

4 **Industria elettrodigitale e nocività**

Sommario 4.1 Un'industria elettrodigitale: concettualizzazione e componenti chiave. – 4.2 I semiconduttori – 4.3 La dimensione socio-ecologica della nocività digitale. – 4.4 L'impronta dell'eco-infrastruttura digitale. – 4.5 Produzione e mercato dei semiconduttori: una panoramica globale. – 4.6 La crisi dei chip e le dinamiche geopolitiche. – 4.7 Le politiche per i semiconduttori in Europa e Italia. – 4.8 I data center. – 4.9 Zone economiche speciali e industria elettrodigitale.

4.1 Un'industria elettrodigitale: concettualizzazione e componenti chiave

Per capire la portata reale della digitalizzazione e coglierne le varie manifestazioni fisico-spaziali e, più in generale, le sue conseguenze socio-ecologiche, è fondamentale non separarla dall'industria elettronica. In altri termini, il digitale deve essere analizzato come un'industria integrata su scala globale definibile come 'elettrodigitale',¹ in cui progettazione, componentistica, manifattura, logistica, infrastrutture di rete e servizi software si articolano lungo catene globali del valore (GVC) modulari (Gibbon, Bair, Ponte

1 La scelta di utilizzare il termine composto 'elettrodigitale' ha l'obiettivo di rendere ancora più esplicito il legame inscindibile tra il digitale e l'elettronica, evidenziando come le innovazioni nel mondo digitale siano strettamente ancorate a infrastrutture e componenti materiali, nelle reti fisiche di trasmissione e nei semiconduttori che ne costituiscono il cuore tecnologico.

2008; Sturgeon 2002; Sturgeon, Kawakami 2011) nel quadro di una divisione internazionale del lavoro digitale (Fuchs 2014; Pirina 2022). L'industria elettronica ha attraversato un processo significativo di delocalizzazione ed esternalizzazione dei processi produttivi ad alta intensità di lavoro. Dalla produzione concentrata nel Nord Globale fino agli anni Sessanta, a partire dagli anni Ottanta l'industria ha conosciuto un'ampia esternalizzazione verso *Contract Manufacturers* (basata sul modello dell'*Electronic Manufacturing Service* – EMS) e *Original Design Manufacturers* (ODM): le imprese leader (*lead firms*) mantengono controllo su progettazione, marchio e mercato, mentre la produzione è affidata a fornitori specializzati; accanto a queste figure, i *platform leaders* (ad es. progettisti di chip e architetture) inseriscono i propri standard tecnologici nei prodotti altrui (Sturgeon 2002; Sturgeon, Kawakami 2011; Gereffi 2018).

Tabella 5 Tipologie di imprese nella filiera elettrodigitale (definizioni sintetiche).
Fonte: elaborazione dell'Autore a partire da Gibbon, Bair, Ponte 2008; Gereffi 2018; Sturgeon 2002; Sturgeon, Kawakami 2011.

Tipo di impresa	Definizione
<i>Lead firms</i> (imprese leader/brand)	Detengono progettazione, marchio, proprietà intellettuale e canali commerciali. Esternalizzano gran parte della produzione fisica a terzi, mantenendo il controllo architetturale della filiera (es.: Apple, Dell, HP).
EMS – <i>Electronic Manufacturing Services</i> (fornitori di produzione elettronica)	Aziende che assemblano e producono dispositivi e componenti per conto delle <i>lead firms</i> , spesso su specifiche tecniche del committente. Offrono servizi di industrializzazione, approvvigionamento, test e logistica (es.: Foxconn, Pegatron, Flex).
ODM – <i>Original Design Manufacturers</i> (produttori a progettazione originale)	Progettano e producono prodotti completi che possono essere venduti con il marchio del cliente (<i>white/grey label</i>). Rispetto agli EMS hanno maggiore autonomia progettuale e talvolta forniscono piattaforme di riferimento (es.: Compal, Quanta, Wistron).
<i>Platform leaders</i> (leader di piattaforma tecnologica)	Imprese che sviluppano standard, architetture o componenti chiave (chip, sistemi operativi, toolchain) che diventano basi comuni per l'ecosistema, imponendo traiettorie tecnologiche e di compatibilità (es.: Intel, ARM, Google per Android).

La ricollocazione geografica della manifattura ha favorito il Sud-Est asiatico, con la Cina come snodo chiave. Ad esempio, nel 2020 la Cina ha rappresentato circa il 30% delle esportazioni mondiali di beni ICT (*ICT goods*), risultando di gran lunga il principale esportatore globale (UNCTAD 2021). Da oltre un decennio la Cina presidia i segmenti chiave: dalle esportazioni di computer che coprono circa metà del mercato mondiale almeno dal 2010, ai telefoni che superano il 40% del mercato globale dal 2015; nel complesso, la Cina è il principale esportatore mondiale di prodotti ICT (Chen, Salike, Thorbecke 2025).

Un ambito fondamentale dell'industria elettrodigitale è rappresentato dalle ICTs. Basandoci sulla definizione proposta dal United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD),² l'ambito delle ICTs può suddividersi in servizi (*ICTs services*) e merci o manifattura (*ICTs goods*). Il primo comprende lo sviluppo di software, i servizi informatici e di telecomunicazioni. Il secondo include la componentistica e l'hardware, dunque dispositivi dell'elettronica di consumo, delle comunicazioni, i PC, la componentistica periferica ecc. Secondo i dati Eurostat (2025), tra il 2012 e il 2022 nel contesto dell'UE-27 la manifattura ICTs è stata caratterizzata da una crescita molto contenuta: il suo contributo al valore aggiunto lordo è aumentato di appena 0,6%, riflettendo le sfide legate all'automazione, alla concorrenza globale e ai trasferimenti produttivi in regioni a costi inferiori. Nel 2022 l'ICTs ha contribuito per circa il 5,5% al valore aggiunto lordo europeo, di cui 4,6% attribuibili ai servizi e 0,9% alla manifattura. Queste dinamiche si riflettono anche sul fronte occupazionale, dove quasi il 92% dei posti di lavoro nel settore ICT è concentrato nei servizi, contribuendo significativamente all'innalzamento della produttività, sebbene il comparto manifatturiero, nonostante il suo ruolo strategico per il 'made in Europe', mostri un calo occupazionale (con un indice in diminuzione da 100 nel 2012 a circa 83,9 nel 2022) dovuto all'effetto congiunto di automazione e delocalizzazione (Eurostat 2025).

L'importanza delle ICTs all'interno dell'industria elettrodigitale è evidente anche nella loro capacità integrativa e abilitante, poiché forniscono l'infrastruttura e i servizi necessari per la raccolta, l'elaborazione, lo scambio e la gestione delle informazioni. Inoltre, l'interazione tra ICTs e semiconduttori è cruciale: i progressi nella progettazione e nella produzione di microchip ad alte prestazioni supportano lo sviluppo di algoritmi complessi e di infrastrutture per reggere e incrementare la potenza computazionale (Ruberti 2023).

² Per maggiori dettagli sul quadro definitorio, le statistiche e gli indicatori per misurare il commercio internazionale di beni ICT e servizi ICT si veda la nota tecnica dell'UNCTAD consultabile alla seguente pagina: https://unctad.org/system/files/official-document/tn_unctad_ict4d03_en.pdf.

4.2 I semiconduttori

I semiconduttori costituiscono uno dei fondamenti tecnologici più importanti – se non il più importante – dell'industria elettrodigitale. Essi sono materiali – principalmente silicio, ma anche germanio per applicazioni specializzate – lavorati con precisione nanometrica per realizzare dispositivi complessi che permeano la vita quotidiana, dagli smartphone e computer all'elettronica automobilistica, dai sistemi di intelligenza artificiale alle infrastrutture di telecomunicazione, fino agli elettrodomestici più comuni come tostapane e frigoriferi. Essi hanno una caratteristica distintiva rispetto ad altri materiali: in sé, trasmettono (appunto, conducono) pochissima elettricità, ma con l'aggiunta di materiali e sostanze specifiche (*doping*) e di un campo elettrico, la loro capacità di trasmettere energia aumenta (Miller 2024; Sissa 2024).

La centralità strategica di questa industria deriva dalla sua trasversalità: i semiconduttori sono indispensabili non solo nell'elettronica di consumo, ma anche in industrie come quella automobilistica, la difesa, l'automazione industriale, l'IoT, i data center e l'AI. La loro ubiquità è resa possibile dalle dimensioni infinitesimali – come riportato dalla European Semiconductor Industry Association (ESIA), un transistor moderno è 10.000 volte più sottile di un capello umano e un processore odierno di fascia alta contiene fino a 100 miliardi di transistor³ – e dalla loro capacità di abilitare tecnologie sempre più avanzate.

I microchip combinano milioni o miliardi di transistor su una singola unità, consentendo operazioni logiche e computazionali straordinariamente avanzate. La loro progettazione e fabbricazione richiedono strutture sofisticate, come le camere bianche ultra-sterili e i macchinari per la litografia ottica. La qualità del wafer, inclusa la purezza del materiale e la precisione nella sua lavorazione, è determinante per l'efficienza e l'affidabilità dei semiconduttori finali. La lavorazione dei wafer avviene con processi altamente specializzati, che includono incisioni, deposizioni e trattamenti termici, e su di essi vengono realizzati strati multipli di circuiti elettronici. Una volta prodotti, i microchip vengono integrati in schede madri, circuiti stampati che collegano processori, memoria e periferiche, ottimizzando flussi di dati, gestione energetica e dissipazione del calore. Un aspetto chiave nella produzione dei semiconduttori è l'assoluta necessità di eliminare ogni contaminante, come polvere o umidità, per garantire il corretto funzionamento dei dispositivi (Khan, Mann 2020).

3 Per maggiori informazioni sui semiconduttori e per un quadro definitorio si veda la pagina dell'ESIA: <https://www.eusemiconductors.eu/esia/semiconductors-industry/what-semiconductor>.

A ben vedere, questa condizione accompagna l'evoluzione dei semiconduttori e dei relativi dispositivi elettronici fin dalle loro origini, seppur con livelli di precisione e di complessità differenti. Lo storico dell'economia Chris Miller (2024) racconta questa attenzione a partire dal passaggio dai calcolatori meccanici a ingranaggi ai calcolatori elettrici basati su valvole termoioniche, spiegando l'origine del termine informatico *debugging*. Pur garantendo un salto qualitativo nella capacità computazionale, i calcolatori elettrici avevano un limite esogeno derivante dal loro funzionamento fisico. Le valvole termoioniche apparivano come lampadine, con all'interno dei filamenti che emettevano luce e calore, attraendo in questo modo insetti come le falene. Questa condizione comportava perciò continue operazioni di disinfestazione – appunto, *debugging* – per garantire il funzionamento continuo ed efficace dei calcolatori elettrici.

L'origine dei semiconduttori si rintraccia nei laboratori dell'apparato accademico-militare-industriale statunitense, sorti durante la Seconda Guerra Mondiale e il secondo dopo guerra per la ricerca in ambito atomico, missilistico e spaziale. Sono tre i passaggi fondamentali per l'affermazione dell'industria dei semiconduttori: l'invenzione del transistor nel 1947 rappresentò un punto di rottura rispetto alle vecchie valvole termoioniche, offrendo un sistema più affidabile e compatto per il controllo dei segnali elettrici. Successivamente, nel 1958, l'introduzione del circuito integrato consentì di miniaturizzare ulteriormente i componenti, raggruppando più transistor su un'unica piastrina o wafer di silicio (o, in alternativa, di germanio) e migliorando prestazioni ed efficienza. Infine, il microprocessore (microchip), sviluppato nel 1971, permise di integrare in un solo chip tutte le funzioni di un'unità di elaborazione centrale e aprendo la strada all'informatica personale e ai dispositivi digitali che oggi dominano la nostra vita quotidiana (Brown, Linden 2009; Miller 2024).

