v7.n7.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

REPENSANDO A PRODUÇÃO DE SEMICONDUTORES: *MINIMAL FAB* E POCKETFAB COMO UMA NOVA ESTRATÉGIA INDUSTRIAL PARA O BRASIL

RETHINKING SEMICONDUCTOR PRODUCTION: MINIMAL FAB AND POCKETFAB AS A NEW INDUSTRIAL STRATEGY FOR BRAZIL

REPENSANDO LA PRODUCCIÓN DE SEMICONDUCTORES: MINIMAL FAB Y POCKETFAB COMO NUEVA ESTRATEGIA INDUSTRIAL PARA BRASIL

André Luiz Silva Santos[1], Marcos Lajovic Carneiro[2], Viviane Margarida Gomes Pacheco[3], José Elmo de Menezes[4], Clóves Gonçaves Rodrigues[5]

e778459
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i7.8459

PUBLICADO: 07/2026

RESUMO

O presente trabalho aborda o conceito de fábricas compactas de semicondutores, com ênfase nas *Minimal Fabs* e na iniciativa nacional PocketFab, como alternativas ao modelo tradicional das *megafabs*. Destaca-se que este estudo possui natureza bibliográfica e documental, não contemplando validação experimental nem investigação de campo. A metodologia adotada baseia-se na revisão sistemática de artigos científicos e na análise de relatórios técnicos e institucionais relevantes ao tema. Os resultados indicam que o modelo convencional de *megafab*, embora essencial para a produção em larga escala e para o desenvolvimento de tecnologias de ponta, apresenta elevados custos de implantação e operação, uso intensivo de recursos naturais e baixa flexibilidade para atender demandas de baixo volume e alta customização. Em contraste, as Minimal Fabs demonstram significativa redução de CAPEX e OPEX, menor consumo energético e hídrico, maior flexibilidade produtiva e maior viabilidade para aplicações de nicho, como sensores, dispositivos analógicos e sistemas embarcados. Conclui-se que as *Minimal Fabs* não substituem as *megafabs*, mas constituem uma estratégia complementar, adequada a contextos de restrições estruturais, podendo contribuir para a inserção gradual do Brasil na cadeia global de semicondutores.

PALAVRAS-CHAVE: Semicondutores. Política Industrial. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This paper addresses the concept of compact semiconductor fabrication facilities, with an emphasis on Minimal Fabs and the national PocketFab initiative, as alternatives to the traditional megafab model. It is noteworthy that this study is of a bibliographic and documentary nature, not including experimental validation or field investigation. The adopted methodology is based on a systematic review of scientific articles and the analysis of technical and institutional reports relevant to the topic. The results indicate that the conventional megafab model, although essential for large-scale production and the development of cutting-edge technologies, presents high capital expenditure (CAPEX) and operating expenditure (OPEX), intensive use of natural

[1] Mestre em Engenharia Industrial e Inteligência Artificial pela PUC Goiás.
[2] Doutor em Engenharia Elétrica pela UnB. Professor da Escola Politécnica da PUC Goiás.
[3] Doutora em Engenharia Elétrica e de Computação pela UFG. Professora do IFG.
[4] Doutor em Estatística pela USP. Professor da Escola Politécnica da PUC Goiás.
[5] Doutor em Física pela Unicamp. Professor da Escola Politécnica da PUC Goiás.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

resources, and low flexibility to meet low-volume, highly customized demands. In contrast, Minimal Fabs demonstrate a significant reduction in CAPEX and OPEX, lower energy and water consumption, greater production flexibility, and higher feasibility for niche applications, such as sensors, analog devices, and embedded systems. It is concluded that Minimal Fabs do not replace megafabs, but rather constitute a complementary strategy, suitable for contexts with structural constraints, potentially contributing to Brazil's gradual integration into the global semiconductor supply chain.

KEYWORDS: *Semiconductors. Industrial Policy. Sustainability.*

RESUMEN

El presente trabajo aborda el concepto de fábricas compactas de semiconductores, con énfasis en las Minimal Fabs y en la iniciativa nacional PocketFab, como alternativas al modelo tradicional de megafabs. Se destaca que este estudio posee una naturaleza bibliográfica y documental, sin contemplar validación experimental ni investigación de campo. La metodología adoptada se basa en la revisión sistemática de artículos científicos y en el análisis de informes técnicos e institucionales relevantes al tema. Los resultados indican que el modelo convencional de megafab, si bien es esencial para la producción a gran escala y el desarrollo de tecnologías de vanguardia, presenta altos costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX), uso intensivo de recursos naturales y baja flexibilidad para atender demandas de bajo volumen y alta personalización. En contraste, las Minimal Fabs demuestran una reducción significativa de CAPEX y OPEX, menor consumo de energía y agua, mayor flexibilidad productiva y mayor viabilidad para aplicaciones de nicho, como sensores, dispositivos analógicos y sistemas embebidos. Se concluye que las Minimal Fabs no sustituyen a las megafabs, sino que constituyen una estrategia complementaria, adecuada a contextos de restricciones estructurales, pudiendo contribuir a la inserción gradual de Brasil en la cadena global de semiconductores.

PALABRAS CLAVE*: Semiconductores. Política industrial. Sostenibilidad.*

1. INTRODUÇÃO

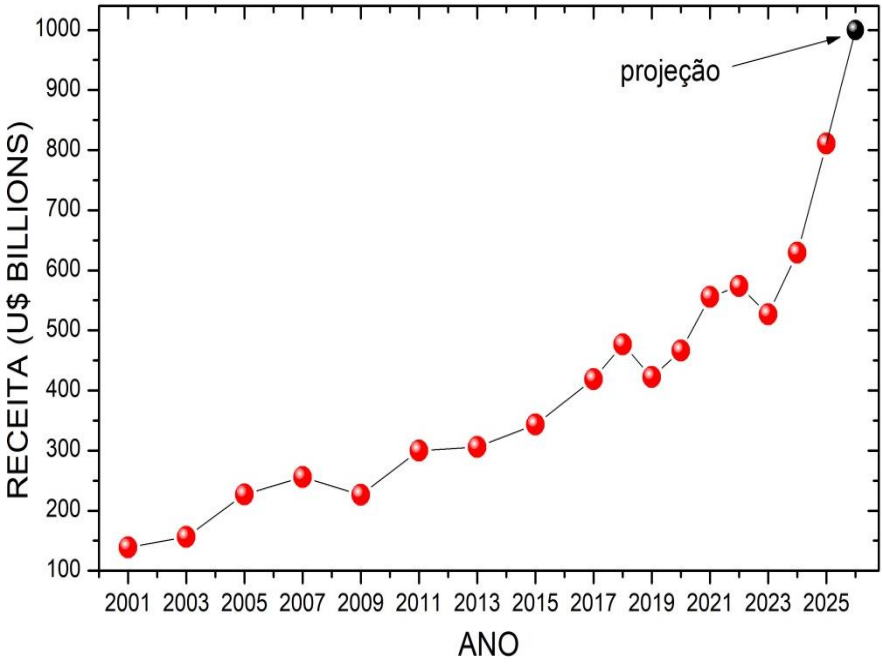
A indústria de semicondutores constitui um alicerce estratégico para a economia digital global. Os materiais semicondutores exercem papel fundamental na indústria eletrônica, tendo impulsionado avanços significativos na computação e na eletrônica [1]. Entre os dispositivos fabricados com esses materiais destacam-se diodos, diodos emissores de luz (LEDs), transistores, detectores e emissores, células solares, sensores e *lasers* [2].

A Figura 1 apresenta a receita anual da indústria global de semicondutores no período de 2001 a 2025, em bilhões de dólares norte-americanos [3]. Uma análise detalhada dos dados compreendidos entre 2001 e 2022 pode ser encontrada em [4]. Em 2023, a receita total da indústria atingiu US$ 526,8 bilhões, representando uma retração de 8,2% em relação ao valor recorde de US$ 574,1 bilhões registrado em 2022, resultado, sobretudo, da desaceleração no segmento de *chips* de memória e de ajustes de inventário. Observa-se uma recuperação em

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2024, com a receita anual situando-se entre US$ 627,6 bilhões e US$ 630,5 bilhões, o que corresponde a um crescimento entre 18% e 19,1% em relação ao ano anterior. Para 2025, estima-se que a receita alcance valores entre US$ 791,7 bilhões e US$ 830 bilhões, impulsionada principalmente pela expansão da infraestrutura de inteligência artificial. Projeções para 2026 indicam que as vendas anuais podem atingir aproximadamente US$ 1 trilhão em escala global, com destaque para o crescimento dos segmentos de processamento e memória.

Figura 1. Receita anual (em bilhões de dólares americanos) da indústria de semicondutores. O valor para o ano de 2026 é uma projeção



Fonte: [3].

No Brasil, a ausência de capacidade produtiva nacional resulta na necessidade de importações, comprometendo a competitividade de setores estratégicos, como o automotivo e o eletrônico. A crise de abastecimento ocorrida entre 2020 e 2022, desencadeada pela pandemia de COVID-19, evidenciou de forma acentuada essa vulnerabilidade: linhas de montagem automotivas foram paralisadas devido à escassez de *chips*, demonstrando o risco sistêmico associado à dependência externa [5].

O setor automotivo brasileiro consome, em média, US$ 350,00 em semicondutores por veículo, sendo cerca de 70% desse valor composto por dispositivos analógicos, sensores e componentes discretos [6,7]. Considerando uma produção anual aproximada de 2 milhões de veículos, o mercado potencial atinge cerca de US$ 700 milhões por ano. Observa-se, ainda, a transição para veículos elétricos e autônomos, alinhada ao conceito CASE (*Connected,*

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Autonomous, Shared, Electric), que tende a intensificar essa demanda, com projeções de aumento de até dez vezes no conteúdo eletrônico por veículo [8].

Paralelamente, o setor de eletrônicos apresenta um déficit comercial crônico, caracterizado pela produção de bens de consumo fortemente dependente de componentes importados, o que compromete a agregação de valor ao longo de toda a cadeia produtiva [7].

A viabilidade da produção de semicondutores está diretamente associada à eficiência dos processos produtivos, ao controle estatístico da variabilidade e à redução das taxas de defeitos. O desempenho financeiro das plantas industriais depende de fatores como rendimento de produção, taxa de obsolescência tecnológica, consumo energético e custos logísticos, o que torna indispensável a adoção de estratégias avançadas de otimização e padronização de processos [9].

Esse cenário reforça a necessidade de avaliação de modelos produtivos alternativos às *megafabs*, especialmente em contextos nos quais a demanda é caracterizada por menor escala, maior grau de customização e restrições de capital, infraestrutura e sustentabilidade. Nesse sentido, torna-se pertinente investigar arquiteturas produtivas capazes de atender às novas demandas por flexibilidade, customização e redução de barreiras tecnológicas na manufatura de semicondutores.

A experiência da CEITEC (Centro Nacional de Tecnologia Eletrônica Avançada), a única fábrica de semicondutores verticalmente integrada na América Latina, ilustra os desafios enfrentados por essa indústria no contexto brasileiro [10]. Fundada em 2008, com a utilização de equipamentos doados pela Motorola (baseados em tecnologia de 0,6 µm, já considerada obsoleta desde meados da década de 1990), e encerrada em 2022, a CEITEC enfrentou limitações significativas, incluindo problemas de gestão associados a planos de negócios desatualizados desde 2004, instabilidade no financiamento e restrições institucionais, como o veto do Ministério da Fazenda em 2015, atribuído a diretrizes de política econômica de cunho liberal.

