mineral que contém chumbo é a galena (PbS), que é encontrada principalmente com minérios de zinco. Às vezes é substituído por outros minerais de chumbo, tais como anglesita (PbCO<sub>3</sub>) e cerussita (PbCO<sub>3</sub>.H<sub>2</sub>O ou Pb(OH)<sub>4</sub>). Minerais contendo chumbo são frequentemente encontrados com minérios de zinco na forma cristalina, porque o sistema comum de coleta e transporte de minério de locais de mineração para fundições concentra significativamente o sulfeto de chumbo[19]. Os recursos naturais mundiais de chumbo excedem dois bilhões de toneladas e os depósitos mais significativos estão localizados na Austrália, China, Irlanda, México, Peru, Portugal, Rússia e Estados Unidos. Em 2016, existiam 88 milhões de toneladas de reservas economicamente viáveis, incluindo 35 milhões de toneladas na Austrália, 17 milhões na China e 6,4 milhões na Rússia[20], [21].

O uso de chumbo como acessório decorativo é datado de períodos pré-históricos, como metais da antiguidade. Há relatos do uso para miçangas e outros acessórios por conta de suas características físicas maleáveis. Também se sabe da utilização em cosméticos, redes de pesca, óculos, ornamentos e até em moedas nas civilizações Egípcia, Grega antiga e até Chinesa[22], [23]. Nesse contexto o império romano foi o primeiro grande produtor de chumbo da era clássica.

A grande obtenção do chumbo pelo império romano vinha da fundição de prata, como subproduto. Estima-se uma produção anual de 80000 toneladas advindas da atividade de mineração na Europa Central, Grã-Bretanha, Balcãs, Grécia, Anatólia e Hispânia, sendo esta última responsável por 40% da produção mundial[19]. Com grande produção, a utilização do chumbo começou a se diversificar, tendo aplicação em mesas para escrita, material para caixões de chumbo, munição armamentista e até em encanamentos, que inclusive se relaciona ao nome em latim do elemento, já que *plumbing* em inglês vem do nome *plumbum* [20], [21].

Ainda nesse contexto a utilização do chumbo no império romano foi intensificada pela mineração e seu uso cada vez mais associado ao cotidiano. Sua maleabilidade e resistência a corrosão garantiram seu uso em aplicações farmacêuticas, tanto quanto em recipientes para a preparação de adoçantes e conservantes adicionados a comida e vinho. Seu uso associado a alimentação vinha principalmente do sabor do “açúcar de chumbo”, nada mais que a formação de acetato de chumbo, ao contrário do sabor amargo advindo dos recipientes de cobre ou bronze devido a formação de verdete (pigmento obtido do contato entre ácido acético e recipientes de cobre, bronze ou latão)[24], [25].

O grande problema dessa utilização desenfreada de chumbo foram os problemas de saúde associados a esse metal, inclusive com alguns autores sugerindo uma grande influência do envenenamento de chumbo com o declínio do império romano[24]. Como será discutido nesse trabalho, um dos sintomas do envenenamento por chumbo são fortes dores abdominais. Cidadãos que apresentavam sintomas de envenenamento por chumbo eram frequentemente chamados de saturninos, em relação ao deus Saturno e, assim como o deus saturno, o chumbo foi considerado o pai dos metais[26].

Do século 11 à meados do século 18, a produção e utilização de chumbo foi intensificada. Seus efeitos nocivos à saúde humana passaram a ser mais bem estudados após vários eventos de envenenamento em massa. Em 1948, foi preciso um decreto papal emergência para fiscalização da adulteração de vinhos com chumbo. Além disso, ao longo dos anos a utilização do chumbo na indústria de cosméticos e de comunicação (material de construção das prensas de impressão) aumentavam as estáticas de envenenamento em massa[26]–[28].

As indústrias britânica, europeia continental e americana experimentaram a Revolução Industrial durante a segunda metade do século XVIII, que foi a primeira vez que as taxas de produção de chumbo superaram as de Roma[29], [30]. Em meados do

século XIX, os britânicos haviam perdido sua posição de principais produtores com o esgotamento de suas minas e o desenvolvimento de outros países produtores de chumbo, como a Alemanha, a Espanha e os Estados Unidos. A canalização e a pintura, que utilizavam regularmente tinta com chumbo, foram responsáveis pela maior parte da demanda por chumbo.

Como resultado da exposição a metais e envenenamento por chumbo, a taxa de envenenamento por chumbo aumentou entre as pessoas (classe trabalhadora). Em resposta a isso, os pesquisadores estudaram os efeitos da inalação de chumbo e descobriram que os vapores de chumbo são mais perigosos do que o chumbo sólido. Os efeitos adversos da ingestão crônica de chumbo, tais como distúrbios mentais, também foram estudados no século XIX, portanto, no Reino Unido durante os anos 1870 e 1880, as primeiras leis foram promulgadas com o objetivo de reduzir o envenenamento por chumbo nas fábricas[29], [30].

Com o avanço do século 20, mais evidências foram descobertas sobre os perigos que o chumbo representa para os seres humanos. Nos Estados Unidos e na Europa, o chumbo foi gradualmente retirado do uso público porque os mecanismos dos danos foram mais bem compreendidos, foi documentado que o chumbo causa a cegueira[31]. Mais tarde, os governos da Europa Ocidental e dos Estados Unidos introduziram legislação na década de 1970 para reduzir a poluição do ar por chumbo[32]. Portanto, de acordo com os Centros de Controle e Prevenção de Doenças, 77,8% da população havia elevado os níveis de chumbo no sangue em 1976-1980, mas em 1991-1994, apenas 2,2% tinham níveis tão elevados[33].

A produção de chumbo do Bloco Ocidental aumentou em mais de 31% entre 1960 e 1990, enquanto a participação do Bloco Oriental na produção global de chumbo aumentou de 10% para 30%. A União Soviética foi responsável pela maior parte da

produção mundial de chumbo durante meados dos anos 70 e 80, e a China iniciou uma importante indústria de fabricação de chumbo no final do século 20[34], [35].

Atualmente a produção de chumbo tem como líder mundial a China (com uma produção 5 vezes maior que o segundo colocado), seguido de Austrália, Estados Unidos, Peru, México e Rússia. Essa produção pode ser de forma primária, extração de minérios, ou secundária ou da reciclagem de sucata, com uma quantidade média por volta de 4,5 milhões de toneladas para a primeira e 5,5 milhões de toneladas para a segunda forma. Com o avanço da tecnologia, é quase imperceptível a diferença de qualidade/pureza de chumbo de fonte primária ou secundária[36].

Apesar do baixo valor e amplitude de utilização o chumbo possui uma característica que inviabiliza sua aplicação nas mais diversas áreas, a toxicidade para seres humanos [27], [28]. Hoje em dia sabe-se que não existe dose segura de ingestão e que, dependendo do tipo de organismo, pode-se ter sintomas graves de envenenamento cerebral até em doses mínimas. Pelo seu efeito bioacumulativo, o chumbo pode gerar consequências momentâneas, bem como a longo prazo, sendo armazenado nos ossos e dentes, pela substituição de regiões com cálcio.

O envenenamento mais grave acontece pela ingestão aérea ou quando engolido, porém, pode-se perceber efeitos pelo contato com a pele [27], [28]. Após absorvido, grande quantidade de chumbo fica disponível na corrente sanguínea, substituindo outros metais (cálcio, ferro e zinco) e/ou se ligando a grupos ativos em enzimas. Apesar de traços de chumbo já terem disso encontrado em diversos órgãos, os mais afetados são os rins e o cérebro, sendo que neste último foram constatados efeitos permanentes quando ainda em desenvolvimento, por exemplo em crianças [31].

Os sintomas mais comuns de intoxicação por chumbo são problemas renais, cólicas abdominais, tremedeiras nas mãos, pulsos e calcanhares e sinais de deterioração

mental, desde a perda de memória até falta de noção espacial com súbitas explosões de raiva. Esse efeito cerebral acontece principalmente pela ação do chumbo em neurotransmissores, degradando a bainha (proteção) de mielina. Apesar dos graves efeitos de intoxicação, há tratamento efetivo para o chumbo, onde na maioria das vezes são utilizados agentes quelantes que possuem mais afinidade com chumbo do que com cálcio e são posteriormente excretados pela urina [37], [38].

Por fim, o maior problema da utilização de chumbo na história é o impacto ambiental causado. Atualmente, o chumbo disponível ambientalmente tem origem de fontes naturais, produção industrial, incineração e reciclagem. De maneira geral, observa-se acumulação de chumbo em solos e plantas, onde pode percorrer a cadeia alimentar e chegar em animais de consumo humano. Por sua alta toxicidade, o chumbo já possui banimentos específicos, como por exemplo na utilização para armamento, com o banimento desde 2017 [39], [40].

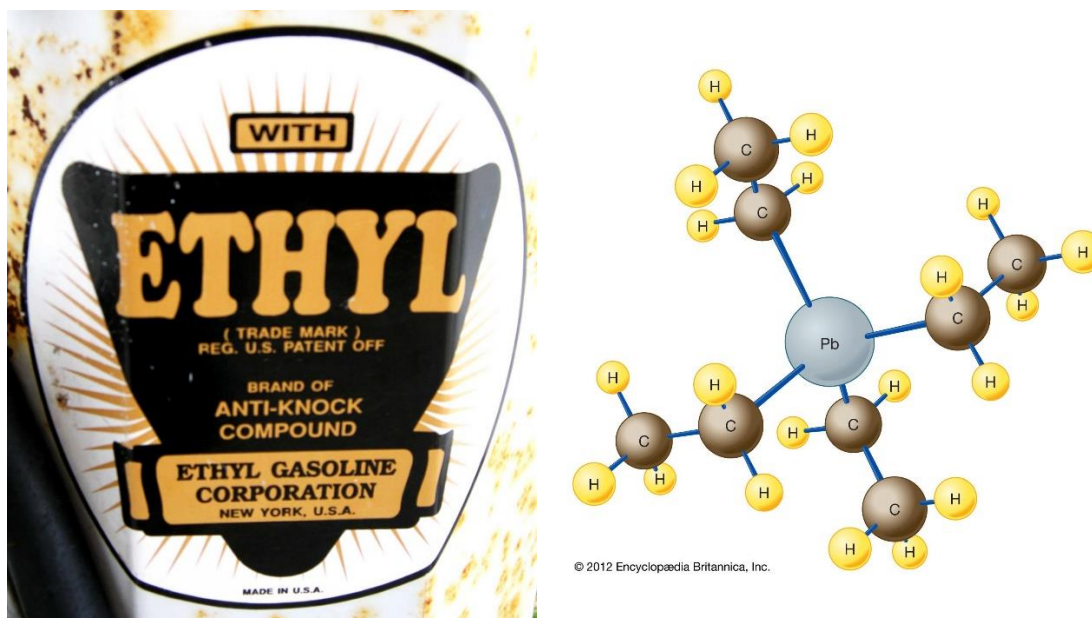
O começo do maior banimento ao uso do chumbo começou em meados dos anos 1980, tal que começou o declínio do uso de chumbo na indústria, com eliminação ou uso regulado de chumbo em produtos que não sejam baterias, como tintas, soldas e até sistemas de água, nos EUA [39]. Na Europa, também houve um movimento de banimento do uso do chumbo, visto os problemas ocasionados pelo efeito do aditivo TEL nos EUA. Em resumo, a consciência social pelo banimento do chumbo, por mais que atrasada, acaba sendo mais efetiva depois do entendimento da alta toxicidade desse material para os seres humanos, de maneira que restam aos governos e cientistas traçarem estratégias para descontaminação de solos e águas, tendo em vista de um futuro com menos problemas de envenenamento.

