



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
CURSO ENGENHARIA DE PRODUÇÃO ELÉTRICA

Fabício Emydio da Silva

**Análise de riscos logísticos da cadeia global de suprimentos dos
semicondutores**

Florianópolis
2023

Fabrcio Emydio da Silva

**Análise de riscos logísticos da cadeia global de suprimentos dos
semicondutores**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Produção Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção Elétrica

Orientador(a): Prof.(a) Mônica Maria Mendes Luna, Dr.(a)

Florianópolis

2023

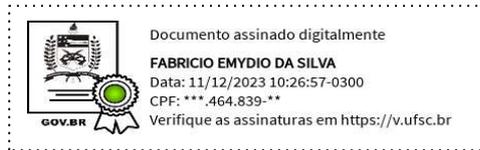
Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC

Silva, Fabrício Emydio da
Análise de riscos logísticos da cadeia global de suprimentos
dos semicondutores /Fabrício Emydio da Silva ; orientadora,
Mônica Maria Mendes Luna, 2023.
62 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em
Engenharia de Produção Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Elétrica. 2. Cadeia de suprimentos.
3. Semicondutores. 4. Riscos Logísticos. I. Luna, Mônica Maria
Mendes. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia de Produção Elétrica. III. Título.

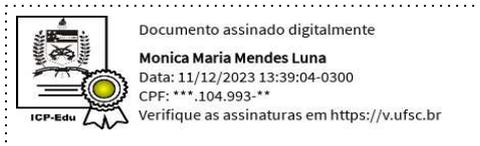


Fabrício Emydio da Silva

Análise de riscos logísticos da cadeia global de suprimentos dos semicondutores

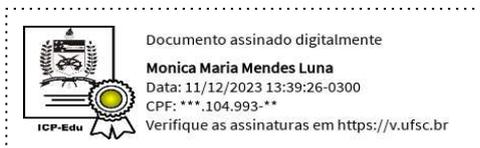
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Produção Elétrica.

Florianópolis, 04 de dezembro de 2023.



Prof.(a) Mônica Maria Mendes Luna, Dr.(a)
Coordenadora do Curso

Banca examinadora



Prof.(a) Mônica Maria Mendes Luna, Dr.(a)
Orientador(a)



Prof.(a) Gisele de Lorena Diniz Chaves Dr.(a)
Instituição UFSC



Prof. Jovane Medina Azevedo, Dr.
Instituição UDESC

Florianópolis, 2023.

Este trabalho é dedicado
aos meus colegas de classe e a minha família.

AGRADECIMENTOS

No limiar desta etapa da minha trajetória acadêmica, sinto uma profunda necessidade de expressar meu reconhecimento e gratidão àqueles que possibilitaram cada passo deste caminho.

Primeiramente, sou grato a Deus, o Supremo Arquiteto do Universo, que com sua incomensurável sabedoria e amor, delineou os planos de minha vida e me concedeu a determinação e o propósito de seguir adiante, especialmente nos momentos mais intrincados e desafiantes.

À Doutora Mônica Maria Mendes Luna, minha orientadora e mentora, minha sincera gratidão por cada palavra de orientação, paciência e encorajamento. Seu comprometimento e perspicácia foram pilares fundamentais na edificação deste trabalho.

Estendo meu reconhecimento aos mestres e colegas da Universidade Federal de Santa Catarina. Cada ensinamento, feedback e interação contribuíram para moldar não só este trabalho, mas o profissional e ser humano que sou hoje.

À minha amada esposa, Tatiane, cujo suporte e amor foram essenciais em cada passo desta jornada. Aos meus filhos, Gabriel e Benício, que são fontes constantes de inspiração e alegria em minha vida. Aos meus pais, Diva e Claudomiro, cujas lições, valores e carinho formaram a base de tudo o que sou. E uma menção especial à minha sogra Luiza e ao saudoso Augusto, que nos deixou este ano, mas cuja presença e ensinamentos permanecerão sempre vivos em nossos corações.

Agradeço de coração aos meus amigos e companheiros de jornada, que compartilharam comigo cada desafio, conquista e momento de reflexão. Cada palavra, cada gesto, cada riso teve um significado especial e enriquecedor.

E, finalmente, a todos que, direta ou indiretamente, foram peças essenciais na construção deste projeto e de minha trajetória, minha mais sincera gratidão.

*“Menor que meu sonho não posso ser”
(Lindolf Bell)*

RESUMO

Este estudo enfoca a essencial cadeia de suprimentos dos semicondutores na indústria tecnológica global, destacando sua relevância em variados produtos e serviços. Utilizando uma metodologia adaptada de Luna (2023), foi conduzida uma análise abrangente em etapas distintas: inicialmente, salientando a importância da cadeia no cenário contemporâneo, seguido de uma descrição detalhada dos elos da cadeia por meio de revisão bibliográfica e pesquisa em fontes online. Posteriormente, foram estabelecidos limites para o escopo da cadeia, considerando sua vasta aplicabilidade em diferentes setores. Com a cadeia mapeada, uma avaliação dos elos críticos foi realizada, levando em consideração fatores como a participação de mercado e localização geográfica. A representação da cadeia foi ilustrada, evidenciando as inter-relações entre as organizações-chave. A pesquisa culmina em uma análise dos riscos logísticos associados à cadeia de semicondutores. A motivação deste estudo centra-se na crescente demanda por semicondutores, ressaltando a urgência de compreender e mitigar potenciais riscos logísticos para assegurar a resiliência da cadeia.

Palavras-chave: Cadeia de suprimentos; Semicondutores; Riscos logísticos.

ABSTRACT

This study focuses on the essential supply chain of semiconductors in the global technological industry, highlighting its significance in various products and services. Using a methodology adapted from Luna (2023), a comprehensive analysis was conducted in distinct stages: initially emphasizing the importance of the chain in the contemporary scenario, followed by a detailed description of the chain's links through bibliographic review and online research. Subsequently, boundaries were established for the scope of the chain, considering its vast applicability across different sectors. With the chain mapped, an evaluation of the critical links was carried out, taking into account factors such as market share and geographical location. The chain's representation was illustrated, showcasing the interrelationships between key organizations. The research culminates in an analysis of the logistical risks associated with the semiconductor supply chain. The motivation behind this study centers on the rising demand for semiconductors, underscoring the urgency to understand and mitigate potential logistical risks to ensure the chain's resilience.

Keywords: Supply chain; Semiconductors; Logistical risks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Hierarquia para mapeamento dos sistemas de suprimentos.....	19
Figura 2 - Representação de uma cadeia global de valor.	20
Figura 3 - Rede de Suprimentos do Cobalto.	21
Figura 4 - Rede de suprimentos da H&M.	22
Figura 5 - Mapa da cadeia de suprimentos dos fertilizantes.....	23
Figura 6 - Mapa da cadeia de suprimentos do cobalto.....	23
Figura 7 - Mapa de fluxo de valor para uma linha de produção têxtil.	24
Figura 8 - Mapa de Processos de abate e curtimento.	25
Figura 9 - Como mapear uma cadeia de suprimentos e identificar riscos logísticos?	26
Figura 10 - Cadeia produtiva e modelos de negócios da indústria de semicondutores.....	32
Figura 11 - A cadeia de suprimentos dos semicondutores	33
Figura 12 - A cadeia de produção do semicondutor	35
Figura 13 - Detalhamento do tamanho do mercado de equipamentos de fabricação de semicondutores pelas principais famílias, 2019 (US\$ bilhões). ..	36
Figura 14 - Visão geral do processo de fabricação de <i>wafer</i>	39
Figura 15 – Vendas globais de semicondutores por tipo em 2019	41
Figura 16 - Vendas globais de semicondutores por área geográfica em 2019.....	43
Figura 17 - A jornada global de um processador para smartphone.....	43
Figura 18 - Mapa da cadeia de valor dos semicondutores	46
Figura 19 – Produção anual de <i>wafers</i> de silício em milhões de unidades ..	48
Figura 20 - Mapa da rede de suprimentos dos semicondutores.....	56
Figura 21 - Cadeia de suprimentos do semicondutor.	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Macros e micros etapas produtivas do semicondutor.....	46
Quadro 2 - Top 10 fabricantes de silício policristalino.	47
Quadro 3 - Top fabricantes de <i>wafers</i> de silício.	48
Quadro 4 - Top 10 melhores fornecedores de equipamentos	48
Quadro 5 - Top empresas de IP	49
Quadro 6 - Top 10 Global OSAT	50
Quadro 7 - Os elos da cadeia de suprimentos dos semicondutores	51
Quadro 8 – Classificação dos pontos críticos e seus riscos logísticos	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de produção mundial de silício (em milhares de toneladas).....	47
Tabela 2 - Top 10 Design Houses	49
Tabela 3 - Top 10 fabricantes de semicondutores.....	50
Tabela 4 - Maiores consumidores TSMC	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	<i>Application Processor</i>
ASE	<i>Advanced Semiconductor Engineering</i>
ATP	<i>Assembly, Testing, and Packaging</i>
CI	<i>Circuito Integrado</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DAO	<i>Discreto, Analógico e Outros</i>
DH	<i>Design House</i>
DRAM	<i>Dynamic random-access memory</i>
EDA	<i>Electronic Design Automation</i>
EMS	<i>Electronic Manufacturing Services</i>
EUV	<i>Extreme Ultra Violet</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Arrays</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
GVC	<i>Global Value Chain</i>
IDM	<i>Integrated Device Manufacturers</i>
IOT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Intellectual Property</i>
NAND	<i>NOT-AND</i>
ODM	<i>Original Design Manufacture</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
OSAT	<i>Outsourced Semiconductor Assembly and Test</i>
R&D	<i>Research and Development</i>
RF	<i>Radiofrequência</i>
SIP	<i>Silicon Intellectual Property</i>
SME	<i>Semiconductor Manufacturing Equipment</i>
SPIL	<i>Siliconware Precision Industries</i>
SSD	<i>Solid State Device</i>
TSMC	<i>Taiwan Semiconductor Manufacturing Company</i>
UMC	<i>United Microelectronics Corporation</i>
VSP	<i>Value Stream Maps</i>
P&D	<i>Pesquisa e Desenvolvimento</i>
PC	<i>Personal Computer</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA.....	18
1.2	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	18
1.3	OBJETIVO GERAL	18
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2	A HIERARQUIA DOS SISTEMAS DE SUPRIMENTO	19
3	METODOLOGIA	26
4	A INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES.....	28
4.1	DEFINIÇÃO DA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES	29
4.2	AS ETAPAS PRODUTIVAS DO SEMICONDUTOR.....	31
4.3	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO.....	35
4.4	MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO	37
4.5	A FABRICAÇÃO DETALHADA DE UM WAFER.....	38
4.6	A DEMANDA DO PONTO DE VISTA GEOGRÁFICO	41
4.7	A ESTRUTURA INTEGRADA GLOBAL.....	43
5	A CADEIA DE SUPRIMENTOS DOS SEMICONDUTORES.....	44
5.1	A ESTRUTURA INTEGRADA GLOBAL.....	44
5.2	ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO	45
5.3	MAPA DA CADEIA DE VALOR GLOBAL	46
5.4	OS ELOS	51
5.5	OS LIMITES DA ANÁLISE DA CADEIA.....	52
5.6	OS ELOS CRÍTICOS	53
5.7	MAPA DA REDE DE SUPRIMENTOS.....	55
5.8	MAPA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	57
5.9	ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
6	CONCLUSÕES.....	60
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A cadeia de suprimentos dos semicondutores desempenha um papel fundamental na indústria global de tecnologia, fornecendo componentes essenciais para uma ampla gama de produtos e serviços, desde data centers, laptops e telefones celulares, mas também no setor automobilístico, nas indústrias de linha branca, de lâmpadas, de sistemas de orientação de mísseis nucleares e na infraestrutura de redes elétricas (Thadani; Allen, 2023).

Dadas as tendências emergentes, como o aumento na escolha por automóveis elétricos, a expansão acelerada da Internet das Coisas, aplicações que utilizam Inteligência Artificial, bem como o crescimento das plataformas de *cloud computing*¹ e a generalização do teletrabalho, é provável que a demanda por semicondutores se intensifique consideravelmente no futuro próximo (Saxena, 2023).

Segundo projeções de um relatório da McKinsey (Burkacky; Dragon; Lehmann, 2022), caso se considere um incremento anual nos valores de 2% e uma estabilização após as flutuações recentes, o setor de semicondutores poderá atingir um valor de mercado próximo a US\$ 1 trilhão até o final da década. As áreas que mais contribuirão para esse crescimento, impulsionadas pelo uso de semicondutores, abrangem o segmento automotivo, as tecnologias de comunicação sem fio e as soluções de *cloud computing*, que juntas devem representar cerca de 70% dessa evolução.

No entanto, assim como outras cadeias produtivas, a dos semicondutores não se mostra blindada contra riscos e adversidades. Isso ficou latente durante a crise sanitária da Covid-19, quando muitas empresas fecharam por conta da necessidade do isolamento social com o objetivo de evitar a propagação da doença, acarretando atrasos e paradas no fornecimento de insumos para a fabricação de semicondutores (Frieske; Stieler, 2022). Esse fato reconfigurou as cadeias de suprimentos, modificou relações de oferta e demanda que eram até então estáveis e gerou descompassos significativos tanto na logística quanto no abastecimento (Handfield; Graham; Burns, 2020).

¹ *Cloud Computing* é o fornecimento sob demanda de serviços de computação por uma rede de comunicação, e a mais comum delas é a Internet.

Com o acelerado progresso tecnológico, a resiliência e integridade das cadeias de suprimentos tornaram-se centrais para a competitividade global e a segurança nacional de muitos países. A importância do estudo dos riscos associados à cadeia de suprimentos dos semicondutores torna-se ainda mais evidente quando se considera as ações recentes tomadas por grandes blocos econômicos, destacando a urgência e pertinência deste tema no cenário contemporâneo.

Um exemplo claro desse reconhecimento é a promulgação, em 21 de setembro de 2023, da "Lei Europeia dos Chips"(Commission, 2023). Esta legislação não só visa fortalecer a posição da Europa no domínio das tecnologias e aplicações de semicondutores, mas também busca garantir a sua resiliência diante de eventuais adversidades. Dentre os cinco objetivos principais desta lei, destaca-se o compromisso em aprofundar a compreensão das cadeias globais de fornecimento de semicondutores. Este foco explícito na necessidade de entendimento dessas cadeias demonstra uma conscientização clara dos desafios inerentes e dos riscos potenciais que podem afetar não apenas a indústria de semicondutores, mas toda a economia e infraestrutura que dela dependem.

A adoção de tal medida legislativa por uma entidade tão significativa quanto a Europa ressalta o caráter atual e premente da questão, sublinhando a necessidade de abordagens inovadoras e investigações contínuas neste domínio. A iniciativa europeia evidencia, sem dúvida, que a análise da cadeia de suprimentos dos semicondutores é não apenas relevante, mas também essencial para compreender e navegar com sucesso na paisagem tecnológica moderna.

Em meio ao panorama apresentado, identificar e gerenciar os riscos em expansão dessa cadeia de suprimentos se faz necessária. A globalização intensificou a interconectividade dessa cadeia, envolvendo múltiplos fornecedores, fabricantes, distribuidores e clientes dispersos geograficamente, torna essencial ter uma compreensão abrangente dos riscos potenciais de ruptura dessas cadeias e da adoção de medidas para mitigá-los. A identificação de riscos permite uma melhor preparação para lidar com eventos disruptivos, minimizar a ocorrência de interrupções e garantir a continuidade dos fluxos de suprimentos.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O crescente papel dos semicondutores em diversos setores torna sua cadeia de suprimentos uma área de investigação. Mas como a cadeia de suprimentos pode ser efetivamente mapeada para garantir resiliência, continuidade dos negócios e satisfação dos clientes? Embora estratégias de mitigação e tecnologias avançadas sejam importantes, é necessário um entendimento claro da cadeia (Tomas; Alcantara, 2013). No entanto, há uma lacuna significativa na literatura sobre as melhores práticas e métodos para esse mapeamento.

1.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Para esse estudo que busca compreender a cadeia dos semicondutores, não abordar todos os seus aspectos pode ser uma limitação significativa. A intrincada rede de interações que envolve diferentes países, empresas e parcerias pode apresentar nuances e especificidades em cada segmento. Assim, uma avaliação que não considera toda essa complexidade arrisca apresentar um panorama incompleto ou não representativo da realidade da cadeia de semicondutores.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste estudo é identificar riscos logísticos da cadeia de suprimentos dos semicondutores.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

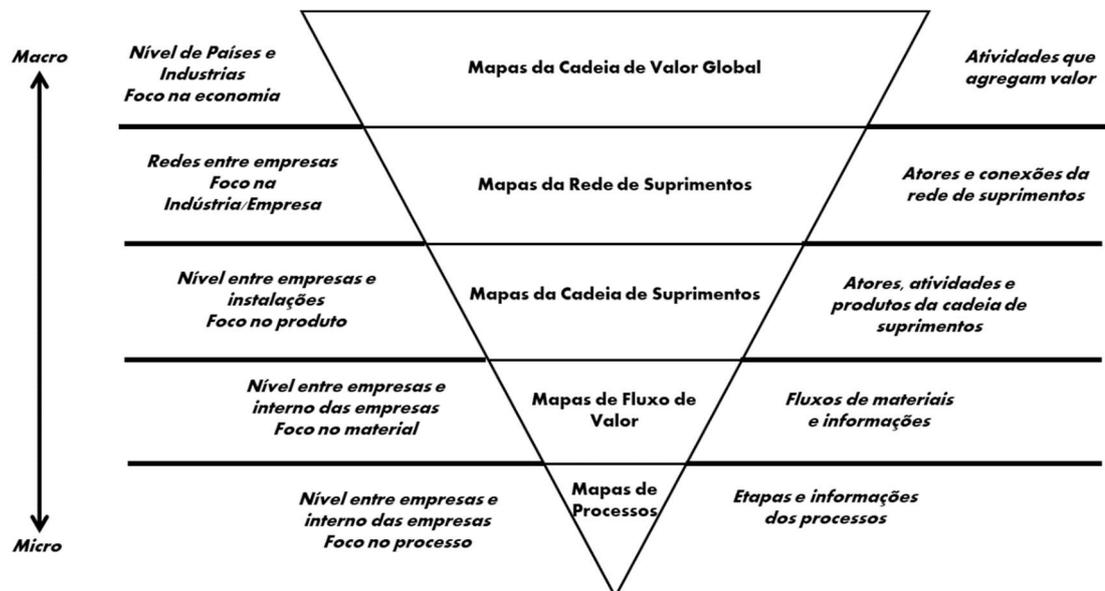
Os objetivos específicos desse trabalho são:

- a) Caracterizar os elos da cadeia de suprimentos dos semicondutores;
- b) Identificar limites da cadeia a ser analisada;
- c) Propor um modelo de representação da cadeia de suprimento dos semicondutores;
- d) Identificar riscos logísticos que afetam a cadeia de semicondutores.