O encerramento da iniciativa implicou perdas de centenas de milhões de reais e evidenciou lições relevantes para o setor, destacando a importância da adoção de tecnologias compatíveis com o mercado-alvo, da implementação de práticas de gestão profissional e da continuidade de políticas industriais [11]. Todavia, após o anúncio de liquidação, retornou às atividades em 2024.

Nesse contexto, emerge o conceito de fábricas compactas de semicondutores, com destaque para as *Minimal Fabs*, desenvolvidas no Japão pela Yokogawa [12,13], e para o modelo PocketFab, uma iniciativa USP-FIESP-SENAI, inaugurado no Brasil em janeiro de 2026 [14,15]. Essas abordagens tecnológicas propõem a redução significativa do investimento inicial, menor

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

impacto ambiental e maior adequação a nichos de alto valor agregado, como os setores automotivo, médico e de Internet das Coisas (IoT).

Nessa perspectiva, este trabalho apresenta uma investigação sobre como as *Minimal Fabs* têm sido abordadas e desenvolvidas na literatura técnica e em documentos institucionais, bem como os processos e aplicações já demonstrados, os elementos tecnológicos que configuram sua singularidade em relação às *megafabs* e a forma como sua arquitetura pode contribuir para novos modelos de microfabricação de semicondutores.

Após a primeira seção, Introdução, o artigo está organizado em mais dez seções: 2) contextualização, 3) Metodologia, 4) Panorama da cadeia global de semicondutores e inserção brasileira, 5) As barreiras técnicas das *megafabs*, 6) A experiência brasileira, 7) *Minimal fab*: conceito e viabilidade técnica, 8) *Minimal fab* como alternativa ao modelo de *megafab* na indústria de semicondutores, 9) PocketFab USP-FIESP-SENAI, 10) Sustentabilidade, consumo energético e infraestrutura crítica, e 11) Conclusão e considerações finais. Assim, espera-se contribuir para a consolidação de uma visão analítica e sistematizada sobre uma plataforma de microfabricação compacta.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

A implantação de fábricas de semicondutores insere-se em um contexto global caracterizado pela crescente dependência tecnológica e pela reconfiguração das cadeias produtivas estratégicas. Os semicondutores são fundamentais para praticamente todos os segmentos da economia digital e industrial contemporânea, incluindo telecomunicações, automação industrial, inteligência artificial, equipamentos médicos, setores energético e de defesa. Nesse cenário, a elevada concentração geográfica da produção mundial, associada a eventos recentes, como a pandemia de COVID-19, afetou significativamente o fornecimento global, evidenciando vulnerabilidades estruturais que impactam diretamente o desempenho econômico e a segurança industrial de países dependentes da importação desses componentes [16].

Diante desse cenário, observa-se um movimento internacional de fortalecimento das políticas industriais voltadas à implantação de unidades fabris de semicondutores. Países como Estados Unidos, membros da União Europeia e economias asiáticas têm adotado programas específicos de incentivo, que combinam subsídios, benefícios fiscais e investimentos em pesquisa, desenvolvimento e formação de capital humano. Essas iniciativas refletem o reconhecimento de que a produção de semicondutores transcende o aspecto econômico

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

imediato, configurando-se como uma infraestrutura tecnológica essencial para o desenvolvimento e a competitividade industrial de longo prazo [17].

A complexidade da indústria de semicondutores, associada ao aumento dos custos de capital, à concentração tecnológica e à necessidade de atualização contínua das linhas produtivas, tem reforçado a predominância das *megafabs* como principal modelo de fabricação de dispositivos eletrônicos. Entretanto, a mesma lógica que impulsionou o avanço do setor passou a impor barreiras crescentes à prototipagem rápida, à fabricação em baixo volume e ao desenvolvimento de dispositivos especializados, sobretudo em contextos nos quais a escala massiva das linhas convencionais não se justifica economicamente [12].

Nesse contexto, torna-se relevante a investigação de arquiteturas alternativas capazes de atender às novas demandas de flexibilidade, customização e redução de barreiras tecnológicas na manufatura de semicondutores. Como resposta a essas limitações, surgiu o conceito de fábricas modulares compactas de *chips*, concebido como uma arquitetura alternativa de microfabricação semicondutora voltada à redução de escala física, do investimento inicial e da complexidade operacional. Em contraste com as *megafabs* convencionais, as minifábricas propõem o uso de wafers de pequena dimensão, equipamentos compactos e uma lógica de produção modular, orientada à prototipagem, à pesquisa, ao desenvolvimento e à fabricação em pequenos lotes.

Estudos indicam que esse conceito não se limita a uma simples miniaturização de equipamentos, mas configura uma reorganização do sistema produtivo, com ênfase na flexibilidade, na redução dos custos de infraestrutura e na viabilização de aplicações que não se enquadram no regime tradicional de produção em massa.

Observa-se que países em desenvolvimento, embora apresentem demanda crescente por dispositivos microeletrônicos, impulsionada por setores como telecomunicações, energia, automação industrial, defesa e tecnologia da informação, mantêm participação limitada na cadeia global de valor dos semicondutores. Essa participação concentra-se predominantemente em etapas de menor intensidade tecnológica, como projeto (*design*), encapsulamento e testes (*back-end*), bem como no consumo final, refletindo uma inserção periférica na estrutura produtiva global [18,19].

A literatura nacional aponta que o principal entrave à consolidação de *megafabs* de semicondutores no Brasil reside no elevado custo de implantação e operação, na necessidade de infraestrutura altamente especializada e na constante atualização tecnológica. Estudos do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) indicam que o investimento inicial para a instalação de uma fábrica de semicondutores pode ultrapassar dezenas de bilhões

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de reais, tornando a viabilidade econômica fortemente dependente de economias de escala, de incentivos governamentais e da estabilidade macroeconômica de longo prazo [18].

Além do elevado investimento inicial (CAPEX), a viabilidade econômica de plantas de fabricação de semicondutores é altamente sensível ao desempenho operacional, especialmente no que se refere ao rendimento produtivo (*yield*), ao consumo energético e à taxa de obsolescência tecnológica. Estudos indicam que o custo unitário de dispositivos semicondutores apresenta relação inversamente proporcional ao *yield* do processo, de modo que reduções aparentemente marginais nesse parâmetro podem resultar em incrementos de custo superiores a 30%, comprometendo significativamente a competitividade da operação [20,21].

No contexto brasileiro, análises institucionais indicam que a limitada maturidade tecnológica e a ausência de domínio pleno dos processos críticos de fabricação (*front-end*) impactam negativamente a estabilidade produtiva e os custos operacionais [22]. Adicionalmente, a elevada complexidade dos sistemas produtivos exige a adoção de arquiteturas avançadas de controle estatístico de processo, automação industrial e otimização em tempo real.

Desse modo, ao analisar a evolução histórica da indústria de dispositivos, Hara *et al.* [12] argumentam que o setor ingressou em uma fase de maturidade, na qual o gigantismo fabril deixa de representar, necessariamente, maior racionalidade econômica. Segundo os autores, o modelo de produção dominante foi fortemente influenciado pelo denominado “culto ao *throughput*”, isto é, pela premissa de que o aumento contínuo da produção por unidade de tempo implicaria automaticamente maior produtividade. Nesse sentido, a crítica ao modelo convencional não decorre apenas de sua escala física, mas também da inadequação desse arranjo frente a demandas caracterizadas por alta variedade, baixo volume e ciclos curtos de desenvolvimento tecnológico.

A literatura brasileira destaca a carência de modelos consolidados de avaliação de viabilidade econômica adaptados à realidade nacional. Embora existam experiências pontuais, como a da CEITEC, estudos indicam que a replicação de modelos tradicionais requer análises mais robustas, que considerem fatores como a dependência de insumos importados, a volatilidade cambial, as políticas fiscais, os custos trabalhistas e a inserção competitiva no mercado global [18,23].

A compreensão desse modelo pode contribuir para debates mais amplos relacionados à descentralização produtiva, à redução de barreiras tecnológicas, à prototipagem de dispositivos semicondutores e ao desenvolvimento de novos arranjos fabris orientados à alta variedade e ao baixo volume de produção. Nesse contexto, coloca-se a seguinte questão de pesquisa: em que

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

medida a implantação de fábricas compactas (*Minimal Fabs/PocketFab*) pode contribuir para a redução de gargalos produtivos nesse setor?

3. METODOLOGIA

Foi adotada uma abordagem de revisão sistemática integrativa, complementada por análise documental, mapeamento patentário e modelagem econômico-ambiental aplicada ao contexto brasileiro. A utilização de métodos mistos possibilita a articulação entre análises conceituais, técnicas e econômico-financeiras [24,25]. O corpus analítico foi composto por artigos científicos, documentos institucionais da Yokogawa, catálogos técnicos de equipamentos e documentos patentários relacionados aos principais subsistemas das *Minimal Fabs*.

4. PANORAMA DA CADEIA GLOBAL DE SEMICONDUTORES E INSERÇÃO BRASILEIRA

Com a declaração da COVID-19 como pandemia pela Organização Mundial da Saúde, em março de 2020, instaurou-se um cenário de crise sanitária de alcance global, cujos efeitos extrapolaram o campo da saúde pública e impactaram significativamente as atividades econômicas. A rápida disseminação do vírus evidenciou vulnerabilidades associadas à elevada interdependência das cadeias produtivas globais, gerando impactos econômicos, sociais e institucionais [5].

Segundo Soares [26], o efeito mais significativo, apontado por 80% das empresas de microeletrônica atuantes no período, refere-se à interrupção da logística internacional, acompanhada pelo aumento expressivo dos custos de frete. Adicionalmente, a desvalorização do real frente ao dólar contribuiu para o encarecimento dos insumos importados.

A indústria de semicondutores constitui um elemento indispensável para a manufatura de equipamentos eletrônicos, configurando-se como a base tecnológica de uma ampla gama de produtos, como notebooks, smartphones e televisores. Trata-se de um dos setores mais essenciais e dinâmicos da atualidade, inserido no contexto da Indústria 4.0 e da Internet das Coisas (IoT) [27,28].

O crescimento dessa indústria está associado à intensificação do consumo de bens eletrônicos nas últimas décadas, impulsionado pela digitalização da economia e pela crescente demanda por dispositivos conectados [29]. O avanço das tecnologias da informação tem favorecido a fragmentação das cadeias produtivas e a redução de custos nas relações comerciais internacionais, consolidando um modelo de produção globalmente distribuído [30].

No Brasil, diagnósticos institucionais indicam que a participação nacional permanece limitada e concentrada em segmentos específicos, com desafios estruturais relevantes para a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

fabricação de dispositivos de maior intensidade tecnológica [19]. Essas características reforçam a necessidade de estudos aplicados voltados ao desenvolvimento de tecnologias de fabricação de semicondutores adaptadas às condições brasileiras.

O principal desafio atual para a produção em escala de semicondutores voltada ao atendimento da demanda interna reside na ausência de investimentos privados, uma vez que a indústria de semicondutores requer elevados custos de implantação. Nesse sentido, torna-se necessária uma ação coordenada e sistêmica entre diferentes atores, incluindo governo, empresas públicas e privadas, além de instituições de ensino e pesquisa. Gutierrez *et al.* [22] destacam que o atraso no desenvolvimento dessa indústria acarreta prejuízos econômicos, com impactos em diversos segmentos da microeletrônica, comprometendo a autonomia nacional nesse setor.