## 2.1 Utilização do Chumbo em Combustíveis: Tetraetilchumbo

Com a evolução da utilização de carros a combustível, a corrida tecnológica para melhor eficiência foi um dos principais desafios do começo do século 20. A eficiência de combustível de um motor pode ser melhorada por diversos fatores, dentre eles o combustível, tanto para o controle da queima, quanto para a frequência e tipo de explosão. Desta forma, a molécula Tetraetilchumbo, química de estrutura  $Pb_2(C_2H_5)_3$ , passou a ter grande importância por volta de 1920 [41], [42].

O Tetraetilchumbo, Figura 6, (TEL, do inglês *Tetraethyllead*) é um líquido viscoso, incolor com um aroma doce. A molécula descoberta em 1853 pelo químico alemão Karl Jacob Löwig, porém permaneceu sem grande importância até a descoberta de seu uso como agente antidetonante por Thomas Midgley em pesquisa financiada pela *General Motors Corporation Research* em conjunto com a *DuPont Corporation*, esta última que era a produtora do composto TEL[43].

Figura 6 - Tetraetilchumbo. Esquerda: exemplo de uma embalagem do produt. Direita: estrutura molecular

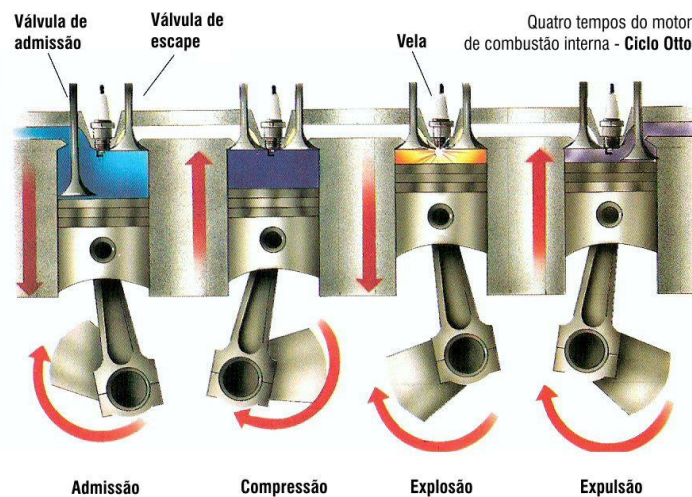


Fonte: <https://educalingo.com/pt/dic-en/lead-tetraethyl> e <https://www.britannica.com/science/tetraethyl-lead>



Para entendimento do fenômeno de utilização desse composto é necessário o conhecimento da aplicação e de sua importância de utilização em um motor de quatro tempos, Figura 7. Em uma breve descrição, esse tipo de motor possui quatro etapas de funcionamento, sendo a primeira fase a Admissão (do inglês, *Intake*) onde acontece a entrada da mistura de ar e combustível dentro da câmara de combustão. Nessa etapa a válvula de admissão permanece aberta e a válvula de escape fechada, para que haja a entrada da mistura de ar e combustível sem a saída. Há o deslocando do pistão do ponto morto superior (PMS), câmara vazia, para o ponto morto inferior (PMI), câmara cheia.

Figura 7- Esquema simplificado do funcionamento de um motor a quatro tempos



Fonte: <https://www.multipetro.com.br/blog/2018/05/30/motores-diesel/>

A segunda fase é chamada de compressão (do inglês, *Compression*) e é caracterizada pelo fechamento das válvulas de admissão e de escape. Nessa etapa ocorre a compressão da mistura ar e combustível chegando a um valor de volume quase 20 vezes menor. Um motor com bom desempenho possui uma boa estanqueidade, evitando assim o vazamento da mistura. Após essa fase, inicia-se a fase mais importante do motor a ignição, a combustão (do inglês, *Combustion or Ignition*) tal que o pistão está no ponto

mais próximo do PMS possível, dependendo do regime de funcionamento adequando do motor em questão.

Na fase da combustão é onde os pesquisadores aumentam a eficiência do motor, já que com uma correta calibração da aproximação do pistão do PMS e do sistema de injeção é possível modular a entrada de mistura e o avanço da ignição. A detonação da mistura ocorre por meio de uma vela de ignição, que consiste em uma faísca para iniciar a combustão. Um fenômeno importante é o bater de biela (do inglês, *Knocking*), como é popularmente conhecido, que ocorre quando uma parte da mistura de ar/combustível não resulta na propagação da chama, ou seja, quando o pico da combustão não ocorre exatamente no melhor momento para o motor de quatro tempos. Por fim, tem-se a fase de escape (do inglês, *Exhaust*) que é onde acontece a expulsão dos gases produtos da combustão para que o ciclo se termine e comece novamente a fase de Admissão de gases.

O fenômeno de *Knocking* foi exatamente o ponto para aumento de eficiência estudado por Thomas Midgley durante o começo do século 20 [43]. O problema para o aparecimento do barulho de batida da biela, ou *Knocking*, era gerado por conta da força extrema que um combustível tinha ao sofrer a primeira combustão, de modo que nas seguintes o pis era empurrado com tanta força que ocorria uma combustão forçada e antes da ignição pela vela, desregulando a frequência calculada de cada fase, de maneira barulhenta e perigosa. Thomas Midgley descobriu que a mistura do combustível com TEL aumentava a octanagem de um combustível comum e praticamente eliminava o problema com *knocking*, para carros movidos a gasolina, ou seja, carros com sistema de ignição.

A escala de octanagem de um combustível é a medida comparativa a uma escala imaginária proporcional entre octano e heptano. Essa escala entre que relaciona a proporção entre octano e heptano é utilizada por informar a capacidade de um combustível em promover a combustão dentro de um motor de 4 tempos. Sendo assim,

o heptano (ou n-heptano) é comparável a um combustível que entra em combustão espontânea somente pela pressão dentro da câmara e o octano (ou isso-octano) é o combustível que suporta as pressões e somente inicia a combustão a partir de uma centelha da ignição. Sendo assim, idealmente um combustível de alta octanagem é aquele que suporta a pressão interna sem entrar em combustão e causa efeito *knocking*.

Por esses motivos a descoberta de aumento de octanagem foi uma revolução na indústria automobilística da época de meados de 1920, pois seria a molécula milagrosa que transformaria qualquer combustível comum em um combustível de alta octanagem a baixo custo. O novo aditivo foi nomeado de “Ethyl” uma referência ao “etil” da molécula de tetraetilchumbo, mascarando um dos mais nocivos elementos já conhecidos pela humanidade, o chumbo. O grande problema da utilização desse aditivo foi um incidente em uma planta de produção, apenas dois meses após a abertura da fábrica, chamada *Standard Oil Refinery* localizada em Bayway, New Jersey.

Nesse episódio cinco trabalhadores morreram com sintomas que se relacionavam a exposição ao chumbo, e outros ficaram gravemente hospitalizados. Pela consequência de envenenamento cerebral a mistura com o aditivo TEL foi chamada de “*Loony gas*”, ou gasolina da loucura, já que os envenenados passavam a perder grande parte das funções cerebrais [41], [42]. Após vários estudos e muitos anos de utilização, o aditivo de TEL foi completamente banido no começo dos anos 2000 e considerado com substância altamente tóxica, mesmo em baixíssimas concentrações, tanto em poluição aérea quanto no solo.

Esse episódio é um comum exemplo de quanto as condições geopolíticas influenciam uma determinada revolução industrial, uma vez que apesar do “milagroso” aumento de desempenho do aditivo TEL, mobilizando um gigantesco aumento em sua produção, os efeitos nocivos do chumbo já eram conhecidos. Há pelo menos quase

duzentos anos antes desse problema com TEL, Benjamin Franklin (em 1786) já tinha se pronunciado dizendo que o chumbo já teria sido usado por muito mais tempo do que devido, considerando sua extrema toxicidade já conhecida.

Um dos agravantes da prática de uso do chumbo em combustíveis são seus efeitos nocivos já discutidos, mas que podem ser ainda pior em crianças, descoberto por Herbert Needleman (1970) [44][31]. Em crianças os efeitos podem ser permanentes afetando a capacidade de aprendizado, acarretando problemas de comportamento e até de diminuição do quociente de inteligência, QI. Essas consequências trouxeram questionamentos sobre a aceitação mínima de concentração de chumbo para o envenenamento, tal que quantidades muito menores ao limite conhecido já exibiram efeitos extremamente nocivos.

Ainda há estudos que relacionam a quantidade de crimes nos Estados Unidos da América (EUA), com a intoxicação por chumbo [31]. Essa hipótese, denominada de hipótese crime-chumbo (do inglês, *lead-crime hypothesis*) foi caracterizada por uma série de eventos, mas principalmente pela constatação da diminuição de taxa de crimes nos anos de 1990 nos EUA. Com a diminuição da utilização de chumbo e consequentemente sua poluição após os anos de 1970, houve um súbito declínio da taxa de crimes nos anos de 1990 com tendência de diminuição para os anos seguintes. Essa hipótese é decorrente da similaridade de tendência entre as curvas de aumento e diminuição de poluição por chumbo e aumento e diminuição de taxa de crimes, com um atraso de aproximadamente 22 anos. Esses fatos associados com a já conhecida toxicidade do chumbo, gerou vários questionamentos sobre os efeitos ainda desconhecidos de ação do chumbo no cérebro [45].

Apesar dos problemas de saúde pública associados ao chumbo, Clair Patterson conseguiu estabelecer a idade da terra através da datação por chumbo, além de ser um dos

pioneiros da *cleanroom*, ou seja, uma sala totalmente limpa de interferentes para uma determinada pesquisa científica [46]. Para os experimentos de datação Patterson utilizou uma técnica conhecida por datação urânio-chumbo, em que se mede a capacidade de decaimento de U-238 para Pb-206, sendo que em rochas primordiais a relação entre U-238 e Pb-206 é proporcional ao tempo de vida daquele material, considerando que o tempo total de decaimento é de 4,5 bilhões de anos.

O experimento realizado no doutorado de Patterson necessitava da calibração dos equipamentos, sendo que ele utilizou cristais de zircão para este fim [46]. A utilização dos cristais de zircão é muito efetiva, uma vez que quando são formados, eles contêm vestígios de urânio, porém nenhuma quantidade de chumbo, tal que todo chumbo que for encontrado em um cristal de zircão tem que ser relacionado ao decaimento de urânio. O problema foi que a conclusão da medição foi uma quantidade muito elevada de chumbo para o previsto da quantidade encontrada de urânio.

Devido a toda poluição de chumbo, já conhecida, Patterson então decidiu construir um laboratório novo e tentar evitar qualquer tipo de contaminação que pudesse atrapalhar seus resultados [46]. Nesta tentativa, uma série de mudanças foram realizadas, tirando cabos elétricos de contato com as paredes interiores, por causa das soldas de chumbo, limpava as paredes, chão e bancadas com amônia, diariamente, e construiu um sistema de ventilação para que o ar estivesse o mais limpo possível e por fim certificou-se de entrar sempre com traje limpo, dando origem a ideia de *cleanroom* para experimentos passíveis de contaminação. E desta maneira, Patterson publicou um trabalho onde mediu a idade da terra como sendo de 4,54 bilhões de anos.