2 A HIERARQUIA DOS SISTEMAS DE SUPRIMENTO

Para MacCarthy, Ahmed e Demirel (2022), existem dois elementos de informação que podem ser considerados os requisitos mínimos de dados necessários para se construir um mapa básico de uma rede de suprimentos: os atores primários e suas ligações entre si. Contudo, MacCarthy; Ahmed e Demirel, (2022) explicam que outros elementos e atributos podem ser acrescentados ao mapa dependendo do contexto e do objetivo do estudo. A localização geográfica dos principais intervenientes e das suas instalações, por exemplo, armazéns, fábricas, centros de distribuição e portos. Para fins operacionais, os dados relacionados com planos de produção, desempenho, capacidades e capacidades de produção, objetivos, ferramentas e recursos (modos de transporte, tecnologias como sistemas de TI) e sua propriedade, incluindo direitos de propriedade intelectual. Além disso, os fluxos de materiais são normalmente incorporados em mapas táticos/operacionais, onde são identificadas as durações das diferentes etapas de produção ou logística.

Figura 1 - Hierarquia para mapeamento dos sistemas de suprimentos.



Fonte: Adaptado de MacCarthy, Ahmed e Demirel (2022).

Para se obter mais informações sobre o problema do que incluir, (MacCarthy; Ahmed; Demirel, 2022) aponta discutir duas questões: (i) a unidade de

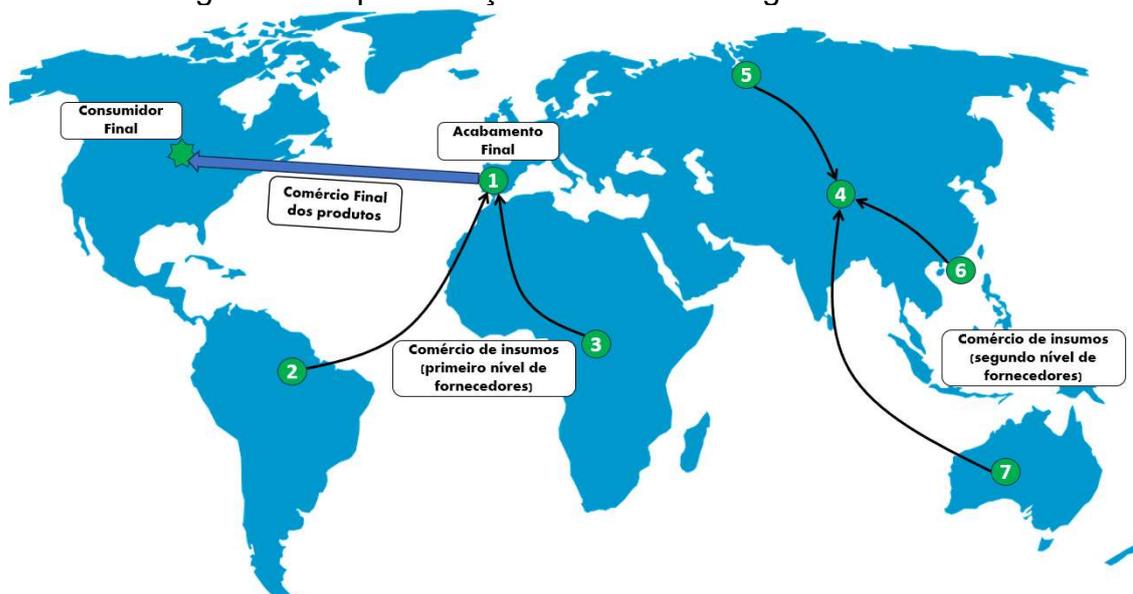
análise ou a extensão de um mapa, ou seja, os limites do sistema de abastecimento mapeados e, (ii) o nível de detalhe ou granularidade da informação capturada.

Com o intuito de abordar essa complexidade, MacCarthy, Ahmed e Demirel (2022) desenvolveram uma classificação estruturada de mapas empregando uma perspectiva hierárquica dos sistemas de suprimentos, conforme demonstrado na Figura 1.

Os mapas podem ser desenvolvidos para muitos fins diferentes e o mapeamento da cadeia de suprimentos tem sido utilizado como um termo abrangente para mapas em diferentes níveis de agregação. O mapeamento estratégico da cadeia de suprimentos contrasta com o mapeamento de processos táticos/operacionais, mas é omissa principalmente sobre as subcategorias de mapas estratégicos da cadeia de suprimentos (MacCarthy; Ahmed; Demirel, 2022).

Em uma ampla perspectiva, um mapa da cadeia de valor global ou *Global Value Chain* (GVC) oferece uma visão integrada das redes de produção mundial e das correntes comerciais de bens ou setores em escala global, exemplificada na Figura 2. Normalmente, as unidades nesses mapas de GVC estão relacionadas aos países e às indústrias. Estes mapas detalham as etapas de adição de valor que ocorrem em uma escala global e mostram a posição de países e regiões nessa cadeia, ressaltando a ideia de comércio de valor agregado. Eles são relevantes para tratar de questões políticas e econômicas, e dão uma visão geral para sistemas de fornecimento mapeados em detalhes mais específicos (MacCarthy; Ahmed; Demirel, 2022).

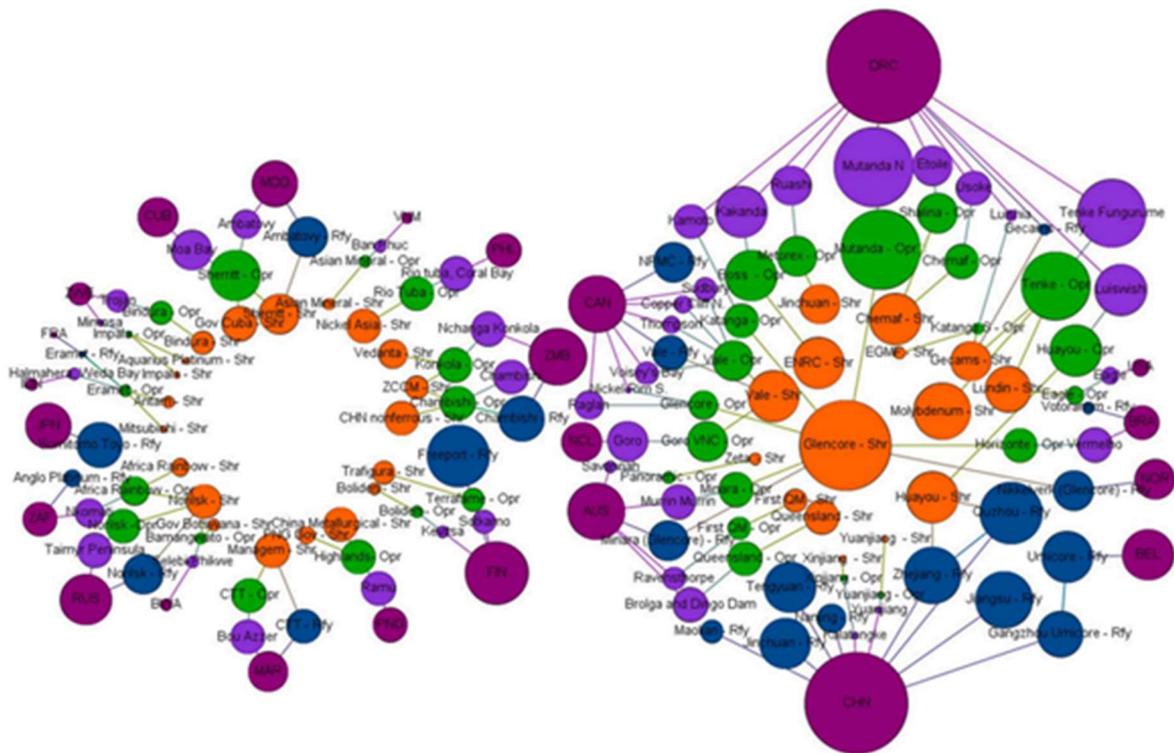
Figura 2 - Representação de uma cadeia global de valor.



Fonte: Adaptado de Azeredo (2018).

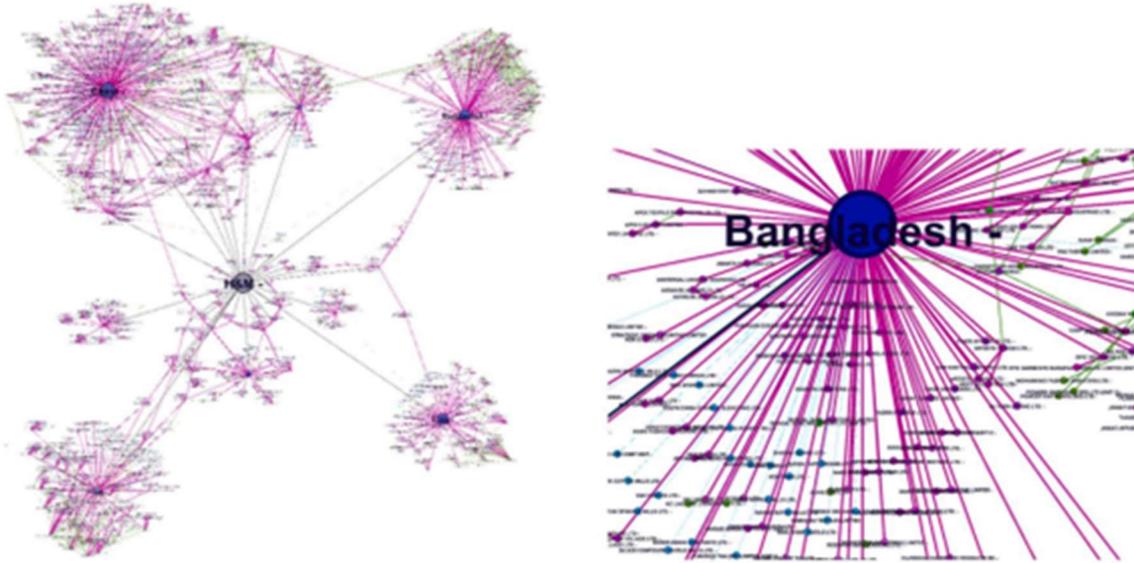
Em um nível inferior, produtos e serviços são gerados por meio de cadeias de suprimento complexa e com múltiplos níveis entre diferentes empresas, como observado nas Figuras 3 e 4. Essas cadeias englobam tanto as atividades que adicionam quanto as que não adicionam valor, além das partes que participam do processo desde a concepção, fabricação, entrega até a distribuição de produtos e serviços. Essas redes podem se concentrar em uma indústria específica ou em uma única empresa, mas em qualquer cenário, elas abordam entidades no contexto empresarial. O mapeamento dessas redes foca na análise da sua estrutura (quais entidades estão ligadas a quais) com objetivos estratégicos (MacCarthy; Ahmed; Demirel, 2022).

Figura 3 - Rede de Suprimentos do Cobalto.



Fonte: Brink et al. (2020).

Figura 4 - Rede de suprimentos da H&M.

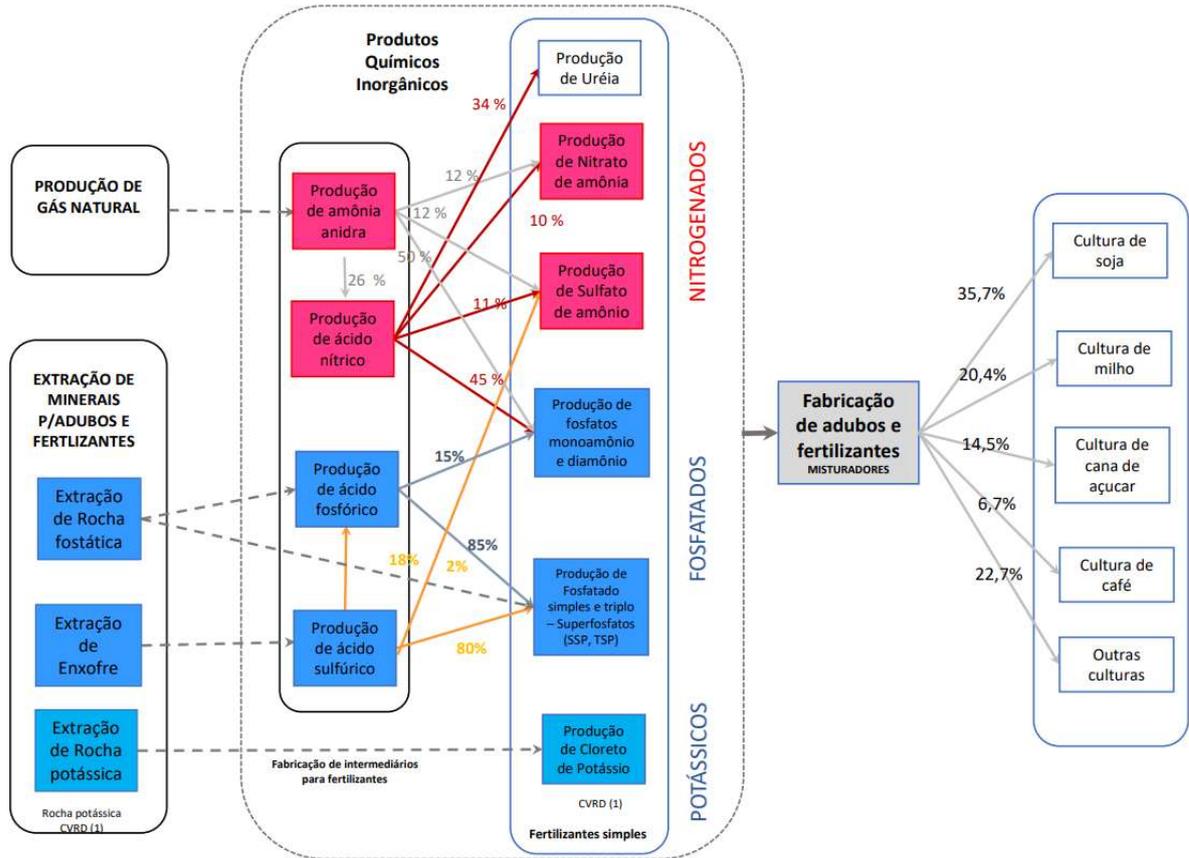


Fonte: MacCarthy, Ahmed e Demirel (2022).

Para MacCarthy, Ahmed e Demirel (2022), o conceito de "mapa da cadeia de suprimentos" fora utilizado de maneira não muito exata em outros estudos, assim, apresentaram uma definição mais precisa. Ele difere tanto do mapeamento da cadeia de valor global quanto do mapeamento da rede de suprimentos. Essa cadeia é vista como uma parte específica de uma rede de suprimentos mais extensa, concentrada em um produto ou conjunto de produtos específicos. As operações, movimentações de materiais e os intervenientes estão ligados à produção e/ou distribuição do produto, incluindo suas partes, componentes e matérias-primas, exemplificada nas Figuras 5 e 6.

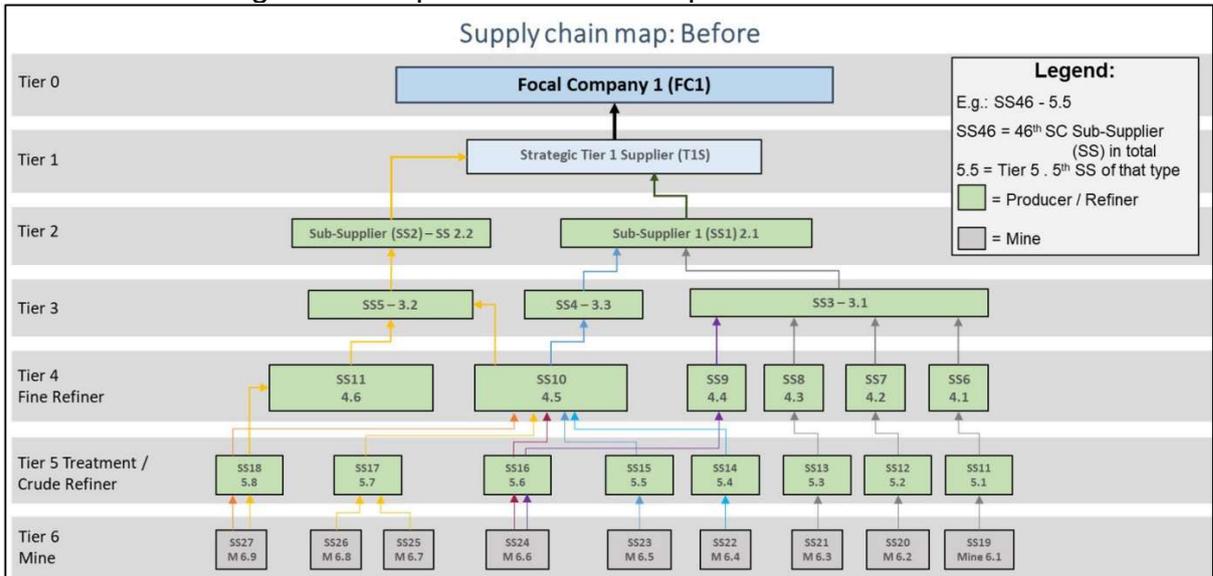
Em um nível mais refinado de granularidade, variados modelos de mapas podem ser criados conforme diferentes objetivos. Técnicas como o Mapeamento do Fluxo de Valor ou *Value Stream Maps* (VSP) e o Mapeamento de Processos, Figuras 7 e 8, são frequentemente utilizadas para representar fluxos de materiais, informações e operações empresariais, seja internamente ou em relações entre comprador e fornecedor. Enquanto o VSP busca identificar atividades que trazem valor e minimizar desperdícios através do planejamento tático, o Mapeamento de Processos detalha as etapas de um processo específico, servindo como base tanto para o VSP quanto para a reestruturação de processos empresariais (MacCarthy; Ahmed; Demirel, 2022).