É possível observar, conforme apresentado na Tabela 1, que, entre 1990 e o final de 2019, houve uma redução da participação nas exportações de semicondutores, com exceção da China e dos chamados Tigres Asiáticos. A partir de 2020, verifica-se uma reversão dessa tendência, com recuperação significativa de importantes players, como Estados Unidos, Japão e Alemanha. Essa recuperação está associada ao contexto da pandemia de COVID-19, que evidenciou gargalos na cadeia global de suprimentos, impulsionando a adoção de políticas governamentais voltadas à reinternalização da produção de semicondutores [26].

Tabela 1. Evolução do *Market-share* das exportações de *chips* para diversas economias

País	1990	2000	2010	2020	2022
Estados Unidos	-	21,50%	9,43%	5,61%	14,76%
Japão	34,60%	12,00%	8,65%	3,67%	9,61%
Singapura	12,40%	11,50%	19,28%	10,95%	-
Coreia do Sul	16,80%	8,00%	9,49%	10,52%	-
Hong Kong	-	4,30%	13,83%	19,54%	-
Alemanha	11,3%	3,90%	2,55%	1,63%	5,65%
Holanda	-	2,80%	0,97%	1,47%	1,45%
China	-	1,20%	7,41%	14,85%	-
Brasil	0,10%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%

Fonte: [26].

A participação brasileira nesse setor é limitada e apresentou trajetória de declínio ao longo dos anos. Na década de 1990, o país detinha aproximadamente 0,10% das exportações totais de semicondutores, ocupando a 12ª posição entre os exportadores mundiais; entretanto, em 1995, essa participação reduziu-se para cerca de 0,01%, com o Brasil passando à 35ª posição no ranking. Filippin [28] afirma que parcela significativa dessa perda de competitividade está associada ao modelo de abertura comercial adotado, o qual contribuiu para a redução do número de fábricas no segmento de componentes eletrônicos. Como consequência, no início dos anos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2000, havia no Brasil apenas cinco empresas e duas instituições atuantes na indústria de semicondutores.

O relatório da Agência Internacional de Energia (IEA), intitulado *Promovendo a Fabricação de Tecnologias Limpas*, destaca que a manufatura de tecnologias estratégicas se encontra no centro das disputas econômicas contemporâneas, sendo caracterizada por elevada concentração geográfica, intensificação dos investimentos e crescente relevância das políticas industriais [31]. Nesse contexto, a competitividade não depende exclusivamente da escala, mas também da capacidade de inovação, da eficiência operacional e da articulação institucional.

A indústria de semicondutores é caracterizada por uma cadeia global de valor altamente fragmentada e especializada, abrangendo etapas de concepção (*design*), fabricação (*front-end*), encapsulamento e testes (*back-end*), logística e integração em produtos finais. Esse arranjo internacional consolidou-se ao longo de décadas em função de fatores tecnológicos, econômicos e estratégicos, resultando em elevada concentração produtiva em poucas regiões e forte dependência de fornecedores especializados. Nos últimos anos, a vulnerabilidade dessa cadeia tem sido amplamente discutida, reforçando a relevância de políticas industriais e de estratégias nacionais voltadas ao fortalecimento da capacidade produtiva [17,32].

A organização desse setor ocorre, em geral, por meio de três modelos produtivos principais: fabricantes integrados (*Integrated Device Manufacturers* – IDM), fundições puras (*foundries*) e empresas *fabless*[6]. Cada modelo apresenta estruturas de custo, níveis de risco tecnológico e estratégias competitivas distintas. Enquanto o modelo IDM permite maior controle da cadeia produtiva, exige investimentos elevados e apresenta maior exposição à obsolescência tecnológica. Por sua vez, o modelo *foundry* beneficia-se de economias de escala e do foco exclusivo na manufatura, ao passo que o modelo *fabless* reduz significativamente o investimento em capital (CAPEX), mas amplia a dependência de fornecedores externos. A escolha do modelo produtivo exerce influência direta sobre a viabilidade econômica da implantação de uma fábrica, especialmente em países emergentes [32].

Segundo Filippin [28], a produção de um circuito integrado (CI), considerado o produto representativo do setor, pode ser dividida em cinco etapas: (i) concepção do produto, na qual são definidas as funcionalidades do chip; (ii) projeto ou design do componente; (iii) fabricação do componente (*front-end*); (iv) teste, ajuste fino, corte e encapsulamento/montagem do componente (*back-end*); e (v) serviços ao cliente. Deng e Deng [33] afirmam que, na indústria de

[6] Empresas *fabless* (sem fábricas) projetam e comercializam semicondutores, terceirizando a produção para fundições especializadas (como a TSMC). Esse modelo concentra-se em pesquisa e desenvolvimento (P&D), permitindo menor intensidade de capital e maior agilidade em inovação. Entre os principais exemplos destacam-se Nvidia, Qualcomm, Broadcom e AMD.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

semicondutores, o processo de fabricação de um CI constitui um dos processos de manufatura mais complexos. A partir da fragmentação da produção nessas etapas, as empresas podem adotar diferentes modelos de negócios, conforme apresentado na Tabela 2.

A elevada demanda do setor requer investimentos substanciais em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e design, bem como a adoção de tecnologias que possibilitem a redução dos custos de produção. Essas tendências têm levado as empresas do segmento a avançar na adoção de modelos de negócios baseados em *offshoring*, com a realocação das atividades manufatureiras, visando acessar fornecedores com maior nível de eficiência [34].

Tabela 2. Tipos de segmento de negócios na indústria de *chips*

Modelo	Etapa dominante	Vantagem	Limitação	Relevância para o Brasil	Empresas
IDM	Cadeia completa	Controle tecnológico	CAPEX elevado	Baixa aderência	Intel Corporation, Samsung Electronics, Micron Technology
Foundry	*Front-end*	Escala	Alto investimento	Difícil para Mega Fab	TSMC, GlobalFoundries, UMC
Fabless	*Design*	Baixo CAPEX	Dependência externa	Já existe no Brasil	Qualcomm, Broadcom, AMD
OSAT	*Back-end*	Menor barreira	Menor valor agregado	Aderente ao histórico nacional	ASE, Amkor Technology, SPIL
Minimal Fab	*Nichos/front-end compacto*	Modularidade	Escala limitada	Alta aderência estratégica	PocketFab

Fonte: [26].

Segundo o relatório da *Semiconductor Industry Association* (SIA), o modelo *Integrated Device Manufacturer* (IDM) deriva das eficiências associadas à integração vertical, enquanto o modelo *fabless-foundry* decorre das eficiências resultantes da especialização das atividades [34]. As empresas *fabless*, por sua vez, concentram-se no design e na inovação, a fim de reduzir a necessidade de elevados investimentos em capital produtivo nas instalações fabris.

Estudos recentes sobre esses modelos indicam que essa divisão delineou uma situação de benefício mútuo, na qual as empresas *fabless* puderam reduzir os custos e riscos associados ao aumento contínuo dos custos fixos das plantas de manufatura, concentrando-se em segmentos produtivos de maior valor agregado. Por sua vez, as *foundries* beneficiam-se de economias de escala e de aprendizado, ao atender simultaneamente a um maior número de clientes *fabless* [33].

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Segundo Soares [26], a indústria de semicondutores em países desenvolvidos, especialmente nos Estados Unidos, mantém a liderança de mercado nas atividades mais intensivas em pesquisa e desenvolvimento (P&D), como *Electronic Design Automation* (EDA), propriedade intelectual (*Intellectual Property* – IP), projeto de *chips* e fabricação de equipamentos. Por outro lado, as etapas de *front-end* e os processos de fabricação *back-end* encontram-se, em grande parte, concentrados na China e nos Tigres Asiáticos. Estima-se que aproximadamente 75% da capacidade global de fabricação, incluindo produção, montagem, teste e encapsulamento de *wafers* de dispositivos avançados, esteja localizada na Ásia. Nesse contexto, os Estados Unidos lideram em determinados segmentos, como semicondutores analógicos e optoeletrônicos, enquanto apresentam menor participação no segmento de semicondutores de memória.

No Brasil, a atuação na indústria de semicondutores concentra-se predominantemente nas etapas de *back-end*, especialmente em atividades de encapsulamento, testes e montagem. Em contrapartida, a produção de *wafers* de silício (*front-end*) é pouco expressiva no país, o que evidencia uma lacuna estrutural, mas também abre perspectivas para a adoção de novos modelos produtivos voltados à fabricação de *chips*.

5. BARREIRAS TÉCNICAS DAS MEGAFABS

A consolidação da indústria de semicondutores no Brasil poderia contribuir significativamente para a redução do déficit da balança comercial, considerando que o país apresenta uma produção relevante de bens eletrônicos, mas depende fortemente da importação de semicondutores e displays para suprir sua base produtiva [35,36].

A fragilidade da produção nacional de componentes semicondutores compromete a competitividade de setores intensivos em eletrônica, contribui para o agravamento do déficit da balança comercial e limita o domínio tecnológico do país em áreas estratégicas, incluindo a segurança nacional e a autonomia tecnológica. Nesse contexto, torna-se necessário o estabelecimento de políticas industriais e a realização de investimentos estratégicos voltados ao fortalecimento desse segmento [19,37].

A fabricação de semicondutores demanda processos de alta precisão, como litografia, deposição, gravação e dopagem, além de ambientes com controle rigoroso de contaminação, temperatura e umidade (as chamadas salas limpas). Tais requisitos elevam a complexidade de implantação e reforçam a necessidade de infraestrutura industrial compatível, incluindo matérias-primas, fornecimento estável de energia, água ultrapura, gases especiais e logística de alta confiabilidade [38,39].

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Esse processo envolve o aprimoramento contínuo de todas as etapas da cadeia de fabricação. Em determinados casos, torna-se necessária a adoção de mudanças estruturais em etapas específicas do processo produtivo, com o objetivo de contornar limitações físicas e tecnológicas decorrentes da redução da geometria, viabilizando a continuidade da evolução tecnológica [28].

A viabilidade de implantação de uma fábrica de semicondutores é sensível ao estado da arte, uma vez que as tecnologias evoluem continuamente, promovendo aumentos no rendimento fabril (*yield*), indicador crítico de desempenho. Nesse contexto, estudos voltados à redução de variações de processo na fabricação de semicondutores são essenciais para mitigar perdas que poderiam elevar os custos unitários e comprometer a competitividade. Assim, os requisitos técnicos tornam-se determinantes para o dimensionamento do investimento em capital (CAPEX) e dos custos operacionais (OPEX), impactando diretamente a sustentabilidade econômica do empreendimento [39].

Grande parte do baixo desempenho do setor de semicondutores no Brasil está associada ao reduzido nível de investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D), quando comparado aos países líderes em tecnologias avançadas. Observa-se, ainda, que o nível de cooperação entre organizações ao longo da cadeia produtiva é insuficiente. Adicionalmente, os incentivos governamentais carecem de maior estruturação para potencializar a inovação, sendo a cooperação entre diferentes atores institucionais uma das principais estratégias para o fortalecimento desse processo [26].

Apesar de se observarem esforços no Brasil para a promoção da inovação nesse setor, tais iniciativas ainda se mostram insuficientes diante do desafio de reestruturação da indústria, considerando o significativo hiato tecnológico existente entre o país e as principais nações atuantes nessa cadeia global [28]. Nos últimos anos, as políticas públicas direcionadas a esse segmento apresentaram estagnação, resultando no encerramento das atividades de diversas empresas, especialmente *design houses* com finalidade lucrativa.