Confirmada a hipótese de contaminação por chumbo Patterson decidiu dedicar suas pesquisas para questões de saúde pública, mostrando o grande problema da contaminação mundial de chumbo em seu artigo “*Contaminated and Natural Lead*

*Environments of Man*” de 1966 [47]. Pode-se considerar Patterson foi responsável pela intensificação do combate ao uso de chumbo. Uma de suas descobertas foi sobre o quão natural é a presença de chumbo na natureza, utilizando a medição de chumbo no oceano, tal que se não houvesse interferência humana a concentração seria próxima na superfície, tanto quanto em regiões mais profundas. Com medidas nos oceanos Atlântico e Pacífico e profundidades de até 4 quilômetros, Patterson percebeu que a concentração superficial era aproximadamente 10 vezes maior na superfície do que nas profundezas.

Após a descoberta de evidências da poluição, Patterson fez a estimativa do período de evolução da poluição por chumbo [47]. Para isso precisou coletar amostras tanto da Groenlândia quanto da Antártica com estimativas de concentração de chumbo de milhares de anos até datas mais atuais. Chegou a resultados mostrando aumentos da concentração de chumbo pelos últimos 4500 anos, relacionados com a atividade humana. Os dados mostravam Eras como o do crescimento e declínio dos impérios Romano e Grego, uso acentuado nos anos 1300 e um pico evidente no século 20 relacionado a industrialização e o aditivo TEL. Após vários experimentos com ossos e dentes de pessoas da época, Patterson chegou à conclusão que o “milagroso” aditivo TEL aumentou em 1000 vezes a expectativa de contaminação proporcional ao uso do chumbo, iniciando assim uma espécie de revolução pela regularização de práticas industriais relacionadas ao uso de chumbo.

## 2.2 Utilização do Chumbo em Soldas

A soldagem (do inglês, *Welding*) é um processo de fabricação de materiais por junção, usualmente metais, tal que se usa o calor para derretimento das partes, ocasionando na fusão dos materiais [48], [49]. É importante salientar que existem

técnicas de fusão de materiais em baixa temperatura, como brasagem (podendo ser do tipo *Brazing* ou *Soldering*), em que não há o derretimento do metal base.

De acordo com o tipo de características da soldagem pode-se ter diferentes condições, tal que há variação dos materiais base, material de solda, fontes de energia e meio de realização da solda [33]. Brevemente, pode-se utilizar como fonte de energia, chama (solda química), arco elétrico (solda elétrica), laser, feixe de elétrons, fricção e ultrassom. Assim como, materiais podem ser soldados em diferentes meios como ar livre, embaixo d'água e até no espaço.

Ao longo da história um dos processos de soldagem mais utilizado é a solda de forja, tal que os ferreiros usavam para processos de melhoramento de ferro e aço por temperatura e pressão (uso do martelo). A partir da primeira guerra, início do século 20, a evolução industrial dos processos de solda sofreu grande mudança, mais uma vez movido pela necessidade política.

Nesse contexto, os tipos de soldagem oxiacetilênica, ou oxigás (do inglês, *Oxy-fuel welding*) e de arco elétrico tiveram grande evolução tecnológica, sendo que especialmente para esse último vários processos se tornaram mais conhecidos, como a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (do inglês, *shielded metal arc welding - SMAW*), soldagens MIG/MAG (do inglês, *metal inert gas - MIG* e *metal active gas - MAG*), soldagem por arco submerso (do inglês, *submerged arc welding*) e soldagem por arame tubular (do inglês, *flux-core arc welding - FCAW*). Posteriormente, outros processos foram desenvolvidos, como soldagem a laser (do inglês, *laser beam welding - LBW*), soldagem por feixe de elétrons (do inglês, *electroslag welding - ESW*) e solda por fricção e mistura (do inglês, *Friction stir welding - FSW*).

De acordo com os métodos desenvolvidos, pode-se classificar os processos de soldas em grupos. O grupo de solda por combustível é a soldagem por oxigás, também

conhecido como soldagem oxiacetilênica [33]. É um dos processos mais antigos e versáteis de soldagem com equipamentos relativamente baratos, porém por utilizar chama e gases explosivos é considerado um processo perigoso. Além disso, diferentemente dos processos com arcos elétricos, não possui controle de utilização e tem a formação do poço de fusão em detrimento do derretimento dos metais base.

Os processos com uso de arco elétrico são muito populares hoje em dia [33]. Esses processos utilizam uma fonte de energia para criar e manter um arco elétrico entre um eletrodo e o material base. Apesar de não ser o foco deste trabalho, os processos que utilizam arco elétrico são amplamente utilizados e possuem excelente controle de utilização sendo que é possível variar a fonte de energia, o tipo de eletrodo para geração do arco elétrico, utilização de gases inertes ou ativos, proteção da região de soldagem, e tipo de corrente (*DC* ou *AC*).

Há também o grupo de soldagem por feixes de energia, laser ou feixe de elétrons, que se tornaram muito populares em aplicações de grande produção [33]. Esses processos necessitam de alta densidade de energia, porém geram resultados de soldagem mais profundos e com melhor acabamento. Por fim, pode-se citar o processo de soldagem por estado-sólido, que, com tecnologia mais moderna, não envolve o derretimento dos materiais a serem soldados [33]. Como exemplo, pode-se citar a soldagem por ultrassom, tal que ocorre pela vibração dos materiais em alta frequência e sobre pressão. Geralmente esse processo é utilizado para conectar chapas finas e cabos de metal.

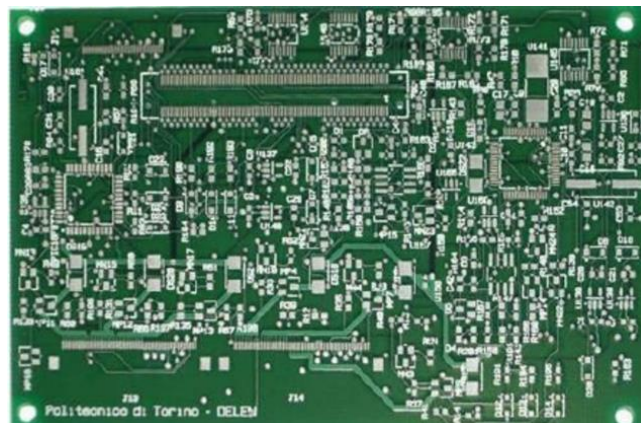
Apesar de outras aplicações, o chumbo também já foi muito utilizado para processos de soldagem [34]. Por ser um metal maleável, excelente contra corrosão e impermeável, o chumbo foi utilizado para soldagem no começo do século 20, sendo que preferencialmente para projetos de construção de telhados e canos em domicílio e industriais. A solda por chumbo é feita por um processo de soldagem por combustível,



normalmente por soldagem oxiacetilênica, em que dois componentes de chumbo são conectados após o derretimento por chama, em baixo ponto de fusão, 327,5 °C. O grande benefício da soldagem de chumbo é em características de corrosão, tal que esse material não precisa de um agente purificador ou de limpeza (do inglês, *flux*), para proteção contra oxidação.

Em aplicações mais recentes, o chumbo tem sido utilizado na indústria eletrônica para soldagem de componentes em circuitos impressos, Figura 8, (do inglês, *printed circuit boards – PCB*) ou até de chips em substratos [50]. A utilização do chumbo nessa indústria vem em grande parte das conhecidas solda de chumbo-estanho, tal que as mais utilizadas são as ligas de chumbo-estanho em composição eutética (~37% de chumbo) e as ligas ricas em chumbo (entre 90 e 97% de chumbo). A grande vantagem da utilização de chumbo é o baixo ponto de fusão, dúctil, excelente condutividade e grande resistência a corrosão.

Figura 8 - Exemplo de uma PCB



Fonte: [https://www.researchgate.net/publication/221906787\\_Design\\_Solutions\\_for\\_Modular\\_Satellite\\_Architectures](https://www.researchgate.net/publication/221906787_Design_Solutions_for_Modular_Satellite_Architectures)

Do ponto de vista do comportamento mecânico da solda de chumbo-estanho, percebe-se um comportamento macio e deformável em temperatura ambiente [50]. Esse comportamento é importante no estudo de reação ao estresse de movimento, sendo que

podem exibir comportamento elástico, inelástico e viscoelástico. Esses comportamentos são importantes para a medição de durabilidade de uma soldagem, uma característica muito importante na utilização de componentes eletrônicos. Além disso, ainda podem ser citadas vantagens da aplicação desse tipo de solda na fadiga isotérmica e termomecânica e deformação.

Uma importante característica da soldagem em componentes eletrônicos é a maior facilidade de realização de testes [50], [51]. A avaliação mecânica pode resultar em informações específicas sobre a aplicabilidade direta da solda, termos de dimensões conjuntas, taxa de resfriamento, intermetálicos e distribuição tensão-deformação. Além destas informações, medidas em relação ao envelhecimento térmico são de extrema importância, uma vez que os circuitos PCBs costumam aquecer durante o uso e uma boa solda deve ser robusta o suficiente para que o calor não comprometa a composição interfacial entre solda e substrato.

Apesar da grande usabilidade das soldas chumbo-estanho, sua utilização atual é desmotivada por problemas ambientais e deficiências técnicas intrínsecas [35]. Amplamente discutido, o uso chumbo está cada mais vez sendo erradicado de várias áreas industriais, visto sua toxicidade para saúde humana. Além disso, a soldagem com chumbo-estanho possui deficiência a deformação cíclica, sendo que os danos internos da solda podem ser expressivos a ponto de iniciar rachaduras precoces em seu tempo de utilização. Motivados por esses fatores, pesquisadores focam esforços no desenvolvimento de materiais sem chumbo (do inglês, *lead-free*) para aplicação na indústria eletrônica.

Com a restrição do uso de chumbo na maioria de suas aplicações, as soldas eletrônicas têm sido substituídas por materiais sem uso de chumbo com estanho *lead-free* [51]–[54]. Nesse caso as soldas podem conter estanho, cobre, prata, bismuto, zinco e

antimônio, porém com propriedades mais próximas o possível da solda chumbo-estanho. Hoje em dia o desenvolvimento desses materiais está bem avançado, porém em aplicações mais críticas, como a aeroespacial, ainda é utilizada a solda chumbo-estanho pelo maior conhecimento de suas características.

Hoje em dia a solda *lead-free* mais utilizada é a de estanho-prata-cobre [51]–[54]. Grande parte da disseminação de seu uso é que a composição eutética ternária de estanho-prata-cobre tem ponto de fusão de 217 °C que é menor do que a composição eutética de chumbo-estanho (22/78 % em peso), 221 °C e da composição eutética de estanho-cobre de 227 °C. É importante ressaltar que as características dessa composição ternária ainda estão em fase de estudo, como por exemplo o envelhecimento térmico desse material em diferentes substratos, como o substrato de cobre [51]–[54].

### 3. Semicondutores

Os semicondutores são em sua maior característica materiais com condutividade elétrica variável, ou seja, possuem propriedade variável entre material isolante e material condutivo para passagem de elétrons [55]. De maneira geral, esse tipo de característica é controlada por perturbações extrínsecas, por exemplo o aumento de temperatura, e/ou condições intrínsecas, dopagem com outros elementos químicos.

Nesse contexto, a dopagem de um semicondutor é o processo pela qual se adiciona impurezas na estrutura cristalina [55], [56]. Essa formação pode gerar a existência de duas diferentes regiões dentro de um cristal, o que é chamada de junção do semicondutor. A grande importância dessa formação de junções é o comportamento de carregadores de carga (elétrons, íons e buracos, *electrons holes*) através dessa região é a base da teoria dos diodos, transistores e da eletrônica em geral.

Silício, Germânio e Arsenieto de gálio são exemplos dos materiais mais usados como semicondutores [55]. Há bastante popularidade do Silício como principal semicondutor, e esse fato deve-se a grande utilização do deste material no início de fabricação dos primeiros transistores, apesar de atualmente a utilização do Arsenieto de gálio ter crescido bastante. Ainda considerando o Silício, sua condutividade pode ser aumentada com acréscimo de dopantes, como antimônio, fosforo, arsênico, boro e gálio.