Figura 5 - Mapa da cadeia de suprimentos dos fertilizantes.



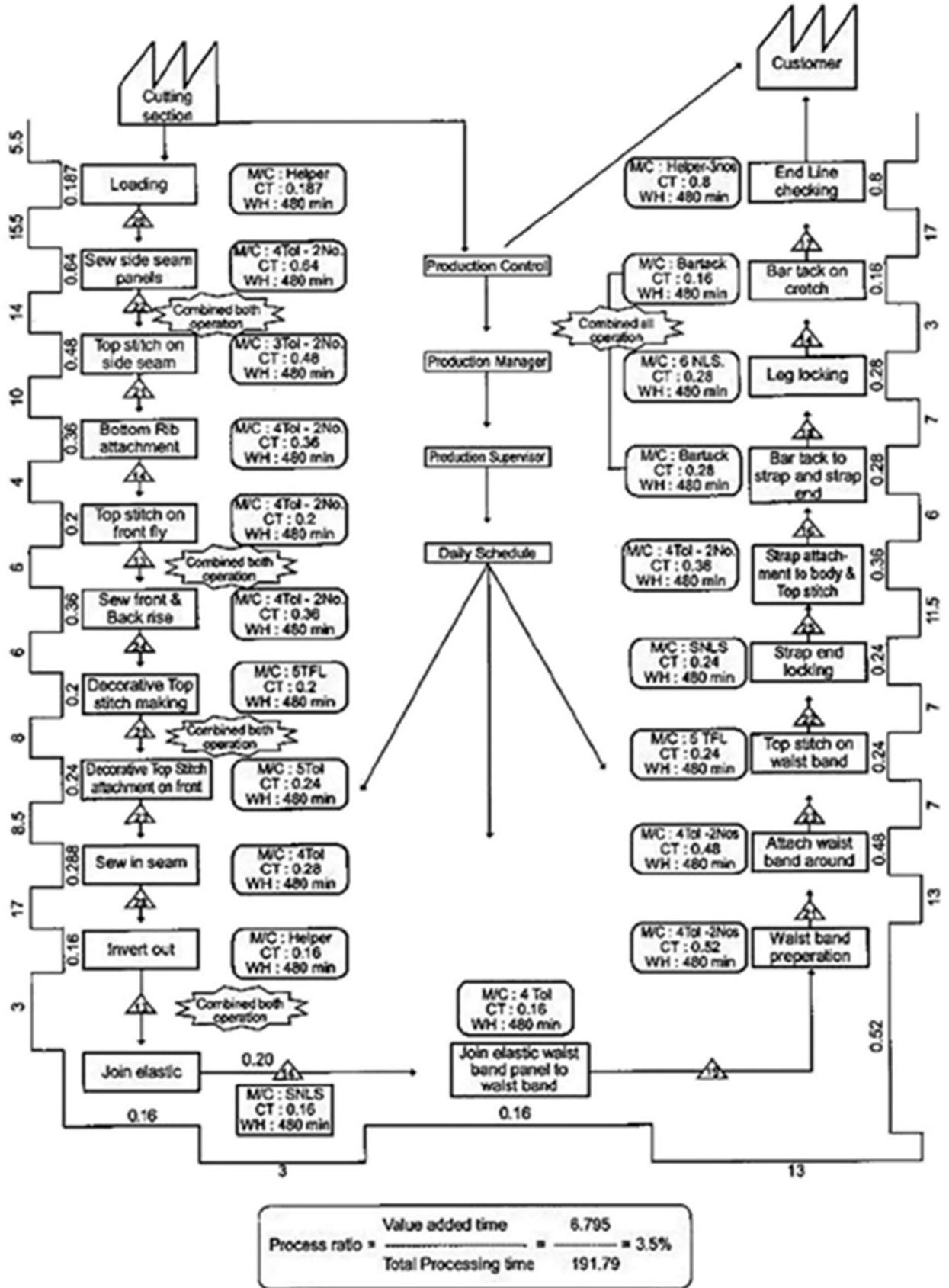
Fonte: Luna (2023).

Figura 6 - Mapa da cadeia de suprimentos do cobalto.



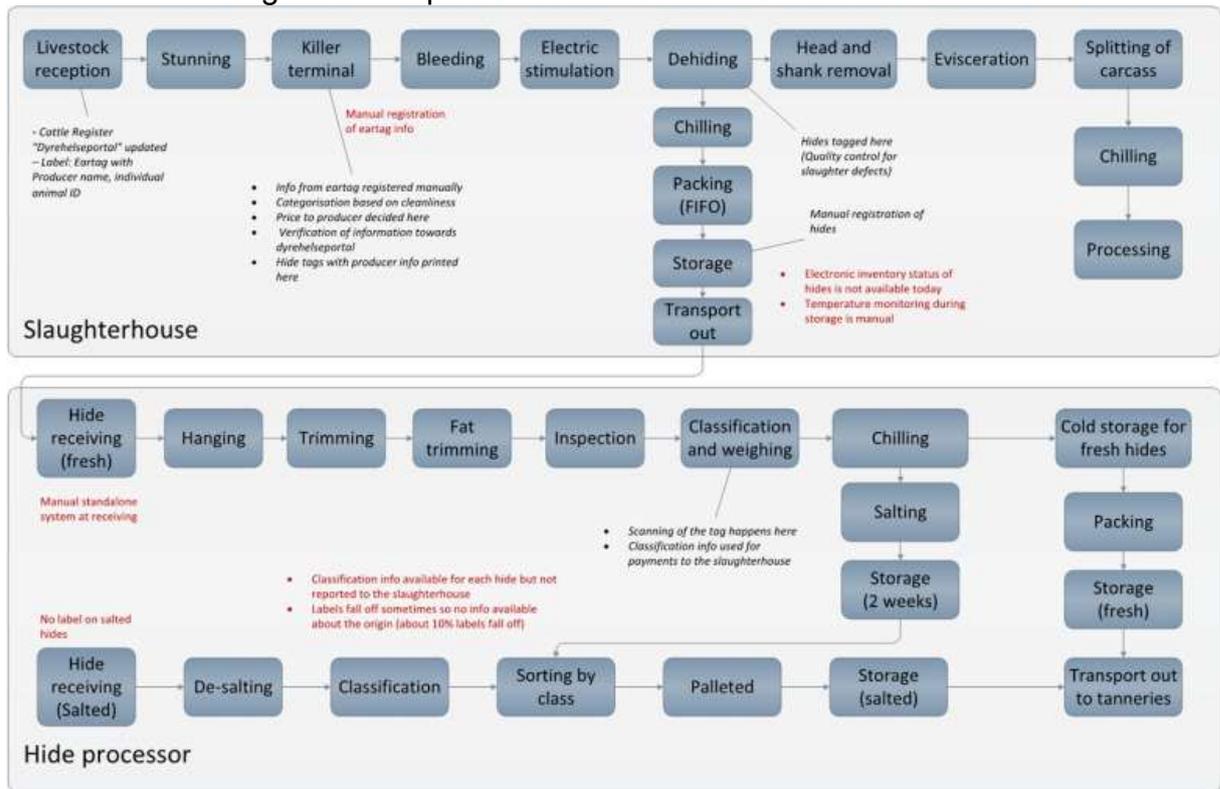
Fonte: Fraser, Müller e Schwarzkopf (2020).

Figura 7 - Mapa de fluxo de valor para uma linha de produção têxtil.



Fonte: Kumar (2016).

Figura 8 - Mapa de Processos de abate e curtimento.



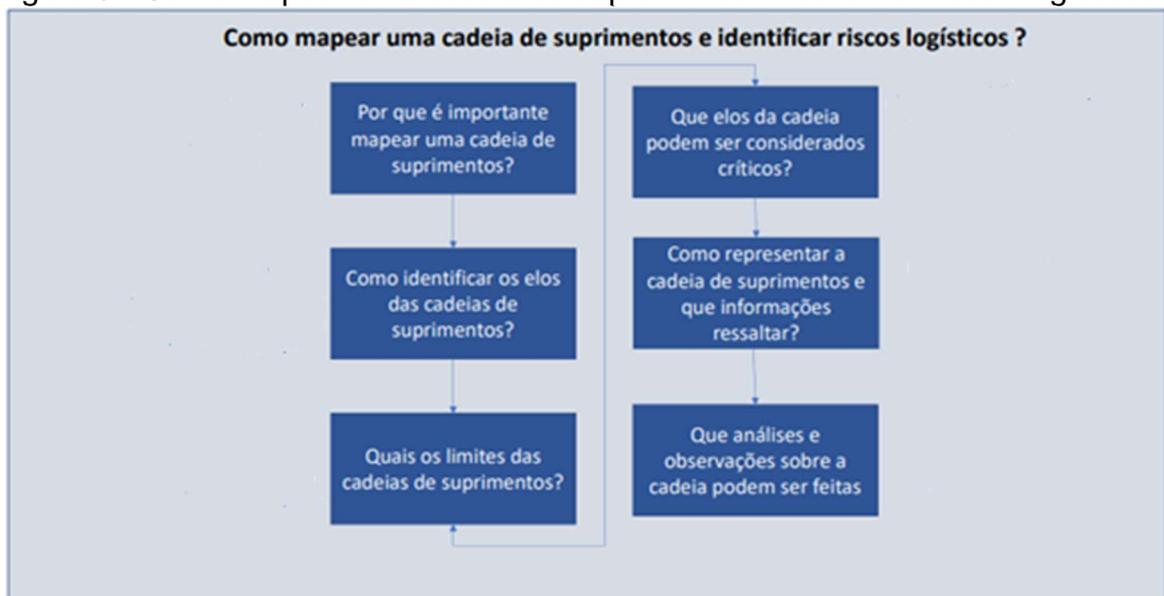
Fonte: Thakur et al. (2020).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho pode ser caracterizado como "um estudo descritivo e exploratório que busca compreender em profundidade a cadeia de suprimentos dos semicondutores, identificando seus elos críticos e potenciais riscos logísticos associados.

Os procedimentos metodológicos adotados neste estudo estão embasados no trabalho de Luna (2023), que sugere uma sequência de etapas que devem ser consideradas ao realizar o mapeamento de uma cadeia de suprimentos visando à identificação de riscos logísticos (Figura 9). É válido destacar que as etapas propostas em Luna (2023) foram adaptadas em função dos objetivos desse estudo e das especificidades da indústria de semicondutores.

Figura 9 - Como mapear uma cadeia de suprimentos e identificar riscos logísticos?



Fonte: Adaptado de Luna (2023).

A primeira etapa tem o objetivo de destacar a importância da cadeia de suprimentos dos semicondutores e a necessidade de identificar os vários elos que formam essa cadeia, como forma de avaliar a dependência entre esses e os riscos associados a rupturas. O capítulo da Introdução apresenta a importância dessa cadeia no atual contexto, apresentando dados de projeções de mercado e de sua importância estratégica.

A segunda etapa visa a descrever a cadeia de semicondutores, identificando as organizações que a formam. Para tanto, dados são obtidos por meio de revisão bibliográfica – artigos científicos, livros, relatórios técnicos – e em pesquisa em páginas da Internet – sites de empresas, reportagens, – foram usados para identificar os principais tipos de semicondutores, o processo produtivo, os equipamentos usados por essa indústria, a fim de identificar os principais elos dessa cadeia e descrever as atividades que cada um desses desempenha. Nessa etapa, também é realizado um levantamento das principais empresas que se destacam em cada elo da cadeia de semicondutores, caracterizada como uma cadeia global.

Tendo em vista que a cadeia de semicondutores é formada por muitas empresas, o que, de fato, caracteriza uma rede complexa, a definição dos limites dessa cadeia consiste no objetivo da terceira etapa. Na seção 5, discute-se as dimensões dessa cadeia e os limites considerados nesse estudo. Por exemplo, embora os semicondutores sejam usados na indústria automobilística, de eletroeletrônicos, indústria bélica e várias outras, não é feita uma análise desses clientes da indústria de semicondutores.

Após mapeada a cadeia de semicondutores, é feita uma análise dos elos considerados críticos, em termos de riscos de rupturas. Para tanto, a identificação das empresas que atuam em cada etapa do processo produtivo, sua participação de mercado e localização são alguns dados considerados nessa análise. Esses dados são tratados e mostrados em tabelas e figuras na seção 5.3. A representação da cadeia é feita na quinta etapa por meio de um esquema que mostra a relação entre as organizações mais relevantes nessa cadeia, fornecedoras e clientes.

Por fim, a última etapa, trata de uma análise dos dados coletados e tratados nas etapas anteriores, que identifica quais os principais riscos logísticos da cadeia de semicondutores.

4A INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES

A indústria de semicondutores é uma das mais relevantes e dinâmicas no mundo hoje. Sua importância está relacionada às crescentes possibilidades de aplicação dos componentes semicondutores, que não se restringem mais às indústrias eletrônica e de telecomunicações. Os semicondutores estão no âmago não apenas da era da informação e da comunicação, como também da indústria 4.0².

A importância da indústria de semicondutores ainda se relaciona ao significativo impacto que a evolução tecnológica do setor tem sobre a produtividade de todos os demais setores da economia, uma vez que a crescente capacidade de processamento e armazenamento foi acompanhada por custo decrescente (Filippin, 2020).

Em sua entrevista a Semiconductors.org (SIA America, 2021), Susie Armstrong, vice-presidente Sênior da empresa Qualcomm, uma das maiores no setor de tecnologia no mundo, narra a importância da pesquisa e desenvolvimento no setor de semicondutores. Segundo Susie, ao longo de 30 anos só a Qualcomm investiu mais de US\$67 bilhões em *Research and Development* (R&D)³ e no mesmo período já foram registradas ou solicitadas mais de 140 mil patentes de produtos (SIA America, 2021). Seguindo a entrevista, Susie demonstra como a evolução da tecnologia transformou a forma de como o mundo se conecta, computa e se comunica, exemplificando com a digitalização das comunicações móveis, de analógico para digital, com a redefinição da computação, passando de desktops para smartphones, com a transformação da indústria utilizando a tecnologia wireless, e no momento o 5G, que será o maior disseminador da *Internet of Things* (IOT)⁴ (Armstrong, 2021).

² Também chamada de Quarta Revolução Industrial, engloba um amplo sistema de tecnologias avançadas como inteligência artificial, robótica, internet das coisas e computação em nuvem que estão mudando as formas de produção e os modelos de negócios no Brasil e no mundo. (Industria, 2023).

³ *Research and Development* ou Pesquisa e Desenvolvimento.

⁴ Termo em inglês, *Internet of things*, significa internet das coisas.

4.1 DEFINIÇÃO DA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES

Os semicondutores são componentes altamente especializados que fornecem a funcionalidade essencial para dispositivos eletrônicos processarem, armazenarem e transmitirem dados. A maioria dos semicondutores atuais são circuitos integrados, também conhecidos como “chips”. Um chip é um conjunto de circuitos eletrônicos miniaturizados compostos por dispositivos discretos ativos (transistores, diodos), dispositivos passivos (capacitores, resistores) e as interconexões entre eles. Os chips modernos são minúsculos, empacotando bilhões de componentes eletrônicos em uma área tão pequena quanto apenas alguns milímetros quadrados (Varas et al, 2021).

Embora a taxonomia relativa às categorias de produtos da indústria de semicondutores descreva mais de 30 tipos, podem ser identificadas três grandes categorias segundo (Varas et al, 2021), quais sejam: lógicos; memória e; os discretos, analógicos e outros.

Os produtos lógicos, que representam 42% da receita dessa indústria, são circuitos integrados que funcionam com códigos binários (0 e 1) que servem como os blocos de construção fundamentais ou “cérebros” da computação. Esses incluem:

- a) Microprocessadores como *Central Processing Unit (CPU)*⁵, *Graphics Processing Unit (GPU)*⁶ e *Application Processor (AP)*⁷, que processam instruções fixas armazenadas em dispositivos de memória para executar operações de computação complexas usados em telefones celulares, computadores pessoais, servidores, sistemas de inteligência artificial e supercomputadores;
- b) Produtos lógicos de uso geral, como *Field Programmable Gate Arrays (FPGA)*⁸, que não contêm nenhuma instrução pré-fixada e permitem que um usuário programe operações lógicas personalizadas;

⁵ Termo em inglês que significa unidade de processamento central.

⁶ Termo em inglês que significa unidade de processamento gráfica.

⁷ Termo em inglês que significa processadores de aplicativos.

⁸ Termo em inglês que significa matriz de portas programáveis.