A única política de incentivo que permaneceu em vigor, ainda que com modificações, foi o PADIS (Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores e Displays), instituído pela Lei nº 11.484/2007. Trata-se de uma iniciativa do governo brasileiro que concede incentivos fiscais a empresas que investem em pesquisa, desenvolvimento e inovação nos setores de semicondutores, displays e painéis fotovoltaicos. Contudo, a implementação isolada desse instrumento não se mostra suficiente para dinamizar a cadeia de inovação no setor.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A operação de uma fábrica de semicondutores exige mão de obra altamente qualificada, com competências técnicas em processos, metrologia, automação, controle estatístico e manutenção de equipamentos complexos. A estrutura de custos de uma *megafab* é caracterizada por elevado investimento inicial, além de custos operacionais significativos, associados ao fornecimento de energia, ao uso de insumos de alta pureza, à manutenção, à qualificação da mão de obra e à atualização tecnológica [39].

A qualificação da mão de obra constitui uma variável crítica para a inserção competitiva em cadeias produtivas intensivas em tecnologia, exercendo, ademais, impacto direto sobre a produtividade e o desempenho industrial [37,40]. No contexto brasileiro, a Tabela 3 apresenta o quadro técnico efetivo da empresa CEITEC, com base em seu Relatório de Gestão de 2020, evidenciando a distribuição da força de trabalho e os respectivos níveis de escolaridade.

Sabe-se que, quanto mais avançadas são as tecnologias voltadas à redução das dimensões dos *wafers*, maiores são os custos associados em todas as etapas da produção. Os custos crescentes relacionados ao desenvolvimento de *chips* cada vez mais complexos, aliados aos elevados investimentos necessários para a construção de fábricas de última geração (*state-of-the-art fabs*), configuram-se como um dos principais desafios econômicos enfrentados pela indústria de semicondutores. Esses fatores decorrem da elevada intensidade de capital e da crescente sofisticação tecnológica dos processos produtivos, que exigem investimentos contínuos em pesquisa, desenvolvimento e infraestrutura [41].

Tabela 3. Distribuição do quadro técnico por carreira da CEITEC

Cargo	Formação Mínima	Salário Inicial	No. de Colaboradores	(%)
Analista administrativo operacional	Superior	R$ 6.875,24	26	16%
Especialista em tecnologia eletrônica avançada	Superior	R$ 9.500,72	98	59%
Técnico administrativo operacional	Nível Médio	R$ 3.383,24	20	12%
Técnico em eletrônica avançada	Nível Técnico	R$ 5.074,86	23	14%
Total de colaboradores			167	100%

Fonte: [10].

Estimativas indicam que o custo de desenvolvimento de um chip de última geração pode ultrapassar US$ 1 bilhão, enquanto a construção de fábricas de semicondutores de ponta pode exigir investimentos entre US$ 10 bilhões e US$ 20 bilhões, a depender da tecnologia empregada [29,42]. Nesse contexto, a busca por alternativas para a produção de *chips* configura-se como

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

uma estratégia relevante para mitigar as barreiras econômicas associadas ao modelo tradicional de fabricação.

Segundo Bauer *et al.* [43], entre 2001 e 2014, o custo de construção de fábricas de última geração aumentou, em média, 13% ao ano, passando de US$ 1,7 bilhão para US$ 10 bilhões. Consequentemente, o número de empresas que operam fábricas no estado da arte nos segmentos de memórias e circuitos integrados lógicos reduziu-se de 29 para 6 no mesmo período. Esse movimento evidencia que os elevados investimentos requeridos para o desenvolvimento tecnológico e a construção de *megafabs* podem se tornar economicamente inviáveis para empresas que não acompanham o ritmo de inovação do setor, contribuindo para a obsolescência tecnológica e a concentração industrial.

Segundo Filippin [28], no contexto das *megafabs*, uma das estratégias para equilibrar os custos de produção consiste na melhoria da produtividade por meio de economias de escala e do aumento da dimensão dos *wafers*. A manutenção de elevados níveis de utilização da capacidade instalada é um fator crítico, de modo que apenas produtos de alto volume, como microprocessadores e memórias, são tipicamente fabricados nesse tipo de planta.

Ademais, não apenas o nível de utilização, mas também a capacidade instalada deve ser elevado, uma vez que o aumento dos custos dos equipamentos necessários para a produção em tecnologias avançadas dificulta a amortização dos investimentos em novas plantas. Nesse contexto, tanto as *dedicated foundries* quanto as empresas do modelo *Integrated Device Manufacturer* (IDM) passaram a produzir *chips* sob contrato para terceiros, como forma de manter elevados níveis de utilização da capacidade instalada.

Para Filippin [28], é importante destacar que os custos crescentes associados ao desenvolvimento de novas tecnologias e à construção de fábricas de última geração eram, historicamente, compensados por ganhos de produtividade, resultando em produtos mais acessíveis. Contudo, essa tendência tem perdido força na atualidade. Nesse contexto, as megafabs que operam com *wafers* de 300 mm, e que demandam investimentos da ordem de bilhões de dólares por linha de produção, além de apresentarem impactos ambientais elevados, vêm sendo progressivamente reavaliadas à luz de novos paradigmas produtivos.

Por outro lado, evidências mais recentes indicam que a indústria de semicondutores está ingressando em uma fase de maturidade, caracterizada por desafios estruturais, como a saturação de determinados mercados, a supercapacidade produtiva, o aumento dos custos ambientais e a elevação dos riscos associados a novos investimentos em fábricas de grande escala [16,29,42].

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

No Brasil, documentos técnicos indicam que os custos e riscos associados à implantação de fábricas de semicondutores de última geração são amplificados por fatores estruturais e institucionais, como a dependência de insumos importados e a sensibilidade à volatilidade cambial, reforçando a necessidade de avaliações econômico-financeiras mais robustas [36]. Nesse cenário, emergem alternativas tecnológicas e organizacionais, como o conceito de *Minimal Fab*, que propõe a manufatura de semicondutores em pequena escala, com menor intensidade de capital, maior flexibilidade produtiva e capacidade de atender nichos específicos de mercado, como aplicações na indústria automotiva e em sistemas embarcados.

6. EXPERIÊNCIA BRASILEIRA

A trajetória brasileira na indústria de semicondutores revela um conjunto de iniciativas públicas voltadas à formação de competências, à atração de investimentos e ao fortalecimento da base tecnológica nacional. Entretanto, a experiência acumulada demonstra que os principais entraves não se limitam à ausência de políticas industriais, mas estão associados à dificuldade de coordenação entre instrumentos de financiamento, formação de recursos humanos, estratégia produtiva, continuidade institucional e inserção efetiva nas etapas de maior valor agregado da cadeia [18,37].

Nesse sentido, a análise das iniciativas brasileiras mostra-se relevante não pela reconstrução histórica detalhada de cada programa, mas pelas lições que oferecem para a avaliação de modelos produtivos mais compatíveis com as condições estruturais do país, como as *Minimal Fabs* e PocketFab.

Historicamente, o Brasil buscou estruturar sua atuação na indústria de semicondutores por meio de diferentes instrumentos, como o Plano Nacional de Microeletrônica (PNM), a Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior (PITCE), o Programa CI-Brasil, o PADIS, a CEITEC e, mais recentemente, o Chip Tech Brasil e a Nova Indústria Brasil (NIB). Essas iniciativas contribuíram para a formação de capacidades em projeto de circuitos integrados, a criação de *design houses*, a qualificação de recursos humanos e o fortalecimento institucional da microeletrônica.

Contudo, seus resultados foram limitados no que se refere à consolidação de uma capacidade nacional robusta de fabricação de *wafers*, especialmente em função da elevada intensidade de capital, da descontinuidade das políticas públicas e da dificuldade de sustentar modelos produtivos de maior escala [28].

A síntese das principais iniciativas permite identificar que os programas brasileiros apresentaram avanços relevantes, mas também limitações recorrentes quanto à aderência

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

produtiva, à governança institucional e à capacidade de indução tecnológica. A Tabela 4 sintetiza essas experiências sob a ótica de sua contribuição para a discussão sobre *Minimal Fabs*.

A análise do PNM indica que, desde os primeiros diagnósticos nacionais, já se reconhecia a dificuldade de competir diretamente com países asiáticos em estruturas fabris de grande escala. Ao priorizar atividades de *design*, *back-end* e *foundries* de menor porte, o programa evidenciou que a inserção brasileira na cadeia de semicondutores dependeria de estratégias seletivas, orientadas a nichos tecnológicos e compatíveis com a capacidade de investimento nacional [44,45].

Essa constatação permanece atual e reforça a pertinência de modelos produtivos compactos, como as Minimal Fabs, especialmente para aplicações de baixo volume, maior grau de customização e menor intensidade de capital.

A experiência da PITCE e do CI-Brasil, por sua vez, demonstra que a formação de competências em projeto de circuitos integrados constituiu um avanço relevante, porém insuficiente para a estruturação de uma indústria de semicondutores completa. A criação de *design houses*, centros de treinamento e redes de cooperação contribuiu para a ampliação da base de conhecimento em microeletrônica. Entretanto, não foi suficiente para suprir a carência de profissionais especializados em processos fabris, operação de equipamentos, controle de contaminação, metrologia e integração de manufatura [46].

Tabela 4. Lições institucionais da política brasileira de semicondutores para Minimal Fab

Iniciativa	Objetivo principal	Resultado/limitação	Lição para Minimal Fab
PNM	Estruturar a microeletrônica nacional e identificar possibilidades de inserção produtiva	Priorizou design, *back-end* e *foundries* de menor escala, reconhecendo limites de capital para grandes fábricas	Nichos tecnológicos e produção em menor escala são mais realistas que a implantação direta de Mega Fabs
PITCE/CI-Brasil	Formar *design houses*, capacitar projetistas e estimular a articulação entre Estado, empresas e ICTs	Avançou em projeto de circuitos integrados, mas não consolidou capacidade nacional de *front-end*	A formação de RH deve ir além do design e incluir processos fabris, metrologia, manutenção e controle de produção
PADIS	Criar incentivos fiscais para empresas de semicondutores e displays condicionados a produção e PD&I no país	Gerou avanços em segmentos específicos, mas apresentou burocracia, baixa aderência a modelos compactos e alcance limitado em fabricação de *wafers*	Requer modalidade simplificada para plantas modulares, de baixo CAPEX e forte integração universidade-indústria

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

CEITEC	Desenvolver capacidade nacional integrada em projeto, prototipagem, produção e P&D	Acumulou competências, mas enfrentou problemas de escala, gestão, mercado, continuidade institucional e sustentabilidade econômica	Evitar modelos estatais pesados sem mercado definido, governança profissional e estratégia tecnológica compatível
Chip Tech Brasil/ NIB	Retomar a política industrial de semicondutores com foco em inovação, financiamento e formação de capacidades	Encontra-se em fase de implantação e ainda demanda mecanismos operacionais claros para plantas compactas	Representa oportunidade para inserir Minimal Fabs como instrumento de manufatura distribuída, formação de RH e produção de nicho

Fonte: Elaborado pelo autor com base em [18,26,28,37,44-47].

Para o modelo *Minimal Fab*, essa lição é central: a viabilidade não depende exclusivamente da disponibilidade de engenheiros de projeto, mas também da existência de uma base operacional qualificada, capaz de conduzir processos de fabricação em ambientes controlados e modulares.