L'industria dei semiconduttori comprende diversi segmenti specializzati, ciascuno con funzioni distinte e applicazioni specifiche. I chip di memoria, tra cui la DRAM (*Dynamic Random-Access Memory*), costituiscono la memoria volatile a breve termine dei computer, essenziale per l'elaborazione rapida dei dati, mentre la memoria flash offre archiviazione non volatile a lungo termine, mantenendo le informazioni anche in assenza di alimentazione. I chip logici, come CPU e GPU, sono il 'cervello' dei dispositivi elettronici, responsabili dell'esecuzione di calcoli complessi e operazioni logiche. I chip analogici, invece, gestiscono segnali continui come suono, temperatura e tensione, trovando impiego in amplificatori audio, sensori e sistemi di alimentazione. I chip discreti, tra cui transistor e diodi, svolgono funzioni circuitali fondamentali come la regolazione e la commutazione della corrente elettrica. I sensori, come quelli di movimento, luce o pressione, convertono stimoli

fisici in segnali elettrici, abilitando l'interazione tra dispositivi e ambiente. I chip ottici, utilizzati nelle fibre ottiche e nei sistemi di comunicazione laser, ottimizzano la trasmissione di dati ad alta velocità. Infine, i microcomponenti, tra cui oscillatori e regolatori di tensione, sono elementi essenziali per il corretto funzionamento e la sincronizzazione dei circuiti integrati. Questa diversificazione riflette la natura poliedrica dell'industria dei semiconduttori, che alimenta settori che vanno dall'elettronica di consumo all'*automotive*, dall'IoT all'intelligenza artificiale (Brown, Linden 2009; Miller 2024).

Tabella 6 Tipologie di chip e descrizione sintetica. Fonte: parziale adattamento dell'Autore da Blevins et al. 2023; trad. dell'Autore.

Tipo	Funzione/applicazione
Chip logici	Funzionano tipicamente come il 'cervello' dei dispositivi informatici. Includono microprocessori, come le unità di elaborazione centrale (CPU) per il computing generico e le unità di elaborazione grafica (GPU) per il rendering video. Comprendono anche chip meno costosi progettati per compiti specifici (es. controllo finestrini e sedili nelle auto). I mercati principali includono smartphone, personal e high-performance computing (es. supercomputer e server), dispositivi IoT (es. dispositivi smart come smartwatch, altoparlanti, automazione domestica e sistemi di sorveglianza) e il settore automotive (es. sistemi di infotainment e assistenza alla guida).
Chip di memoria	Memorizzano dati. I due tipi principali sono la memoria ad accesso casuale dinamico (DRAM) e la memoria flash NAND. La DRAM conserva dati a breve termine mentre il dispositivo è acceso (es. codice necessario al processore per eseguire programmi). La NAND flash fornisce archiviazione a lungo termine per dati come foto e musica, che rimangono disponibili anche dopo lo spegnimento del dispositivo. I mercati principali includono telefoni mobili, data center e dispositivi personali.
Chip analogici	Svolgono diverse funzioni, tra cui: lavorare con sensori per convertire segnali analogici dall'ambiente (es. temperatura, velocità e pressione, che possono assumere un intervallo continuo di valori) in segnali digitali; gestione dell'alimentazione per convertire, controllare e distribuire energia elettrica (es. nei veicoli elettrificati); comunicazioni (es. telefoni mobili e applicazioni militari come rilevamento e sorveglianza, radar, sonar e imaging a infrarossi).

Tipo	Funzione/applicazione
Optoelettronica	Dispositivi che interagiscono con o producono luce. Le principali applicazioni includono: diodi a emissione luminosa (LED), sensori di immagine (es. nelle fotocamere) e diodi laser (es. nelle comunicazioni in fibra ottica).
Sensori	Rilevano o controllano proprietà fisiche come temperatura, pressione e accelerazione. Hanno applicazioni in elettronica di consumo (es. smartphone), automobili e apparecchiature industriali.
Componenti discreti	Svolgono una singola funzione elettrica, come il controllo della corrente in un circuito integrato. Esempi includono transistor, diodi e resistori ad alta potenza.

4.3 La dimensione socio-ecologica della nocività digitale

I decenni in cui si è affermato il modello della società dell'informazione hanno testimoniato il fiorire delle innovazioni microelettroniche e nella chimica, le cui conseguenze si sono riverberate in tutti i settori produttivi, seguendo quella che è stata definita come la «transizione dagli atomi agli elettroni» (Pasek 2023): una transizione questa che, lungi dal realizzare la promessa di dematerializzazione, ha semplicemente spostato il peso materiale dell'infrastruttura tecnologica verso nuove forme di consumo energetico e nuove geografie estrattive. In questo contesto, la Legge di Moore e la Legge di Koomey – che descrivono rispettivamente la crescita esponenziale della potenza di calcolo e il miglioramento dell'efficienza energetica – possono essere rappresentate come una crescita tendenziale dei costi socio-ecologici dell'industria elettrodigitale: mentre i semiconduttori, i chips, i transistor si rimpiccioliscono e le loro prestazioni aumentano, i costi socio-ecologici dell'industria elettrodigitale crescono. Dunque, la miniaturizzazione – che permette di inserire sempre più componenti in spazi sempre più ridotti – diventa un 'feticcio', marxianamente inteso, per cui il peso specifico di semiconduttori, chip e transistor, misurato in termini di movimentazione e consumo di risorse naturali ed energia, diventa gargantuesco. Un singolo smartphone, ad esempio, contiene in media oltre quaranta metalli diversi. Inoltre, il prodotto finale rappresenta solo il 2% della massa complessiva dei rifiuti generati lungo l'intero ciclo di vita: per esempio, la produzione di un microchip di due grammi comporta la generazione di circa 32 chilogrammi di scarti, ossia un rapporto di 1 a 16.000 tra materia utile e rifiuti (Pitron 2023).

La tendenza a una crescita dei costi socio-ecologici si può cogliere a partire da una tecnologia chiave nel quadro dell'industria elettrodigitale e, più nello specifico, dei circuiti integrati (IC) e per

la Legge di Moore: la litografia – cioè un metodo che utilizza la luce per stampare circuiti microscopici su un wafer di silicio, creando così i chip dei microprocessori – in particolare mediante EUV (*Extreme Ultraviolet*). Quest'ultima svolge una funzione cruciale poiché consente una riduzione della lunghezza d'onda di esposizione di un fattore 15 rispetto alla litografia UV profonda tradizionale, operando a 13 nm (Teng et al. 2023), essenziale per sostenere la legge di Moore e permettere la fabbricazione di dispositivi con dimensioni sempre più ridotte e maggiore densità di transistor, sebbene l'ambiente di vuoto richiesto e l'utilizzo di specchi multistrato altamente riflettenti introducano complessità tecniche e sfide ambientali legate al consumo energetico e all'inquinamento (Ma et al. 2022; Teng et al. 2023).

La capacità della litografia EUV di operare a 13 nm sostiene il ritmo di avanzamento previsto dalla legge di Moore, ma richiede un controllo ambientale rigoroso poiché contaminanti come vapore acqueo e idrocarburi, generati dal *fotorezist* – una sostanza chimica che reagisce alla luce per creare una patina sulla superficie di un wafer di silicio – o dal degassamento dei cavi, possono depositarsi sulle superfici ottiche sotto irradiazione EUV, riducendone la riflettività (Teng et al. 2023). La diffusione di queste sostanze, se non adeguatamente controllata, dà origine a problematiche ambientali multiformi, interessando atmosfera, suolo e risorse idriche. Dal punto di vista atmosferico, esse contribuiscono alla formazione di smog fotochimico, particolarmente in contesti industriali non adeguatamente controllati, dove l'interazione tra la radiazione EUV ad alta energia e gli idrocarburi ne favorisce la frammentazione in specie reattive che, combinandosi con ossidi di azoto e radiazione solare, generano ozono troposferico e particolato secondario, con conseguente degrado della qualità dell'aria nelle aree ad alta densità produttiva (Teng et al. 2023). Parallelamente, l'inquinamento da idrocarburi interessa anche il suolo e l'idrosfera, poiché i composti organici, attraverso una gestione non ottimale dei rifiuti di processo, possono infiltrarsi nel terreno contaminandolo, con ripercussioni lungo la catena alimentare. La natura idrofobica di molti di questi composti ne facilita inoltre la migrazione verso le falde acquifere, con conseguente compromissione degli ecosistemi acquatici e rischi per la salute pubblica legati alla possibile presenza di contaminanti nelle risorse idriche destinate al consumo umano (Teng et al. 2023).

A ciò si aggiungono le emissioni di gas serra e il consumo energetico dei sistemi a vuoto e di abbattimento (Ma et al. 2022), con l'idrogeno, usato per la pulizia delle superfici e la riduzione della contaminazione da stagno, che contribuisce significativamente all'impronta energetica, sebbene sistemi di riciclo possano ridurre le emissioni di CO₂ fino a 536 tonnellate annue per sistema (Ma et al. 2022). L'industria deve quindi bilanciare innovazione e sostenibilità attraverso ottimizzazione energetica, ad esempio con sistemi di terza

generazione che riducono del 49% i consumi, controllo avanzato dell'inquinamento, e gestione sostenibile delle risorse come il riciclo dell'idrogeno, approcci che migliorano l'efficienza produttiva riducendo contemporaneamente l'impronta di carbonio e allineando lo sviluppo tecnologico con le esigenze di sostenibilità globale (Ma et al. 2022; Teng et al. 2023).

Il punto diventa, quindi, riflettere sulla «energetica digitale» (Pasek et al. 2023) per comprendere come l'energia non sia semplicemente un *input* per il funzionamento dei dispositivi, ma il vero *medium* che plasma l'ecologia stessa dell'industria elettrodigitale. L'elettricità diventa così l'elemento che connette la chimica dei wafer di silicio con la geopolitica delle miniere di terre rare, i data center con le centrali a carbone, in un unico sistema metabolico che delinea una «storia naturale dell'elettronica» (Gabrys 2011): l'elettronica non scompare nel momento in cui viene dismessa, ma continua ad agire nell'ambiente sotto forma di rifiuti tossici, microplastiche e metalli pesanti, riconfigurando gli ecosistemi in modi spesso invisibili. Seguendo l'intuizione di Jussi Parikka (2015), i media - e per estensione le tecnologie digitali - non sono più una semplice estensione dei sensi umani, bensì della Terra, entrando così a pieno titolo nei processi geologici.⁴ Questa visione permette di smascherare la magnificazione digitale, cioè l'illusione ottica prodotta dall'immaginario tecnologico che dipinge il digitale come forza dematerializzante (Balbi 2022). In realtà, la cosiddetta rivoluzione digitale non ha affatto risolto il problema del metabolismo sociale con la natura, ma lo ha semplicemente traslato su scala globale, creando nuove forme di nocività che riconfigurano gli ecosistemi attraverso rifiuti elettronici, microplastiche e metalli pesanti.

Dunque, l'apparente paradosso della crescita tendenziale dei costi socio-ecologici della miniaturizzazione dei semiconduttori alla base dell'infrastrutturazione digitale sfida radicalmente il racconto dominante sul passaggio dall'analogico al digitale, dagli atomi ai bits (Marrone, Pirina, Peterlongo 2022). Quella che è stata presentata come una dematerializzazione dell'economia e dei consumi si rivela piuttosto una riconfigurazione della materialità, dove l'infrastrutturazione non più solo digitale ma figurale - con i suoi data center, cavi sottomarini e dispositivi sociotecnici di varia natura - riproduce e intensifica le logiche estrattive del Capitalocene. Come nota Guillaume Pitron (2023), ogni semplice clic o video in streaming attiva una complessa catena di processi materiali ed energetici che si estende attraverso continenti e oceani, che comprende oltre 500 anelli lungo le catene produttive con più di sedici mila subappaltatori.

4 A questo proposito si veda anche la mappa «Anatomy of an AI System» realizzata da Kate Crawford e Vladan Joler e consultabile alla pagina: <https://anatomyof.ai/>.

4.4 L'impronta dell'eco-infrastruttura digitale

La connettività permanente sulla quale si basa la digitalizzazione contemporanea ha implicazioni significative per il lavoro, la produzione e la sostenibilità ambientale. Da un lato, l'aumento della connettività ha migliorato l'accesso a informazioni, istruzione ed economie digitali. Tuttavia, ha anche intensificato la domanda di dispositivi elettronici e di infrastrutture informatiche e di telecomunicazione, tanto fisiche quanto intangibili, esercitando ulteriore pressione sulle catene di approvvigionamento manifatturiere globali.