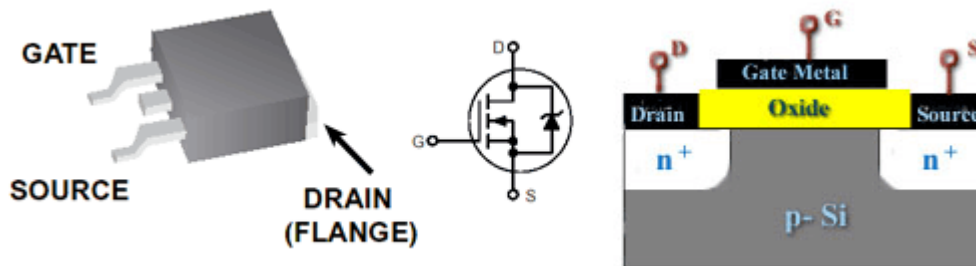
Grande parte da descoberta das propriedades dos semicondutores aconteceu ao longo da metade do século XIX e começo do século XX [57]. O primeiro diodo semicondutor com aplicação prática foi aplicação de detector de ondas de rádio, chamado de *cat's-whisker detector*, em 1904. Futuramente, avanços tecnológicos da física quântica, levaram à invenção do primeiro transistor em 1947 e do primeiro circuito integrado em 1958.

Em um cenário de segunda guerra mundial, o desenvolvimento tecnológico de detectores de onda de rádio era necessário para interceptação de mensagens [57]. Nesse período houve um grande avanço da utilização do silício, bem como sua purificação e propriedades fotovoltaicas e tipos de junções da estrutura cristalina. Os avanços tecnológicos dessa época deram início a terceira revolução industrial, também chamada de Era Digital.

Nos primeiros anos da indústria de semicondutores, o germânio era o semicondutor mais utilizado para os transistores, dentro outros aparelhos semicondutores. Essa maior utilização, em comparação com o Silício, era baseada no conhecimento da melhor capacidade de mobilidade de carregadores de carga. Apesar de maior utilização futuramente, naquela época a o havia problemas com o conhecimento de condutividade elétrica do Silício, o que mais tarde foi resolvido pela passivação superficial por oxidação térmica desenvolvida pela Bell Labs dos EUA, no final da década de 60 [57], [58].

Essa técnica de passivação da superfície, desenvolvida por Mohamed Atalla, deu origem a massiva utilização do semicondutor de silício [57], [58]. Esse processo é considerado um dos mais importantes avanços na tecnologia de semicondutores, dando origem ao processo de semicondutor de metal-óxido (do inglês, *metal-oxide-semiconductor -MOS*) e posteriormente do transistor MOSFET, Figura 9, (do inglês, *MOS field-effect transistor*), que foi o primeiro transistor compacto que poderia ser miniaturizado e utilizado para produção em massa com uma gama grande de usos.

Figura 9- Esquema de representação de um MOSFET



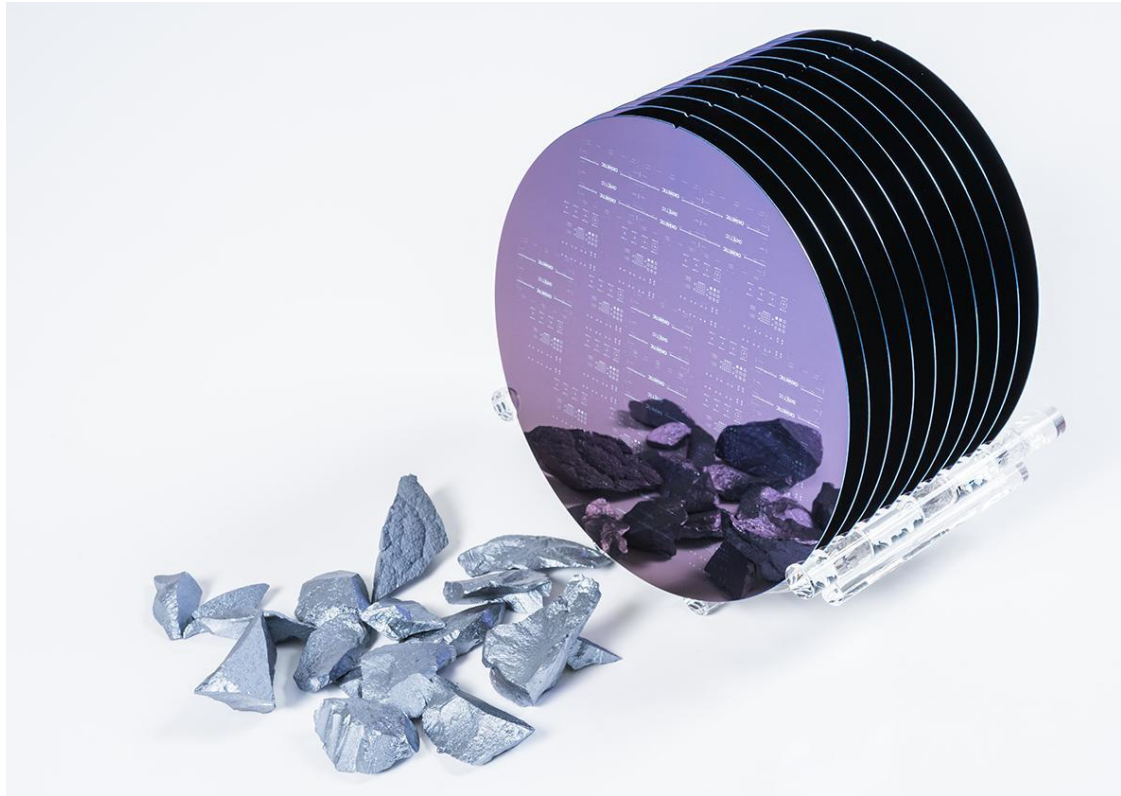
Fonte: <https://www.techpowerup.com/articles/21>

Em termos industriais, essa escalabilidade de produção e eficiência de consumo de energia do MOSFET, fez com que esse transistor se torna-se o tipo mais famoso utilizado em computadores, eletrônicos e produtos de comunicação, com os celulares [57], [58]. Tanto sucesso fez com que o escritório de patentes norte-americano declarasse o MOSFET como “invenção inovadora que transformou a vida e a cultura em todo o mundo” (versão do autor para “*groundbreaking invention that transformed life and culture around the world*”).

A fabricação de um dispositivo semicondutor é um processo de múltipla sequência de etapas químicas (passivação da superfície e oxidação termal, por exemplo) e de fotolitografia [57], [58]. Durante esses processos são formados os circuitos eletrônicos,

gradualmente formados pelas *wafers* (Figura 10) feitas de semicondutores puros. Apesar do silício ser o mais utilizado, dependendo do tipo de fabricação são usados semicondutores de germânio e/ou arsenito de gálio.

Figura 10 - Exemplos de Silício metálico e em formato de *Wafer*.



Fonte: <https://www.okmetic.com/about-okmetic/tale-of-a-silicon-wafer/>

Por ser um processo demorado, ao menos oito semanas para produção sem a inclusão do desenho de circuito, existem empresas extremamente especializadas e líderes de mercado. Uma das mais famosas é a *Samsung Eletronics*, que tem instalações tanto na coreia do sul quanto nos EUA. A segunda maior fabricante é a Intel, com instalações na Europa e Asia. Outras empresas se destacam no ramo, como TSMC que é uma das maiores fundições de semicondutores do mundo, que abriga produções de outras empresas como *Qualcomm* e *Broadcom*.

O Silício é um dos elementos mais abundantes do universo conhecido, perdendo apenas para hidrogênio, hélio, carbono, nitrogênio, oxigênio, ferro e neon [59]–[62]. Apesar disso, essa escala não é seguida na terra, devido a separação de elementos na origem do sistema solar. Na camada mais externa da Terra, tem-se uma quantidade de aproximadamente 27% de silício (em peso), sendo que há indícios da presença desse elemento no manto da terra, na forma de silicatos. Por fim, a ocorrência natural do silício está sempre associada a outros elementos, e muitas vezes na forma de óxido, ou seja, o silicato.

Nesse contexto, uma maneira de extração de silício é por meio do tratamento de magma vulcânico [59]–[62]. Com o resfriamento do magma pode-se ser observada a seguinte sequência de aparecimento de minérios contendo silício:

i. Olivina – São minerais de magnésio/ferro silicato ( $(\text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{2+})_2\text{SiO}_4$ ). Sendo um dos componentes principais do manto da terra. A maior fonte de ocorrência desse mineral é na Europa, mais precisamente na Noruega, tal que aproximadamente 50% da Olivina utilizada industrialmente no mundo tem origem nesse país. Os produtos do processamento desse mineral são dióxido de silício, carbonato de magnésio e quantidades de óxido de ferro. Esse mineral é muito utilizado para na forja de alumínio e para sequestro de  $\text{CO}_2$  em um processo chamada de “*enhanced weathering*” para aceleração de condições meteorológicas de reações químicas entre rochas, água e ar.

ii. Piroxênio – São minerais de aluminossilicato de fórmula geral  $\text{XY}(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$ , onde X pode representar cálcio (Ca), sódio (Na), ferro (Fe II) ou magnésio (Mg) e Y representa íons de tamanho menor, como crômio (Cr), alumínio (Al), magnésio (Mg), cobalto (Co), manganês (Mn), escândio (Sc), titânio (Ti), vanádio (V). Pode ser encontrado em diversas localizações de rochas ígneas e ocorre com frequência em meteoritos.

iii. Anfíbola – São minerais do grupo dos inosilicatos, geralmente com íons de magnésio ou ferro em sua estrutura. Muitas vezes usadas para ornamento e decoração e algumas variedades fibrosas são usadas como fonte de asbesto. Há uma grande variedade de rochas presentes nessa categoria com ocorrência na Rússia, Alemanha, rochas vulcânicas e outros lugares do mundo.

iv. Biotita mica – São minerais de aluminosilicatos com grupo mica. O grupo mica está presente em diversos metais e tem a característica de estrutura basal em alto grau de perfeição. Por esse motivo tem uma rigidez dielétrica e excelente estabilidade química, sendo utilizado para confecção de capacitores de dispositivos de rádio frequência.

v. Ortoclásio – São minerais do grupo de tectossilicatos tipicamente constituído por uma solução sólida de fórmula de membro final  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ . Essa formação tem características importante como a presença de feldspato (do inglês, *feldspar*), que é a formação rochosa rica no teor de álcalis e alumina. Desta maneira, esse tipo de formação tem grande importância de uso na fabricação de vidros, cerâmicas, incorporação de tintas, plásticos e borrachas, eletrodos de solda e abrasivos leves.

vi. Quartzo – São minerais duros compostos com sílica (dióxido de silício). É o segundo mineral mais abundante da terra, atrás apenas da formação feldspato. Existem registros históricos da utilização do quartzo desde a época da Eurásia, para utilização em joias e glíptica (arte de gravar em pedras preciosas), justamente pela alta variedade de cores e estrutura. É um mineral constituinte do granito e outras rochas félsicas (combinação de palavras de feldspato e sílica, pelas características de presença de elementos leves como álcalis e sílica). É também muito comum em rochas sedimentares como o arenito e o xisto.