No caso do PADIS, a política representou um marco ao estabelecer incentivos fiscais condicionados à realização de atividades produtivas e investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) no país. Entretanto, sua efetividade mostrou-se heterogênea entre os diferentes segmentos da cadeia produtiva, com maior aderência a atividades como encapsulamento, testes e projeto, e menor capacidade de induzir investimentos em etapas intensivas em capital, como a fabricação de *wafers* e *displays* [18,37,48,49].

No contexto das *Minimal Fabs*, uma das principais limitações do PADIS reside em sua baixa especificidade para modelos produtivos compactos, o que sugere a necessidade de instrumentos regulatórios mais adequados, como modalidades simplificadas voltadas a plantas modulares, laboratórios-fábrica e unidades de prototipagem industrial.

A CEITEC constitui o caso mais relevante da tentativa brasileira de consolidar capacidade produtiva nacional em semicondutores. A empresa acumulou competências em projeto, produção em baixo volume, pesquisa e desenvolvimento (P&D) e propriedade intelectual, mas enfrentou limitações relacionadas à escala, ao posicionamento de mercado, à governança, à continuidade institucional e à sustentabilidade econômica [10,28,37].

A principal lição para o modelo *Minimal Fab* é que a produção nacional de semicondutores não deve ser estruturada como um empreendimento isolado, intensivo em capital e dependente exclusivamente do Estado. Ao contrário, deve estar vinculada a nichos de mercado, a parcerias

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

público-privadas, à formação de recursos humanos, à existência de demanda industrial identificada e a mecanismos de governança tecnológica de longo prazo.

Mais recentemente, o Chip Tech Brasil e a Nova Indústria Brasil sinalizam uma retomada da agenda de semicondutores como prioridade estratégica. Esses programas buscam articular financiamento, inovação, fortalecimento produtivo e formação de capital humano especializado, em sintonia com o processo de reindustrialização e com a transição tecnológica em curso [47]. No entanto, sua efetividade dependerá da capacidade de converter diretrizes gerais em instrumentos operacionais adequados às diferentes escalas produtivas. Nesse contexto, as *Minimal Fabs* podem atuar como um mecanismo intermediário entre o ambiente acadêmico e a produção industrial, viabilizando atividades de prototipagem, capacitação, produção de nicho e desenvolvimento tecnológico, com menor investimento em capital (CAPEX) e reduzido risco de obsolescência.

Dessa forma, a experiência brasileira indica que a inserção nacional na cadeia de semicondutores não deve ser concebida apenas pela replicação de modelos internacionais baseados em megafabs. A trajetória do PNM, do CI-Brasil, do PADIS e da CEITEC evidencia que o país alcançou avanços institucionais relevantes, mas não consolidou uma estratégia contínua e integrada de manufatura de semicondutores.

Nesse contexto, o modelo *Minimal Fab*/PocketFab emerge como uma alternativa complementar, mais aderente às condições brasileiras, por combinar menor intensidade de capital, flexibilidade produtiva, formação técnica aplicada e capacidade de atendimento a nichos estratégicos, como sensores, dispositivos analógicos, aplicações em Internet das Coisas (IoT), sistemas automotivos específicos e dispositivos médicos.

7. *MINIMAL FAB*: CONCEITO E VIABILIDADE TÉCNICA

O conceito de *Minimal Fab* surge no Japão como uma resposta direta às limitações estruturais do modelo convencional de produção em larga escala na indústria de semicondutores. Diferentemente das *megafabs*, que operam sob a lógica de maximização de escala e elevado investimento em infraestrutura, a *Minimal Fab* baseia-se em três princípios fundamentais: (i) redução do tamanho do *wafer*; (ii) miniaturização dos equipamentos; e (iii) substituição das salas limpas convencionais por ambientes com controle localizado de contaminação [13].

Essa configuração representa mais do que uma simples adaptação técnica, constituindo uma mudança na lógica de organização da produção. Ao reduzir o diâmetro do *wafer* para 12,5 mm e compactar as ferramentas de processamento, o sistema elimina a necessidade de grandes

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

instalações industriais, tradicionalmente responsáveis por uma parcela significativa do investimento inicial.

Adicionalmente, a introdução de técnicas como a dopagem por plasma na fabricação de transistores e circuitos integrados, utilizada para inserir impurezas (dopantes) em níveis atômicos, permite manter níveis adequados de controle de contaminação sem a dependência de salas limpas de grande escala, alterando significativamente a estrutura de custos do processo produtivo [12].

Do ponto de vista tecnológico, estudos experimentais demonstram a viabilidade da fabricação de dispositivos semicondutores funcionais nesse ambiente. Trabalhos como os de Khumpuang *et al.* [50] indicam que a produção de dispositivos CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) em geometrias da ordem de 4–6 µm é plenamente factível dentro dessa arquitetura, sendo adequada para aplicações em setores como o automotivo, o médico e a Internet das Coisas (IoT), ou seja, segmentos nos quais o desempenho extremo não constitui o principal requisito.

Além disso, a possibilidade de integração entre as etapas de *front-end* e *back-end* em um fluxo contínuo constitui uma inovação relevante em termos de organização produtiva, reduzindo os tempos de ciclo e simplificando a cadeia de valor. O processo completo de encapsulamento Ball Grid Array (BGA)[7], conforme descrito no catálogo da Yokogawa Solution Service Corporation [51], aliado ao uso de técnicas de *maskless exposure*, permite acelerar significativamente o ciclo PDCA[8] em atividades de pesquisa e desenvolvimento, indicando oportunidades relevantes de otimização do fluxo de trabalho [13].

Apesar dos avanços demonstrados, existem limitações quanto à aplicação das *Minimal Fabs*. A principal delas refere-se à escala tecnológica, uma vez que esses sistemas não competem com os processos de última geração utilizados na fabricação de semicondutores de alto desempenho, operando em geometrias significativamente maiores. Isso restringe sua aplicação a segmentos nos quais custo, flexibilidade e customização são mais relevantes do que a densidade de integração, o que está em consonância com a segmentação observada na indústria global de semicondutores [16].

Adicionalmente, a capacidade produtiva do sistema é naturalmente limitada, sendo mais adequada a modelos de produção do tipo *high-mix*, *low-volume.* Essa característica, embora

[7] BGA (*Ball Grid Array*) é um tipo de encapsulamento de montagem superficial utilizado para circuitos integrados que utiliza pequenas esferas de solda dispostas em uma grade na face inferior do componente para realizar a conexão com a placa de circuito impresso (PCB).
[8] PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) no contexto das *Minimal Fab* refere-se à agilidade no processo de pesquisa e desenvolvimento de protótipos de semicondutores. Devido às características técnicas dessa infraestrutura, o ciclo é significativamente acelerado em comparação com as fábricas tradicionais (*megafabs*).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

represente uma limitação em termos de escala, pode ser interpretada como vantagem em mercados fragmentados ou em aplicações específicas, especialmente em contextos de crescente diversificação tecnológica e digitalização industrial. A Tabela 5 sintetiza comparação paramétrica entre Mega Fab e *Minimal Fab* baseada em dados de múltiplos artigos.

Tabela 5. Comparação Técnico-Econômica: *Mega Fab* vs. *Minimal Fab*

Parâmetro	Mega Fab (300-450 mm)	*Minimal Fab (half-inch)*	Redução
Investimento inicial	US$ 10-15 bilhões	US$ 1-5 milhões	99,97%
Área de sala limpa	10.000-50.000 m² (ISO Class 5)	100-500 m² (sistema localizado)	98%
Consumo energético	50-100 MW	5-10 MW (estimado)	90%
Consumo de água ultrapura	7-15 milhões litros/dia	0,7-1,5 milhões litros/dia (estimado)	90%
Mão de obra	1.000-3.000 funcionários	10-50 operadores/engenheiros	98%
Tempo de implantação	5-10 anos	1-2 anos	80%
Tamanho de wafer	300 mm ou 450 mm	12,5 mm	-
Geometria alcançada	< 3 nm (estado-da-arte)	4-6 µm (tecnologia madura)	-
Construção sala limpa	US$ 3.000-10.000/m²	Não necessária	100%
OPEX anual (energia + manutenção)	2-5% do CAPEX (US$ 200-750 milhões/ano)	Estimado US$ 50-250 mil por ano	99,90%

Fonte: Elaborada pelo autor com base em [12,13,52-54].

A comparação entre o modelo tradicional de *megafab* e o modelo *Minimal Fab* evidencia diferenças estruturais significativas. Enquanto a implantação de uma fábrica convencional pode exigir investimentos da ordem de dezenas de bilhões de dólares, uma unidade *Minimal Fab* pode ser implementada com investimentos substancialmente inferiores, situando-se na faixa de milhões de dólares. Essa diferença não se limita ao investimento em capital (CAPEX), estendendo-se também ao consumo energético, à demanda por água ultrapura e à necessidade de mão de obra especializada.

As *Minimal Fab*s podem apresentar reduções de CAPEX da ordem de 99% em relação às *megafabs*, em decorrência da modularização dos equipamentos, da eliminação de infraestrutura intensiva e da operação em menor escala produtiva, configurando-se como uma alternativa economicamente viável para mercados emergentes e aplicações de nicho [29,55].

No entanto, a interpretação desses dados exige cautela. A redução expressiva de custos não implica equivalência funcional entre os modelos, mas sim sua adequação a diferentes contextos produtivos. Nesse sentido, a *Minimal Fab* não substitui a *megafab*, mas ocupa uma posição distinta na cadeia de valor, voltada a aplicações específicas e mercados de menor escala. Essa coexistência de modelos produtivos é consistente com a reorganização das cadeias

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

globais de valor, que aponta para a emergência de arranjos mais descentralizados e especializados [16,30].

8. *MINIMAL FAB* COMO ALTERNATIVA AO MODELO DE MEGAFAB NA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES

A indústria de semicondutores consolidou-se historicamente sob um modelo de produção em larga escala, conhecido como *megafab*, caracterizado por elevada automação, alta intensidade de capital e foco na maximização do volume produtivo. Esse modelo está diretamente associado à lógica das economias de escala, na qual a diluição dos elevados custos fixos depende da operação contínua em altos níveis de *throughput*. Estimativas indicam que uma única linha de produção baseada em *wafers* de 300 mm pode demandar investimentos da ordem de dezenas de bilhões de dólares, configurando uma das maiores barreiras à entrada entre os setores industriais contemporâneos [12].

Entretanto, a evolução recente do setor sugere que esse paradigma produtivo enfrenta limitações estruturais. Conforme apontado por Hara *et al.* [12], o crescimento da indústria segue uma dinâmica semelhante a uma curva logística, na qual períodos iniciais de expansão acelerada são sucedidos por fases de maturidade, caracterizadas pela desaceleração da demanda, pela saturação de mercado e pelo aumento da capacidade ociosa. Nesse contexto, a continuidade da expansão baseada exclusivamente em *megafabs* tende a elevar os riscos econômicos, sobretudo em ambientes marcados por menor previsibilidade da demanda.

Além disso, o modelo convencional impõe elevados custos fixos, associados não apenas à construção da infraestrutura fabril, mas também à aquisição de equipamentos de alta complexidade, à implementação de sistemas avançados de controle ambiental e ao desenvolvimento de projetos de circuitos integrados. Em cenários de maturidade do mercado, nos quais o crescimento deixa de ser exponencial, essa estrutura de custos pode gerar desequilíbrios operacionais, reduzindo a eficiência econômica das plantas e ampliando a exposição a ciclos de supercapacidade [12].