- c) Microcontroladores, que são pequenos computadores em um único chip. podendo conter um ou mais núcleos de processador juntamente com memória e periféricos de entrada/saída programáveis e são usados para executar tarefas básicas de computação em inúmeros produtos eletrônicos, como carros, equipamentos de automação industrial ou eletrodomésticos;
- d) Produtos de conectividade, como modems celulares, chips WiFi ou Bluetooth ou controladores Ethernet, que permitem que dispositivos eletrônicos se conectem a uma rede sem fio ou com fio para transmitir ou receber dados.

Os produtos de Memória (26% das receitas da indústria) são semicondutores usados para armazenar informações necessárias para realizar qualquer computação. Os computadores processam informações armazenadas em sua memória, que consiste em vários dispositivos de armazenamento de dados ou memória. Duas memórias de semicondutores mais usadas atualmente são a *Dynamic random-access memory* (DRAM)⁹ e a memória *NOT-AND* (NAND)¹⁰:

- a) a DRAM é usada para armazenar os dados ou código de programa necessários para o funcionamento de um processador de computador, sendo normalmente encontrada em computadores pessoais (PCs) e servidores, além de smartphones e aplicativos eletrônicos automotivos, como sistemas avançados de assistência ao motorista.
- b) A memória NAND, por sua vez, é o tipo mais comum de memória flash, e, ao contrário da DRAM, não precisa de energia para reter dados, sendo usada para armazenamento permanente – as aplicações típicas incluem unidades de estado sólido ou *Solid State Device* (SSD) usadas como discos rígidos de laptop ou cartões digitais seguros usados em dispositivos portáteis.

⁹ Termo em inglês que significa memória dinâmica de acesso aleatório.

¹⁰ Um tipo de memória de computador não-volátil.

Os Discreto, Analógico e Outros (DAO) (32% das receitas da indústria): São semicondutores que transmitem, recebem e transformam informações tratando de parâmetros contínuos como temperatura e tensão:

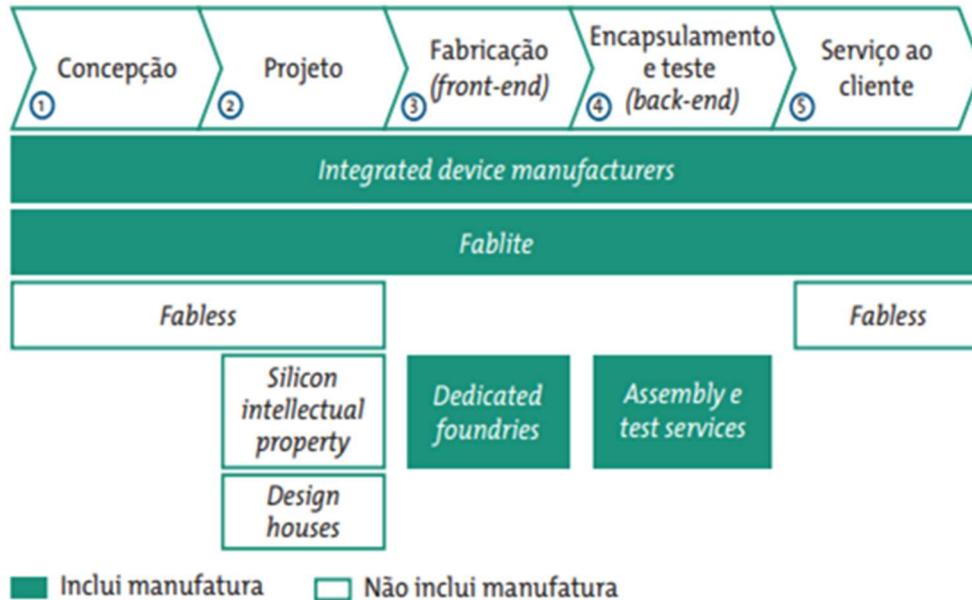
- a) Os produtos discretos incluem diodos e transistores projetados para executar uma única função elétrica;
- b) Os produtos analógicos incluem reguladores de tensão e conversores de dados, que convertem sinais analógicos de fontes como voz em sinais digitais, e os circuitos integrados de gerenciamento de energia encontrados em qualquer tipo de dispositivo eletrônico e semicondutores de radiofrequência (RF), que permitem que os smartphones recebam e processem os sinais de rádio provenientes das estações-base das redes celulares;
- c) Outros produtos incluem optoeletrônicos, como sensores ópticos para detectar a luz usada em câmeras, bem como uma ampla variedade de sensores e atuadores não ópticos que podem ser encontrados em todos os tipos de dispositivos da Internet das Coisas.

4.2 AS ETAPAS PRODUTIVAS DO SEMICONDUTOR

Segundo Filippin (2020), a produção de um semicondutor pode ser dividida em cinco etapas (Figura 10), quais sejam:

- a) Concepção do produto, que pode ou não ser realizada em conjunto com o fabricante do bem final e que é a etapa na qual são definidas as funcionalidades do chip;
- b) Projeto ou design do componente;
- c) Fabricação do componente, ou *front-end*;
- d) Teste, afinamento, corte e encapsulamento/montagem do componente, ou *back-end*;
- e) Serviço ao cliente.

Figura 10 - Cadeia produtiva e modelos de negócios da indústria de semicondutores



Fonte: Filippin (2020).

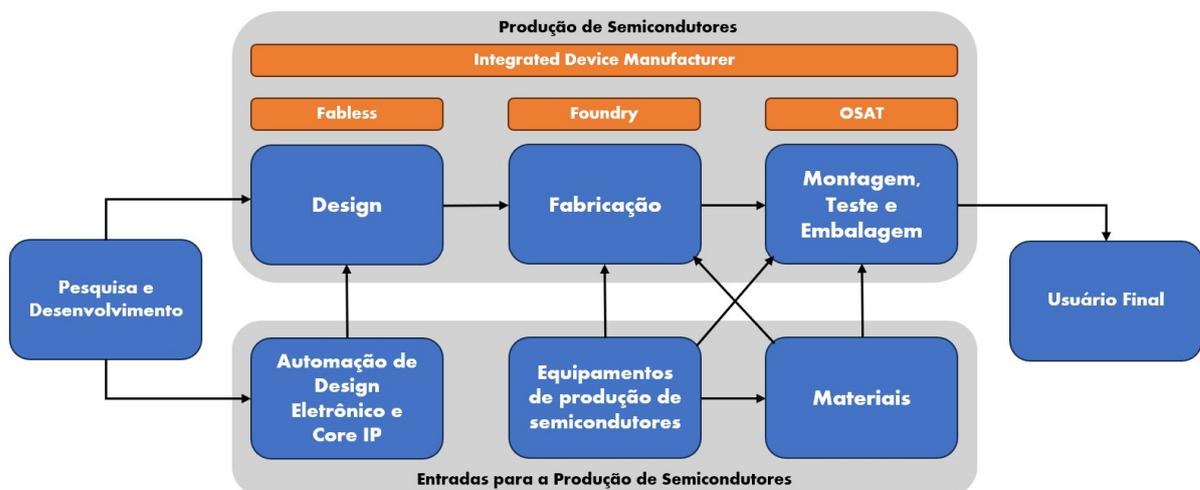
As empresas que atuam nesse setor podem adotar variados modelos de negócios, a depender de quais etapas dentre as descritas acima a empresa realiza. Filippin (2020) denomina essas empresas como:

- a) Fabricantes integrados ou, no original, *integrated device manufacturers* (IDM), quando realizam todas as etapas da produção do CI, e o produto leva a sua marca, tais como a Intel Corporation (EUA), a Samsung Electronics (Coreia do Sul) e a Micron Technology (EUA);
- b) Empresas sem fábrica ou *fabless*, quando realizam todas as etapas, exceto as que envolvem manufatura (*front-end* e *back-end*), como é o caso da Qualcomm (EUA), a Broadcom (EUA) e a AMD (EUA);
- c) Empresas *fablite*, quando realizam todas as etapas de produção de CIs em determinadas geometrias e terceirizam a fabricação de CIs em outras geometrias, geralmente menores e mais modernas. Esse modelo também pode ser identificado como *fabless with manufacturing capability*. As principais empresas *fablite* são a Texas Instruments (TI) (EUA), a NXP (Países Baixos) e a Infineon Technologies (Alemanha);

- d) Fabricantes dedicados, ou *pure-play foundries*, que realizam apenas a etapa de fabricação (front-end) são a Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) (Taiwan), a Globalfoundries (EUA) e a UMC (Taiwan) e as principais de *back-end* são a Advanced Semiconductor Engineering (ASE) (Taiwan), a Amkor Technology (EUA) e a Siliconware Precision Industries (SPIL) (Taiwan);
- e) Empresas de projeto independentes ou DH, quando contratadas por outras empresas (IDMs, empresas *fablite* ou empresas *fabless*) para realizar apenas a etapa de design do componente sem que sua marca conste no produto;
- f) Empresas de propriedade intelectual em silício (SIP) ou *silicon intellectual property companies*, como a Synopsys (EUA), a ARM Holdings (Inglaterra), a Rambus (EUA) e a MIPS Technologies (EUA), quando desenvolvem bibliotecas de células para o design de componentes e as vendem ou licenciam para IDMs, empresas *fablite*, empresas *fabless* ou DH).

Para Khan, Mann e Peterson (2021), a cadeia de suprimentos dos semicondutores inclui sete setores como apresentado na Figura 11.

Figura 11 - A cadeia de suprimentos dos semicondutores



Fonte: Adaptado de Khan, Mann e Peterson (2021).

Pesquisa e desenvolvimento avançam todos os setores da cadeia de suprimentos. Isto inclui pesquisa exploratória pré-competitiva sobre tecnologias fundamentais e pesquisa competitiva avançando diretamente na vanguarda da tecnologia de semicondutores (Khan; Mann; Peterson, 2021).

A produção envolve três etapas principais: projeto, fabricação e montagem, testes e embalagem ou *Assembly, Testing, and Packaging* (ATP). Essas etapas ocorrem em uma única empresa - um fabricante de dispositivo integrado (IDM) que vende o chip - ou em empresas separadas, onde uma empresa sem fábrica projeta e vende o chip e compra serviços de fabricação de uma fundição e serviços de ATP de uma empresa terceirizada de montagem e teste de semicondutores ou *Outsourced Semiconductor Assembly and Test* (OSAT). A produção requer vários insumos: materiais, equipamentos de fabricação de semicondutores ou *Semiconductor Manufacturing Equipment* (SME), automação de design eletrônico ou *Electronic Design Automation* (EDA) e propriedade intelectual principal ou *Intellectual Property* (IP) (Khan; Mann; Peterson, 2021).

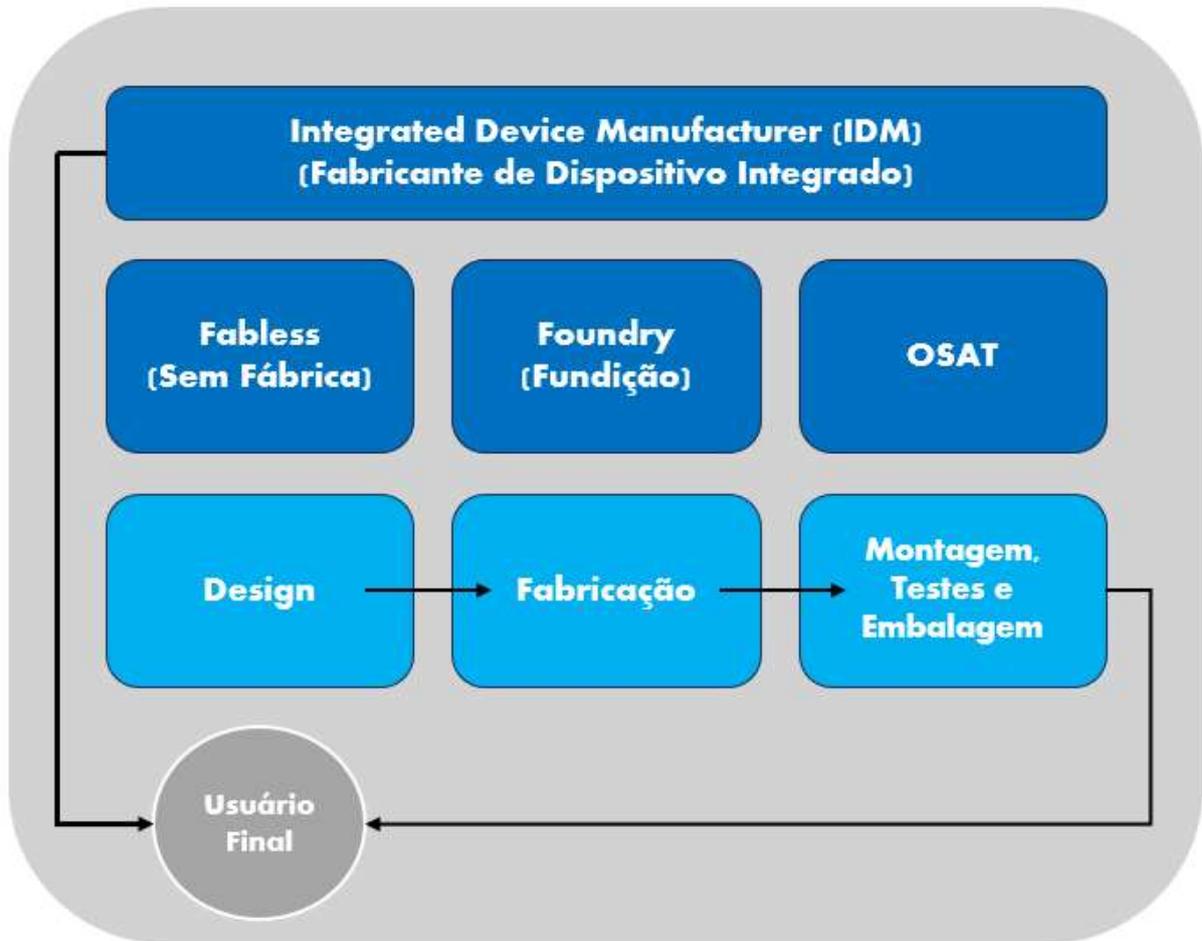
O design, envolve especificação, design lógico, design físico e validação e verificação. A especificação determina como o chip deve operar no sistema. O design lógico cria um modelo esquemático de interconexão componentes elétricos. O design físico traduz este modelo para um físico layout de componentes elétricos e interconexões, os fios que conectam componentes. A validação e a verificação garantem que os chips com base no design serão operar conforme o esperado (Khan; Mann; Peterson, 2021).

A fabricação transforma projetos em chips. Cada chip é montado em um quadro com fios que conectam o chip a dispositivos externos e são colocados em um invólucro protetor. O chip também é testado para garantir que funcione como pretendido (Khan; Mann; Peterson, 2021).

O uso final envolve a distribuição de chips para integração em produtos como, smartphones, laptops, servidores, equipamentos de comunicação e automóveis, entre outros (Khan; Mann; Peterson, 2021).

Para Guedes (2022), a produção de semicondutores compreende três etapas principais: design; fabricação; e montagem, teste e embalagem (Figura 12).

Figura 12 - A cadeia de produção do semicondutor



Fonte: Adaptado de Guedes (2022).

4.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO

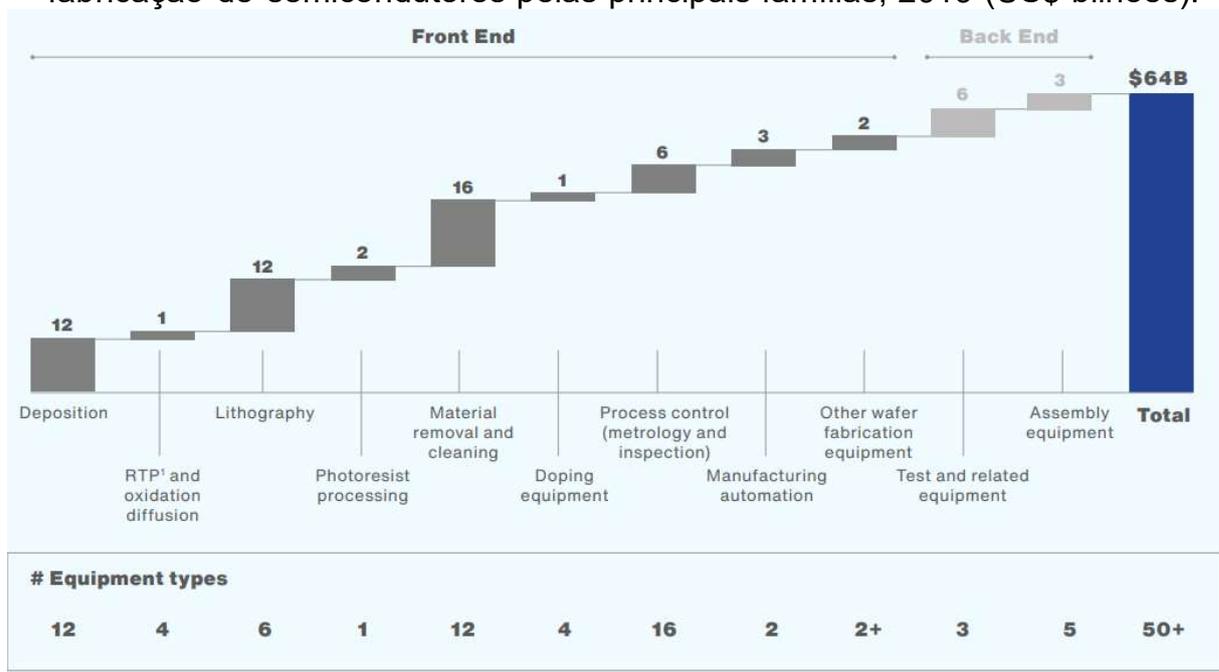
A fabricação de semicondutores usa mais de 50 tipos diferentes de sofisticados equipamentos de processamento e teste de *wafer* fornecidos por fornecedores especializados para cada etapa do processo de fabricação (Figura 13).