Come si è chiesto la fisica ed esperta di impatto ambientale delle tecnologie digitali Giovanna Sissa: «potevamo davvero pensare che tale *universo digitale* fosse privo di un impatto ambientale?» (2024, 6). Effettivamente, a uno sguardo più attento, l'impronta ecologica e materiale emerge chiaramente. Uno studio condotto da Wang e colleghi (2021) sul consumo di acqua ed energia e sulle emissioni di gas serra (GHG) nell'industria dei semiconduttori, ha evidenziato l'elevata intensità di risorse necessarie per la produzione con una forte correlazione positiva tra il consumo di energia e il prelievo di acqua da parte delle aziende di semiconduttori. La loro analisi indica che nel 2021, il consumo totale di acqua da parte di 28 aziende di semiconduttori è stato di 789 milioni di m³, con un intervallo che variava tra 2,3 e 163,7 milioni di m³ per azienda.

Il consumo energetico totale ha raggiunto i 149 miliardi di kWh, con un intervallo compreso tra 410 milioni e 32,3 miliardi di kWh. Le emissioni totali di gas serra (GHG) sono state pari a 71,5 milioni di tonnellate di CO₂ equivalente, suddivise in 27,4 milioni di tonnellate di emissioni dirette (Scope 1) e 44,1 milioni di tonnellate di emissioni indirette (Scope 2). Cinque aziende (Samsung, SK hynix, TSMC, Intel e Micron) hanno consumato oltre 50 milioni di m³ di acqua e 9 miliardi di kWh di energia ciascuna, mentre la maggior parte delle altre aziende ha registrato consumi inferiori a 30 milioni di m³ di acqua e 4 miliardi di kWh di energia (Wang et al. 2021). Per quanto riguarda il consumo medio per unità di prodotto, nel 2021 è stato calcolato che per ogni centimetro quadrato di prodotto sono stati consumati 8,22 litri di acqua, 1,15 kWh di energia e sono stati emessi 0,84 kg di CO₂ equivalente. Sulla base delle informazioni fornite da 6 imprese (DB HiTek, PSMC, VIS, HUAHONG, NXP e UMC) delle 28 considerate, lo studio ha calcolato che per la produzione di un singolo wafer da 8 pollici sono stati consumati 2,58 m³ di acqua, 361,3 kWh di energia e sono state emesse 263,9 kg di CO₂ equivalente. Dal 2017 al 2020, il consumo medio di acqua ed energia per unità di prodotto è aumentato rispettivamente del 15% e del 10,2%, mentre nel 2021 si è registrata una diminuzione del 10,5% per il consumo di acqua e del 13,6% per quello di energia rispetto al 2020. Le principali fonti di approvvigionamento idrico delle aziende di semiconduttori sono

state l'acqua superficiale, che ha rappresentato il 47,0% del totale, la fornitura municipale con il 35,3%, il prelievo di acque sotterranee con l'8,5%, la fornitura da terze parti con il 5,8% e l'acqua riciclata con il 3,2%. Sette aziende, tra cui PSMC, UMC, TSMC, GFS, Seagate, Sony e SK hynix, hanno utilizzato acqua riciclata proveniente da impianti di trattamento esterni, con percentuali che variavano dal 0,15% al 37,3% del consumo totale. TSMC, ad esempio, ha costruito impianti di riciclo dell'acqua per ridurre il consumo di acqua dolce, con uno di questi impianti che nel 2021 ha fornito 10.000 m³ di acqua riciclata al giorno (Wang et al. 2021).

Sissa, nella sua efficace e chiara esposizione sulle emissioni di gas climalteranti lungo le varie e articolate fasi che compongono il ciclo di vita delle tecnologie digitali, ha ricordato che possono essere raggruppate in due gruppi principali: le «emissioni incorporate», che «derivano dall'utilizzo di energia primaria nei processi di produzione, trasporto e smaltimento e le «emissioni operative», le quali «sono effetto del consumo di energia in fase di utilizzo» (2024, 23). Volendo utilizzare un linguaggio meno tecnico e più prossimo alle scienze sociali, potremmo richiamare quanto scritto nell'introduzione al presente libro sulla metafora dell'iceberg e sulla «storia sulla sfera» e la «storia in primo piano» (Fraser, Jaeggi 2019): la prima include l'insieme delle emissioni incorporate, la seconda le emissioni operative.

Data la loro organizzazione su scala globale e lungo molteplici settori e segmenti produttivi, le catene di produzione e del valore delle tecnologie digitali sono complesse e dinamiche (Sissa 2024). Da ciò deriva una difficoltà nella contabilità della loro impronta ecologica per quanto concerne le emissioni di gas climalteranti, il consumo energetico e idrico e l'inquinamento derivante dall'utilizzo di fonti fossili. Questo dipende da un carente quadro definitorio su cosa includere nel calcolo, ma anche al fatto che vi sono stati avanzamenti dal punto di vista dell'efficientamento energetico. Dunque, è un compito assai arduo creare un'equazione relativa al vantaggio in termini di consumo energetico dell'utilizzo di un dispositivo digitale rispetto al corrispettivo analogico/fisico a causa della quantità di variabili che entrano in gioco nel ciclo di vita di un prodotto. Il cosiddetto *rebound effect* è un esempio emblematico: i miglioramenti nell'efficienza tecnica delle tecnologie digitali (più potenza per kWh) vengono neutralizzati dall'aumento complessivo del traffico dati e dell'uso digitale globale (Galenbe 2023). Secondo Lange e Santarius (2020), questi sviluppi tecnologici rappresentano una forma di esternalizzazione dei costi ambientali, trasferendo i benefici economici a pochi attori e lasciando i costi ecologici alla collettività. In pratica, una privatizzazione della ricchezza e una socializzazione dei costi in salsa *green*.

Al netto della difficoltà di contabilizzare con precisione costi e benefici ambientali della transizione digitale, la letteratura converge nel ritenere che le ICT assorbano circa il 7-10% dei consumi elettrici mondiali, sulla base di stime modellistiche e di misurazioni consolidate (Andrae 2020; Gelenbe 2023). In termini di emissioni climalteranti, la migliore sintesi disponibile colloca l'impronta dell'ICT tra il 1,8% e il 2,8% delle emissioni globali, che può salire fino al 2,1-3,9% quando si corregge per la troncatura delle filiere (Freitag et al. 2021). Secondo l'Agenzia Internazionale dell'Energia, i soli data center e le reti di trasmissione hanno generato 330 MtCO_{2e} nel 2020, pari a 0,9% delle emissioni energetiche globali (IEA, 2023). Il report congiunto di International Telecommunication Union (ITU) e World Benchmarking Alliance (WBA) mostra che, nel 2023, 166 delle 200 aziende digitali valutate hanno riportato emissioni operative (quindi scope 1 e scope 2) di 297 milioni di tonnellate di CO₂ equivalente (MtCO_{2e}), pari a circa lo 0,8% delle emissioni globali legate al settore energetico ed equivalenti alle emissioni annuali combinate di Argentina, Bolivia e Cile (ITU, WBA 2025). Di queste, le emissioni operative dirette (Scope 1) – dunque quelle derivanti da fonti di proprietà dell'azienda o sotto il suo diretto controllo – ammontavano a 46 milioni di tCO_{2e}, mentre le emissioni indirette derivanti dall'acquisto di energia elettrica *location-based* (Scope 2) – cioè quelle che considerano il mix energetico della rete locale – raggiungevano i 244 milioni di tCO_{2e}, segnando un incremento dell'1,4% rispetto al 2022, malgrado i crescenti impegni per la loro riduzione. Da quanto emerge dal report, le emissioni indirette lungo le catene del valore (Scope 3) rappresentano l'84% delle emissioni totali tra le aziende che hanno fornito dati completi, principalmente dovute all'uso dei prodotti venduti (57,6%), ai beni e servizi acquistati (23,7%) e ai beni capitali (5,6%). L'impatto più elevato è stato riscontrato nel settore dell'elettronica, con emissioni totali di 900,4 milioni di tCO_{2e}, seguito dal settore IT software e servizi con 319,5 milioni di tCO_{2e} e dalle telecomunicazioni con 279,5 milioni di tCO_{2e}.

Le emissioni sono fortemente concentrate: le prime 10 aziende, tra cui China Mobile, Amazon, Samsung Electronics, China Telecom, China Unicom, TSMC, Alphabet (Google), Microsoft, SK Hynix e BOE Technology Group, sono responsabili da sole del 53% delle emissioni operative complessive (Scope 1 e Scope 2). Queste aziende sono prevalentemente con sede in Asia orientale e Pacifico, regioni caratterizzate da un'elevata dipendenza da reti energetiche basate su fonti fossili. Secondo il già citato studio di Wang e colleghi (2021), le emissioni di gas serra sono diminuite costantemente nel tempo, con una riduzione del 19,4% nel 2021 rispetto al 2017. Tuttavia, ricerche più recenti che hanno incluso anche l'espansione dell'IA e della produzione di chip dedicati mostrano come questi ultimi stiano contribuendo significativamente all'aumento delle emissioni globali:

ad esempio, il consumo elettrico globale per la fabbricazione di chip IA è cresciuto di oltre il 350% tra il 2023 e il 2024, soprattutto nelle regioni altamente dipendenti da combustibili fossili, come Taiwan, Corea del Sud e Giappone (Greenpeace 2025; ITU, WBA 2025). Per quanto riguarda le fonti energetiche, nel 2021 l'elettricità ha rappresentato l'83,7% del consumo totale, seguita dai combustibili fossili con il 12,0%, dall'energia rinnovabile con il 2,7% e da altre fonti non rinnovabili con l'1,7%. Complessivamente, l'elettricità e i combustibili fossili hanno costituito il 95,8% del consumo energetico totale (Wang et al. 2021). Per comprendere la vasta portata dei consumi, lo studio ha paragonato l'impatto delle 27 principali aziende di semiconduttori (produttrici dei chip essenziali per l'elettronica moderna) alle esigenze di una popolazione civile. Ad esempio, nel 2021 il prelievo idrico totale era equivalente al consumo annuale di acqua di una città con 1,88 milioni di abitanti, mentre consumo energetico totale del settore, corrispondeva al fabbisogno energetico di una metropoli con ben 25,2 milioni di abitanti (Wang et al. 2021).

A valle dell'infrastrutturazione digitale, i data center, anche per via dell'espansione dell'IA, rappresentano una quota in rapido aumento dei consumi elettrici e idrici: nel 2024 hanno utilizzato 415 TWh (circa 1,5% dell'elettricità mondiale) e, secondo l'IEA, la domanda dei data center è destinata a superare i 945 TWh entro il 2030 (IEA, 2025; ITU-WBA, 2025 (ITU, WBA 2025)). Ma l'impatto ambientale non si limita al consumo energetico. Ad esempio, la costruzione di data center *hyperscale* comporta la cementificazione di vaste aree periurbane e rurali, frammentando gli ecosistemi, assorbendo acqua per i sistemi di raffreddamento e contribuendo alla frammentazione degli habitat naturali (Carr et al. 2022). Ad esempio, l'addestramento del modello GPT-3 nei data center di Microsoft ha consumato circa 5,4 milioni di litri di acqua, di cui 700.000 litri per il raffreddamento sul posto e si stima che la domanda globale di AI nel 2027 comporterà un prelievo di acqua tra 4,2 e 6,6 miliardi di metri cubi e un consumo tra 0,38 e 0,60 miliardi di metri cubi, equivalenti al consumo annuale di acqua di 4-6 volte quello della Danimarca o metà del Regno Unito (Li et al. 2023).

In parallelo, la crescente digitalizzazione ha contribuito alla pressione su catene globali di approvvigionamento di risorse naturali. La domanda di materie prime come le terre rare e semiconduttori è esplosa, accompagnando l'espansione della potenza computazionale e della produzione di dispositivi. Non a caso, la capitalizzazione delle 40 principali compagnie minerarie è triplicata dal 2003 al 2022 (PwC 2023), e sebbene questa crescita non sia dovuta unicamente alla digitalizzazione, segnala una tendenza di fondo: il digitale - meglio, l'industria elettrodigitale - ha un 'peso', e questo peso è misurabile anche in tonnellate di minerali estratti, trattati, trasportati e assemblati.