Nesse contexto, o custo de implantação de uma *Minimal Fab* pode representar uma fração significativamente inferior, da ordem de um milésimo, do investimento necessário para uma instalação convencional, configurando-se como uma alternativa particularmente adequada para aplicações de baixo volume e alta especialização.

Segundo Hara *et al.* [12], do ponto de vista técnico-operacional, a plataforma *Minimal Fab* apresenta características significativamente distintas do modelo tradicional. Essa configuração representa uma inovação relevante, uma vez que elimina um dos principais componentes de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

custo da indústria de semicondutores, as salas limpas, contribuindo diretamente para a redução do investimento em capital (CAPEX) e para o aumento da flexibilidade locacional.

Adicionalmente, o modelo incorpora tecnologias habilitadoras específicas, como a litografia sem máscara, sistemas compactos de deposição, gravação e dopagem, além de soluções integradas de metrologia. Essas inovações permitem não apenas a redução da complexidade operacional, mas também a aceleração dos ciclos de desenvolvimento, tornando a *Minimal Fab* particularmente adequada para prototipagem rápida, atividades de pesquisa e produção em pequenos lotes. Evidências empíricas indicam a capacidade de fabricação de protótipos em prazos de poucos dias, o que reforça seu potencial como plataforma de inovação tecnológica aplicada [56].

Sob a perspectiva econômica e estratégica, a *Minimal Fab* não deve ser interpretada como uma substituta do modelo de *megafab*, mas como uma alternativa complementar, direcionada a nichos específicos de mercado nos quais a flexibilidade, a customização e a velocidade de desenvolvimento são mais relevantes do que a escala produtiva.

A análise conjunta desses elementos evidencia que a limitação central do modelo tradicional não reside exclusivamente em seus elevados custos, mas em sua inadequação relativa a contextos produtivos caracterizados por menor escala de demanda, maior incerteza tecnológica e necessidade de adaptação rápida. Nesse sentido, a *Minimal Fab* representa uma mudança de paradigma ao propor uma lógica produtiva orientada à flexibilidade, à modularidade e à especialização.

Essa transição é particularmente relevante para economias em desenvolvimento, como o Brasil, nas quais restrições de capital, lacunas tecnológicas e limitações institucionais dificultam a inserção competitiva no modelo de produção em larga escala. Nesse contexto, em vez de competir diretamente com grandes polos globais, a adoção de arquiteturas produtivas compactas pode viabilizar uma estratégia de inserção gradual na cadeia de valor dos semicondutores.

9. POCKETFAB USP-FIESP-SENAI: CASO BRASILEIRO

A implantação da unidade PocketFab no InovaUSP, inaugurada em janeiro de 2026, representa uma das primeiras iniciativas concretas de adoção de modelos produtivos compactos na indústria de semicondutores no Brasil [15]. Estruturada com base em uma parceria entre universidade, setor industrial e sistema de formação profissional, a iniciativa sinaliza uma tentativa de adaptação do paradigma das *Minimal Fabs* às condições institucionais e econômicas nacionais. Estimativas indicam que o investimento inicial situa-se na faixa de US$ 3 milhões a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

US$ 5 milhões, valor substancialmente inferior ao requerido por instalações convencionais de grande escala [14].

Do ponto de vista técnico, a unidade incorpora princípios fundamentais do modelo *Minimal Fab*, como o uso de *wafers* de dimensões reduzidas e a adoção de sistemas produtivos compactos. No entanto, sua diferenciação em relação às iniciativas japonesas não se restringe aos aspectos tecnológicos, estendendo-se também ao modelo operacional.

Em vez de priorizar a escala produtiva, a PocketFab orienta-se à prototipagem, à customização e à formação de recursos humanos, integrando-se ao ecossistema de inovação da Universidade de São Paulo (USP) e à rede de capacitação do SENAI. Essa configuração sugere uma mudança de enfoque, na qual a função da planta ultrapassa a produção industrial, incorporando dimensões educacionais e de desenvolvimento tecnológico.

A análise dos mercados-alvo indica que a estratégia da PocketFab está alinhada a segmentos nos quais a customização e a adaptação a condições específicas são mais relevantes do que a produção em larga escala. No setor automotivo, por exemplo, a crescente demanda por sistemas eletrônicos embarcados, como sensores e dispositivos de assistência ao condutor, abre espaço para soluções adaptadas às condições locais de operação, incluindo variações térmicas e ambientais.

De forma semelhante, aplicações médicas e industriais demandam dispositivos com elevado grau de confiabilidade e especificidade, frequentemente produzidos em volumes reduzidos, o que reforça a adequação de modelos produtivos flexíveis.

Entretanto, a viabilidade desse modelo não pode ser analisada apenas sob as perspectivas tecnológica ou institucional. A capacidade declarada de produção, da ordem de milhões de componentes por ano, suscita questionamentos relevantes quanto à sustentabilidade econômica da operação, especialmente quando considerados os custos associados à cadeia de suprimentos, à certificação de produtos e à inserção em mercados altamente regulados.

Além disso, a dependência de equipamentos e insumos importados pode limitar os ganhos em autonomia tecnológica, reproduzindo, ainda que em menor escala, desafios já observados na indústria nacional.

De acordo com o portal da Universidade de São Paulo (USP), as características técnicas desse modelo de fabricação mais limpa incluem: (i) capacidade de produção de até 10 milhões de componentes por ano; (ii) tecnologia baseada no conceito *Minimal Fab*, com utilização de *wafers* de meia polegada; e (iii) foco em aplicações nos setores automotivo (sistemas avançados de assistência ao condutor, sensores de estacionamento e controle de estabilidade), médico

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

(incluindo sensores biométricos e dispositivos implantáveis), e industrial, com destaque para sensores de pressão, temperatura e vibração.

Nesse sentido, a PocketFab diferencia-se das *Minimal Fabs* japonesas em três aspectos principais: (i) modelo de negócio orientado à formação de recursos humanos, com destaque para a parceria com o SENAI na capacitação de técnicos e engenheiros; (ii) foco em prototipagem rápida e customização voltada à indústria local, em contraste com a produção em larga escala; e (iii) integração ao ecossistema de inovação do InovaUSP, envolvendo startups, centros de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e empresas residentes [15].

Sob essa perspectiva de mercado, as aplicações prioritárias da PocketFab se alinham a nichos de alto valor agregado, com destaque para o setor automotivo. Nesse contexto, os sistemas ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*) demandam uma ampla gama de sensores, incluindo radar, LiDAR (*Light Detection and Ranging*), câmeras e ultrassom, que dependem fortemente de circuitos analógicos e de sinal misto de alto desempenho.

No Brasil, estima-se que o mercado de dispositivos analógicos específicos para essas aplicações alcance cerca de US$ 180 milhões anuais. Diante disso, a PocketFab posiciona-se de forma estratégica para atender montadoras instaladas no país por meio do desenvolvimento de *chips* customizados, otimizados para condições locais de operação. Essas condições incluem variações significativas de temperatura, alta umidade e elevados níveis de vibração, características comuns em vias brasileiras, especialmente em regiões com infraestrutura viária menos desenvolvida.

Essa abordagem de customização não apenas agrega valor ao produto final, mas também contribui para maior robustez, confiabilidade e adaptação dos sistemas eletrônicos embarcados, diferenciando a proposta da PocketFab frente a fornecedores globais com soluções mais padronizadas.

No setor médico, por sua vez, sensores biométricos utilizados em equipamentos de diagnóstico, como glicosímetros, oxímetros e monitores cardíacos, bem como dispositivos implantáveis, a exemplo de marcapassos e bombas de insulina, constituem um mercado de alto valor agregado, caracterizado por rigorosos requisitos de confiabilidade e certificação (ANVISA, FDA). Nesse contexto, a PocketFab pode viabilizar o desenvolvimento de dispositivos médicos nacionais, contribuindo para a redução da dependência de importações e para a diminuição de custos no âmbito do Sistema Único de Saúde (SUS) [14].

No setor de máquinas industriais, sensores de pressão, temperatura, vibração e proximidade, utilizados na automação industrial, representam um mercado em expansão, impulsionado pela demanda de segmentos como petróleo e gás, mineração, siderurgia, papel e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

celulose. Nesse contexto, a PocketFab pode fornecer sensores customizados, projetados para operar em condições extremas, tais como altas temperaturas, ambientes corrosivos e níveis elevados de vibração [14,15].

A parceria entre a USP e o SENAI constitui um diferencial estratégico para a PocketFab, ao estruturar um modelo de formação de recursos humanos em três níveis. No nível técnico, propõem-se cursos de capacitação com duração de seis meses para técnicos em eletrônica, com foco na operação de equipamentos *Minimal Fab,* controle de qualidade e manutenção preventiva, com meta de formação de 50 técnicos por ano. No nível de graduação, são previstos estágios e projetos de conclusão de curso para estudantes de engenharia elétrica, eletrônica, mecatrônica e de materiais, oriundos da USP e de outras universidades paulistas, com meta de 20 estagiários por ano. Por fim, no nível de pós-graduação, contemplam-se dissertações de mestrado e teses de doutorado voltadas a processos de fabricação, caracterização de materiais, projeto de circuitos integrados e aplicações específicas, com meta de desenvolvimento de 10 projetos anuais.

O componente de formação de recursos humanos constitui um dos principais diferenciais da iniciativa. A integração entre o ensino técnico, a graduação e a pós-graduação possibilita a criação de um ambiente de aprendizagem aplicado, contribuindo para a formação de profissionais em áreas críticas, como processos de fabricação, metrologia e projeto de circuitos integrados. Esse aspecto revela-se particularmente relevante no contexto brasileiro, caracterizado pela escassez de mão de obra especializada.

Nesse contexto, a PocketFab USP–FIESP–SENAI não deve ser interpretada apenas como uma unidade produtiva, mas como um experimento institucional voltado à construção de capacidades tecnológicas em um setor de elevada complexidade. Sua relevância reside menos na escala de produção e mais na possibilidade de testar, em ambiente real, um modelo alternativo de inserção industrial, baseado em flexibilidade, especialização e formação de competências.

Assim, ao dialogar com o conceito de *Minimal Fab* e com as limitações observadas em iniciativas anteriores, como a CEITEC, a PocketFab emerge como uma estratégia complementar ao modelo tradicional de grandes fábricas, contribuindo para a construção de uma trajetória de desenvolvimento mais gradual e alinhada às condições estruturais do Brasil.

10. SUSTENTABILIDADE, CONSUMO ENERGÉTICO E INFRAESTRUTURA CRÍTICA

A indústria de semicondutores caracteriza-se pela elevada intensidade no uso de recursos, particularmente energia e água, o que a posiciona entre os setores industriais de maior impacto

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ambiental relativo. Instalações convencionais de grande escala (*megafabs*) podem demandar entre 50 e 100 MW de potência contínua, valor comparável ao consumo de centros urbanos de médio porte, refletindo a complexidade dos processos produtivos e a necessidade de controle rigoroso de variáveis ambientais.

O consumo energético de *megafabs* distribui-se da seguinte forma: (i) sistemas HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*), responsáveis pela manutenção de salas limpas ISO Classe 5, correspondendo a 40–60% do consumo total; (ii) equipamentos de processo, como litografia, deposição, *etching* e implantação iônica, representando 30–40%; (iii) sistemas de produção e tratamento de água ultrapura, com participação de 5–10%; e (iv) iluminação e infraestrutura, também com parcela de 5–10% [53,54].