As ferramentas de litografia representam um dos maiores gastos de capital para fabricantes e determinam o quão avançado um chip pode ser produzido por uma fábrica. Equipamentos de litografia avançados, especificamente aqueles que utilizam a tecnologia *Extreme Ultra Violet* (EUV) são necessários para fabricar chips de 7 nanômetros ou menos (Varas et al, 2021).

Os equipamentos de metrologia e inspeção também são críticos para o gerenciamento do processo de fabricação de semicondutores. Como o processo envolve centenas de etapas ao longo de um a dois meses, se algum defeito ocorrer

no início do processo, todo o trabalho realizado nas etapas subsequentes e demoradas será desperdiçado. Rigorosos processos de metrologia e inspeção usando equipamentos especializados são, portanto, estabelecidos em pontos críticos do processo de fabricação de semicondutores para garantir que um determinado rendimento possa ser confirmado e mantido (Varas et al, 2021).

Figura 13 - Detalhamento do tamanho do mercado de equipamentos de fabricação de semicondutores pelas principais famílias, 2019 (US\$ bilhões).



Fonte: Varas et al. (2021).

As fábricas modernas também possuem sistemas avançados de automação e controle de processo para controle direto de equipamentos, transporte automatizado de materiais e despacho de lotes em tempo real, com muitas das instalações mais novas quase totalmente automatizadas (Varas et al, 2021).

O equipamento de fabricação de semicondutores também incorpora muitos subsistemas e componentes com funcionalidade específica, como subsistemas ópticos ou de vácuo, gerenciamento de gás e fluido, gerenciamento térmico ou manuseio de *wafer*. Esses subsistemas são fornecidos por centenas de fornecedores especializados.

Desenvolver e fabricar tais equipamentos de manufatura avançados e de alta precisão também requer grandes investimentos em P&D. As empresas de equipamentos de fabricação de semicondutores normalmente investem de 10 a 15% de suas receitas em P&D. Os fornecedores gerais de fabricantes de equipamentos de semicondutores representaram 9% da P&D e 11% do valor agregado da indústria em 2019 (Varas et al, 2021).

4.4 MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO

As empresas envolvidas na fabricação de semicondutores também contam com fornecedores especializados de materiais. A fabricação de semicondutores usa até 300 insumos diferentes, muitos dos quais também exigem tecnologia para produzir. Por exemplo, o polissilício empregado para fazer o lingote de silício que posteriormente é cortado em *wafers* deve ter um nível de pureza 1.000 vezes maior do que o nível exigido para painéis de energia solar e é fornecido principalmente por apenas quatro empresas, com uma combinação de quota de mercado global acima de 90.

Segundo (Varas et al, 2021), os principais materiais *front-end* incluem:

- a) Polissilício, um silício de grau metalúrgico em níveis de pureza ultra refinados, adequado para uso na produção de *wafers* semicondutores;
- b) bolachas de silício, quando o polissilício é derretido, formado em lingotes de cristal único, então cortados em bolachas, limpos, polidos e oxidados em preparação para impressão de circuito nas instalações de fabricação;
- c) fotomáscara, uma placa coberta com padrões usados no processo de litografia, cujos padrões consistem em áreas opacas e claras que impedem ou permitem a passagem da luz;
- d) fotorresistor, um material especial que sofre uma reação química após a exposição à luz. Os *wafers* de silício são cobertos com uma camada fotorresistente, impressa com os padrões contidos na fotomáscara durante o processo de litografia;
- e) produtos químicos de processamento úmido, os quais são usados nas etapas de corrosão e limpeza do processo de fabricação de semicondutores e incluem solventes, ácidos, ácidos, decapantes e outros produtos;
- f) gases, usados para proteger os *wafers* da exposição atmosférica no processo de fabricação de semicondutores como dopantes, agentes corrosivos secos e na deposição química de vapor;

- g) pastas de Planarização Mecânica Química (CMP), que são materiais usados para polir a superfície do *wafer* após a etapa de deposição do filme para fornecer uma superfície plana.

Os materiais de *back-end* incluem *leadframes*, substratos orgânicos, embalagens de cerâmica, resinas de encapsulamento, fios de ligação e materiais de fixação de matriz. Eles normalmente têm barreiras técnicas relativamente mais baixas para produzir em comparação com os materiais de fabricação de *wafer* descritos acima.

A produção desses materiais altamente especializados é feita em grandes fábricas, que também demandam altos investimentos. O gasto de capital anual dos principais fornecedores globais de *wafers* de silício, fotorresistores ou gases varia normalmente entre 13 e 20% de suas receitas. No geral, os fornecedores de materiais contribuíram com 6% do total das despesas de capital e representaram 5% do valor agregado da indústria em 2019 (Varas et al, 2021).

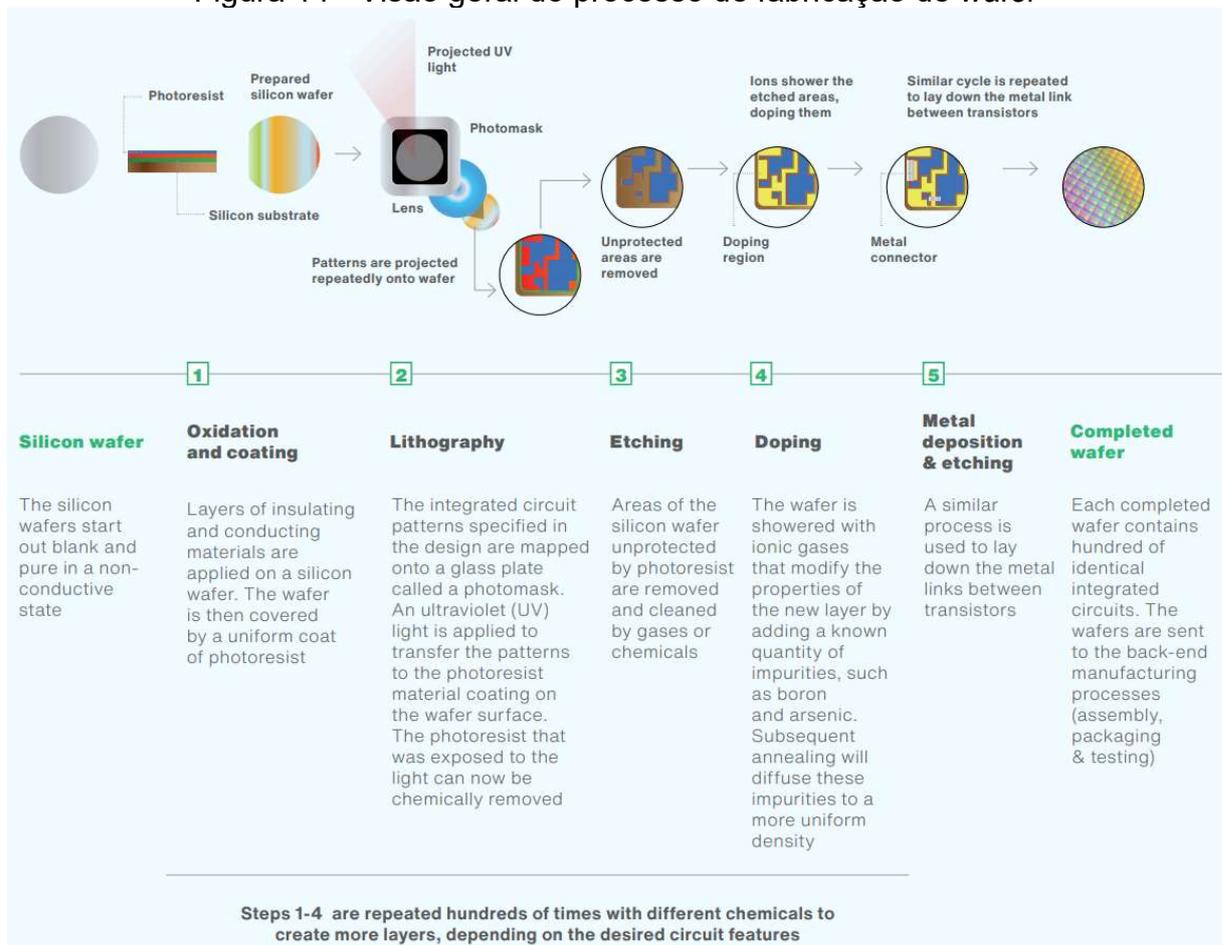
4.5 A FABRICAÇÃO DETALHADA DE UM WAFER

Instalações de fabricação de semicondutores altamente especializadas, normalmente chamadas de “fabs”, imprimem os circuitos integrados em escala nanométrica do design do chip em *wafers* de silício. Cada *wafer* contém vários chips do mesmo design. O número real de chips por *wafer* depende do tamanho do chip específico: pode variar entre centenas de processadores grandes e complexos que alimentam computadores ou smartphones, até centenas de milhares de pequenos chips destinados a executar uma função simples.

Para Varas et al (2021), o processo de fabricação é intrincado e requer insumos e equipamentos altamente especializados para atingir a precisão necessária em escala miniatura. Os circuitos integrados são construídos em salas limpas, projetadas para manter condições estéreis para evitar a contaminação por partículas no ar que possam alterar as propriedades dos materiais que compõem os circuitos eletrônicos. Para comparação, o ar ambiente externo em uma área urbana típica contém 35.000.000 partículas de 0,5 micron ou maiores em tamanho para cada metro cúbico, enquanto uma sala limpa de fabricação de semicondutores

permite absolutamente zero partículas desse tamanho. Dependendo do produto específico, há de 400 a 1.400 etapas no processo geral de fabricação de *wafers* semicondutores. O tempo médio para fabricar *wafers* semicondutores acabados, conhecido como tempo de ciclo, é de cerca de 12 semanas, mas pode levar de 14 a 20 semanas para ser concluído em processos avançados. Ele utiliza centenas de insumos diferentes, incluindo *wafers* brutos, commodities químicas, especialidades químicas, bem como diferentes tipos de equipamentos e ferramentas de processamento e teste, em vários estágios (Figura 14). Essas etapas são frequentemente repetidas centenas de vezes, dependendo da complexidade do conjunto desejado de circuitos eletrônicos (Varas et al, 2021).

Figura 14 - Visão geral do processo de fabricação de *wafer*



Fonte: Varas et al. (2021).

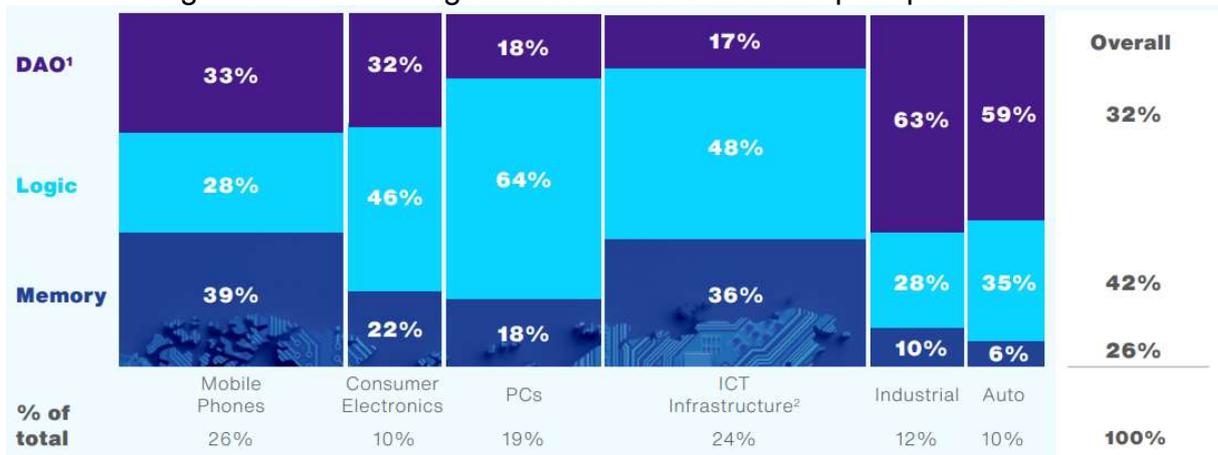
Os avanços na tecnologia do processo de fabricação são normalmente descritos referindo-se a “nós”. O termo “nó” se refere ao tamanho em nanômetros

das portas do transistor nos circuitos eletrônicos, embora com o tempo tenha perdido seu significado original e se tornado um termo genérico para designar tanto recursos menores quanto diferentes arquiteturas e fabricação de circuitos tecnologias.

Geralmente, quanto menor o tamanho do nó, mais poderoso é o chip, pois mais transistores podem ser colocados em uma área do mesmo tamanho. Este é o princípio por trás da “Lei de Moore”, uma observação chave e projeção na indústria de semicondutores que afirma que o número de transistores em um chip lógico dobra a cada 18 a 24 meses. A Lei de Moore sustenta o ritmo implacável de melhoria simultânea no desempenho e custo dos processadores desde 1965. Os processadores avançados de hoje encontrados em smartphones, computadores, consoles de jogos e servidores de data center são fabricados em nós de 5 a 10 nanômetros. A fabricação de chips comerciais usando tecnologia de processo de 3 nanômetros deve começar por volta de 2023.

Embora os chips de lógica e memória usados para aplicações digitais se beneficiem muito do dimensionamento do tamanho do transistor associado a nós menores, outros tipos de semicondutores – particularmente aqueles do grupo DAO descrito acima – não atingem o mesmo grau de desempenho e benefícios de custo ao migrar para nós cada vez menores, ou simplesmente usar diferentes tipos de circuitos, ou arquiteturas que não funcionariam em escalas mais miniaturizadas. Como resultado, hoje a fabricação de *wafers* ainda ocorre em uma ampla gama de nós, desde o atual “nó líder” em 5 nanômetros usado para lógica avançada até os nós legados acima de 180 nanômetros usados para discretos, optoeletrônicos, sensores e semicondutores analógicos. De fato, apenas 2% da capacidade global está atualmente em nós abaixo de 10 nanômetros (Figura 15) (Varas et al, 2021).

Figura 15 – Vendas globais de semicondutores por tipo em 2019



Fonte: Varas et al. (2021).

4.6 A DEMANDA DO PONTO DE VISTA GEOGRÁFICO

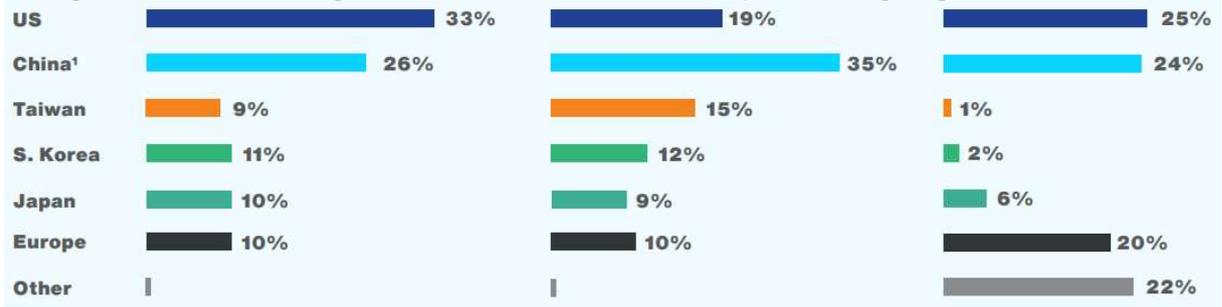
A parcela da demanda global de semicondutores que vem de cada região é diferente dependendo de como o ponto de origem da demanda é definido. Embora os semicondutores sejam normalmente adquiridos pelos fabricantes de dispositivos eletrônicos para construir seus produtos, em última análise, a demanda por semicondutores é impulsionada pelos usuários finais que compram esses dispositivos. É por isso que, do ponto de vista geográfico, existem três formas diferentes de medir a origem da demanda de semicondutores, com referência a pontos alternativos na cadeia de fornecimento de eletrônicos global (Varas et al, 2021).

- a) Localização da sede dos fabricantes de dispositivos eletrônicos: essas empresas são os clientes das empresas de chips, comprando os semicondutores que vão para seus dispositivos. Fabricantes de dispositivos eletrônicos – comumente chamados de fabricantes de equipamentos originais ou *Original Equipment Manufacturer (OEM)* – geralmente projetam seus produtos e decidem quais componentes usar de qual fornecedor. Por exemplo, sob essa abordagem, os semicondutores que entram em um smartphone desenvolvido por uma empresa sediada nos EUA seriam computados como demanda dos EUA, mesmo que o produto possa ser construído fisicamente em outro país;

- b) Local onde o dispositivo é fabricado/montado: os OEMs muitas vezes não fabricam seus dispositivos no mesmo país onde estão localizadas suas matrizes ou onde está localizada a equipe de engenharia que projetou o dispositivo. Em vez disso, os dispositivos são normalmente montados em uma fábrica localizada em um país diferente ou em muitos países diferentes, geralmente por outras empresas comumente chamadas de fabricantes de dispositivos originais ou *Original Design Manufacture* (ODM) ou serviços de fabricação eletrônica, ou *Electronic Manufacturing Services* (EMS). Este é o local onde os semicondutores são acabados e precisam ser enviados fisicamente. Por exemplo, com essa abordagem, os chips que entram em um smartphone projetado por uma empresa dos EUA, mas, na verdade fabricado por um empreiteiro taiwanês em uma fábrica localizada na China continental, seriam computados como demanda chinesa;
- c) Localização dos usuários finais que compram os dispositivos eletrônicos: dado que os semicondutores são componentes, a demanda por semicondutores é, em última análise, impulsionada pelas vendas de dispositivos eletrônicos para usuários finais, tanto consumidores quanto empresas. Em nosso exemplo, o valor dos chips contidos em smartphones projetados por uma empresa norte-americana, mas montados na China, seriam distribuídos por todos os países do mundo onde esses smartphones são vendidos aos consumidores;

A Figura 16 mostra a divisão geográfica da demanda global de semicondutores usando essas três lentes alternativas: as participações de países ou regiões são bastante diferentes dependendo dos critérios. Mas nenhuma das três abordagens possíveis é considerada a resposta “correta” – elas apenas refletem os diversos papéis que os países/regiões desempenham na indústria eletrônica mais ampla.