A ciò si aggiunge la contraddizione del mix energetico. Nonostante gli sforzi per una transizione ecologica, gran parte dell'infrastrutturazione digitale è alimentata ancora oggi da petrolio, gas e carbone. L'adozione di soluzioni verdi come il raffreddamento attraverso il riutilizzo dell'acqua o l'energia eolica/solare è importante, ma non ancora sufficiente a invertire la tendenza di fondo. Le politiche europee, pur esercitando una pressione normativa, non sempre si traducono in azioni concrete a livello industriale (Brodie 2025). Queste dinamiche riflettono la tensione tra la necessità di concentrare le risorse in poli altamente sviluppati e l'obiettivo di distribuire equamente i benefici della digitalizzazione tra le diverse aree geografiche.

4.5 Produzione e mercato dei semiconduttori: una panoramica globale

Dopo aver delineato le implicazioni ecologiche e geopolitiche dell'infrastrutturazione digitale attraverso i concetti di assemblaggi carbossiliconici e capitale cyber-fossile, è necessario esaminare le forme concrete in cui tale sistema si struttura e si consolida a livello industriale. L'industria dei semiconduttori rappresenta, in tal senso, il nodo strategico per comprendere le dinamiche economiche, produttive e finanziarie.

Questa industria è dominata da poche grandi multinazionali, tra cui Intel, TSMC e Samsung, che controllano una quota significativa della produzione globale di microchip. Questa elevata concentrazione è dovuta agli enormi investimenti richiesti e alla complessità tecnologica del settore.

Le fasi produttive dell'industria dei semiconduttori sono organizzate su tre livelli, ciascuno con elevato gradiente di *know-how*:

1) design; 2) 'fabrication'; 3) 'assembly, testing and packaging' (ATP). All these three phases can be carried out: a) in-house, by a single company ('integrated device manufacturer' or IDM), as for Intel; although this happens in very few cases now; b) or, as it is much more common, by different agents. (Ruberti 2023, 2)

Dunque, da un lato ci sono grandi produttori integrati (IDM) come Samsung, Intel e SK Hynix, che controllano più fasi delle catene del valore; dall'altro le aziende *fabless*, come ad esempio Nvidia e Qualcomm, che progettano i chip e ne affidano la produzione a fonderie (*fab*) esterne specializzate come TSMC, attualmente la maggiore realtà mondiale nel campo della produzione a contratto: nel quarto trimestre 2024 TSMC ha detenuto circa il 67% del mercato

globale delle fonderie, raggiungendo un record di 70,2% nel secondo trimestre 2025 (TrendForce 2024; 2025b).

Per orientarsi nell’ecosistema, è utile distinguere fasi (progetto, fabbricazione su wafer, assemblaggio e test) e famiglie di prodotto. Una tassonomia accessibile che adotta questa doppia chiave — fasi + tipologie (logica/SoC, memorie, microprocessori e microcontrollori, analogico, optoelettronica/sensori/discreti) — è proposta nei recenti lavori dell’OCSE sulla filiera dei semiconduttori (OECD 2024; 2025). A livello europeo, i rapporti del JRC mostrano come la domanda automotive pesi in modo crescente sulla configurazione della filiera e sulle politiche industriali, specie per i semiconduttori di potenza (Bonnet et al. 202).

Sul piano quantitativo, il 2024 si è chiuso a 627,6 miliardi di dollari di vendite globali, con una previsione per il 2025 rivista al rialzo nel corso dell’anno fino a circa 700,9 miliardi (SIA 2025; WSTS 2025).

Dal lato della domanda, smartphone e comunicazioni restano un baricentro importante (5G, realtà estesa, IA sul dispositivo), ma una spinta crescente viene da server e data center dovuta all’adozione di acceleratori per l’IA (Mii 2024). In quest’ultimo segmento si stima che le vendite di semiconduttori possano raggiungere il picco di 156 miliardi di dollari nel 2025, con una traiettoria che raggiunge 361 miliardi nel 2030 (Infosys Knowledge Institute 2025).

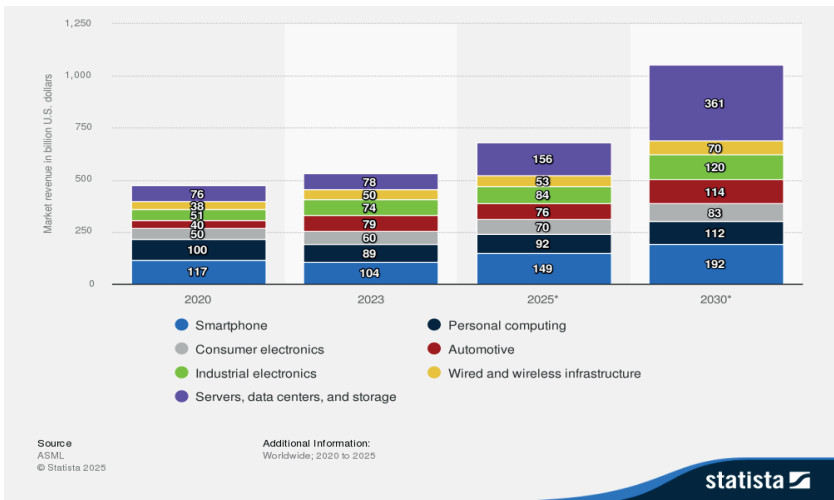


Figura 4 Ricavi del mercato globale dei semiconduttori nel periodo 2020-30, per mercato finale (in miliardi di dollari). Fonte: ASML 2025

Secondo l'ultimo report di PwC sullo stato dell'industria dei semiconduttori (2024), l'impatto dell'IA si manifesta principalmente lungo due direttrici: da un lato, l'integrazione di tecniche di IA nei processi di progettazione e fabbricazione dei chip; dall'altro, la crescente domanda di semiconduttori specializzati, trainata dalla diffusione di applicazioni avanzate di machine learning.

Sul piano produttivo, l'adozione di algoritmi di IA sta trasformando le metodologie di progettazione, consentendo un'ottimizzazione più efficiente dei circuiti integrati e una significativa riduzione degli errori di fabbricazione. L'analisi automatizzata di grandi dataset permette, ad esempio, di identificare precocemente difetti nei wafer o di perfezionare il layout dei transistor, accelerando così i tempi di sviluppo. Contemporaneamente, l'emergere di modelli con elevata potenza computazionale ha innescato una corsa verso soluzioni hardware sempre più performanti. Tale esigenza si traduce nella richiesta di componenti specializzati – tra cui GPU, TPU e memorie ad alta banda (HBM) – capaci di gestire l'onere computazionale associato alle fasi di training e inferenza dei modelli di deep learning (PwC 2024).

Un fenomeno particolarmente rilevante è la proliferazione di semiconduttori personalizzati, progettati *ad hoc* per applicazioni specifiche. Questa tendenza, che vede impegnati attori come Google, Microsoft e Amazon, riflette una strategia volta a conciliare efficienza energetica e capacità di calcolo. Non a caso, AWS ha sviluppato acceleratori dedicati (Tranium e Inferentia), mentre Google ha ottimizzato le proprie TPU per l'addestramento distribuito su larga scala. Analoghi sforzi sono osservabili nel contesto asiatico, con Huawei e Alibaba che stanno investendo in architetture proprietarie per superare i vincoli imposti dalle restrizioni tecnologiche (PwC 2024).

Nonostante gli impatti negativi legati a questa crescita, l'industria sta compiendo sforzi per rendere la produzione di microchip più sostenibile. Alcune aziende, come TSMC, stanno investendo in tecnologie più pulite e processi di produzione più efficienti per ridurre il consumo di energia e acqua e minimizzare i rifiuti tossici, implementando programmi di riciclaggio dell'acqua e di riduzione delle emissioni di gas serra nei suoi *fabs*. Tuttavia, questi sforzi sono spesso limitati dalla pressione competitiva e dalla necessità di ridurre i costi. Le tecnologie digitali stesse possono anche svolgere un ruolo nel promuovere la sostenibilità nell'industria dei semiconduttori; ad esempio, Cubitt (2017) ha esplorato come possano essere utilizzate per migliorare la trasparenza e la responsabilità nelle catene di approvvigionamento, attraverso piattaforme di tracciabilità e campagne di sensibilizzazione sui diritti dei lavoratori e la sostenibilità ambientale. È fondamentale, tuttavia, che queste

tecnologie siano impiegate in modo etico, evitando che contribuiscano a ulteriori forme di sfruttamento e inquinamento.

Tabella 7 Top 10 fornitori di semiconduttori per fatturato a livello mondiale, 2023-24 (in milioni di dollari statunitensi). Fonte: Gartner (aprile 2025);* trad. dell'Autore.

Posizione 2024	Posizione 2023	Fornitore	Fatturato 2024	Quota di mercato 2024 (%)	Fatturato 2023	Crescita 2024-23 (%)
1	3	NVIDIA	76.692	11,7	34.846	120,1
2	2	Samsung Electronics	65.697	10,0	40.868	60,8
3	1	Intel	49.804	7,6	49.427	0,8
4	6	SK hynix	44.186	6,7	23.077	91,5
5	4	Qualcomm	32.976	5,0	29.229	12,8
6	5	Broadcom	27.801	4,2	25.613	8,5
7	12	Micron Technology	27.619	4,2	16.153	71,0
8	7	AMD	24.127	3,7	22.307	8,2
9	8	Apple	20.510	3,1	18.052	13,6
10	13	MediaTek	15.934	2,4	13.451	18,5
-	-	Altri (fuori top 10)	270.536	41,2	269.031	0,6
-	-	Totale Mercato	655.882	100,0	542.054	21,0

4.5.1 Anatomia di un chip

La manifattura dei semiconduttori è un processo complesso e tecnologicamente avanzato che avviene nei *fabrication plants* (FABS), strutture altamente specializzate che richiedono investimenti miliardari per la costruzione e il mantenimento, con costi che possono superare i 10-20 miliardi di dollari per impianti all'avanguardia, come dimostrato, ad esempio, dall'investimento da oltre 40 miliardi di dollari di TSMC per allestire un impianto in Arizona. La produzione di litografi *extreme ultraviolet* (EUV), in cui domina l'olandese ASML, costa oltre 150 milioni di dollari per unità (ASML Annual Report 2022). La fabbricazione ha luogo prevalentemente in paesi come Taiwan, Corea del Sud e, in misura minore, Cina e Stati Uniti (Baldwin 2016).

5 Per un approfondimento con la tabella originale, si rimanda all'articolo consultabile alla seguente pagina: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2025-04-10-gartner-says-worldwide-semiconductor-revenue-grew-21-percent-in-2024>.

Il modello *fabless* permette di evitare questi investimenti, caratterizzandosi per una netta separazione tra progettazione e produzione. Questo approccio consente di concentrarsi sull'innovazione e sul design dei chip, delegando la produzione a terzi. Tale modello ha favorito una divisione internazionale del lavoro altamente specializzata (Gereffi, Fernandez-Stark 2016): le imprese *fabless*, prevalentemente localizzate negli Stati Uniti (es. NVIDIA, Qualcomm e AMD), si occupano della progettazione, mentre le fonderie (*fabs*), concentrate prevalentemente in Asia (Taiwan, Corea del Sud, Malesia, Indonesia e Cina), gestiscono la produzione.

Infine, l'assemblaggio e i test vengono spesso effettuati in paesi dove il costo della manodopera è più contenuto, come Cina, Vietnam e Filippine. Questa fase è caratterizzata da un'intensa attività manuale e da una logistica complessa, che richiede una forza lavoro abbondante e a basso costo (Milberg, Winkler 2013).