A adoção de modelos produtivos mais eficientes, como as *Minimal Fabs*, introduz uma mudança relevante ao reduzir significativamente a intensidade de uso de recursos, especialmente energia e água, por meio da eliminação de salas limpas de grande escala e da miniaturização dos equipamentos produtivos [53]. Essa característica não apenas contribui para a redução da pegada ambiental da indústria, mas também amplia a viabilidade de implantação dessas unidades em regiões com restrições de infraestrutura, como ocorre em diversos contextos brasileiros [13].

As *Minimal Fab*s possibilitam a redução do consumo energético em aproximadamente 90%, em decorrência da eliminação de salas limpas convencionais de grande porte, da miniaturização dos equipamentos, com ferramentas de cerca de 30 cm de largura, que consomem uma fração da energia requerida por equipamentos convencionais, e do processamento *single-wafer*, que reduz o desperdício de energia associado ao aquecimento e resfriamento de lotes [13].

Além disso, as *megafabs* consomem aproximadamente entre 7 e 15 milhões de litros de água ultrapura por dia, exigindo sistemas complexos de tratamento e reciclagem, conforme relatórios do *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* [53]. A água ultrapura, caracterizada por elevada resistividade, constitui um insumo fundamental para a limpeza de *wafers* e a preparação de soluções químicas. Entretanto, seu processo de purificação, que envolve etapas como osmose reversa, deionização e filtração UV, apresenta elevado consumo energético e gera resíduos [53].

Segundo Imura *et al.* [13], as *Minimal Fabs* possibilitam a redução do consumo hídrico em até 90%, em razão da menor escala de processamento de *wafers*, o que implica redução proporcional no volume de produtos químicos e de água de enxágue. Adicionalmente, o sistema de limpeza localizada elimina a necessidade de controle de umidade e climatização de toda a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

sala limpa, contribuindo para a diminuição do consumo de água associado aos sistemas de climatização [12].

De acordo com a Agência Nacional de Águas [57], empreendimentos industriais de médio porte no Brasil frequentemente operam com volumes de captação hídrica superiores a esse patamar, o que indica que uma unidade da PocketFab apresenta demanda hídrica relativamente modesta quando comparada a outros segmentos industriais. Em contraste, *megafabs* podem consumir volumes equivalentes ao abastecimento de cidades de pequeno porte, o que restringe sua instalação a regiões com elevada disponibilidade hídrica e infraestrutura consolidada. Nesse contexto, a arquitetura produtiva das *Minimal Fabs* alinha-se às tendências globais de manufatura sustentável e de uso eficiente de recursos.

As *megafabs* apresentam fluxos significativos de resíduos sólidos, tanto perigosos quanto não perigosos, incluindo lodos provenientes do tratamento de efluentes, filtros contaminados, resinas de troca iônica saturadas, embalagens de produtos químicos e substratos rejeitados, como silício e fotomáscaras [58].

Em contraste, as *Minimal Fabs* (ou PocketFab), caracterizadas por produção modular, baixo *throughput* e utilização de processos simplificados, apresentam redução substancial na geração absoluta de resíduos, frequentemente na ordem de 80–90%, em decorrência da menor escala operacional e da adoção de sistemas compactos e mais eficientes no uso de insumos [55].

Entretanto, a periculosidade dos resíduos permanece elevada em ambos os modelos, uma vez que os fluxos incluem substâncias classificadas como perigosas segundo normas como a NBR 10004 e diretrizes internacionais (RCRA/EPA), especialmente no que se refere à presença de metais pesados (como arsênio e chumbo), compostos fluorados e resíduos organoclorados [59,60].

A principal diferença reside na densidade de geração por unidade produtiva e na capacidade de segregação e tratamento descentralizado, este último mais viável em *Minimal Fabs* em razão da menor complexidade dos fluxos [29].

Estudos indicam que *megafabs* podem gerar entre 1,5 e 3,0 kg de resíduos sólidos por wafer processado, considerando rejeitos diretos e indiretos do sistema, enquanto *Minimal Fabs* tendem a operar em faixas inferiores a 0,5 kg/wafer, em função da simplificação dos processos e do menor número de etapas críticas [58]. Adicionalmente, *megafabs* demandam sistemas centralizados de gestão de resíduos, com elevada capacidade logística e energética, ao passo que *Minimal Fabs* permitem maior integração com estratégias de logística reversa regionalizada

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

e de economia circular, reduzindo custos e impactos ambientais associados ao transporte e ao tratamento [29,31].

No entanto, é importante destacar que a superioridade ambiental desses modelos não deve ser assumida de forma absoluta. Comparações diretas entre diferentes arquiteturas produtivas requerem análises mais abrangentes, como avaliações de ciclo de vida, que considerem todas as etapas do processo produtivo, desde a construção das instalações até o descarte dos materiais [60,61]. A ausência desse tipo de análise comparativa limita a capacidade de generalização dos resultados e evidencia a necessidade de estudos mais aprofundados.

Ruberti [62] realizou uma análise do desempenho ambiental da indústria global de *foundries*, porém restringiu-se às *megafabs* convencionais, sem incluir o modelo produtivo das *Minimal Fabs*. De forma semelhante, Agrawal [63] desenvolveu uma simulação de eficiência energética para a *Intel Mini Fab*, mas não realizou uma avaliação de ciclo de vida completa. Por sua vez, Iacopi *et al.* [64] exploraram abordagens baseadas em química verde, contudo não quantificaram impactos ambientais comparativos. Dessa forma, essa lacuna limita a robustez da argumentação sobre a sustentabilidade das *Minimal Fabs*, especialmente no que se refere à formulação de políticas públicas ambientais.

Adicionalmente, a incorporação de práticas de economia circular e de química verde emerge como uma estratégia complementar para a mitigação dos impactos ambientais da indústria de semicondutores. A recuperação de metais preciosos, a reutilização de insumos químicos e a substituição de substâncias tóxicas por alternativas menos agressivas ao meio ambiente são apontadas como caminhos viáveis para a redução de resíduos e emissões, especialmente em sistemas produtivos de menor escala, nos quais o controle dos processos tende a ser mais eficiente [64,65].

A análise integrada desses fatores sugere que a sustentabilidade, no contexto da indústria de semicondutores, não está associada exclusivamente à adoção de tecnologias específicas, mas à capacidade de articulação entre modelo produtivo, eficiência operacional e políticas de gestão ambiental. Nesse sentido, modelos como *Minimal Fabs* e PocketFab podem desempenhar um papel relevante como soluções complementares ao paradigma das *megafabs*, contribuindo para a construção de trajetórias industriais mais flexíveis, descentralizadas e ambientalmente sustentáveis [16,31].

11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste trabalho evidencia que a indústria global de semicondutores atravessa um momento de transição estrutural, marcado por tensões entre o

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

modelo tradicional de produção em larga escala, baseado em *megafabs*, e novas demandas associadas à flexibilidade, customização, sustentabilidade e redução de barreiras de entrada. Nesse contexto, a investigação das *Minimal Fabs* e, em particular, da experiência brasileira da PocketFab, oferece contribuições relevantes para o debate sobre estratégias de inserção produtiva em países com restrições de capital e capacidades tecnológicas ainda parcialmente consolidadas.

Os resultados indicam que o modelo de *megafab*, embora ainda indispensável para a produção de semicondutores de alto desempenho e em larga escala, apresenta limitações crescentes, especialmente no que se refere ao elevado CAPEX, à sensibilidade à obsolescência tecnológica, ao consumo intensivo de recursos naturais e à dificuldade de adaptação a mercados caracterizados por baixo volume e alta variedade. Tais características tornam esse modelo pouco aderente às condições estruturais do Brasil, o que é corroborado pela trajetória histórica das políticas públicas e iniciativas nacionais analisadas, como o PNM, o CI-Brasil, o PADIS e a CEITEC.

Por outro lado, as *Minimal Fabs* configuram-se como uma alternativa tecnologicamente viável e economicamente mais acessível para determinados nichos de mercado. A significativa redução dos custos de implantação e operação, aliada à modularidade, à menor demanda por infraestrutura e à capacidade de prototipagem rápida, posiciona esse modelo como uma opção estratégica para aplicações específicas, como sensores, dispositivos analógicos, sistemas embarcados e soluções voltadas à indústria automotiva, médica e à Internet das Coisas. Ademais, os ganhos potenciais em termos de eficiência energética, uso de água e redução de resíduos reforçam seu alinhamento com os princípios da sustentabilidade industrial.

A experiência da PocketFab USP-FIESP-SENAI demonstra, na prática, a viabilidade do modelo no contexto brasileiro, destacando-se não apenas como uma unidade produtiva, mas também como um arranjo institucional voltado à formação de recursos humanos, à inovação aplicada e à articulação entre universidade, indústria e governo. Esse caráter multifuncional indica que o valor estratégico das fábricas compactas transcende sua capacidade produtiva, contribuindo para a construção de capacidades tecnológicas e para a consolidação de um ecossistema de microeletrônica mais dinâmico e integrado.

Entretanto, o estudo também evidencia limitações importantes. As *Minimal Fabs* não substituem as *megafabs* e apresentam restrições quanto à escala, à complexidade tecnológica e à inserção em mercados altamente competitivos e regulados. Além disso, persistem desafios relacionados à dependência de insumos e equipamentos importados, à sustentabilidade

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

econômica de longo prazo e à ausência de instrumentos regulatórios e de financiamento especificamente desenhados para esse modelo produtivo.

Do ponto de vista das políticas públicas, os achados sugerem a necessidade de formulação de estratégias diferenciadas, que reconheçam a coexistência de múltiplos modelos produtivos na indústria de semicondutores. Nesse sentido, recomenda-se a criação de mecanismos de incentivo direcionados às fábricas compactas, incluindo adaptações no PADIS, apoio à infraestrutura de pesquisa aplicada, estímulo à formação de mão de obra especializada em processos fabris e o fortalecimento de parcerias entre instituições de ensino, centros de pesquisa e o setor produtivo.

Por fim, como agenda futura de pesquisa, destaca-se a necessidade de estudos empíricos mais aprofundados sobre a viabilidade econômica das *Minimal Fabs* em diferentes contextos regionais, bem como a realização de análises de ciclo de vida que permitam avaliar, de forma mais robusta, seus impactos ambientais. Investigações sobre modelos de governança, estratégias de inserção em cadeias globais de valor e mecanismos de financiamento também se mostram essenciais para consolidar esse paradigma como uma alternativa efetiva de desenvolvimento industrial.

Em síntese, conclui-se que *Minimal Fabs* e PocketFab*s* representam uma estratégia complementar e promissora para a indústria de semicondutores no Brasil, ao possibilitarem uma trajetória de desenvolvimento mais gradual, flexível e alinhada às condições estruturais do país, sem, contudo, eliminar a necessidade de integração com a dinâmica global do setor.

Agradecimentos

O autor, André Luiz Silva Santos, agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

[1] C. G. Rodrigues *et al.* **The role of nonequilibrium thermo-mechanical statistics in modern technologies and industrial processes: an overview**. Brazilian Journal of Physics, v. 40, p. 63–91, 2010.

[2] C. G. Rodrigues, R. Luzzi, **Science, technology and non equilibrium statistical mechanics**. Physics Journal, vol. 4, p. 9-16, 2018.

[3] R. Rajput, Gartner, 2026. Disponível em: https://www.gartner.com/en.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

[4] C. G. Rodrigues, J. E. Menezes, M. L. Carneiro, **Global Market Overview of Semiconductor Industry**. Revista Gestão e Conhecimento, v. 16, n. 1, pp. 490–497, 2022. DOI: https://doi.org/10.55908/RGCV16N1-028

[5] D. W. A. Hattori, M. R. Schluter, A. Zorzo, **A Importância dos Semicondutores no Cenário Automotivo: Impacto da Pandemia de COVID-19**. Americana: FATEC, 2021. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/11819.