Figura 16 - Vendas globais de semicondutores por área geográfica em 2019.

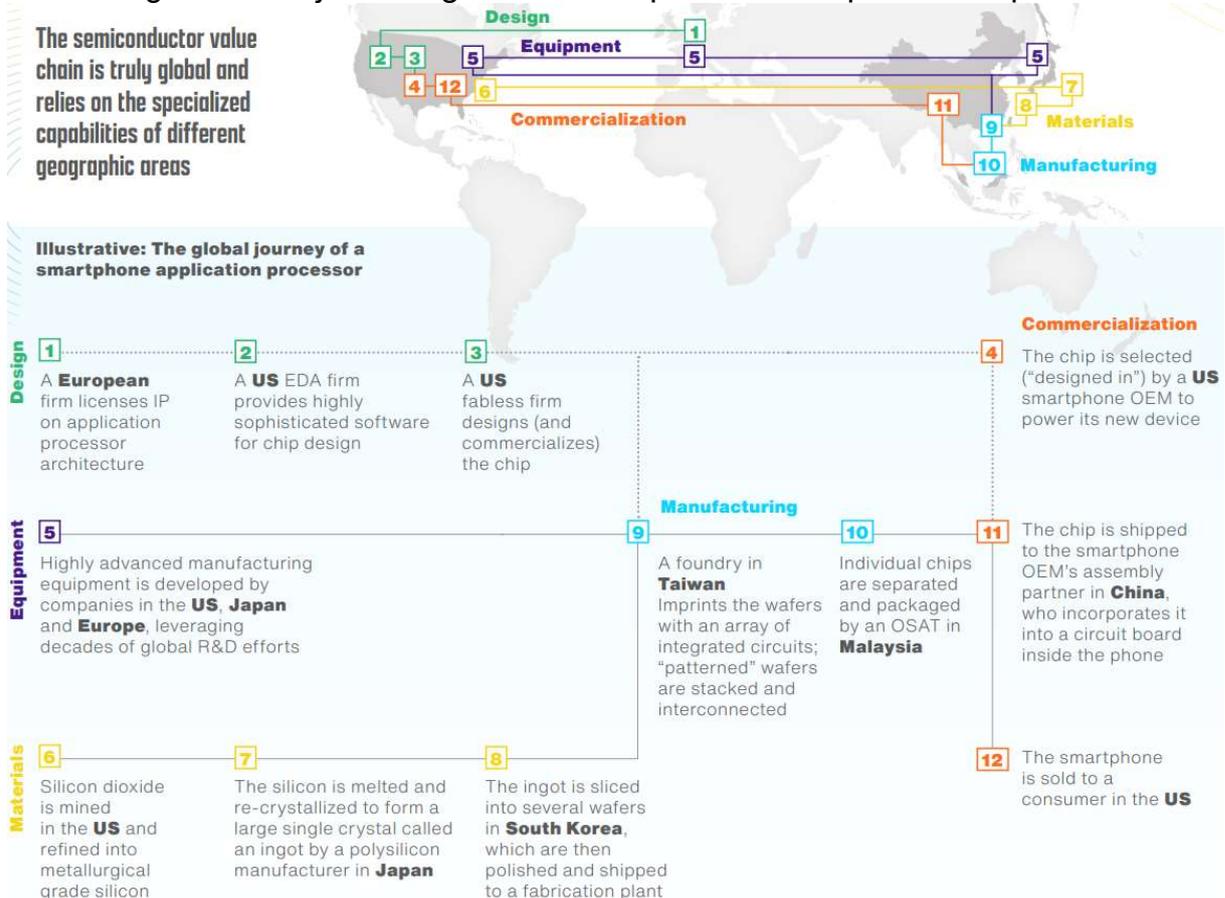


Fonte: Varas et al. (2021).

4.7 A ESTRUTURA INTEGRADA GLOBAL

A cadeia de suprimentos de semicondutores é verdadeiramente global: seis grandes regiões (EUA, Coreia do Sul, Japão, China continental, Taiwan e Europa) cada uma contribui com 8% ou mais para o valor total agregado pela indústria de semicondutores em 2019. Como mostra a Figura 17, a jornada típica de um semicondutor envolve a maioria, senão todas essas áreas geográficas em diferentes estágios durante o processo de projeto e fabricação (Varas et al, 2021).

Figura 17 - A jornada global de um processador para smartphone.



Fonte: Varas et al. (2021).

5A CADEIA DE SUPRIMENTOS DOS SEMICONDUTORES

5.1 A ESTRUTURA INTEGRADA GLOBAL

A indústria de semicondutores é um dos pilares da moderna economia digital, alimentando tecnologias que vão desde smartphones e computadores pessoais até automóveis e infraestrutura crítica. Dada a sua importância estratégica, o desenvolvimento de uma cadeia de suprimento robusta e eficiente é fundamental. No entanto, estabelecer uma cadeia de suprimento para semicondutores não é tarefa fácil. A criação de uma cadeia de suprimento de semicondutores é repleta de obstáculos intrincados e desafios distintos. Em primeiro lugar, a própria natureza da fabricação de semicondutores é embebida em complexidade tecnológica. Os processos necessários para a produção envolvem equipamentos de precisão, ambientes de salas limpas e um controle extremamente meticuloso sobre variáveis, tornando a produção altamente sensível a quaisquer perturbações, mesmo que mínimas. Adicionalmente, o investimento inicial necessário para ingressar neste setor é astronômico. Apenas a construção de uma única fábrica de semicondutores, também conhecida como "*foundry*", pode exigir bilhões em capital, como visto na Figura 15, e o retorno sobre esse investimento é frequentemente ameaçado pela natureza volátil e evolutiva da tecnologia.

A natureza global da indústria de semicondutores adiciona outra camada de complexidade. Muitos dos componentes e matérias-primas essenciais para a fabricação de semicondutores são originários de diversas partes do mundo. Isso significa que a cadeia de suprimentos é frequentemente suscetível a interrupções, seja por tensões geopolíticas, desastres naturais ou outras crises internacionais. Além disso, a demanda por semicondutores não é constante. Flutuações são frequentes e podem ser influenciadas por diversos fatores, desde o lançamento de novos produtos tecnológicos até mudanças nas condições econômicas globais.

Neste cenário, a cadeia de suprimento de semicondutores se desenrola em várias etapas críticas. Tudo começa com a extração de matérias-primas, com o silício sendo o principal componente utilizado como substrato na maioria dos chips. Após a obtenção dos materiais necessários, a fase de design do produto entra em cena. Aqui, o desenho e a arquitetura do chip são desenvolvidos, estabelecendo a

funcionalidade e o desempenho do produto. Posteriormente, os semicondutores são produzidos nas *foundries*, seguindo rigorosos padrões de qualidade. Após a fabricação, é imperativo que cada chip passe por testes rigorosos para garantir sua funcionalidade. Uma vez aprovados, são então empacotados para proteção. A etapa final envolve a distribuição e logística, garantindo que os semicondutores cheguem de forma segura aos fabricantes de equipamentos originais (OEMs) ou outros clientes pertinentes.

Com todos esses pontos levantados, se buscar apoio na hierarquia da cadeia de suprimentos sugerida por (MacCarthy; Ahmed; Demirel, 2022) para representar as três primeiras camadas do sistema, facilitando assim, o processo de obtenção e de entendimento da cadeia dos semicondutores.

5.2 ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO

O processo produtivo é um dos pilares fundamentais de qualquer indústria, constituindo o coração da transformação de insumos brutos em produtos ou serviços de valor agregado. Embora seja um conceito universal, as etapas específicas e metodologias envolvidas podem variar amplamente, dependendo do setor, da natureza do produto e das escolhas estratégicas da organização. Interessante é notar que, mesmo em uma única indústria, diferentes autores e especialistas podem identificar e nomear etapas distintas, refletindo nuances ou perspectivas particulares. Contudo, apesar dessas variações, é possível esboçar um caminho exemplificativo para ilustrar a jornada típica do semicondutor desde a concepção até a entrega. Este percurso, embora possa apresentar diferenças dependendo da fonte, fornece uma visão holística e estruturada do que envolve a transformação de ideias e materiais em soluções tangíveis e úteis para o consumidor final.

Assim, as etapas produtivas levantadas para a cadeia de suprimento dos semicondutores foram divididas em duas: as principais e as primárias. As principais são aquelas onde aparecem em destaque para a maioria dos autores estudados, e as primárias são aquelas etapas onde os processos são essenciais para o fornecimento de materiais para as etapas primárias.

O Quadro 1 elenca as principais etapas encontradas e divididas em macro etapas (mais amplas) e micro etapas (mais específicas).

Quadro 1 - Macros e micros etapas produtivas do semicondutor.

Macro etapas	Micro etapas
Concepção	Pesquisa e Desenvolvimento
Projeto/SIP	Mineração de silício
Fabricação do <i>wafer</i>	Fabricação de lingotes de silício
Empacotamento e Teste	Fabricação de equipamentos
Usuário Final	Fornecedores de Insumos Especiais

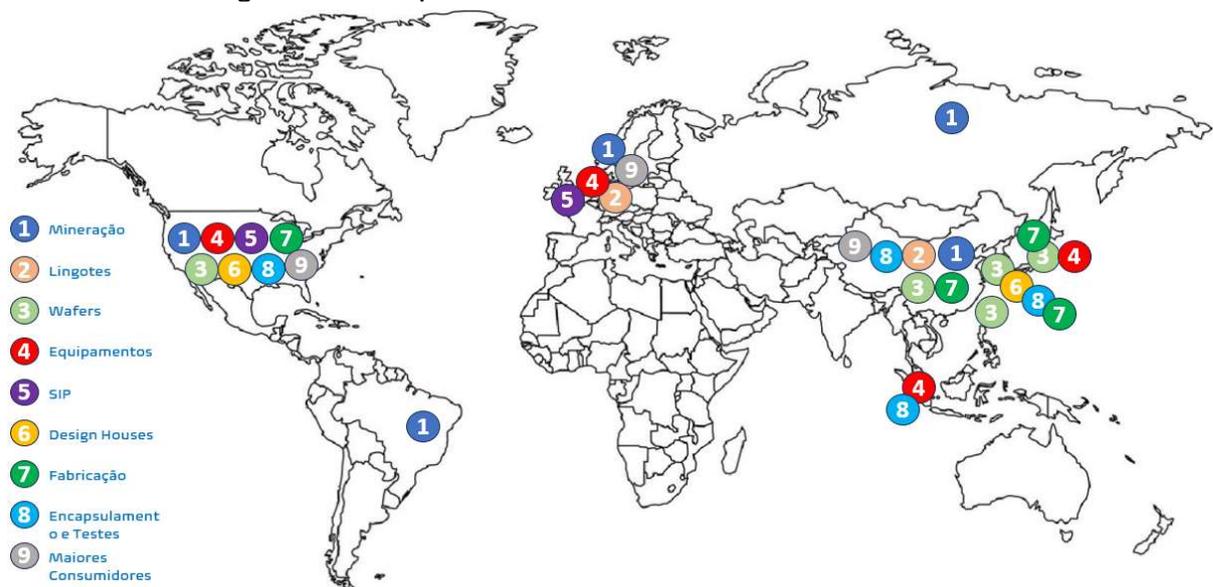
Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

5.3 MAPA DA CADEIA DE VALOR GLOBAL

A indústria de semicondutores é um ecossistema global e intrincado que vai muito além da simples fabricação de chips. O mapa da cadeia de valor global oferece uma visão panorâmica deste vasto universo, abrangendo desde a pesquisa e desenvolvimento até a distribuição e a aplicação final. Neste mapa, se examina como os diversos elementos, países e empresas se interconectam, cooperam e competem para entregar inovações tecnológicas que alimentam o mundo digital de hoje. É um retrato da sinergia e interdependência que existe em uma escala verdadeiramente global.

Para criar o mapa de valor, apresentado na Figura 18, foram utilizados dados levantados nos quadros e tabelas apresentados na descrição de cada item.

Figura 18 - Mapa da cadeia de valor dos semicondutores



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

O mapa evidencia, no ponto 1, os principais países que se destacam na mineração de silício. A China lidera com uma participação dominante de 68% da

produção global, seguida pela Rússia com 7,3%, Brasil com 4,6%, Noruega com 4,1% e Estados Unidos com 3,5% como visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Produção de produção mundial de silício (em milhares de toneladas).

	2021	2022
Estados Unidos	313	310
Austrália	50	50
Butão	85	85
Brasil	389	400
Canadá	49	49
China	6.400	6.000
França	127	120
Alemanha	63	63
Islândia	111	110
Índia	59	59
Cazaquistão	122	120
Malásia	85	92
Noruega	362	360
Polônia	49	49
Rússia	644	640
Espanha	60	57
Ucrânia	49	19
Outros países	128	210
Total Mundial (arredondado)	9.150	8.800

Fonte: Adaptado de Schnebele (2023).

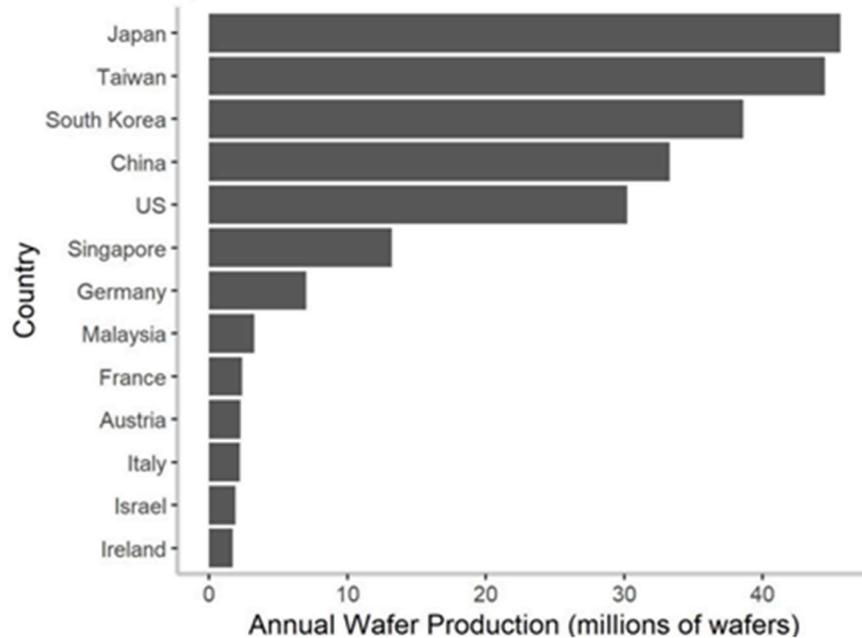
No ponto 2, identificam-se os líderes na fabricação de silício policristalino, também referido como lingotes de silício. A China é a principal produtora, enquanto Alemanha, Coreia do Sul e Malásia têm presença notável no setor (Quadro 2).

Quadro 2 - Top 10 fabricantes de silício policristalino.

POSIÇÃO	COMPANY	PAÍS
1	Tongwei Co., Ltd.	China
2	GCL Technology Holdings Ltd.	China
3	Daqo New Energy Corp.	China
4	Wacker Chemie AG	Alemanha / E.U.A.
5	Xinte Energy Co., Ltd.	China
6	Xinjiang East Hope New Energy Co., Ltd.	China
7	OCI Company Ltd.	Coreia do Sul / Malásia
8	Asia Silicon (Qinghai) Co., Ltd.	China
9	Hemlock Semiconductor Operations LLC	E.U.A.
10	Shaanxi Non-Ferrous Tianhong REC Silicon Mat. Co., Ltd.	China

Fonte: Adaptado de Casarin (2022).

O ponto 3 destaca os países onde a fabricação de *wafers* puros é predominante. Japão, Taiwan, Coreia do Sul, China e Estados Unidos são os protagonistas neste segmento (Figura 19 e Quadro 3).

Figura 19 – Produção anual de *wafers* de silício em milhões de unidades

Fonte: Adaptado de Frost e Hua (2019).

Quadro 3 - Top fabricantes de *wafers* de silício.

POSIÇÃO	COMPANY	PAÍS
1	Shin-Etsu Chemical	Japão
2	SUMCO	Japão
3	GlobalWafers	Taiwan
4	SK Siltron	Coreia do Sul
5	Siltronic	Alemanha
6	MCL Semiconductor	Taiwan
7	WaferGen	Taiwan
8	China Resources Electronics	China
9	LG Siltron	Coreia do Sul

Fonte: Adaptado de Trendforce (2022).

A fabricação de semicondutores necessita de equipamentos especializados. No ponto 4, Japão, Holanda, Bélgica, Singapura e Estados Unidos emergem como principais fornecedores desses equipamentos (Quadro 4).

Quadro 4 - Top 10 melhores fornecedores de equipamentos

POSIÇÃO	COMPANY	PAÍS
1	Advantest	Japão
2	ASML	Holanda
3	ASM Pacific Technology	Singapura
4	Edwards	Bélgica
5	Teradyne	E.U.A.
6	Kokusai Electric	E.U.A.
7	Lam Research	E.U.A.

8	Tokyo Electron	Japão
9	Applied Materials	E.U.A.
10	Hitachi High-Tech	Japão

Fonte: Adaptado de Insights (2022).