Cristais de quartzo de ocorrência natural de pureza extremamente alta são utilizados para a fabricação das *wafers* de silício na indústria de semicondutores, porém



são muito raros e caros. A maior mina de produção desse tipo de quartzo é a “Spruce Pine Gem Mine” localizada na cidade de Spruce Pine, Carolina do Norte, nos EUA. Devido à grande utilização do quartzo e desenvolvimento científico da indústria de semicondutores, essa região ficou conhecida como vale do silício e até hoje é reconhecida pela prosperidade financeira e tecnológica. Há também ocorrência de quartzo em outros locais como o Pico do Caldeveiro, na Espanha e até no Brasil, onde foi encontrado o maior monocristal de quartzo do mundo, na cidade de Itaporã, Goiás.

vii. Zeólito – São minerais de aluminossilicato muito utilizados como adsorventes e catalisadores para reações químicas. Esse mineral é também usado para purificação de água de troca de íons, processamento de lixo nuclear, separação de gases e tratamento do solo. Apesar de comumente ser sintetizado artificialmente, a ocorrência natural desse mineral é ligada a China, Coreia do Sul, Japão, Jordânia, Turquia e EUA, de maneira decrescente de quantidade de produção.

Essa sequência de aparecimento já traz informações sobre o comportamento de aumento de complexidade dos silicatos com o resfriamento. Apesar de características bem diversas, os minerais de silício tem grande importância na formação ambiental da crosta terrestre, uma vez que participam do processo de intempérie crosta terrestre silício [61], [62]. Estima-se que quase 900 megatoneladas de poeira eólica seja depositada nos mares por ano, e desta quantidade quase 30% são materiais particulados de silício, através do transporte por fluxo em rios.

Dada a importância dos minerais de silício, o período entre o final do século XX e começo do século XIX foi denominado com Era do Silício, durante a revolução digital. Essa definição é uma homenagem que se baseia na importância desse material para o mundo, assim como outras nomeações anteriores, por exemplo, Era da Pedra, Era do

Bronze e Era do Ferro. O componente mais importante da Era do Silício foi o transistor MOSFET, por sua impactante miniaturização e possibilidade de produção em massa.

Por causa da grande importância do elemento Silício em alta-tecnologia de aparelhos semicondutores, muitos lugares no mundo levam seu nome. O maior exemplo é o Vale de Santa Clara (Califórnia, EUA) leva o nome de Vale do Silício, conhecido mundialmente pelo alto desenvolvido proporcionado pela indústria de semicondutores. Alguns outros exemplos desses lugares são:

- Estados Unidos da América: Silicon Forest em Oregon, Silicon Hills em Austin (Texas), Silicon Slopes em Salt Lake City (Utah), Silicon Alley em Nova Iorque e Silicon Beach em Los Angeles (Califórnia).

- Inglaterra: Silicon Fen em Cambridge, Silicon Roundabout em Londres, Silicon Gorge em Bristol e Silicon Glen na Escócia.

- Outros países: Silicon Wadi em Israel, Silicon Saxony na Alemanha, Silicon Valley na Índia, Silicon Border no México.

São evidentes o grande avanço tecnológico que a utilização dos semicondutores, especialmente o silício, propiciaram para a humanidade. Sempre que um material é utilizado com tanto entusiasmo pela humanidade é necessária a avaliação e constatação do risco ambiental e de saúde pública que pode acarretar seu uso. Com o Silício não poderia ser diferente, mas a boa notícia é que sua toxicidade não é calamitante, como observado para o chumbo, por exemplo.

O silício tem um papel biológico importante já que é um elemento constituinte da estrutura corporal de algas, protozoários e esponjas do mar na forma de sílica biogênica ( $\text{BSiO}_2$ ) [59]. A grande maioria da forma biológica de silício nos oceanos vem das algas chamadas diatomáceas que contribuem a fertilizar o oceano com quantidade de silício como nutriente e também de outros elementos de sua constituição.

Assim como em alguns organismos, há indícios da utilização de silício para a saúde humana, tal que esse elemento é constituinte de unhas, cabelo, ossos e pele [63]. Um grande exemplo é a suplementação de silício em pacientes com osteoporose, que pode ajudar a aumentar a densidade e volume ósseos, assim como melhorar a síntese de elastina e colágeno. Dessa forma, o silício pode ser considerado essencial para vida humana, tanto na saúde quanto nos benefícios tecnológicos e industriais da sua utilização como material de alta tecnologia.

### 3.1 Escassez de produção global de Semicondutores

Vivemos em uma crise sem precedentes de escassez global de silício. Desde o ano de 2020 até o presente momento a humanidade sofre o impacto da diminuição de produtos derivados de aparelhos semicondutores [64]–[66]. Apesar da crise ainda estar sob estudo, estima-se um prejuízo de receita de aproximadamente 210 bilhões de dólares somente para a indústria automobilista. Os efeitos da escassez de chips levou a aumentos exorbitantes nos preços para os consumidores de automóveis, placas gráficas de computador, consoles de videogame, dentre outros produtos que necessitam o uso de semicondutores. Estima-se que alguns fatores podem ter levado a essa crise:

- i. Pandemia de COVID-19: Além dos graves efeitos na saúde pública, a pandemia de COVID-19 exerceu um papel de aceleração de uso dos meios digitais para o trabalho, uma vez que a medida mais urgente para controle da contaminação é o isolamento de pessoas e familiares em suas residências. Esse aumento de trabalho/aprendizado remoto causou um aumento gigantesco na demanda por computadores e periféricos, dentre outros produtos que utilizam chips. Essa alta demanda não foi suportada pelo mercado e agravou o processo de escassez de matéria-prima e capacidade de produção.

ii. Guerra comercial entre EUA e China: Parte do conflito econômico entre duas potências mundiais, China e EUA, trouxeram imposições comerciais por parte do departamento de comércio dos EUA. Em setembro de 2020, foram impostas restrições ao maior produtor de chips da China, a SMIC (do inglês, *Semiconductor Manufacturing International Corporation*) trazendo dificuldades para a venda de chips chineses para indústrias americanas. Essas restrições forçaram o direcionamento do consumo para outras produtoras, como TSMC (do inglês, *Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited*) e Samsung, porém a capacidade máxima de produção dessas empresas já estava sendo empregada.

iii. Problemas Climáticos: Duas fábricas de produção de chips, de propriedade da Samsung e da NXP Semiconductors, em Austin, Texas, foram fechadas devido a fortes tempestades de inverno. Esse problema causou problemas de eletricidade e as duas instalações ficaram inoperantes por alguns meses.

iv. Guerra da Rússia e Ucrânia em 2022: O neon é um gás nobre utilizado em lasers para a manufatura de chips. Devido a pandemia de COVID-19 e o agravamento das tensões na Ucrânia, o preço desse gás aumentou quase seis vezes entre dezembro de 2021 e março de 2022. A Ucrânia é responsável pela metade da produção global desse gás, e esse fornecimento foi severamente restringido após a invasão do país pela Rússia. Assim como em todo período de necessidade, foram procuradas alternativas para fornecedores, porém é necessário muito tempo para outras fábricas adequarem a sua produção para a demanda do mercado. O suprimento de kriptônio e xênon também foi afetado, já que a Ucrânia é também a maior produtora desses gases.

Desde então várias estratégias foram tomadas para tentar reverter o aumento de preços e/ou aumentar a produção de chips para suprir a demanda do mercado. Em

fevereiro de 2021, o presidente dos EUA, Joe Biden, assinou uma ordem executiva para revisão das opções de fortalecimento da cadeia de abastecimentos de semicondutores [67]. Após algumas reuniões oficiais entre o executivo da Casa Branca e CEOs das maiores empresas do EUA, em setembro de 2021 fabricantes de chips e de carros foram pressionados pela Casa Branca para resolução do problema. Ações parecidas foram tomadas pela União Europeia com esse intuito.

Em relação as empresas produtoras de chips, há um grande esforço para o aumento de produção e normalização da distribuição de aparelhos semicondutores [68]. Comunicados de CEOs de grandes empresas como Intel, Nvidia, AMD e IBM convergem em ressaltar que essa crise continue em 2022, sendo que o CEO da IBM, Arvind Krishna, chegou a comentar que qualquer tentativa de previsão do fim da crise para o ano de 2022 é otimista, que uma previsão consciente é dada para o ano de 2023 ou até 2024.

#### **4. Terras Raras**

Os elementos de terras raras (do inglês, *rare-earth elements* - REE), também chamados de metais de terras raras, são cerca de 17 elementos químicos que possuem características específicas em utilização moderna de alta tecnologia. Na classificação da tabela periódica são incluídos como metais de terras raras os elementos da família dos lantanídeos juntamente com o escândio e ítrio [69]–[73]. Apesar de diferentes características eletrônicas e magnéticas, escândio e ítrio são considerados terras raras por serem encontrados nos mesmos depósitos minerais que os lantanídeos, portanto com características químicas similares.

Dada a importância destes elementos, os elementos de terra rara são citados abaixo, em ordem crescente de número atômico [69]–[73]:

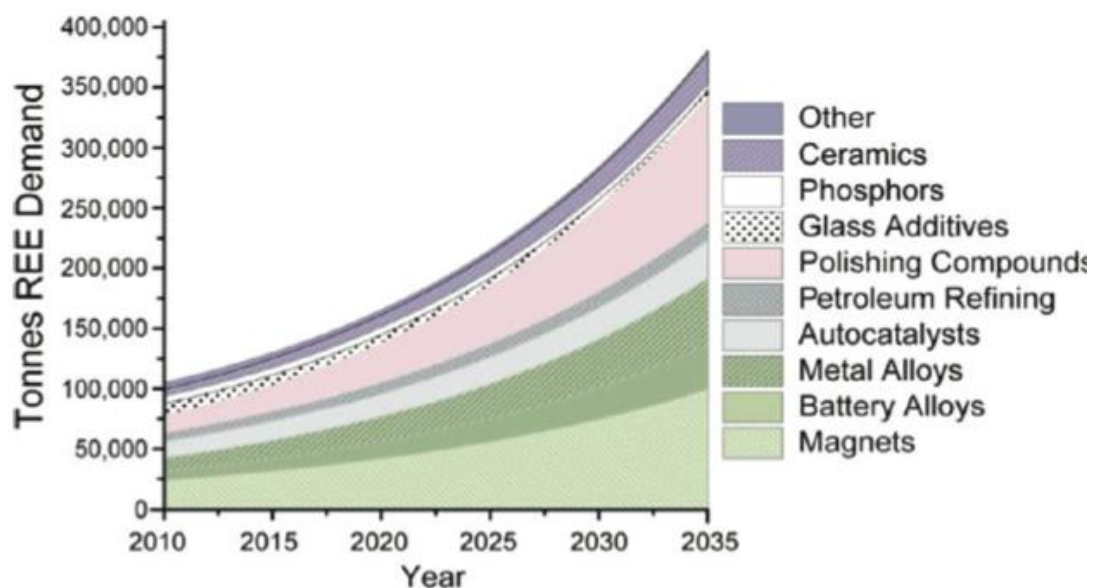
- i. Escândio (Sc): Seu nome é dado em homenagem ao país Escandinávia. Metal muito utilizado na indústria aeronáutica na forma de liga alumínio-escândio, como aditivo em lâmpadas de haleto-metálico/vapor de mercúrio e também como agente indicativo de radiação em refinarias de petróleo.
- ii. Ítrio (Y): Seu nome é dado em homenagem ao vilarejo de Ytterby, Suécia. Metal utilizado em lasers de granada de ítrio e alumínio (do inglês, *Yttrium aluminium garnet* – YAG), em materiais refratários para uso dentário, eletro-cerâmicas de medição de pH, lentes, baterias e tubos de emissão de luz.
- iii. Lantânio (La): Seu nome vem do grego com significado de “escondido”. Por suas propriedades de alto índice refrativo, assim como o Ítrio, é bastante utilizado em lentes e vidros, câmeras e telescópios.
- iv. Cério (Ce): Seu nome vem em homenagem ao deus romano da agricultura. Muito utilizado em reações químicas, como agente oxidativos, pigmento de coloração amarela, e catalisador de refinarias de petróleo para quebra de hidrocarbonetos de alto peso molecular em produtos como gasolina e gases olefínicos.
- v. Praseodímio (Pr): Seu nome vem do grego e se relaciona com a coloração verde. Metal utilizado na fabricação de lasers, ímãs de terras raras, pigmento de coloração verde, óculos de proteção para soldagem, óculos de didímio.
- vi. Neodímio (Nd): Seu nome vem do grego com significado de novo. Assim com o Praseodímio, metal também utilizado na fabricação de lasers, ímãs de terras raras, pigmento de coloração roxa e para fabricação do vidro de didímio.
- vii. Promécio (Pm): Seu nome vem do Deus Prometeo, da cultura grega. Dentre as utilizações mais acentuadas desse metal, pode-se citar a produção de baterias nucleares e tinta luminescente.