[6] Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA). **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. São Paulo: ANFAVEA, 2024.

[7] Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE). **Desempenho do Setor Eletroeletrônico**. São Paulo: ABINEE, 2025.

[8] J. Harrel, **Electromobility in the Automotive Industry: A Technological and Geopolitical Shift**. Journal of Multidisciplinary Research, v. 13, n. 5, pp. 44–58, 2021. DOI: 10.35925/j.multi.2021.5.44.

[9] F. M. Jaenichen *et al.* **Simulating and Evaluating Supply Chain Disruptions along an End-to-End Semiconductor Automotive Supply Chain**. In: Winter Simulation Conference, 2021. Proceedings IEEE, 2021. DOI: 10.1109/wsc52266.2021.9715436.

[10] CEITEC S.A. **Relatório de Sustentabilidade / Relatório de Gestão**. Porto Alegre: CEITEC, diferentes anos (2018–2025), 2026. Disponível em: https://www.ceitec-sa.com.

[11] J. Verde *et al.* **Semiconductor industrial policy in Brazil: lessons from CEITEC's trajectory**. Innovation and Development, v. 13, n. 1, pp. 45–68, 2023.

[12] S. Hara, T. Hattori, T. Watanabe, **Minimal Fab: A new concept for semiconductor manufacturing using 0.5-inch wafers**. Proceedings of the International Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM), 2011.

[13] H. Imura, S. Hara, T. Hattori, **Economic analysis of Minimal Fab operation: cost structure and profitability under Japanese conditions**. Japanese Journal of Applied Physics, v. 57, n. 6S2, 2018.

[14] SENAI-SP. **Lançamento da PocketFab USP–FIESP–SENAI marca novo capítulo para a fabricação de semicondutores no Brasil**, 2026**.** Disponível em: https://www.sp.senai.br/noticia/lancamento-da-pocketfab-usp-fiesp-senai-marca-novo-capitulo-para-a-fabricacao-de-semicondutores-no-brasil#:~:text=O%20projeto%20objetiva%20colocar%20o%20Brasil%20em,semicondutores%2C%20como%20provedor%20de%20tecnologia%20e%20inova%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 26 jan 2026.

[15] USP aposta em "fábricas de bolso" para colocar o Brasil no mapa dos semicondutores. G1/Jornal Nacional, 4 abr. 2026. Disponível em: https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2026/04/04/usp-aposta-em-fabricas-de-bolso-para-colocar-o-brasil-no-mapa-dos-semicondutores.ghtml.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

[16] OECD. **The Semiconductor Industry in the Global Economy**. Paris: OECD Publishing, 2019.

[17] P. A. Gargini, **The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS): Past, present and future.** In: IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). San Francisco: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/GAAS.2000.906261.

[18] Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). **Complexo eletrônico e semicondutores no Brasil: diagnóstico e perspectivas.** Rio de Janeiro: BNDES, 2022.

[19] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI**). Plano Brasileiro de Inteligência Artificial e Estratégias em Tecnologias Digitais**. Brasília: MCTI, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mcti. **Estratégia Brasileira para Semicondutores**. Brasília: MCTI, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mcti.

[20] C. A. Mack, **Yield modeling for semiconductor manufacturing**. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, v. 24, n. 4, pp. 500–507, 2011. DOI: https://doi.org/10.1109/TSM.2011.2162768.

[21] C. Wu, J. Lin, **Impact of yield on wafer fabrication cost**. Microelectronics Reliability, v. 52, n. 9–10, pp. 1868–1873, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.06.006

[22] R. M. V. Gutierrez, R. S. Leal, **Complexo eletrônico: a indústria de semicondutores no Brasil**. Rio de Janeiro: BNDES, 2004. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2567.

[23] M. R. Pereira, E. M. Albuquerque, **Sistema nacional de inovação e a indústria de semicondutores no Brasil.** Revista Brasileira de Inovação, Campinas, v. 18, n. 1, p. 1–28, 2019.

[24] A. Tashakkori, C. Teddlie, **SAGE Handbook of Mixed Methods in Social & Behavioral Research**. 2. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2010.

[25] M. Patton, **Qualitative Research & Evaluation Methods: Integrating Theory and Practice**. 4. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2014.

[26] M. L. C. Soares, **Formas de governança nas cadeias globais de valor e seus possíveis impactos ao desenvolvimento tecnológico: o caso do setor de semicondutores no Brasil** (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/46104/1/FormasGovernan%C3%A7aCadeias.pdf

[27] B. Aita, **A cadeia produtiva da indústria de semicondutores: Um estudo exploratório**. (Dissertação de Mestrado). Porto Alegre, Rio Grande do Sul: UFRS, 2013.

[28] C. Filippin, **Política industrial para semicondutores no Brasil: o caso do PADIS** (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

[29] Semiconductor Industry Association (SIA). **State of the U.S. Semiconductor Industry**. Washington, 2026. Disponível em: https://www.semiconductors.org/.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

[30] R. Baldwin, **The Great Convergence: Information Technology and the New Globalization.** Cambridge: Harvard University Press, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.2307/j.ctv24w655w.1.

[31] Agência Internacional de Energia (IEA). **Promovendo a fabricação com tecnologia limpa: um relatório especial sobre perspectivas da tecnologia energética**. Paris: IEA, 2023.

[32] A. Haramboure, **Vulnerabilidades na cadeia de fornecimento de semicondutores**. Documentos de Trabalho de Ciência, Tecnologia e Indústria da OCDE, n. 2023/05, OECD Publishing, Paris, 2023. DOI: https://doi.org/10.1787/6bed616f-en.

[33] B. L. Deng, B. S. Deng, **A Economia Política da Indústria de Semicondutores e o Recente Desenvolvimento Limitado da República Popular da China (2014-2021)**. Revista de Economia Contemporânea, v. 26, pp. 1-25, 2022.

[34] Semiconductor Industry Association (SIA). **The 2016 Semiconductor Industry Association Factbook**, 2016. Disponível em: http://blog.semiconductors.org/blog/ the-2016-sia-factbookyourtop-source-forsemiconductor-data.

[35] Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI). **Estudo prospectivo da indústria de semicondutores no Brasil**. Brasília: ABDI, 2011.

[36] Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). **A indústria de semicondutores: panorama global e perspectivas para o Brasil**. Rio de Janeiro: BNDES, 2025. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/20585.

[37] Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). **Semicondutores no Brasil: diagnóstico, desafios e oportunidades**. Brasília: CGEE, 2021.

[38] S. M. Sze, K. K. Ng, **Physics of Semiconductor Devices**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

[39] G. S. May, C. J. Spanos, **Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. DOI: https://doi.org/10.1002/0470068140

[40] A. L. G. Silva, **A Indústria de Componentes Eletrônicos Semicondutores: Padrão de Concorrência Internacional e Inserção do Brasil** (Dissertação de Mestrado). Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1985.

[41] S. Heck, S. Kaza, D. Pinner, **Creating value in the semiconductor industry**. McKinsey on Semiconductors, n. 1, pp. 5–14, 2011.

[42] Boston Consulting Group (BCG). **Strengthening the global semiconductor supply chain in an uncertain era**, 2021. Disponível em: https://www.semiconductors.org.

[43] H. Bauer, S. Burghardt, S. Tandon, F. Thalmayr, **Memory: are challenges ahead?** McKinsey on Semiconductors, n. 5, p. 28–37, 2015.

[44] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **Programa Nacional de Microeletrônica acadêmico: plano de formação de recursos humanos em microeletrônica**. Brasília, 2002.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

[45] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Secretaria Executiva. Secretaria de Política de Informática. **Programa Nacional de Microeletrônica: contribuições para a formulação de um Plano Estruturado de Ações**. Brasília, 2002.

[46] K. Faccin, I. Bortolaso, A. Balestrin, **A Visão Relacional de Políticas de Ciência e Tecnologia: O Caso do Programa CI-Brasil**. Revista Eletrônica de Administração (Porto Alegre), v. 22, pp. 226–251, 2016.

[47] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **Programa Chip Tech Brasil**. Brasília, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mcti.

[48] R. Rivera *et al.* **Microeletrônica: qual é a ambição do Brasil?** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 41, p. 345–396, 2015.

[49] R. A. R. Zulke, I. C. Paula, C. Richter, **Indústria de Semicondutores Brasileira: uma Análise do PADIS**, 2017.

[50] S. Khumpuang *et al.* **Process development for CMOS fabrication using minimal fab**. In: IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference, 2017. Proceedings IEEE, 2017. DOI: 10.1109/EDTM.2017.7947527.

[51] Yokogawa Solution Service Corporation. **Minimal Fab Equipment List**. 30 ago. 2019. Disponível em: https://web-material3.yokogawa.com/1/35480/tabs/MinimalfabEquipmentList2019.pdf

[52] S. Khumpuang, S. Hara, **Overview of Minimal Fab and its applications**. IEEE J. Transactions on Sensors and Micromachines, v. 137, n. 11, pp. 380–386, 2017.

[53] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). **Minimal Fab: A New Concept for Semiconductor Manufacturing**. Tsukuba: AIST, 2016.

[54] Minimal Fab General Incorporated Association (MFGIA). **About Minimal Fab**. Tokyo, Japan: Minimal Fab General Inc., 2014. Disponível em: http://www.minimalfab.com/english/.

[55] International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). **Environment, Safety and Health Report**. 2015. Disponível em: https://www.semiconductors.org/resources/2015-international-technology-roadmap-for-semiconductors-itrs/.

[56] Yokogawa Solution Service Corporation. **Making Device Prototype in Yokogawa Minimal Fab Application Laboratory**. Tokyo, 2019. Disponível em:http://www.yokogawa.com/yjp/biz/semi/minimal-fab.htm

[57] Agência Nacional de Águas (ANA). **Uso da água,** 2023. Brasília. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/usos-da-agua.

[58] Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC). **Sustainability Report TSMC**, 2024. Disponível em: https://esg.tsmc.com/en-US/sustainability-roles/greenpower-practitioner.

[59] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 10004: Resíduos sólidos** – **Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

[60] Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), 2020. **Manual de Orientação RCRA 2020: Lei de Conservação e Recuperação de Recursos.** Washington. Disponível em: https://www.epa.gov.

[61] J. Zhang *et al.* **Author keywords in scientific articles: A corpus study**. Scientometrics, v. 103, n. 3, pp. 1057–1069, 2015. DOI: 10.1007/s11192-015-1593-5.

[62] M. Ruberti, **Environmental performance of semiconductor manufacturing: a comparative analysis of fab types.** Journal of Cleaner Production, v. 392, 2024.

[63] R. Agrawal, **Global virtual factory simulation for energy efficiency**. arXiv:2311.04947, 2023. DOI: 10.48550/arxiv.2311.04947.

[64] F. Iacopi *et al.* **Opportunities and perspectives for green chemistry in semiconductor technologies.** Green Chemistry, v. 21, n. 16, pp. 4324–4340, 2019. DOI:10.1039/C9GC01058K.

[65] A. S. Brejão *et al.* **Proposta para a economia circular: reuso do resíduo da microeletrônica**. Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção, v. 8, n. 13, p. 73-85, 2020. DOI: 10.5380/RELAINEP.V8I13.73185.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.