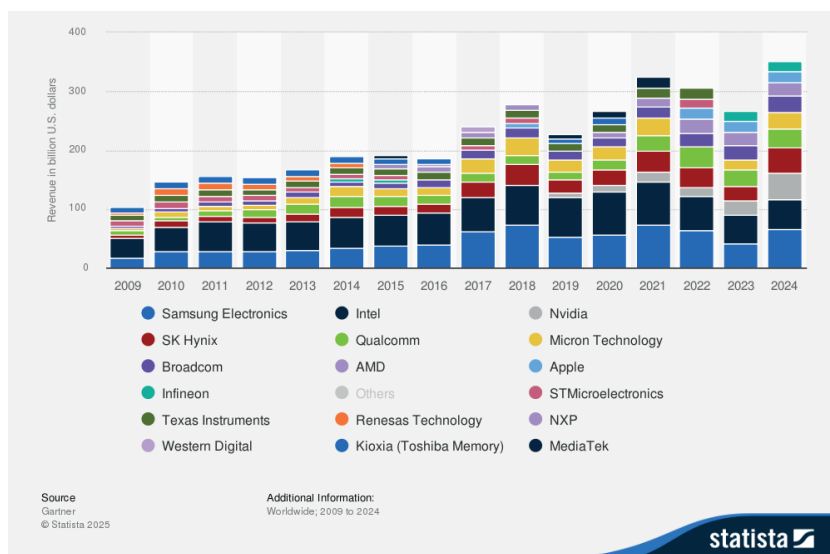


Figura 5 Ricavi delle imprese di semiconduttori a livello globale, nel periodo 2009-24 (in miliardi di dollari). Fonte: Statista 2025c

Nel 2024, Nvidia si è confermata leader tra le *fabless* di circuiti integrati (IC), raggiungendo ricavi pari a 124,38 miliardi di dollari statunitensi, un significativo incremento rispetto ai 55,27 miliardi registrati l'anno precedente, posizionandosi come protagonista assoluta della rivoluzione dell'intelligenza artificiale che sta trasformando il panorama tecnologico globale (TrendForce 2025). La crescita esponenziale di Nvidia (come esemplificato dalla Figura 6) è strettamente legata all'adozione dei suoi chip per l'addestramento

e l'esecuzione di modelli linguistici avanzati, come ChatGPT, e più in generale per applicazioni di IA che richiedono processori specializzati, in grado di offrire maggiore potenza, efficienza e ottimizzazione per algoritmi di machine learning complessi. Questo boom dell'IA ha favorito non solo Nvidia, ma anche altre aziende *fabless* come Qualcomm e AMD, contribuendo a un significativo aumento dei loro ricavi (TrendForce 2025c).

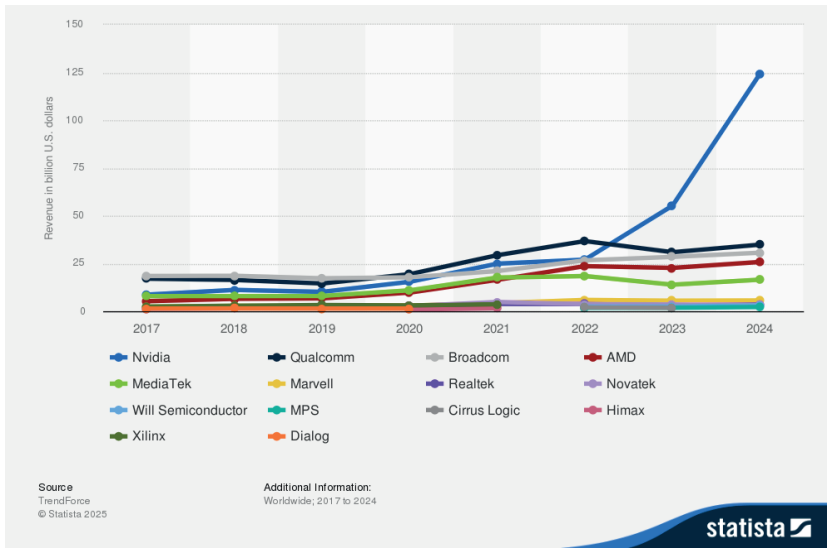


Figura 6 Ricavi delle imprese *fabless* nel periodo 2017-24 (in miliardi di dollari).

Fonte: Statista 2025b

Per quanto riguarda la capitalizzazione di mercato, nonostante il crollo di oltre 600 miliardi di dollari di valore di mercato a causa dell'introduzione di DeepSeek, Nvidia nel primo trimestre del 2025 si è attestata come leader con 3.050 miliardi di dollari, davanti TSMC, Broadcom, ASML e Samsung. Dal punto di vista geografico, il settore rimane saldamente nelle mani di attori nordamericani e asiatico-pacifici, con particolare riferimento ai mercati cinese, sudcoreano e taiwanese, che guidano la spesa globale in macchinari per la produzione di chip. In questo contesto spicca il ruolo strategico dell'europea ASML, unico produttore al mondo di sistemi di litografia a raggi ultravioletti estremi (EUV), tecnologia fondamentale per i processi produttivi più avanzati. La posizione di ASML come fornitore esclusivo di aziende come TSMC - a sua volta principale partner produttivo di Nvidia - evidenzia le complesse interdipendenze che caratterizzano questa industria globale ad alta intensità tecnologica.

A dicembre 2024, le vendite globali di semiconduttori hanno raggiunto i 56,97 miliardi di dollari statunitensi, registrando un incremento di oltre 12 miliardi rispetto allo stesso mese dell'anno precedente. L'analisi per aree geografiche conferma il predominio della regione asiatica, che si mantiene il principale mercato di riferimento, seguita dalle Americhe e dall'Europa (World Semiconductor Trade Statistics 2025). Sebbene il Vecchio Continente mostri volumi di vendita inferiori, il recente annuncio dell'Unione Europea di voler raggiungere entro il 2030 una quota pari al 20% della produzione globale di semiconduttori in termini di valore potrebbe ridisegnare gli equilibri del settore.⁶

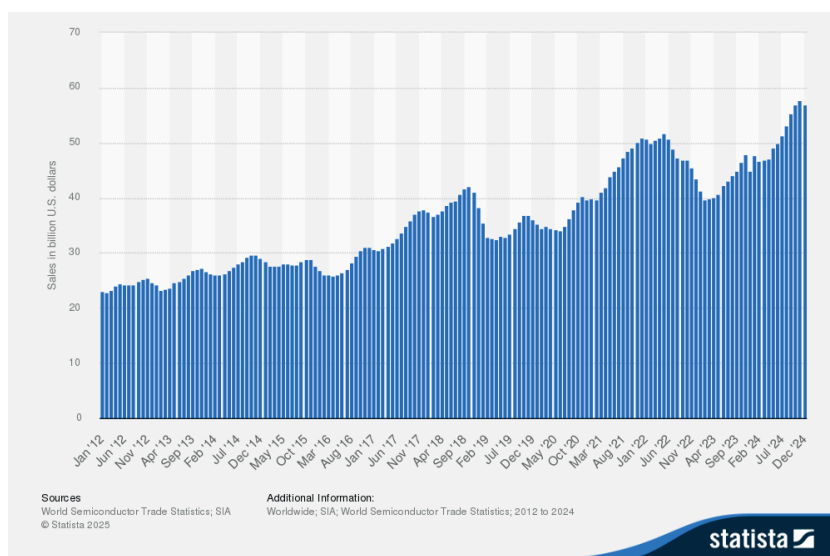


Figura 7 Vendite globali di semiconduttori nel periodo 2012-24, per mese (in miliardi di dollari).
Fonte: Statista 2025a; WSTS 2025

4.6 La crisi dei chip e le dinamiche geopolitiche

Gli avvenimenti degli ultimi anni - dalla pandemia di COVID-19 alla guerra commerciale lanciata dall'Amministrazione Trump all'inizio del 2025 - impongono una riflessione, per quanto breve e certamente

⁶ Le informazioni sul Regolamento europeo sui Chips, con gli obiettivi specifici e il quadro degli investimenti sono consultabili alla seguente pagina: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_it.

non esaustiva, sulle criticità relative all'approvvigionamento di materiali critici. A questo riguardo, i semiconduttori, in virtù della loro centralità nell'organizzazione economico-sociale degli ultimi 50 anni, ricadono in dinamiche strategiche, di sicurezza e geopolitiche per le entità statali, sovrastatali e le imprese.

La recente «crisi dei chip» (Condemi, Diddi, Franchina 2025) si inserisce nel più ampio contesto dell'approvvigionamento delle materie prime critiche e strategiche: le prime in relazione ai rischi di approvvigionamento, le seconde definite in questo modo per la centralità che esse rivestono in specifici settori economico-produttivi, per la difesa e nel settore energetico. La concentrazione della produzione in pochi paesi (in particolare Taiwan, Corea del Sud e Cina) ha creato dipendenze strategiche che hanno implicazioni globali. Ad esempio, la carenza di semiconduttori durante la pandemia di COVID-19 ha evidenziato la vulnerabilità delle catene di approvvigionamento globali e ha spinto molti paesi a ripensare le proprie strategie industriali.

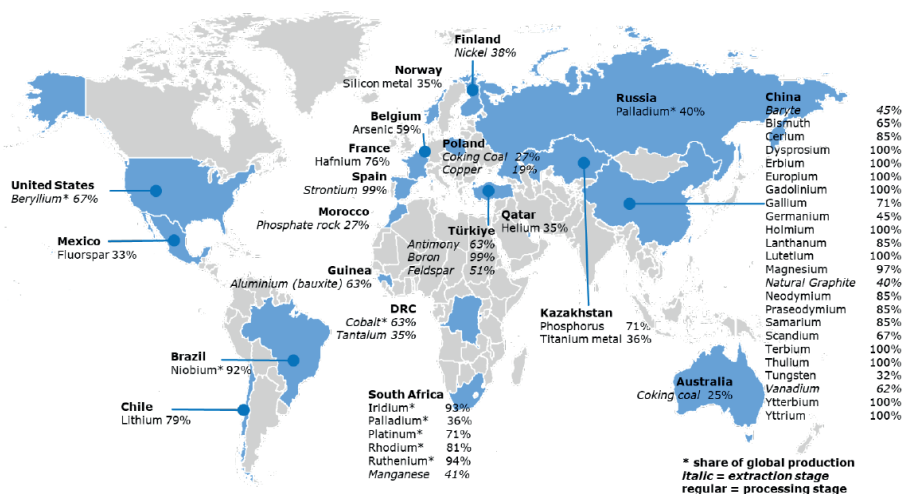


Figura 8 Mappa dei principali fornitori di CRMs per l'Europa, al 2023.
Fonte: European Commission 2023

Secondo Miller (2022), la competizione tra Stati Uniti e Cina per il controllo della produzione di semiconduttori è diventata una delle principali aree di conflitto geopolitico. Gli Stati Uniti hanno imposto sanzioni alla Cina per limitare l'accesso alle tecnologie avanzate, mentre la Cina ha intensificato gli investimenti nella produzione domestica di semiconduttori, cercando di ridurre la propria dipendenza dalle importazioni. L'approvvigionamento di questi ultimi nell'Unione Europea ha una valenza strategica e di

sicurezza (energetica) nel quadro delle transizioni gemelle digitale ed energetica, proprio in virtù della loro applicazione in una pluralità di segmenti fondamentali per conseguire tali transizioni.

Ma, ad una più attenta lettura storica dell'industria dei semiconduttori, quest'ultima emerge ricorsivamente come oggetto della tensione tra attori globali. Prima della Cina, negli anni Ottanta il Giappone è stato il principale competitore degli Stati Uniti - seppur in un rapporto di alleanza, a differenza di quanto accade oggi con la Cina - nella produzione e commercializzazione di semiconduttori. Douglas A. Irwin, professore universitario statunitense ed esperto in politiche commerciali, in uno scritto del 1996 per il National Bureau of Economic Research descrisse approfonditamente i motivi delle scelte protezionistiche attuata dall'Amministrazione Reagan negli anni Ottanta per tutelare le imprese produttrici di semiconduttori dall'ascesa nipponica. Quest'ultima avviata negli anni Settanta e basata sul sistema produttivo integrato noto come *keiretsu*, fu sostenuta da massicci investimenti statali e da una struttura industriale che creava barriere d'ingresso per imprese straniere (Irwin 1996). La concorrenza in un settore altamente strategico per le applicazioni sia in ambito civile che militare convinse gli Stati Uniti - su spinta della Semiconductor Industry Association (SIA) - ad imbastire un tavolo negoziale per tutelare gli interessi delle principali aziende statunitensi di produzione di semiconduttori e attuare misure antidumping, in particolare per la produzione di chip DRAM (*Dynamic Random Access Memory*) e EPROM (*Erasable Programmable Read-Only Memory*). Ad esempio, il prezzo dei DRAM da 64K scese da circa \$ 3,00 nel primo trimestre del 1984 a \$ 0,75 a metà del 1985, rendendo difficile per i produttori statunitensi competere a causa dei ridotti margini di profitto. Ciò comportò il guadagno di quote di mercato significative da parte delle imprese nipponiche: nel mercato globale dei DRAM, la quota statunitense scese dal 70% nel 1978 al 20% nel 1986, mentre la quota giapponese è aumentata dal 30% al 75% nello stesso periodo (Irwin 1996).