No ponto 5, destacam-se as empresas SIP responsáveis pelo registro da propriedade intelectual dos semicondutores, para prevenir questões como apropriação indevida de design. Estados Unidos e Reino Unido lideram neste aspecto (Quadro 5).

Quadro 5 - Top empresas de IP

POSIÇÃO	COMPANY	PAÍS
1	Arm	Reino Unido
2	Synopsys	E.U.A.
3	Cadence	E.U.A.
4	Imagination Technologies	Reino Unido
5	CEVA	E.U.A.

Fonte: Adaptado de Markets (2022).

As *Design Houses*, situadas no ponto 6, são vitais para a elaboração dos projetos dos semicondutores. Os Estados Unidos e Taiwan são centros reconhecidos nesse domínio (Tabela 2).

Tabela 2 - Top 10 *Design Houses*

POSIÇÃO	COMPANY	1Q23 (USD Million)	1Q23 MARKET SHARE	PAÍS
1	Qualcomm	7.942	23,5%	E.U.A.
2	Broadcom	6.908	20,4%	E.U.A.
3	NVIDIA	6.732	19,9%	E.U.A.
4	AMD	5.353	15,8%	E.U.A.
5	MediaTek	3.147	9,3%	Taiwan
6	Marvell	1.354	4,0%	E.U.A.
7	Novatek	791	2,3%	Taiwan
8	Realtek	646	1,9%	Taiwan
9	Will Semiconductor	539	1,6%	Taiwan
10	MPS	451	1,3%	E.U.A.
	Total	33.863	100%	

Fonte: Adaptado de Trendforce (2022).

O ponto 7 ilumina os titãs da fabricação de semicondutores. Taiwan impressiona com uma gigantesca fatia de 68,7% da produção mundial, seguida pela Coréia do Sul com 13,2%, China com 8,3% e Estados Unidos com 6,6% (Tabela 3).

Tabela 3 - Top 10 fabricantes de semicondutores

POSIÇÃO	COMPANY	1Q23 (USD Million)	1Q23 MARKET SHARE	PAÍS
1	TSMC	16.735	60,1	Taiwan
2	Samsung	3.446	12,4	Coréia do Sul
3	GlobalFoundries	1.841	6,6	E.U.A.
4	UMC	1.784	6,4	Taiwan
5	SMIC	1.462	5,3	China
6	HuaHong Group	845	3,0	China
7	Tower	356	1,3	Israel
8	PSMC	332	1,2	Taiwan
9	VIS	269	1,0	Taiwan
10	DB Hitek	234	0,8	Coréia do Sul
	Total	33.863	100	

Fonte: Adaptado de Chiao e Chung (2023).

No ponto 8, a Ásia mostra sua força, com Taiwan, China e Malásia à frente na realização de encapsulamento e testes de semicondutores. Os Estados Unidos também têm relevância significativa neste setor (Quadro 6).

Quadro 6 - Top 10 Global OSAT

POSIÇÃO	COMPANY	PAÍS
1	ASE	Taiwan
2	Amkor	E.U.A.
3	JCET	China
4	Powertech	Taiwan
5	TFME	China
6	HT-Tech	China
7	UTAC	Singapore
8	KYEC	Taiwan
9	ChipMOS	Taiwan
10	Chipbond	Taiwan

Fonte: Adaptado de Kerstin (2022).

Finalmente, no ponto 9, são identificados os maiores consumidores de semicondutores. Os Estados Unidos lideram com 25%, seguidos de perto pela China com 24%, e a Europa com 20% do mercado (Tabela 4).

Tabela 4 - Maiores consumidores TSMC

Consumidor TSMC	%
Apple	25,93
MediaTek	5,80
AMD	4,39
Qualcomm	3,90
Broadcom	3,77
Nvidia	2,83
Sony	2,54
Marvell	1,39
STM	1,38
ADI	1,06
Intel	0,84

Fonte: Adaptado de Varas et al. (2021).

O mundo dos semicondutores, em sua vastidão e complexidade, desempenha um papel inegavelmente central na infraestrutura tecnológica do nosso século. Através da análise desses pontos-chave, se ganha uma perspectiva panorâmica de toda a jornada que um semicondutor percorre, desde as minas de silício até os centros de consumo tecnológico.

A predominância da Ásia, particularmente da China e de Taiwan, em várias etapas desta cadeia, reitera sua influência crescente no cenário global dos semicondutores. Entretanto, países de diferentes continentes, desde os Estados Unidos na América do Norte até a Alemanha na Europa, desempenham papéis críticos em nichos específicos, evidenciando a natureza verdadeiramente global desta indústria.

5.4 OS ELOS

Baseado nos dados apresentados nas seções anteriores, é possível identificar os principais elos da cadeia de suprimento dos semicondutores. Isso exige a compreensão das etapas de produção, desde a obtenção da matéria-prima até a entrega do produto ao consumidor. O Quadro 7 mostra os principais elos no estudo.

Quadro 7 - Os elos da cadeia de suprimentos dos semicondutores

ELO	DESCRIÇÃO	PRINCIPAIS PAÍSES
Mineração e Refino de Matérias-Primas	Os semicondutores necessitam de várias matérias-primas, como silício, gases, metais raros e outros compostos químicos. Essa etapa envolve a mineração dessas matérias-primas e seu refino para produzir materiais de alta pureza.	China, Brasil, Rússia, Noruega e Estados Unidos

Fabricação de <i>Wafer</i>	O silício refinado é geralmente transformado em grandes cilindros chamados lingotes. Estes são, então, cortados em fatias finas, conhecidas como <i>wafers</i> , que servirão como a base para os circuitos integrados.	Japão, Taiwan, Coréia do Sul, China e Estados Unidos
Design e Projeto	A fase de design determina o desempenho, eficiência energética e custo de produção do chip final. Quaisquer inovações ou otimizações nessa etapa podem ter benefícios significativos para o produto. Além disso, a proteção da propriedade intelectual é realizada aqui, pois os designs de chip são ativos valiosos.	Estados Unidos e Taiwan
Produção de Equipamentos	A fabricação de semicondutores requer máquinas e equipamentos altamente especializados. Isso inclui equipamentos de litografia, que "imprimem" os projetos nos <i>wafers</i> , bem como equipamentos de dopagem, oxidação, gravação e outros processos.	Holanda, Japão, Singapura, Bélgica e Estados Unidos
Fabricação do semicondutor	Essa é uma das etapas mais importantes, a de fabricação. Envolve uma série de processos altamente especializados para transformar <i>wafers</i> de silício em circuitos integrados.	Taiwan, Coréia do Sul, China e Estados Unidos
Empacotamento e Teste	Uma vez que os CI's são produzidos no wafer, eles são cortados, embalados em um formato utilizável e testados para garantir que funcionem corretamente.	Taiwan, China e Estados Unidos
Montagem de Dispositivos	Os CI's empacotados são então soldados em placas de circuito ou integrados em sistemas maiores.	China, Coréia do Sul e Estados Unidos
Distribuição e Vendas	Após montados, os dispositivos são distribuídos por meio de vários canais para vendedores e consumidores.	China e Estados Unidos
Aplicações Finais	Estes são os dispositivos e sistemas finais em que os semicondutores são usados, como smartphones, computadores, carros, e muitos outros.	China e Estados Unidos

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

5.5 OS LIMITES DA ANÁLISE DA CADEIA

Este trabalho visa a apresentar um mapa genérico da cadeia de suprimentos dos semicondutores, considerando sua relevância e impacto transversal em várias indústrias. No entanto, é preciso reconhecer que, devido à amplitude e complexidade deste campo, várias delimitações foram necessárias para garantir a viabilidade e a qualidade da pesquisa.

O estudo concentrou-se no entendimento da cadeia de suprimentos dos semicondutores sem descrição aprofundada das demais cadeias a essa

relacionadas - como as cadeias de suas principais clientes, cadeia de suprimentos automotiva e cadeia de eletroeletrônicos. A indústria automobilística, por exemplo, é uma cadeia complexa e globalizada, com demandas, riscos e desafios logísticos específicos que justificariam uma investigação isolada.

O mapeamento permite identificar os principais elos da cadeia, mas sem o objetivo de realizar uma investigação aprofundada sobre cada elo individualmente. Uma análise detalhada de cada segmento, seja em produção, distribuição, ou uso final, exigiria um conjunto de metodologias e recursos que vão além do escopo deste trabalho.

Embora o trabalho reconheça tendências emergentes na demanda e aplicação de semicondutores, não tem a pretensão de fazer previsões sobre as direções da indústria. A pesquisa concentrou-se no cenário atual e em descrever o *status quo* da cadeia de suprimentos.

Eventos globais, como crises econômicas, conflitos políticos ou pandemias, têm o potencial de reconfigurar cadeias de suprimentos. Embora a recente crise da Covid-19 tenha sido mencionada, o estudo não se aprofundou em todas as implicações potenciais de eventos exógenos sobre a cadeia de suprimentos dos semicondutores.

As delimitações deste trabalho foram intencionalmente definidas para proporcionar uma visão panorâmica e coesa da cadeia de suprimentos dos semicondutores. Reconhece-se que cada delimitação mencionada poderia ser objeto de estudos futuros, que se aprofundariam em áreas específicas para uma compreensão mais detalhada.

5.6 OS ELOS CRÍTICOS

Na análise da cadeia, alguns elos podem ser considerados críticos. Como afirmam Ritchie e Brindley (2004 apud Tomas e Alcantara, 2013), fontes de riscos e incertezas permeiam todas as cadeias de suprimentos e, devido à complexidade e maior interdependência das empresas, risco é um elemento constantemente presente nas cadeias de suprimentos, seja por meio de perturbações, de incertezas ou de interrupções.

Se uma cadeia de suprimentos é dependente de um único fornecedor, por exemplo, a uma perturbação pode ter um efeito cascata em várias indústrias. Por isso, alguns elos são particularmente críticos devido a sua importância estratégica, a susceptibilidade a interrupções ou a sua singularidade na cadeia. Reconhecer esses pontos críticos e implementar estratégias de mitigação de riscos serve para garantir a resiliência da cadeia de suprimentos.

O Quadro 8 elenca e descreve os principais pontos críticos encontrados no estudo e a descrição dos riscos logísticos associados. É importante classificar esses riscos segundo sua natureza, conforme sugerem Tomas e Alcantara (2013) em: i) internos à empresa (operações e processo, controle); ii) internos à cadeia (demanda, fornecimento e fornecedores e clientes) e iii) externos à cadeia (ataques terroristas, crises mundiais, desastres naturais e diferenças culturais).

Quadro 8 – Classificação dos pontos críticos e seus riscos logísticos

CATEGORIA	PONTOS CRÍTICOS	RISCOS LOGÍSTICOS
Internos à empresa	Matérias-Primas e Insumos Especiais	A obtenção e transporte de matérias-primas e insumo especial para locais de produção pode enfrentar desafios logísticos, como atrasos, interrupções ou variações na qualidade. Dependendo da origem e raridade desses insumos, pode haver riscos associados à disponibilidade, transporte, armazenamento e custos.
	Fabricação de Wafer	Embora a fabricação em si seja um processo de produção, os riscos logísticos podem surgir na entrega e transporte desses <i>wafers</i> para outras etapas de produção ou para centros de empacotamento e teste.
	Empacotamento e Teste	Após o empacotamento e teste, os semicondutores precisam ser transportados para locais de montagem final ou para clientes. Riscos logísticos nesta fase incluem danos durante o transporte, atrasos na entrega ou erros no empacotamento que podem impactar a integridade do produto.
	Expectativas de Crescimento	Com a crescente dependência de tecnologias eletrônicas em quase todos os aspectos da vida moderna, a demanda por semicondutores está sempre crescendo. Isso coloca pressão constante sobre a cadeia de suprimentos para manter o ritmo.
Internos à cadeia	Cadeia de Suprimento Extensa	Uma cadeia de suprimentos longa e complexa amplia os riscos logísticos. Cada elo adicional na cadeia representa um ponto potencial de falha, seja na forma de atrasos, interrupções, falhas de comunicação ou desafios de coordenação. Uma cadeia de suprimentos extensa frequentemente cruza fronteiras internacionais, adicionando complexidades aduaneiras e regulatórias.
	Dependência de Fornecedores Únicos	Muitas vezes, componentes específicos ou materiais são adquiridos de um único fornecedor, ou de uma região específica. Qualquer interrupção nesse fornecimento (por razões políticas, desastres naturais ou outros) pode ter grandes repercussões na cadeia de suprimentos.
	Variações de Demanda	Dada a rápida evolução da tecnologia e as mudanças nos mercados, as demandas por semicondutores específicos podem flutuar. Adaptar-se rapidamente a essas mudanças é um desafio logístico.

	Gargalos de Produção	A capacidade limitada de produção em fundições de semicondutores de ponta pode levar a gargalos, especialmente quando há um aumento súbito na demanda.
	Questões Regulatórias e Tarifárias	Com a produção e fornecimento ocorrendo globalmente, mudanças nas políticas comerciais, tarifas ou regulamentações podem afetar a movimentação de semicondutores, ou suas matérias-primas entre países.
Externos à cadeia	Desafios de Transporte	Semicondutores e seus insumos podem exigir condições de transporte específicas, como temperaturas controladas. Além disso, a dependência de poucas rotas de transporte ou fornecedores pode introduzir riscos.
	Questões de Qualidade e Conformidade	Manter a qualidade ao longo da cadeia é crucial. Desvios ou não conformidades podem levar a <i>recalls</i> , ou rejeições que afetam a logística.
	Riscos de Segurança	Dada a natureza crítica dos semicondutores em muitas aplicações, a segurança do transporte e armazenamento é vital. Roubo, sabotagem ou outros atos mal-intencionados podem interromper a cadeia de suprimentos.
	Competição por Recursos	À medida que a demanda por certas matérias-primas utilizadas em semicondutores cresce, pode surgir uma competição mais acirrada, afetando a disponibilidade e os preços.
	Desastres Naturais	Terremotos, tufões, inundações e outros desastres naturais em regiões críticas de produção ou fornecimento podem causar interrupções significativas.
	Riscos Ambientais e de Sustentabilidade	Pressões para adotar práticas mais sustentáveis podem afetar a logística, seja pela necessidade de alternativas mais verdes ou por restrições em certas práticas, ou materiais.

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Na indústria de semicondutores, os principais riscos estão associados a própria cadeia, ou seja, as relações entre clientes e fornecedores. A demanda crescente por semicondutores e a participação de poucas empresas na etapa de fundição, torna esse elo um dos mais críticos da cadeia com maiores riscos para o abastecimento das grandes indústrias à jusante dessa cadeia, como a de eletroeletrônicos e automobilística.

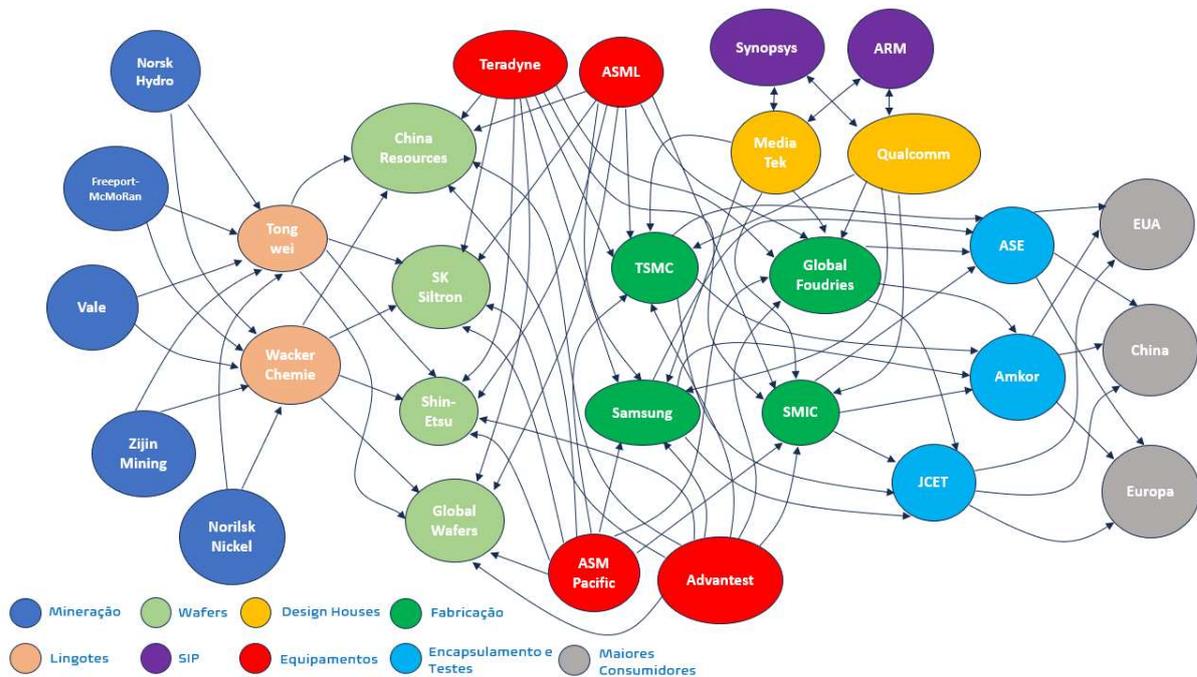
5.7 MAPA DA REDE DE SUPRIMENTOS

Enquanto a cadeia de valor nos dá uma visão ampla da indústria de semicondutores, o mapa da rede de suprimentos expõe as intrincadas relações e fluxos entre as empresas que sustentam a produção. Esta representação detalha a interligação entre fornecedores, fabricantes e distribuidores, se mostra o caminho que os materiais e componentes percorrem até se transformarem em produtos. É

uma ferramenta essencial para entender a complexidade operacional da indústria e para identificar potenciais pontos de vulnerabilidade e oportunidades de otimização.