- viii. Samário (Sm): Seu nome vem da mina oficial *Samarsky-Bykhovets*, Russia. Também utilizado na fabricação de ímãs de terras raras, lasers e em instrumentos de reatores nucleares.
- ix. Európio (Eu): Seu nome vem em homenagem ao continente Europa. Metal utilizado em lasers, em lâmpadas LED vermelhas e brancas, fluorescentes e de vapor de mercúrio.
- x. Gadolínio (Ga): Seu nome vem em homenagem ao investigador de terras raras Johan Gadolin. Metal utilizado em aparelhos médicos de imagem, eletrônicos, combustível, combustível nuclear e em células a combustível de oxido sólido.
- xi. Térbio (Tb): Seu nome vem em de acordo com uma parte da “impureza” de separação do Ítrio. Utilizado em ímãs de neodímio, LED verde, lasers e lâmpadas fluorescentes.
- xii. Disprósio (Dy): Seu nome vem do grego, significando “difícil de conseguir”. Utilizado em ímãs de neodímio, lasers e HD de computador.
- xiii. Hólmio (Ho): Seu nome vem em homenagem a cidade de Estocolmo. Utilizado em ímãs, lasers e como material de calibração para espectrofotômetros óticos.
- xiv. Érbio (Er): Seu nome vem em de acordo com uma parte da “impureza” de separação do Ítrio. Utilizado na produção de lasers de infravermelho, pigmento de vidro e na tecnologia de fibra ótica.
- xv. Túlio (Tm): Seu nome vem da mitologia nórdica. Utilizado na fabricação de ímãs de terras raras, lâmpadas e lasers.
- xvi. Itérbio (Yb): Seu nome é dado em homenagem ao vilarejo de Ytterby, Suécia. Utilizado em painéis solares, fibras óticas, lasers, ligas de aço inoxidável e medicina nuclear.

xvii. Lutécio (Lu): Seu nome é dado em homenagem a cidade predecessora de Paris, *Lutetia*. Utilizado em equipamento de PET (do inglês, *positron emission tomography*) como detector, vidro de alto índice refrativo, lâmpada de LED e como catalisador em processos de refinarias.

Em resumo, apesar das diferentes aplicações tecnológicas dos metais de terras raras, pode-se dizer que existe grande demanda para uso em ímãs de terras raras, catalisadores e fontes de emissão eletromagnética, como por exemplo, lasers, lâmpadas e LED, a Figura 11 mostra algumas tendências [70]. Estima-se que mais da metade dos REEs são usados para esses fins em regiões como nos EUA, China e Europa. Seguindo uma divisão por área de uso, pode-se dizer que os catalisadores mais importantes são Ce e La; os mais utilizados para ímãs são Pr, Nd, Sm, Dy, Ho e Tu; os mais utilizados em dispositivos eletrônicos são Ce, Ga e Nd; os mais utilizados para baterias são Ce, La e Pr; e, por fim, os mais utilizados para desenvolvimento de lâmpadas, LEDs e lasers são Y, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Er, Yb e Lu.

Figura 11 - Tendência de utilização dos metais de terras raras



Fonte: <https://web.mit.edu/12.000/www/m2016/finalwebsite/problems/ree.html>



Esse tipo de descrição de uso é relacionada aos trabalhos existentes na literatura, assim como a aplicação industrial até o momento [70]. Porém, se faz necessária a consideração que esses elementos são relativamente novos, e por isso se espera que o conhecimento da aplicação, tanto quanto manufatura e extração ainda evoluam consideravelmente nos próximos anos. Ressalta-se ainda, o grande entusiasmo da comunidade científica para esses elementos, visto que estes apresentam propriedades eletrônicas e magnéticas únicas e são capazes de ocupar nichos específicos na indústria tecnológica.

Apesar das maravilhas modernas que esses elementos podem proporcionar, a humanidade já tem experiência nas consequências do uso irrestrito e descontrolado de metais, como o caso do chumbo, já citado. Os REEs são encontrados em baixas quantidades na natureza, esse fato por si já preocupa ambientalistas em relação à mineração, manufatura e concentração elevada desses elementos em lixo eletrônico [74], [75]. Pode-se assumir que uma vez iniciado o ciclo de utilização, esses elementos podem seguir o caminho de transporte de metais e atingir solos e posteriormente lençóis freáticos, tal que será reabsorvido por microrganismos e plantas, com consumo final por humanos e animais em geral.

Além do próprio risco, ainda há a possibilidade de produção de rejeitos contaminados da mineração e refinamento desses metais [76], [77]. Um dos potenciais perigos é a ocorrência de impurezas de tório e urânio, materiais conhecidos como radioativos, assim como a contaminação por óxidos dos REEs, por exemplo o óxido de cério. Além do controle com os subprodutos da mineração e refinamento, ainda têm o cuidado com produtos utilizados nesses processos, como por exemplo o uso de ácidos fortes que podem contaminar o meio ambiente.

O impacto da contaminação do meio ambiente com REEs pode prejudicar tanto solos e águas, quanto plantas e animais [76], [77]. Sabe-se que a contaminação de plantas, de acordo com a biodisponibilidade de cada elemento, pode prejudicar o desenvolvimento de acordo com interferências na produção de clorofila. Além de vegetação selvagem, os impactos da contaminação podem afetar também a agricultura, tal que os efeitos em maçãs e beterrabas já são noticiados pela literatura.

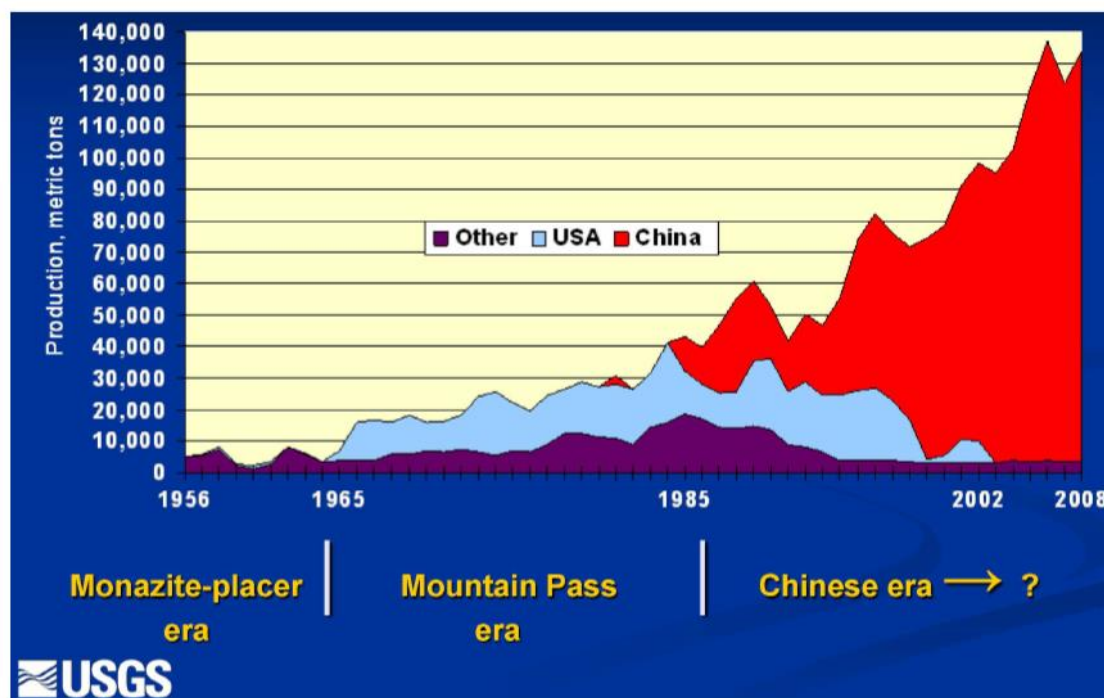
De acordo com a ampla variedade de REEs e conhecimento científico ainda limitado, ainda é difícil a escolha de níveis de segurança recomendados para humanos. Além da falta de conhecimento específico, a exposição por diversos fatores (agricultura, mineração e produção na indústria) tem que ser levada em consideração em regiões de alta mineração desses metais. Alguns sintomas de contaminação incluem problemas respiratórios, perda dentária e câncer, com alguns casos levando a óbito.

Embora tenham aplicação em diversas áreas de alta tecnologia, os REEs não representam grande significante por peso total desses produtos. Isso implica que a mineração desses metais movimenta a economia de algumas regiões com processos de extração e refinamento de alta tecnologia industrial, concentrando a produção em regiões específicas. Neste sentido, pode-se citar a evolução histórica de mineração desses metais, tal que dos anos 60 até 80, quase que a extração total era realizada na mina de Mountain Pass, EUA [71], [73], [75].

Em meados dos anos 90, dada a importância científica de utilização dos REEs, a produção estava mais descentralizada, como praticamente dois terços da produção dividida entre EUA e China, 12% para a Austrália e o restante para outros países como Índia, Brasil, Canadá, África do sul e Tailândia [71], [73], [75]. Entretanto a hegemonia de produção chinesa começou a dar sinais em meados dos anos 2000, tal que nesse período a China já possuía quase que 80% da produção mundial. A partir da segunda

década do século XXI, a produção dos REEs já estava quase que totalmente nas mãos do governo chinês (Figura 12), o que levou a uma grande mudança na utilização e comercialização desses metais.

Figura 12- Tendência de produção global de terras-raras, relatório da agência USGS, norte americana.



Fonte: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20111042>

Em 2011, com uma produção de quase 90% do suprimento mundial, algumas restrições passaram a ser preponderante para a comercialização mundial dos REEs [71], [73], [75]. O governo chinês, começa a fazer regulações quanto a exportação desses elementos, tal que a justificativa de controle de contrabando, conservação e proteção do meio ambiente levaram a planos de diminuição das exportações para 35 k toneladas por ano. Esse foi o início de uma série de regulações que levaram a ondulações da utilização e compra desses elementos.

Ainda em 2011 a agência norte americana “US Geological Survey - USGS”, juntamente com um departamento do governo, descreveu as tendências da indústria na China examinando os pontos cruciais para orientação do futuro da produção desses

materiais do país, no relatório Indústria de terras-raras chinesa (do inglês, *China's Rare-Earth Industry*). Por esse relatório foi então confirmada a ascensão chinesa na produção e exportação das RREs, porém apesar do grande aumento nas últimas décadas, é esperada a diminuição na produção, devido a “demanda interna”.