L'esito del tavolo negoziale fu un accordo commerciale siglato nel 1986, che imponeva al Giappone di monitorare i prezzi di esportazione per evitare pratiche sleali e di garantire ai produttori stranieri un accesso equo al proprio mercato con una quota del 20% per le aziende americane entro cinque anni (Irwin 1996). Tuttavia, le misure per limitare la produzione e aumentare i prezzi attuate dal Giappone attraverso il Ministero del Commercio Internazionale e dell'Industria non riuscirono nell'intento. Perciò, l'amministrazione Reagan nell'aprile del 1987 impose dazi del 100% su 300 milioni di dollari di importazioni giapponesi, un atto senza precedenti contro un alleato strategico (Irwin 1996; Miller 2024).

Gli andamenti dell'industria si basano infatti su cicli di rapida crescita della domanda seguiti da bruschi cali, come dimostrato dal

boom-and-bust cycle del 1999-2001, in cui il 2001 è stato definito «l'anno peggiore mai visto» per il settore (Bezemer, Akkermans 2003). Durante il boom (1999-2000), la domanda è cresciuta del 35%, trainata dall'espansione di Internet e dell'elettronica di consumo, portando a investimenti eccessivi in capacità produttiva. Tuttavia, nel 2001, la saturazione del mercato e l'effetto 'frusta' hanno causato un crollo della domanda, lasciando le aziende con capacità inutilizzata e livelli di inventario insostenibili. La rigidità delle catene di approvvigionamento ha perciò comportato ritardi significativi nell'adattarsi a queste fluttuazioni, con differenti tipi di riardo: ritardi operativi (10-20 settimane per indicatori come la qualità delle consegne), tattici (1-2 anni per l'inventario) e strategici (2-3 anni per l'adeguamento della capacità) (Bezemer, Akkermans 2003). Tali criticità si collocano nel quadro di una modello logistico *just-in-time*, con una riduzione degli inventari in cui immagazzinare le risorse.

4.7 Le politiche per i semiconduttori in Europa e Italia

Nell'epoca post-COVID-19, l'Unione Europea ha avviato una serie di politiche, strategie e pacchetti di sviluppo, tra cui il *NextGenerationEU* e il *Green Deal*, volte a mitigare il cambiamento climatico e a sostenere la transizione gemella verde-digitale e la sovranità digitale. Tuttavia, queste ambizioni hanno dovuto affrontare sfide cruciali, come il crollo dell'approvvigionamento di semiconduttori e di materie prime *critiche e strategiche*.

La produzione di semiconduttori in Europa è storicamente andata a rilento, rimanendo indietro rispetto ad altri contesti territoriali più rilevanti, in particolar modo Stati Uniti, Cina, Taiwan, Corea del Sud e Giappone. In un mercato globale che vale oltre 550 miliardi di dollari, l'Europa rappresenta solo il 10% della produzione mondiale, in calo rispetto al 30% degli anni Novanta (Yeung 2022; Johnston, Huggins 2023). Nonostante questo ritardo, l'industria europea dei semiconduttori è caratterizzata da una solida base tecnologica e da una rete di distretti innovativi, tra cui Leuven (Belgio), Dresda (Germania), Eindhoven (Paesi Bassi) e Grenoble (Francia), in cui sussiste una stretta collaborazione tra aziende, università e centri di ricerca, che favorisce lo sviluppo di tecnologie avanzate e sinergie interdisciplinari (European Commission 2013; Huggins et al. 2022).

Tabella 8 Principali imprese europee di semiconduttori. Fonte: industriALL European Trade Union 2023.

Posizione	Impresa	Paese	Ricavo (milioni di dollari)	N° lavoratori
7	ASML	Olanda	27.424	37.704
15	STMicroelectronics	Francia/Italia	17.318	51.370
16	Infineon	Germania	17240	57.217
19	NXP Semiconductors	Olanda	12.177	34.500
39	ASM International	Olanda	2.811	4.258
45	AT&S	Austria	2.026	14.403
46	Silitronic	Germania	1.851	4.500
60	Soitec	Francia	963	1.986
62	Melexis NV	Belgio	923	1.900
70	X-Fab	Belgio	769	4.200
79	BE Semiconductor	Olanda	635	1.682
80	Technoprobe	Italia	588	2.120
87	Aixtron	Germania	475	974
91	Magnachip	Lussemburgo	338	897

La dipendenza dalle importazioni di semiconduttori, dimostrata anche dal deficit commerciale di circa 20 miliardi di euro con i principali paesi produttori ed esportatori – in particolare dalla Cina, che rappresenta un terzo delle importazioni europee di chip (European Commission 2022; Johnston, Huggins 2023; Meyers 2022) – espone l'Europa a rischi di approvvigionamento, accentuati dalle recenti tensioni geopolitiche tra Stati Uniti e Cina (Fitri 2022).

In questo scenario, gli Stati Uniti hanno approvato il *Chips and Science Act*, con un investimento di 50,3 miliardi di dollari per rafforzare la produzione nazionale e la sicurezza della catena di approvvigionamento. Hanno inoltre creato un'alleanza strategica, il *Chip 4*, con Giappone, Corea del Sud e Taiwan, per favorire l'attrazione di colossi come TSMC – che sta costruendo due mega-fab in Arizona per 40 miliardi di dollari – e Intel, impegnata in Ohio con un investimento da 20 miliardi, con l'obiettivo di riportare la quota statunitense nella produzione globale dal 12% al 20-30% entro il 2030 (Blevins et al. 2023; Sutter et al. 2023).

Per affrontare queste sfide, l'Unione Europea ha introdotto il *Chips Act*, un'iniziativa da 43 miliardi di euro che mira a raggiungere il 20% della produzione globale di semiconduttori entro il 2030 (Conдеми, Diddi, Franchina 2025). Il piano si articola in tre pilastri: promuovere l'innovazione, garantire la sicurezza delle forniture e coordinare gli interventi a livello europeo (European Commission 2022). Ciò si è tradotto in un'aumentata quota di investimenti per l'apertura di impianti di produzione di semiconduttori, così come in una 'corsa' ad attività di ricerca, prospezione ed estrazione di materie prime 'critiche' e 'strategiche'.

La ESIA in un documento pubblicato nel 2021⁷ ha sottolineato l'impegno dell'industria dei semiconduttori europea per ridurre le emissioni di carbonio e per supportare il *Green Deal*. Ciò avviene attraverso l'implementazione di soluzioni tecnologiche innovative abilitate dai semiconduttori, che rappresentano strumenti chiave per la decarbonizzazione delle economie. I semiconduttori, ha ribadito la ESIA, contribuiscono a ridurre l'impronta ambientale della società ottimizzando l'uso dell'energia nei settori dei trasporti, della produzione, dei prodotti di consumo e dei servizi. Inoltre, facilitano la transizione verso un'economia decarbonizzata e promuovono una società sostenibile e innovativa.

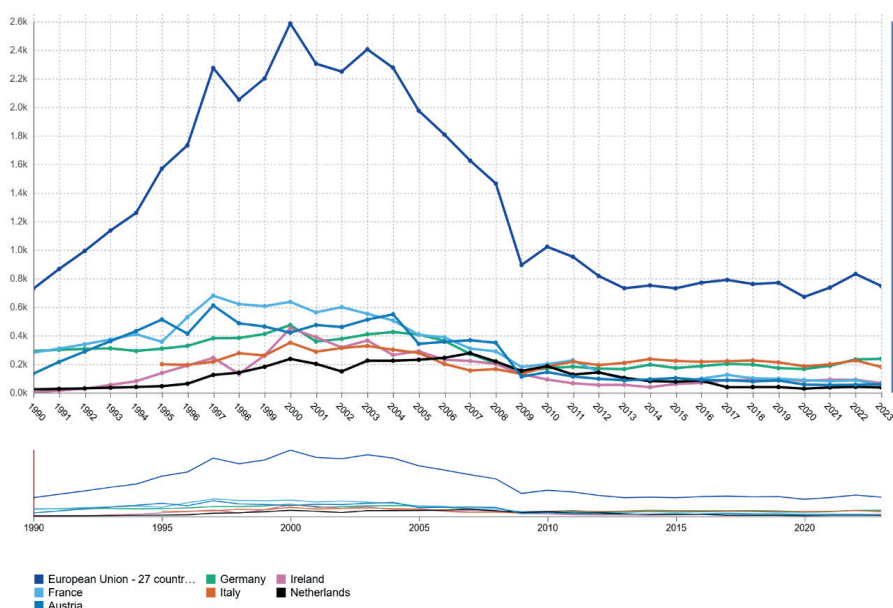


Figura 9 Emissioni di inquinanti atmosferici e gas serra, in migliaia di tonnellate, per la produzione di circuiti integrati e semiconduttori in UE, per settore (1990-2023). Fonte: Eurostat (2025).
Note: Inquinanti atmosferici e gas serra: Gas serra (CO₂, N₂O in equivalente CO₂, CH₄ in equivalente CO₂, HFC in equivalente CO₂, PFC in equivalente CO₂, SF₆ in equivalente CO₂, NF₃ in equivalente CO₂)

Indubbiamente si tratta di un dato di realtà, che tuttavia va contestualizzato nei processi decennali di delocalizzazione delle fasi produttive a maggiore impronta ecologica. Per quanto riguarda le emissioni di GHG, ma anche l'uso di sostanze pericolose per la salute

7 Il documento è disponibile alla seguente pagina: https://www.eusemiconductors.eu/sites/default/files/uploads/ESIA_GHGbrochure_1907.pdf.

umana e ambientale, è infatti ormai noto che la fase più critica sia quella manifatturiera; dunque, la parte dell'iceberg digitale e della storia sullo sfondo che comprende le emissioni incorporate. È qui, nel momento della produzione, fusione e raffinamento di materie prime critiche, semilavorati e nel loro assemblaggio come dispositivi elettronici che viene emesso oltre l'80% di gas climalteranti (Cook, Jardim 2017; Sissa 2024).

4.7.1 Il panorama italiano

Sulla base di quanto riportato da Arsenio Spadoni su *Elettronica e Mercati*,⁸ l'Italia vanta una filiera dei semiconduttori compatta ma fortemente specializzata, il cui valore complessivo (produzione wafer, impianti di processo, ricerca e servizi di test) è stimato in 6-8 miliardi di dollari. Il baricentro produttivo rimane STMicroelectronics, che presidia i due poli di Agrate Brianza, dove è stata appena avviata una nuova linea che usa dischi di silicio più grandi (300 mm) e tecnologie di fascia media (40-65 nm) grazie ai fondi del *Chips Act* europeo, e Catania, che è diventata il punto di riferimento in Europa per materiali avanzati come carburo di silicio e nitruro di gallio, indispensabili per auto elettriche e sistemi energetici. La prima fase di produzione dei chip è completata da LFoundry ad Avezzano, una fonderia che realizza sensori per fotocamere, e da MEMC-GlobalWafers, che tra Merano e Novara taglia i dischi di silicio e sta ampliando la capacità sui formati più grandi con l'aiuto del Fondo Nazionale per la Microelettronica.