A elaboração deste mapa de rede de suprimento para semicondutores (Figura 20), se baseia nas informações do mapa anterior, na listagem das maiores mineradoras do mundo sugerida por (Infomet, 2009), destacando os fabricantes e fornecedores líderes em cada etapa do processo produtivo. Posteriormente, se estabelece as interconexões entre esses estes, ilustrando as intrincadas relações e fluxos que compõem a cadeia.

Figura 20 - Mapa da rede de suprimentos dos semicondutores.



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

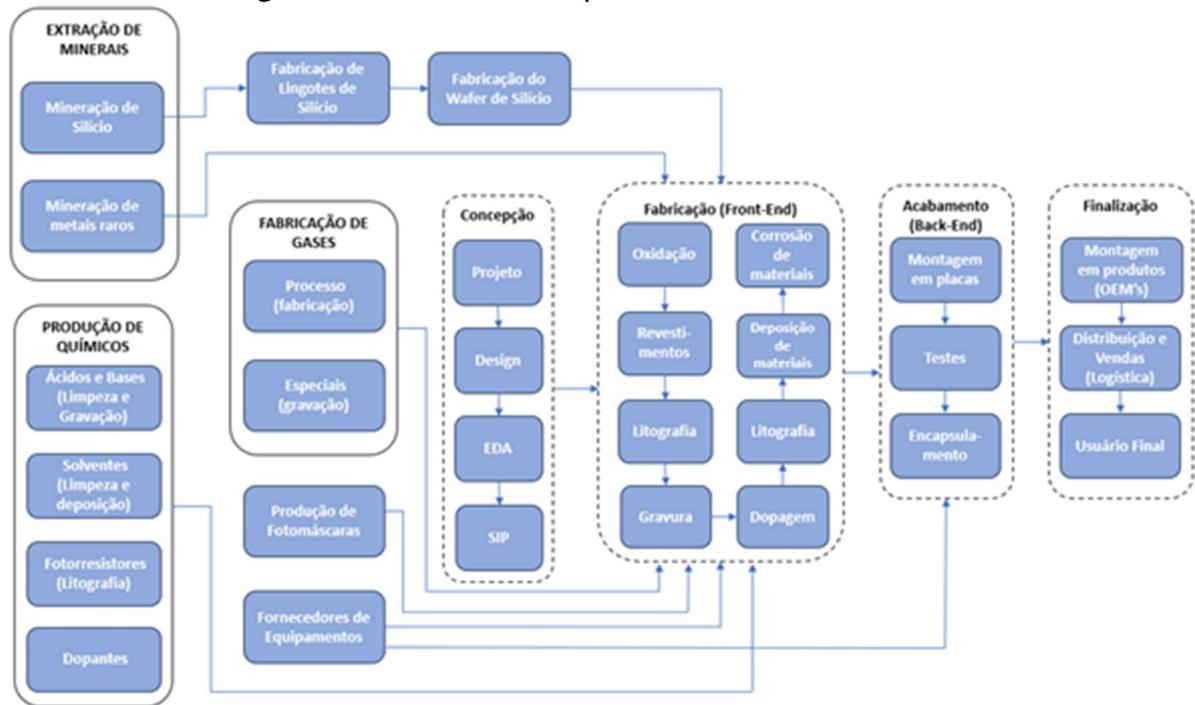
O mapa de rede de suprimento de semicondutores ilustra a complexidade e a interdependência que sustentam a fabricação desses componentes. Cada etapa, cada fabricante e fornecedor desempenham papéis importantes nesta trama global. Este mapa não apenas destaca a sinergia necessária para produzir um semicondutor, mas também nos ajuda a apreciar os desafios e oportunidades inerentes à gestão e otimização desta cadeia. À medida que se avança para um futuro cada vez mais digital e interconectado, entender essa rede será fundamental para qualquer estratégia que busque aproveitar ao máximo as potencialidades da tecnologia.

A complexidade aqui observada já com poucos atores sugere a necessidade de um software para apoiar essa rede. Os softwares de mapeamento de cadeia de suprimentos fornecem uma visão abrangente da cadeia de suprimentos, incluindo fornecedores, fabricantes, distribuidores e clientes. Isso pode ajudar as empresas a identificar gargalos e oportunidades de melhoria. Esses programas podem automatizar tarefas, como a coleta e a análise de dados, isso pode ajudar as empresas a economizar tempo e recursos. Podem também contribuir na identificação e mitigação de riscos, reduzindo a probabilidade de interrupções na cadeia de suprimentos. Pesquisando nos seus próprios sites, encontra-se três sugestões: SAP Supply Chain Management, Oracle Supply Chain Management e Microsoft Dynamics 365 Supply Chain Management.

5.8 MAPA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

O mapa da cadeia de suprimentos destaca, principalmente, as etapas sequenciais envolvidas na concepção, fabricação e distribuição de semicondutores, incluindo desde a mineração de matérias-primas até o empacotamento, teste e integração em dispositivos. Esta visão da cadeia fornece uma compreensão clara de cada fase do processo e de como elas se inter-relacionam. A cadeia destaca não apenas os elos responsáveis pela transformação física do silício, mas também os elos que, embora não utilizem materiais, são os que definem as características dos semicondutores e as etapas subsequentes, como as *design houses*, responsáveis pela concepção do produto que constitui uma das etapas mais importantes dessa cadeia. Tendo como apoio o entendimento dos mapas da cadeia de valor e da rede de suprimentos e os dados levantados no capítulo 4, sugere-se na Figura 21 o seguinte mapa da cadeia de suprimentos.

Figura 21 - Cadeia de suprimentos do semiconductor.



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

5.9 ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapa da rede de suprimento de semicondutores que foi desenvolvido fornece uma visão do vasto e interconectado mundo da produção de semicondutores. Ao analisar o mapa, vários aspectos críticos e considerações emergem:

O mapa ressalta a intrincada rede de fornecedores e processos necessários para produzir um semiconductor. Desde a mineração de matérias-primas, como silício e metais raros, até o fornecimento de componentes essenciais, como químicos, gases e fotorresistores, cada etapa é interdependente e vital.

Com tantos componentes e materiais essenciais provenientes de uma variedade de fornecedores, a cadeia é susceptível a interrupções. Qualquer desafio, seja uma escassez de metais raros ou uma interrupção na entrega de gases especializados, pode ter ramificações em toda a cadeia.

A presença de fornecedores de várias partes do mundo destaca a natureza global da indústria de semicondutores. Isso implica em desafios logísticos, bem como em vulnerabilidades geopolíticas.

A necessidade de equipamentos especializados e fotomáscaras sugere a evolução constante da tecnologia de semicondutores. Manter-se atualizado com as últimas inovações e garantir a integridade e precisão das fotomáscaras e equipamentos é importante.

A dependência de silício, metais raros e outros insumos destaca a necessidade de práticas de mineração responsáveis e sustentáveis. Considerando a finitude de alguns destes recursos, a indústria deve considerar alternativas ou métodos mais eficientes de reciclagem e reutilização.

O mapa da rede de suprimento de semicondutores serve como um lembrete da complexa teia de processos e fornecedores que sustentam a revolução tecnológica em curso. Para stakeholders e tomadores de decisão na indústria, entender este mapa é primordial para garantir a resiliência, eficiência e sustentabilidade da cadeia. À medida que se avança, a otimização contínua desta rede e a adaptação às mudanças globais serão fundamentais para o sucesso e a inovação contínuos na indústria de semicondutores.

6 CONCLUSÕES

A era digital em que se vive, dominada por avanços tecnológicos exponenciais, encontra em seus semicondutores o pilar central. A compreensão dessa complexa cadeia, desde a extração de matérias-primas até a entrega de chips altamente especializados, é fundamental para entender o panorama global da tecnologia.

A interrupção desta cadeia pode ter consequências significativas. Por exemplo, um atraso no fornecimento de silício pode desencadear atrasos cascata, ampliando o lead time e comprometendo não apenas a produção, mas a confiança do cliente. E, à medida que a demanda migra para semicondutores cada vez menores e mais potentes, qualquer quebra nessa cadeia pode resultar em repercussões significativamente amplificadas.

A geopolítica da produção de semicondutores está se tornando cada vez mais palpável. Com a China e os Estados Unidos na corrida pela autossuficiência em semicondutores, testemunha-se não apenas uma competição econômica, mas uma demonstração clara de poder e influência globais.

Em meio a esses desafios, o papel da tecnologia na gestão da cadeia se destaca. Softwares avançados de mapeamento e gestão da cadeia de suprimentos facilitam o monitoramento em tempo real, a previsão de interrupções e a otimização contínua dos processos. Entretanto, ferramentas e tecnologias por si só não são suficientes. É essencial um compromisso contínuo com a pesquisa e o desenvolvimento. A inovação, em um campo tão dinâmico, é a chave para permanecer relevante e competitivo.

Em suma, a complexidade da cadeia de suprimentos é um reflexo de nossa era digital: interconectada, dinâmica e em constante evolução.

Já a abordagem de mapeamento da cadeia proposta por (Luna, 2023) emergiu como um pilar essencial para a execução deste estudo. Sua metodologia oferece uma dinâmica evolutiva, na qual cada fase desencadeia avanços técnicos subsequentes. Contudo, é fundamental reconhecer que a representação gráfica deste modelo pode necessitar de ajustes. Ao longo da dessa jornada acadêmica, observei que as respostas para as questões propostas não emergem necessariamente de forma linear. À medida que o estudo se aprofunda, as

resoluções tornam-se mais matizadas, sugerindo uma abordagem interconectada para decifrar sua essência.

Por outro lado, o modelo hierárquico delineado por (MacCarthy; Ahmed; Demirel, 2022) apresentou-se com uma clareza exemplar. Em diversas ocasiões, me vi imerso em brainstormings extensos, tentando desvendar intuitivamente a estrutura da cadeia de suprimentos. O que esse modelo hierárquico proporciona é um guia estruturado e lógico, orientando a criação de mapas em uma perspectiva "*top-down*". Essa abordagem progressiva não apenas amplia o entendimento, mas também pavimenta o caminho para a elaboração de representações mais detalhadas e sofisticadas no futuro.

Em resumo, enquanto o modelo de Luna (2023) revisita a fluidez e adaptabilidade necessárias em um projeto em evolução, o método de MacCarthy, Ahmed e Demirel (2022) oferece a estrutura e a direção que garantem uma progressão lógica e fundamentada. Ambos foram essenciais para a compreensão holística e detalhada da cadeia de suprimentos dos semicondutores.

Sugestões para trabalhos futuros:

Dada a crescente ênfase global na sustentabilidade, um estudo sobre o impacto ambiental da produção de semicondutores, bem como medidas para mitigá-lo, seria uma contribuição valiosa.

A ferramenta R, amplamente usada para análise de dados, poderia ser explorada para rastrear, monitorar e otimizar a cadeia de suprimentos, permitindo ajustes mais rápidos e precisos.

Aprofundar-se em cadeias relacionadas, como a extração de minerais, produção de gases e fabricação de equipamentos, fornecendo uma visão holística do ecossistema de semicondutores.

Com a constante evolução da tecnologia e a dinâmica geopolítica, modelar cenários futuros pode ajudar a indústria a se preparar para desafios e oportunidades emergentes.

REFERÊNCIAS

- AMERICA, SIA. **SIA Webinar: Strengthening the Global Semiconductor Supply Chain in an Uncertain Era**. v. 2023. [S.l.]: Youtube, 2021. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=8acpON8Xyrg>>
- ARMSTRONG, Susie. **Qualcomm: Leading mobile innovation for over 30 years**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=8acpON8Xyrg>>
- AZEREDO, Paula Laranjeira. **Cadeias Globais de Valor (CGV): questões, mapeamento e análise**. 2018. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/12321046/>>
- BRINK, Susan van den et al. **Identifying supply risks by mapping the cobalt supply chain. Resources, Conservation and Recycling**, v. 156, p. 104743, 2020. ISSN 0921-3449. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104743>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920300653>>
- BURKACKY, Ondrej; DRAGON, Julia; LEHMANN, Nikolaus. **The semiconductor decade: A trillion-dollar industry**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/the-semiconductor-decade-a-trillion-dollar-industry>>
- CASARIN, Ricardo. **Ranking lista os 10 maiores fabricantes de silício policristalino do mundo em 2021**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/internacional/ranking-lista-os-10-maiores-fabricantes-de-silicio-policristalino-do-mundo-em-2021>>
- CHIAO, Joanne; CHUNG, Eden. **Top 10 Foundries Report**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.trendforce.com/presscenter/news/20230612-11719.html>>
- COMMISSION, European. **European Chips Act**. 2023. Disponível em: <https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_en>
- FILIPPIN, Flavia. **Estado e desenvolvimento: a indústria de semicondutores no Brasil**. [S.l.]: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2020. P. 438.
- FRASER, Iain J.; MÜLLER, Martin; SCHWARZKOPF, Julia. **Transparency for Multi-Tier Sustainable Supply Chain Management: A Case Study of a Multi-tier Transparency Approach for SSCM in the Automotive Industry**. [S.l.: s.n.], 2020.

FRIESKE, Benjamin; STIELER, Sylvia. **The “Semiconductor Crisis” as a result of the COVID-19 pandemic and impacts on the automotive industry and its supply chains.** International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 2020. Oslo, Norway. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/wevj13100189>.>

FROST, Kali; HUA, Inez. **Quantifying spatiotemporal impacts of the interaction of water scarcity and water use by the global semiconductor manufacturing industry.** Water Resources and Industry, v. 22, p. 100115, 2019. ISSN 2212-3717. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212371719300150>.>

GUEDES, Geovana Lustosa. **Relação Triangular EUA-China-Taiwan na cadeia de suprimentos global de semicondutores.** [S.l.]: Universidade de Brasília, 2022. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/32685>.>

HANDFIELD, Robert B.; GRAHAM, Gary; BURNS, Laird. **Corona virus, tariffs, trade wars and supply chain evolutionary design. 2020.** Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/IJOPM-03-2020-0171>.>

INDUSTRIA, Portal da. **Indústria 4.0: Entenda seus conceitos e fundamentos.** [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-4-0/#:~:text=A%20Ind%C3%BAstria%204.0%20%C3%A9%20um,processos%20e%20aumentando%20a%20produtividade.>>

INFOMET. **Confirma o ranking das 100 maiores mineradoras do mundo.** [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/noticias-mobile-ler.php?org=&rs=&cod=49157>.>

INSIGHTS, Tech. **Advantest, ASML, FormFactor, Plasma-Therm, and EV Group earn 5 Star Ratings in the 2022 10 BEST Suppliers.** [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.techinsights.com/press-release/10-best-semiconductor-equipment-supplier-rankings-2022>>

KERSTIN. **Top 10 global OSAT revenue ranking.** [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.pcba-manufacturers.com/top-10-global-osat-revenue-ranking/>.>

KHAN, Saif M.; MANN, Alexander; PETERSON, Dahlia. **Supply Chain: Assessing National Competitiveness.** [S.l.]: CSET Center for Security e Emerging Technology, 2021. P. 98.

KUMAR, B Senthil. **Value stream mapping-a lean manufacturing approach to reduce the process wastages in clothing industry.** International Journal of Advances in Management and Economics, v. 5, n. 5, p. 23–33, 2016.

LUNA, Mônica Maria Mendes. **O uso da aprendizagem baseada em problemas para abordar gestão da cadeia de suprimentos e riscos logísticos.** Fortaleza-CE: XLIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2023. P. 1–14.

MACCARTHY, Bart L.; AHMED, Wafaa A. H.; DEMIREL, Guven. **Mapping the supply chain: Why, what and how?** International Journal of Production Economics, v. 250, p. 108688, 2022. ISSN 0925-5273.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108688>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527322002705>.

MARKETS, Markets an. **Semiconductor Intellectual Property Market**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/semiconductor-silicon-intellectual-property-ip-market-651.html?gclid=CjwKCAjwseSoBhBXEiwA9iZt_xSP6jLEb3-Rsfp0UDEmwTyyXImVIMYyMWZDWWqpr8kvdC5dkztTtRoCQH4QAvD_BwE.

SAXENA, Anuj. **The Impact of Semiconductor Chip Shortages on the Global Economy**. 2023. Disponível em: <https://www.knowledgeridge.com/Blog/The-Impact-of-Semiconductor-Chip-Shortages-on-the-Global-Economy#:~:text=This%20shortage%20has%20led%20to,to%20a%20massive%20economic%20break%20down>.

SCHNEBELE, Emily K. **Mineral Commodity Summaries**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-silicon.pdf>.

THADANI, Akhil; ALLEN, Gregory C. **Mapping the Semiconductor Supply Chain: The Critical Role of the Indo-Pacific Region**. 2023. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/mapping-semiconductor-supply-chain-critical-role-indo-pacific-region>.

THAKUR, Maitri et al. **A framework for traceability of hides for improved supply chain coordination**. Computers and Electronics in Agriculture, v. 174, p. 105478, 2020. ISSN 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105478>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919319817>.

TOMAS, Robson N.; ALCANTARA, Rosane L. C. **Modelos para gestão de riscos em cadeias de suprimentos: revisão, análise e diretrizes para futuras Pesquisas**. Gest. Prod., São Carlos, v. 20, n. 3, p. 695-712, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/5mYjwbLMtfkLBmbB9qVYjtd/?format=pdf>

TRENDFORCE. **Global Top 10 IC Design Houses Break Even in Q1**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.eetasia.com/global-top-10-ic-design-houses-break-even-in-q1-ai-demand-seen-to-bolster-hope-for-q2-recovery/>.

VARAS, Antonio et al. **Strengthening the Global Semiconductor Value Chain**. [S.l.]: Boston Consulting Group Semiconductor Industry Association, 2021. P. 53. Disponível em: https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/05/BCG-x-SIA-Strengthening-the-Global-Semiconductor-Value-Chain-April-2021_1.pdf.