Esse tipo de regulação impacta diretamente a produção/preços de produtos de alta tecnologia, citados anteriormente, além de criar uma situação de dependência chinesa para implementação de tecnologia em outros países do mundo. A USGS, está ativamente na procura de depósitos de terras raras em outros países, como por exemplo no Afeganistão, sob proteção das tropas americanas.

Considerasse que a importância geopolítica das terras raras seja um assunto de extrema importância para os próximos anos, principalmente quando se fala de energia renovável. A corrida de países, além da China, para mineração, produção e comercialização desses elementos pode ser um dos acontecimentos notáveis dessa década do novo milênio, com condições que aumentam incentivos econômicos e até interferência política em depósitos naturais em países menos desenvolvidos.

## **5. Considerações Finais**

Sabe-se que a evolução tecnológica tem sido o desafio/meta para o crescimento da sociedade, porém tem-se o questionamento sobre quais as consequências da evolução, bem como os motivadores para o direcionamento do uso de uma nova tecnologia. Uma visão mais simplista indica que toda evolução a tecnológica é importante e que a humanidade é beneficiada por tal.

Contudo, é possível perceber que a sede por descobertas muitas vezes acaba delimitando um futuro incerto e grandes consequências para a humanidade. As consequências muitas vezes são disfarçadas com ideias como melhoria de qualidade de vida, facilidade desempenhar funções, comodidade, ou simplesmente como requisito mínimo para sobrevivência.

Foi visto que a ideia de revolução tecnológica surgiu da necessidade de adaptação, uma vez que as condições de sobrevivência colocavam a perpetuação da espécie humana uma situação de aleatoriedade. Com o início de sociedade, como conhecemos hoje, a humanidade conseguiu se estabelecer e captar recursos para utilizar a seu favor. Posteriormente, com a batalha com o meio ambiente já encaminhada a ambição por dominação trouxe a direção para as grandes mentes descobrirem maneiras de facilitar o desempenho de funções.

Com essa diretriz, houve então a primeira revolução industrial, que mudou totalmente a maneira com o que o ser humano encarava a execução de tarefas e muito além a eficiência para produção e manufatura de produtos e serviços. As populações passaram a se conectar de maneira mais eficiente, da mesma maneira que as realizações de engenharia e ciência básica direcionavam a tecnologia para condições nunca antes experimentadas.

Entretanto, a humanidade já havia sentido a problemática que o uso desenfreado de recursos naturais poderia acarretar, tal que o chumbo, um dos metais mais utilizados da antiguidade, foi um dos grandes problemas para reflexão da extração e utilização inconsequente de metais pode acarretar para a sociedade. Sabe-se que o chumbo é utilizado desde a antiguidade, com indícios de sua utilização para fabricação desde ornamentos até equipamentos, assim como registros de sua utilização em bebidas e canos no império romano.

Apesar do conhecimento de sua toxicidade para a saúde humana, o grande aumento da utilização desse metal foi para indústria automobilista, onde ocorreram alarmantes acidentes com consequências vistas até os dias atuais, dada a problemática de sua bioacumulação no corpo humano e graves problemas de curta prazo, levando até a morte, e de longo prazo, afetando a capacidade cognitiva.

Com o passar de duas revoluções tecnológicas pela humanidade, a tendência de adaptação passou de ser uma concorrência com outras espécies para sobrevivências, mas para uma concorrência interna para conquista de poder de consequentemente soberania por recursos e tecnologia. A produção e manufatura de produtos tecnológicos passaram a ser relacionadas a disputas políticas e territoriais, muito mais do que capacidade de extração de recursos específicos de cada região. Um dos grandes exemplos é a utilização de semicondutores, iniciando o que é conhecido como revolução digital.

Essa corrida por aprimoramento da tecnologia de semicondutores impactou grandemente a maneira de funcionamento da sociedade, e por este motivo é considerada a terceira revolução industrial. A definição de potências, como vemos hoje, teve grande influência pela utilização desses materiais e, consequentemente, pelo avanço digital de cada país. Nesse sentido, a globalização trouxe uma maior proximidade de contato entre

humanos, em diferentes regiões, e disseminação da informação, porém com o preço de dependência dessa tecnologia para sobrevivência.

Nesse sentido, é experimentada por essa geração a revolução da indústria 4.0, ou seja, a era da automatização, robotização, interação virtual e até mudança de pensamento sobre a realidade e virtualização da interação entre seres humanos. Como todo início de revolução, é estabelecido um desafio político de implementação, que consiste na falta de regulação, padronização das práticas modernas e maneira de certificação de qualidade. Nesse sentido, a evolução tecnológica tem como parâmetro uma série de metais, chamados de elementos de terras raras, que possui incertezas em relação as consequências de sua utilização e extração.

Diferentemente do que alguns outros metais utilizados na história da humanidade, os metais de terras raras são encontrados em quantidades relativamente pequenas na crosta terrestre, deixando incerto a problematização de concentração para a toxicidade tanto do ser humano, quanto do ambiente. Por outro lado, um outro desafio percebido para utilização desses elementos é a hegemonia política de produção, tal que a China, detém e regula tanto a produção, quanto distribuição desses metais. A corrida de países, além da China, para mineração, produção e comercialização desses elementos pode ser um dos acontecimentos notáveis dessa década do novo milênio, com condições que aumentam incentivos econômicos e até interferência política em depósitos naturais em países menos desenvolvidos.

## 6. Referências

- [1] J. P. Bocquet-Appel, “When the world’s population took off: The springboard of the neolithic demographic transition,” *Science*, vol. 333, no. 6042. American Association for the Advancement of Science, pp. 560–561, Jul. 29, 2011. doi: 10.1126/science.1208880.
- [2] “Neolithic Period - World History Encyclopedia.” <https://www.worldhistory.org/Neolithic/> (accessed May 07, 2022).
- [3] E. M. Eric Bond, Sheena Gingerich, Oliver Archer-Antonsen, Liam Purcell and S. G. Eric Bond, *The Industrial Revolution – Innovations*. 2003. Accessed: May 07, 2022. [Online]. Available: <http://industrialrevolution.sea.ca/innovations.html>
- [4] ERIH, “Industrial History Of European Countries,” *European Route of Industrial Heritage*, 2022. <https://www.erih.net/how-it-started/industrial-history-of-european-countries> (accessed May 07, 2022).
- [5] R. Souza, “Segunda Revolução Industrial: causas e consequências - Brasil Escola,” 2020. Accessed: May 07, 2022. [Online]. Available: <https://brasilecola.uol.com.br/historiag/segunda-revolucao-industrial.htm>
- [6] W. Rosen, “The most powerful idea in the world: a story of steam, industry, and invention,” *Choice Rev. Online*, vol. 48, no. 08, pp. 48-4443-48-4443, 2011, doi: 10.5860/choice.48-4443.
- [7] E. Alves and R. Marra, “Êxodo e sua contribuição à urbanização,” pp. 80–88, 2010.
- [8] J. Rifkin, *A Terceira Revolução Industrial: como o poder lateral está transformando a energia, a economia e o mundo*. São Paulo: M.Books, 2012.
- [9] Posted and M. Rouse, “What is information age? - definition from WhatIs.com,” *TechTarget*, 2016. <https://www.techtarget.com/searchcio/definition/Information-Age> (accessed May 07, 2022).
- [10] I. Bojanova, “The digital revolution: What’s on the horizon,” *IT Prof.*, vol. 16, no. 1, pp. 8–12, 2014, doi: 10.1109/MITP.2014.11.
- [11] BEIS UK, *Regulation for the Fourth Industrial Revolution*, no. June. 2019.
- [12] and N. D. Philbeck, Thomas, “The fourth industrial revolution: shaping a new era,” *J. Int. Aff.*, vol. 72, pp. 17–22, 2018, Accessed: May 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/26588339>
- [13] A. W. Colombo, S. Karnouskos, and T. Bangemann, “Towards the next generation of industrial Cyber-Physical Systems,” in *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical*



- Systems: The IMC-AESOP Approach*, vol. 9783319056, Springer, Cham, 2014, pp. 1–22. doi: 10.1007/978-3-319-05624-1\_1.
- [14] C. Bai, P. Dallasega, G. Orzes, and J. Sarkis, “Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 229, p. 107776, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107776.
- [15] Y. N. Harari, “The meaning of life in a world without work | Technology | The Guardian,” *Guard.*, no. May, p. 4, 2017, Accessed: May 11, 2022. [Online]. Available: <https://www.theguardian.com/technology/2017/may/08/virtual-reality-religion-robots-sapiens-book>
- [16] A. Davidson *et al.*, “Lead,” *Ullmann’s Encycl. Ind. Chem.*, pp. 1–55, May 2014, doi: 10.1002/14356007.A15\_193.PUB3.
- [17] “Aplicações e características do chumbo.” <https://www.grupogrx.com.br/chumbo> (accessed Apr. 14, 2022).
- [18] J. L. Kitman, “Lead-Letter Office,” 2000.
- [19] D. L. Leach, D. C. Bradley, D. Huston, S. A. Pisarevsky, R. D. Taylor, and S. J. Gardoll, “Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits in Earth History,” *Econ. Geol.*, vol. 105, no. 3, pp. 593–625, May 2010, doi: 10.2113/GSECONGEO.105.3.593.
- [20] J. Rieuwerts, *The elements of environmental pollution*. 2017. doi: 10.4324/9780203798690.
- [21] U.S. Geological Survey, “Lead Statistics and Information,” 2015. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lead-statistics-and-information>
- [22] Cosmetics Info, “A History of Cosmetics from Ancient Times,” no. 1757, pp. 1–14, 2014, Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.cosmeticsinfo.org/get-the-facts/a-history-of-cosmetics-from-ancient-times/>
- [23] S. Wynne-Jones and J. Fleisher, “Coins in context: Local economy, value and practice on the East African Swahili coast,” *Cambridge Archaeol. J.*, vol. 22, no. 1, pp. 19–36, Apr. 2012, doi: 10.1017/S0959774312000029.
- [24] H. Delile, J. Blichert-Toft, J. P. Goiran, S. Keay, and F. Albarède, “Lead in ancient Rome’s city waters,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 111, no. 18, pp. 6594–6599, May 2014, doi: 10.1073/pnas.1400097111.
- [25] M. Boldyrev, “Lead: properties, history, and applications,” *WikiJournal Sci.*, vol.