Nella costruzione dei macchinari e nel collaudo dei chip, l'Italia può contare su aziende molto orientate all'export - Technoprobe, SPEA, Seica, Osai, LPE, ELES - che insieme fatturano oltre un miliardo di euro e vendono più del 70% dei loro prodotti all'estero. Rimane invece scoperto l'assemblaggio finale dei chip, un vuoto che il governo vorrebbe colmare con l'arrivo della società singaporiana Silicon Box.

Sempre secondo Spadoni, grazie a queste risorse e ai nuovi incentivi nazionali ed europei (*National Chips Act*, crediti d'imposta per ricerca e sviluppo, progetti IPCEI), l'Italia mira a ritagliarsi un ruolo di media grandezza in Europa, puntando su elettronica di potenza, automotive e strumenti di test. Con politiche coordinate e maggiori investimenti privati, le eccellenze di nicchia di oggi potrebbero diventare una filiera completa e competitiva.

Effettivamente, pacchetti di sviluppo come il *NextGenerationEU* sono stati declinati a livello nazionale con il PNRR, aprendo

⁸ Per una panoramica dell'industria italiana dei semiconduttori si veda l'articolo disponibile alla seguente pagina: <https://www.elettronicaemercati.it/litalia-dei-chip-una-panoramica-dellindustria-italiana-dei-semiconduttori/>.

così una rinnovata fase di investimenti anche in Italia. Tra i vari settori individuati come strategici, sia per la transizione gemella verde-digitale sia per la sovranità digitale, vi è quello della microelettronica e dei semiconduttori. Dal 2022 in avanti, il governo italiano ha infatti avviato una serie di piani di investimento volti a potenziare le catene di produzione e di fornitura italiane – e, dunque, il ruolo dell'Italia nel quadro delle catene globali del valore – di semiconduttori. In seguito all'implementazione dello *European Chips Act*, è stato stanziato il Fondo nazionale per la microelettronica, di oltre 4 miliardi di euro fino al 2030. Secondo una nota tematica del Dipartimento del Tesoro italiano, tale Fondo

è stato utilizzato per una serie di misure organiche con una visione sistemica del settore: i) aiuti alla produzione di impianti primi nel loro genere, ii) sostegno a progetti di ricerca e sviluppo avviati dalle imprese, iii) finanziamento di progetti di ricerca e sviluppo nell'ambito del partenariato europeo previsto dal Chips Act (Chips Joint Undertaking), iv) promozione dello sviluppo dell'infrastruttura di ricerca per le nano ed eterostrutture e per i materiali avanzati a semiconduttore, e v) sostegno alle linee pilota definite nell'ambito del Chips Act. (Pierleoni 2023, 4)

Nel 2023, il governo italiano ha intensificato gli sforzi per rafforzare la presenza nazionale nel settore strategico della microelettronica. Una delle iniziative più significative è stata l'istituzione della Fondazione Chips.IT, con sede a Pavia, configurata come 'Centro italiano per il design dei circuiti integrati a semiconduttore'. Il centro, inaugurato con un investimento pubblico di 225 milioni di euro, si propone di sviluppare competenze avanzate nel chip design, fornire infrastrutture e software all'avanguardia, coordinare progetti pubblico-privati e formare nuove generazioni di lavoratori altamente specializzati (Vincentelli et al. 2025).

Inoltre, l'Italia ha attivato un ampio quadro di strumenti politico-industriali: un Fondo Nazionale multimiliardario per la Microelettronica, un *National Chips Act* (con agevolazioni fiscali per attività di ricerca e sviluppo fino a 530 milioni di euro entro il 2027) e una partecipazione significativa agli IPCEI europei sulla microelettronica con un impegno complessivo di oltre 1 miliardo di euro.⁹

⁹ <https://www.investinitaly.gov.it/sectors/microelettronica-semiconduttori>.

4.8 I data center

La fruizione di Internet e, in generale, di servizi e strumenti digitali è possibile grazie a specifiche manifestazioni materiali e territoriali, come i punti di interscambio (*Internet Exchange Point* - IXP) e i data center. I primi sono infrastrutture fisiche che consentono un interscambio efficiente del traffico Internet tra i diversi fornitori (*Internet Service Provider*). I secondi svolgono un ruolo cruciale nella società contemporanea come infrastrutture fondamentali per l'economia digitale. I data center sono luoghi fisici - o meglio, figitali - che contengono moltissimi server e che assolvono la funzione di immagazzinamento e elaborazione dati, e che rendono possibile l'utilizzo di servizi nel *cloud*. Come sottolineato da Julia Velkova e Jean-Christophe Plantin (2023), essi mediano le temporalità dei dati, influenzando il ritmo, la velocità e la durata delle operazioni digitali. La maggior parte dei contenuti e dei dati su Internet passa attraverso e viene archiviata in queste strutture, rendendole essenziali per il funzionamento di servizi digitali come piattaforme online, streaming video e social media. Contrariamente a quanto possa far supporre il riferimento alla 'nuvola' (appunto, *cloud*), con un richiamo quindi all'impalpabilità e leggerezza, l'impatto ambientale o il peso dei data center in quanto apparato socio-tecnico è elevato. Le tecnologie di cloud computing non avverano una dematerializzazione fisica, quanto piuttosto una dematerializzazione logica dei server che rendono possibile la fruizione dei servizi ICT tramite Internet (Sissa 2024, 59).

Lungi dall'essere immateriali e solo virtuali, queste infrastrutture cyber-fisiche o figitali presentano un elevato fabbisogno energetico, stimato tra l'1% e il 3% del consumo globale di energia elettrica. Secondo stime recenti (Lange, Santarius 2020; Monserrate 2022), l'incremento globale delle capacità dei data center con un consumo annuale di 200 terawattora (TWh) ha spinto un consumo di energia che supera quello di interi settori industriali, come quello aereo, e nazioni. Shehabi e colleghi (2018) hanno stimato che, a livello globale, il consumo energetico legato ai data center potrebbe crescere fino al 13% della domanda mondiale di elettricità entro il 2030. I data center, inoltre, rappresentano lo 0,3% delle emissioni globali di carbonio, che sale al 2% includendo dispositivi connessi come laptop e smartphone (Monserrate 2022).

Questo consumo energetico è fortemente concentrato, con gli Stati Uniti, l'Europa e la Cina responsabili di circa l'85% del totale (IEA 2025). Negli Stati Uniti, la domanda di energia derivante dai data center è cresciuta del 12% all'anno dal 2015 al 2024, raggiungendo i 180 TWh nel 2024 - quasi il 45% del totale globale e oltre il 4% dell'uso nazionale di elettricità. Il settore dei data center in Cina si è espanso rapidamente dopo il 2015, con una crescita annua della domanda di elettricità del 15% - il doppio del tasso del periodo 2005-15 - contro

un aumento del 7% del consumo energetico complessivo. Attualmente, i data center cinesi consumano circa 100 TWh, paragonabile all'uso di veicoli elettrici nel paese, e rappresentano il 25% della domanda globale, in aumento rispetto a meno del 20% di un decennio fa. Tuttavia, persistono sfide nella stima a causa delle limitazioni dei dati. In Europa, i data center rappresentano poco meno del 2% dell'uso di elettricità (contro l'1,1% della Cina). Il consumo specifico dei data center è pari a circa 74 TWh annui, rappresentando il 2,25% del consumo totale energetico europeo (JRC/EU 2020, citato in Bettiol, Fano, Toschi 2023), per un totale di 70 TWh nel 2024 e con proiezioni che indicano una potenziale crescita globale fino a 2000-3000 TWh entro il 2030 (Andrae et al. 2019, citato in Bettiol, Fano, Toschi, 2023, 15). Sebbene la quota globale dell'Europa sia diminuita, rimane leggermente al di sopra del 15% (IEA 2025). In Italia, secondo gli ultimi aggiornamenti diffusi da Terna, le richieste di connessione alla rete elettrica da parte dei data center hanno raggiunto 30 GW nel 2024, con un incremento di 24 GW rispetto al 2023. La domanda risulta fortemente concentrata nel Nord, con 25,83 GW (86,52% del totale), con una forte localizzazione in Lombardia (circa 18,6 GW) di cui circa la metà concentrati nell'area milanese (Terna 2025).

Tale intensità energetica deriva dalla necessità di una connettività permanente, 24/7, alimentando apparati IT e sistemi di raffreddamento che dissipano il calore generato. Il raffreddamento è la fase più energivora, con oltre il 40% del consumo energetico, mentre solo il 6-12% dell'energia è dedicata ai processi computazionali attivi (Monserrate 2022). A livello tecnico, l'efficienza energetica è quantificata attraverso l'indicatore *Power Usage Effectiveness* (PUE), dove valori prossimi a 1 denotano un uso ottimale dell'energia, con operatori avanzati, come Facebook e Google, che registrano PUE medi di circa 1,1 (Bettiol, Fano Toschi 2023). Oltre all'energia, i data center consumano grandi quantità di acqua¹⁰ principalmente per il raffreddamento dei server e la generazione di elettricità, suddividendo l'uso in tre ambiti: il consumo diretto sul posto (Scope-1), che include l'acqua evaporata nei sistemi di raffreddamento e quella utilizzata per il controllo dell'umidità, con un'efficienza che varia in base alle condizioni climatiche e ai metodi di raffreddamento; il consumo indiretto (Scope-2), legato alla produzione di elettricità, con un prelievo medio di 43,8 L/kWh e un consumo di 3,1 L/kWh negli Stati Uniti; e il consumo nella catena di fornitura (Scope-3), che comprende l'acqua impiegata nella fabbricazione di chip e server, spesso con scarico di sostanze chimiche tossiche (Li et al. 2023). Il consumo stimato per lo stoccaggio raggiunge dati fino a 5 litri per GB, con

10 L'efficienza del consumo di acqua si calcola attraverso il *Water Usage Effectiveness*, indicatore dato dal rapporto tra consumo di acqua *in situ* e consumo energetico dei server.

impatti idrici complessivi per GB che oscillano tra 0,1 e 35 litri a seconda delle tecnologie e delle condizioni (Bettiol, Fano, Toschi 2023).

Le fonti di inquinamento includono anche i rischi associati allo stoccaggio di ingenti volumi di carburanti fossili per i generatori di emergenza, con potenziali perdite e contaminazione, l'inquinamento acustico generato dai sistemi di raffreddamento e dai generatori, i campi elettromagnetici e la produzione di rifiuti elettronici derivante dalla rapida obsolescenza delle apparecchiature (Murdock, Brevini 2019). L'impatto ambientale si estende all'intero ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime al fine vita, e può essere sistematicamente valutato tramite il *Life Cycle Assessment* (LCA), conforme agli standard ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 (Cerana 2023). Le fasi di LCA includono la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, l'analisi di inventario (LCI) con la raccolta dei dati sui flussi di input e output, la valutazione dell'impatto (LCIA) associando i flussi agli impatti ambientali, e l'interpretazione dei risultati per identificare le fonti principali di impatto (Cerana 2023). L'applicazione dell'LCA al data center VSIX dell'Università di Padova, ad esempio, ha evidenziato che gli impatti ambientali maggiori sono legati alla fase di produzione dei componenti e alla realizzazione del data center stesso, con quote stimate tra il 71% e il 92% a seconda delle ipotesi, mentre gli impatti sul funzionamento (consumi energetici) risultano minori (Borgo, De Pietro 2023, 9). Questo sottolinea come i miglioramenti nelle performance degli apparati, pur riducendo i consumi operativi, possano avere implicazioni ambientali rilevanti nella fase produttiva; un'analisi comparata tra un disco HDD e un disco SSD di pari dimensioni e capacità ha mostrato emissioni legate alla produzione e al trasporto 50 volte superiori per l'SSD, attribuibili principalmente al processo di produzione dei circuiti integrati (Borgo, De Pietro 2023, 9).