- 1, no. 2, p. 7, Jul. 2018, doi: 10.15347/wjs/2018.007.
- [26] “Lead Poisoning A Historical Perspective About EPA US EPA.” Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <https://archive.epa.gov/epa/aboutepa/lead-poisoning-historical-perspective.html>
  - [27] S. P. Sinha, Shelly, V. Sharma, Meenakshi, S. Srivastava, and M. M. Srivastava, “Neurotoxic effects of lead exposure among printing press workers,” *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 1993 514, vol. 51, no. 4, pp. 490–493, Oct. 1993, doi: 10.1007/BF00192162.
  - [28] C. Kellett, *Poison and Poisoning: A Compendium of Cases, Catastrophes and Crimes*. 2012. Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.amazon.com.br/Poison-Poisoning-Compendium-Catastrophes-English-ebook/dp/B07ZRBMTJJ>
  - [29] M. A. Riva, A. Lafranconi, M. I. D’Orso, and G. Cesana, “Lead poisoning: Historical aspects of a paradigmatic ‘occupational and environmental disease,’” *Safety and Health at Work*, vol. 3, no. 1. Occupational Safety and Health Research Institute, pp. 11–16, 2012. doi: 10.5491/SHAW.2012.3.1.11.
  - [30] S. Hong, J. P. Candelone, C. C. Patterson, and C. F. Boutron, “Greenland ice evidence of hemispheric lead pollution two millennia ago by Greek and Roman civilizations,” *Science* (80-. ), vol. 265, no. 5180, pp. 1841–1843, 1994, doi: 10.1126/science.265.5180.1841.
  - [31] G. Markowitz and D. Rosner, “‘Cater to the children’: The role of the lead industry in a public health tragedy, 1900-1955,” *American Journal of Public Health*, vol. 90, no. 1. American Public Health Association, pp. 36–46, 2000. doi: 10.2105/AJPH.90.1.36.
  - [32] “Update: Blood lead levels - United States, 1991-1994,” *Journal of the American Medical Association*, vol. 277, no. 13. pp. 1031–1032, 1997. doi: 10.1001/jama.1997.03540370021014.
  - [33] A. G. Union, B. Death, I. Revolution, and C. Gnifetti, “Human activity has polluted European air for 2 , 000 years,” pp. 3–5, 2017, Accessed: Apr. 16, 2022. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20170627215417/https://eos.org/scientific-press/human-activity-has-polluted-european-air-for-2000-years>
  - [34] X. Zhang, L. Yang, Y. Li, H. Li, W. Wang, and B. Ye, “Impacts of lead/zinc

- mining and smelting on the environment and human health in China,” *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 184, no. 4. Springer, pp. 2261–2273, May 14, 2012. doi: 10.1007/s10661-011-2115-6.
- [35] “Lead Properties < Lead Facts | ILA - International Lead Association Website.” <https://web.archive.org/web/20170228171821/http://www.ila-lead.org/news/lead-in-the-news/2012-11-30/significant-growth-in-lead-usage-underlines-its-importance-to-the-global-economy-> (accessed Apr. 16, 2022).
- [36] I. Thorton, R. Rautiu, and S. Brush, “RECYCLING OF LEAD,” in *Lead: The Facts*, London, 2001, pp. 71–80.
- [37] Agency for Toxic Substances and Disease Registry, “Toxicological Profile for Lead,” in *ATSDR’s Toxicological Profiles*, 2002. doi: 10.1201/9781420061888\_ch106.
- [38] O. Tarragó and M. J. Brown, “Agency for toxic substances and disease Registry : Case studies in Environmental Medicine (CSEM),” 2017. Accessed: Apr. 26, 2022. [Online]. Available: <http://www.atsdr.cdc.gov/csem/>.
- [39] U. United Nations Environment Programme, “Final Review of Scientific Information on Lead,” *Chemicals Branch, DTIE*, 2010. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/27635> (accessed Apr. 26, 2022).
- [40] “The End Of Lead? Federal Gov’t Order Bans Sinkers, Ammo | GearJunkie.” <https://gearjunkie.com/news/lead-ban-ammunition-fishing-sinkers> (accessed Apr. 26, 2022).
- [41] D. Blum, “Looney Gas and Lead Poisoning: A Short, Sad History,” *Wired*, 2013. <https://www.wired.com/2013/01/looney-gas-and-lead-poisoning-a-short-sad-history/> (accessed Apr. 24, 2022).
- [42] T. Midgley, “Tetraethyl Lead Poison Hazards,” *Ind. Eng. Chem.*, vol. 17, no. 8, pp. 827–828, Aug. 1925, doi: 10.1021/ie50188a020.
- [43] D. Seyferth, “The Rise and Fall of Tetraethyllead. 2,” *Organometallics*, vol. 22, no. 25, pp. 5154–5178, 2003. doi: 10.1021/om030621b.
- [44] W. Kovarik, “Ethyl-leaded gasoline: How a classic occupational disease became an international public health disaster,” *International Journal of Occupational and Environmental Health*, vol. 11, no. 4. Int J Occup Environ Health, pp. 384–397, 2005. doi: 10.1179/oeh.2005.11.4.384.
- [45] “Ban on leaded petrol ‘has cut crime rates around the world,’” 2007.

- <https://www.independent.co.uk/climate-change/news/ban-on-leaded-petrol-has-cut-crime-rates-around-the-world-398151.html> (accessed Apr. 24, 2022).
- [46] T. J. Chow and C. C. Patterson, "The occurrence and significance of lead isotopes in pelagic sediments," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 26, no. 2, pp. 263–308, Feb. 1962, doi: 10.1016/0016-7037(62)90016-9.
  - [47] C. I. Davidson, *Clean hands : Clair Patterson's crusade against environmental lead contamination*. Nova Science, 1999.
  - [48] H. B. Cary, "Modern Welding Technology 5/e," *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 31, no. 4, pp. 376–376, 2004, doi: 10.1108/ir.2004.31.4.376.3.
  - [49] S. K. Ghosh, "Manufacturing engineering and technology," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 112–113, 1991, doi: 10.1016/0924-0136(91)90107-p.
  - [50] W. J. Plumbridge, "Solders in electronics," *J. Mater. Sci.*, vol. 31, no. 10, pp. 2501–2514, 1996, doi: 10.1007/BF00687275.
  - [51] E. F. De Monlevade and W. Peng, "Failure mechanisms and crack propagation paths in thermally aged Pb-free solder interconnects," *J. Electron. Mater.*, vol. 36, no. 7, pp. 783–797, Jul. 2007, doi: 10.1007/s11664-006-0062-8.
  - [52] W. Peng, E. Monlevade, and M. E. Marques, "Effect of thermal aging on the interfacial structure of SnAgCu solder joints on Cu," *Microelectron. Reliab.*, vol. 47, no. 12, pp. 2161–2168, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.microrel.2006.12.006.
  - [53] E. F. de Monlevade, I. A. P. Cardoso, and G. F. M. de Souza, "A critical analysis of a reliability study of ball grid array electronic components submitted to thermal aging and board-level drop test," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 128, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105578.
  - [54] W. Peng and M. E. Marques, "Effect of thermal aging on drop performance of chip scale packages with SnAgCu solder joints on Cu pads," *J. Electron. Mater.*, vol. 36, no. 12, pp. 1679–1690, Dec. 2007, doi: 10.1007/s11664-007-0260-z.
  - [55] S. K. Tewksbury, "Semiconductor materials," in *Microelectronics, Second Edition*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2005, pp. 1-1-1–24. doi: 10.2465/gkk1952.13.323.
  - [56] H. Arora, "Charge transport in two-dimensional materials and their electronic applications," 2020. Accessed: May 09, 2022. [Online]. Available: <https://himani-arora-ha.github.io/pdf/Dissertation.pdf>
  - [57] Y. Furukawa, "History of semiconductors.," *Bull. Japan Inst. Met.*, vol. 29, no. 1,

- pp. 18–21, 1990, doi: 10.2320/material1962.29.18.
- [58] B. Lojek, *History of semiconductor engineering*. Springer, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-34258-8.
  - [59] B. R. Edwards and J. K. Russell, “A review and analysis of silicate mineral dissolution experiments in natural silicate melts,” *Chem. Geol.*, vol. 130, no. 3–4, pp. 233–245, Aug. 1996, doi: 10.1016/0009-2541(96)00025-3.
  - [60] B. O. Mysen, “The structure of silicate melts,” *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 11, pp. 75–97, Nov. 1983, doi: 10.1146/annurev.ea.11.050183.000451.
  - [61] R. Zevenhoven, J. Fagerlund, and J. K. Songok, “CO<sub>2</sub> mineral sequestration: Developments toward large-scale application,” *Greenhouse Gases: Science and Technology*, vol. 1, no. 1. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 48–57, Mar. 01, 2011. doi: 10.1002/ghg3.7.
  - [62] P. Tréguer, D. M. Nelson, A. J. Van Bennekom, D. J. Demaster, A. Leynaert, and B. Quéguiner, “The silica balance in the world ocean: A reestimate,” *Science* (80-), vol. 268, no. 5209, pp. 375–379, 1995, doi: 10.1126/science.268.5209.375.
  - [63] F. H. Nielsen, “Update on the possible nutritional importance of silicon,” *J. Trace Elem. Med. Biol.*, vol. 28, no. 4, pp. 379–382, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.jtemb.2014.06.024.
  - [64] D. Howley, “These 169 industries are being hit by the global chip shortage,” *Yahoo Finance*, 2021. <https://finance.yahoo.com/news/these-industries-are-hit-hardest-by-the-global-chip-shortage-122854251.html> (accessed May 10, 2022).
  - [65] K. D. and Reuters, “Global Chip Shortage to Cost Automakers \$210 Billion in 2021: Report,” *Business Insider*. <https://www.businessinsider.com/global-chip-shortage-supply-chain-cost-auto-industry-210-billion-2021-9> (accessed May 10, 2022).
  - [66] M. Wayland, “Chip shortage expected to cost auto industry \$210 billion in revenue in 2021,” *CNBC*, 2021. <https://www.cnbc.com/2021/09/23/chip-shortage-expected-to-cost-auto-industry-210-billion-in-2021.html> (accessed May 10, 2022).
  - [67] D. Shepardson, T. Reuters, and D. Shepardson, “White House prods companies on chips information request | Reuters,” *Reuters*. <https://www.reuters.com/technology/white-house-seeks-address-semiconductor-chips-crisis-harming-automakers-2021-09-23/> (accessed May 10, 2022).

- [68] K. Alspach, “IBM CEO Arvind Krishna: Chip Shortage ‘More Likely’ Continuing Until 2023 Or 2024,” *CRN*. <https://www.crn.com/news/components-peripherals/ibm-ceo-arvind-krishna-chip-shortage-more-likely-continuing-until-2023-or-2024> (accessed May 10, 2022).
- [69] L. H. Lewis and F. Jiménez-Villacorta, “Perspectives on permanent magnetic materials for energy conversion and power generation,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 44, no. SUPPL. 1, 2013, doi: 10.1007/s11661-012-1278-2.
- [70] J. Navarro and F. Zhao, “Life-cycle assessment of the production of rare-earth elements for energy applications: A review,” *Front. Energy Res.*, vol. 2, no. NOV, pp. 1–17, 2014, doi: 10.3389/fenrg.2014.00045.
- [71] C. H. Choi, J. Eun, J. Cao, S. Lee, and F. Zhao, “Global strategic level supply planning of materials critical to clean energy technologies – A case study on indium,” *Energy*, vol. 147, pp. 950–964, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.01.063.
- [72] M. S. Widyan, “Design, optimization, construction and test of rare-earth permanent-magnet electrical machines with new topology for wind energy applications,” *Tech. Univ. Berlin*, p. 150, 2006, [Online]. Available: [http://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/files/1310/widyan\\_mohammad.pdf](http://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/files/1310/widyan_mohammad.pdf)
- [73] H. Moran-Palacios, F. Ortega-Fernandez, R. Lopez-Castaño, and J. V. Alvarez-Cabal, “The potential of iron ore tailings as secondary deposits of rare earths,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 14, 2019, doi: 10.3390/app9142913.
- [74] A. Leader, G. Gaustad, and C. Babbitt, “The effect of critical material prices on the competitiveness of clean energy technologies,” *Mater. Renew. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 1–17, 2019, doi: 10.1007/s40243-019-0146-z.
- [75] B. Zhou, Z. Li, and C. Chen, “Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies,” *Miner. 2017, Vol. 7, Page 203*, vol. 7, no. 11, p. 203, Oct. 2017, doi: 10.3390/MIN7110203.
- [76] S. H. Ali, “Social and environmental impact of the rare earth industries,” *Resources*, vol. 3, no. 1, pp. 123–134, Feb. 2014, doi: 10.3390/resources3010123.
- [77] O. Pereao, C. Bode-Aluko, O. Fatoba, K. Laatikainen, and L. Petrik, “Rare earth elements removal techniques from water/wastewater: A review,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 130, no. September 2019, pp. 71–86, 2018, doi: 10.5004/dwt.2018.22844.