I data center, in quanto infrastruttura digitale, includono numerose materie prime *critiche* e strategiche (*Critical Raw Materials* - CRM), tra cui metalli preziosi (oro, argento), terre rare (neodimio, ittrio) e minerali insanguinati (tantalo, cobalto) (Peñaherrera, Pehlken 2023), la cui estrazione e lavorazione sono associate a impatti ambientali e umani significativi e a problematiche di approvvigionamento legate alla scarsità e alla governance. La gestione del fine vita di questi componenti rappresenta una sfida complessa: la varietà e la complessità dei materiali, la frammentazione degli elementi e le tecnologie di riciclo ancora limitate e spesso inefficienti rendono arduo il recupero efficace. Le normative esistenti, quali le direttive europee sui RAEE, tendono a focalizzarsi sulla quantità di materiale recuperato piuttosto che sulla criticità degli elementi o sugli impatti evitati. Inoltre, i costi elevati e la scarsità di dati dettagliati sulla

composizione dei componenti ostacolano una gestione ottimale (Peñaherrera, Pehlken 2023).

Questa complessità è intrinsecamente legata alle catene globali del valore (CGV) dell'industria IT, caratterizzate da una forte frammentazione geografica e una governance modulare che, sebbene favorisca l'innovazione, rende difficile monitorare e controllare le pratiche sostenibili lungo l'intera filiera, dall'estrazione delle materie prime alla produzione e alla dismissione. Nonostante le sfide, le CGV offrono opportunità per l'upgrading ambientale e l'influenza delle aziende leader (come Google, Facebook, Amazon che si impegnano a utilizzare il 100% di energia rinnovabile o Google che ha posizionato i data center strategicamente in aree con alta disponibilità di rinnovabili) sui fornitori per promuovere la sostenibilità (Di Maria, De Marchi 2023).

Le strategie per migliorare la sostenibilità dei data center includono l'adozione diffusa di fonti energetiche rinnovabili (spesso tramite *Power Purchase Agreements* - PPA), il miglioramento continuo dell'efficienza energetica (es. implementando free cooling, ottimizzando il layout), il riutilizzo del calore di scarto, l'applicazione dei principi dell'economia circolare (prolungamento della vita utile e miglioramento del riciclo e recupero dei materiali) e l'adesione a certificazioni (ISO 14001, ISO 50001) e impegni di settore (Climate Neutral Data Centre Pact) (Bettiol, Fano, Toschi 2023, 17-21; Di Maria, De Marchi 2023, 56). Tuttavia, la piena integrazione dell'economia circolare è ancora in fase iniziale, come dimostrato dal dato che solo il 38% dei data center europei ha stretto partnership con aziende certificate per il riciclo dei rifiuti elettronici (Bettiol, Fano, Toschi 2023, 29). L'indagine ha anche esplorato come i gestori comunicano la sostenibilità online, analizzando i contenuti dei siti web aziendali per capire gli impegni presi e la loro intensità comunicativa. In conclusione, la sostenibilità dei data center richiede un approccio olistico che consideri non solo l'efficienza operativa (energetica e idrica), ma anche l'impatto incorporato dei materiali e la gestione responsabile lungo l'intera catena del valore, promuovendo l'innovazione e la collaborazione per ridurre significativamente l'impronta ecologica di queste infrastrutture critiche (Bettiol, Fano, Toschi 2023).

4.8.1 Il mercato della *colocation*

Il mercato della *colocation* (co-locazione) nei data center rappresenta una manifestazione significativa della trasformazione economica e tecnologica globale, configurandosi come una risposta alle esigenze di digitalizzazione delle società contemporanee. Esso prevede la concessione in locazione di spazi fisici all'interno di data center gestiti

da fornitori terzi, offrendo alle imprese un'alternativa più flessibile e sostenibile rispetto alla costruzione e gestione di infrastrutture IT proprie. Le aziende che ricorrono alla colocation possono beneficiare di un accesso privilegiato a infrastrutture tecnologiche avanzate, con garanzie elevate in termini di sicurezza, scalabilità e connettività, contribuendo così alla riduzione dei costi operativi e al rafforzamento della resilienza digitale (Uptime Institute 2024).

I data center non si limitano a rappresentare una fabbrica o apparato di elaborazione dati, ma emergono come nodi strategici di convergenza di capitale, conoscenza e controllo tecnologico, incarnando le logiche strutturali del capitalismo digitale (Couldry, Mejias 2019; Schiller 1999). In particolare, il mercato della colocation riflette la centralizzazione delle infrastrutture IT nelle mani di grandi operatori globali, che costruiscono e gestiscono complessi tecnologici in aree geografiche strategiche. Questo fenomeno solleva interrogativi fondamentali sulla distribuzione del potere economico e tecnologico e sulla sovranità digitale (Blotta 2024), evidenziando la necessità di politiche più inclusive e sostenibili. Secondo il report dell'Uptime Institute (Uptime Institute 2024), i temi della sostenibilità energetica e dell'efficienza nell'uso delle risorse occupano una posizione centrale nelle agende politiche e industriali internazionali, influenzando le scelte di localizzazione dei data center. Questi ultimi, inoltre, stanno acquisendo un ruolo sempre più cruciale nella gestione delle emergenze climatiche e nella resilienza economica.

Il settore della colocation sta vivendo un'espansione senza precedenti alimentata dalla crescente domanda di servizi digitali, dall'adozione di tecnologie come l'Intelligenza Artificiale e l'*Internet of Things* (IoT), e dall'ascesa del *cloud computing* come infrastruttura essenziale per l'economia digitale (Andrae 2020). Secondo le più recenti stime del Data Center Map (2025), in Europa sono attualmente attivi oltre 2.300 data center, con una concentrazione significativa nelle regioni FLAP (Francoforte, Londra, Amsterdam e Parigi), che fungono da snodi centrali per le operazioni digitali del continente.

Tuttavia, le regioni nordiche stanno emergendo come hub competitivi grazie all'abbondanza di risorse energetiche rinnovabili, ai costi operativi relativamente contenuti e alle condizioni climatiche favorevoli. Le temperature rigide tipiche di queste aree rappresentano un elemento strumentale nella scelta di posizionare i data center, poiché agevolano il raffreddamento dei sistemi, riducendo la necessità di impianti artificiali dedicati, che comportano alti consumi energetici. Questa caratteristica contribuisce a rendere i data center nordici particolarmente efficienti dal punto di vista operativo e ambientale, facendo di questa regione una scelta strategica per le grandi aziende tecnologiche (IEA 2023). Questa combinazione di fattori rende le regioni nordiche un modello di riferimento per l'efficienza operativa e ambientale nel settore.

Formalmente, l'Europa si pone tra le regioni più avanzate in questo settore grazie a normative rigorose e investimenti mirati (Greenpeace 2017). Tuttavia, i processi reali mostrano dinamiche ambivalenti, dove l'adozione di soluzioni sostenibili varia significativamente tra i Paesi membri e dipende in larga misura dalle politiche nazionali e locali. Inoltre, esiste il rischio che la transizione ecologica avvenga secondo una logica top-down, in cui decisioni centralizzate privilegiano grandi operatori tecnologici a scapito delle comunità locali. Questo approccio potrebbe rafforzare forme di estrattivismo verde, caratterizzate dall'uso intensivo di risorse naturali per alimentare infrastrutture tecnologiche, con costi ambientali e sociali significativi per le aree coinvolte (Brodie 2025).

Per quanto riguarda l'Italia, il mercato della colocation si trova in una fase di evoluzione e consolidamento, con Milano che si configura come il principale hub digitale nazionale. Secondo un recente report della Commissione Europea, l'Italia conta circa 178 data center (su 2161 presenti in UE), la maggior parte dei quali localizzati nelle principali città del nord, come Milano e Torino, che rappresentano i poli tecnologici del Paese (European Commission 2025).

Nonostante ciò, il settore affronta significative sfide strutturali, tra cui una distribuzione disomogenea delle infrastrutture IT e una dipendenza energetica da fonti non rinnovabili, che ne limitano la competitività su scala internazionale. Tuttavia, il governo italiano sta promuovendo iniziative per incentivare la digitalizzazione, come previsto dal PNRR, che mira a colmare il divario digitale e favorire un accesso equo alle risorse digitali (Ministero dell'Economia e delle Finanze 2023). La concentrazione delle infrastrutture tecnologiche nelle aree urbane più sviluppate sottolinea la necessità di interventi mirati per garantire una maggiore equità territoriale, soprattutto nelle regioni periferiche.

4.9 Zone economiche speciali e industria elettrodigitale

L'industria elettrodigitale, lungi dall'essere deterritorializzata o despaializzata, ha molteplici manifestazioni spaziali che si articolano in diverse fasi: i siti di estrazione mineraria, le traiettorie delle fibre ottiche, le fonderie e raffinerie, gli stabilimenti per la manifattura e l'assemblaggio, gli snodi della logistica, come ad esempio i magazzini di Amazon, i data center, le discariche di rifiuti elettronici. L'espansione dell'industria elettrodigitale è strettamente legata alla proliferazione di specifiche configurazioni urbane, le 'zone economiche speciali' (ZES), le quali offrono condizioni come bassi costi della manodopera, accesso privilegiato alle infrastrutture e normative favorevoli al capitale. L'organizzazione multinazionale delle aziende lungo le catene del valore favorisce sistematicamente

l'opacità e la deresponsabilizzazione da parte delle aziende leader, nonostante la presenza di meccanismi di 'dovuta diligenza' (*due diligence*). Secondo Yeoh (2022), la complessità delle catene di subappalto e la frammentazione giurisdizionale creano zone grigie in cui diventa estremamente difficile attribuire responsabilità per violazioni lavorative o ambientali, creando un «regime di opacità strutturata». In sintesi, l'industria elettronica e dei semiconduttori rappresenta uno dei settori più globalizzati e complessi dell'economia contemporanea, caratterizzato da catene di approvvigionamento altamente frammentate e da un'intensa concentrazione di capitale e tecnologia. Le ZES e i parchi industriali ad alta tecnologia hanno fornito un ambiente ideale per lo sviluppo di questo settore, grazie a una combinazione di fattori economici, normativi e infrastrutturali. Tuttavia, questa crescita è accompagnata da significative criticità, tra cui l'ipersfruttamento del lavoro, l'impatto ambientale e la dipendenza da dinamiche geopolitiche globali.

Prendiamo, ad esempio, Shenzhen, in Cina: una città che, da piccolo villaggio di pescatori, si è trasformata in uno dei più grandi hub globali per la produzione di elettronica di consumo (Chen 2018). Grazie a una combinazione di infrastrutture, manodopera a basso costo e normative favorevoli agli investimenti stranieri, Shenzhen è diventata un simbolo del potere delle ZES nel ridisegnare il panorama industriale globale. Queste zone non offrono solo vantaggi logistici, ma anche una serie di incentivi economici che le rendono irresistibili per le aziende internazionali. Esenzioni fiscali, dazi ridotti o addirittura nulli, e agevolazioni finanziarie sono solo alcuni degli strumenti utilizzati per attrarre investimenti (Farole, Akinci 2011). A ciò si aggiunge l'accesso a infrastrutture moderne: reti di trasporto efficienti, energia elettrica affidabile e connettività a banda larga sono elementi chiave che facilitano la produzione su larga scala.

Una macro-regione cruciale per l'industria elettrodigitale e, quindi, per il capitalismo digitale odierno è la *SIJORI Cross-Border Region* (Singapore-Johor-Riau), costituita da Singapore, Malesia e Indonesia nel 1989 come esperimento di integrazione economica transnazionale (Hutchinson, van Grunseven 2018). Questo 'triangolo della crescita' (*growth triangle*) ha attirato ingenti flussi di investimenti esteri, specialmente nel settore high-tech, trasformando la regione in un nodo cruciale per la produzione di semiconduttori. Nel corso dei decenni, Singapore si è posizionata come *hub* tecnologico e finanziario, attirando i centri di ricerca e sviluppo delle principali multinazionali grazie a mirate politiche statali (Yeoh 2006). Tuttavia, la produzione materiale viene sistematicamente delocalizzata a Johor e Batam, dove viene sfruttata manodopera a basso costo attraverso normative più permissive. Questa divisione spaziale delle attività produttive crea vere e proprie «gerarchie del valore» transnazionali (Ford 2019; Blotta 2025).

Un caso paradigmatico e solo apparentemente controintuitivo è quello della Silicon Valley, che, pur non essendo una ZES nel senso tradizionale del termine, rappresenta un modello di parco industriale ad alta tecnologia che ha influenzato lo sviluppo di numerose altre aree a livello globale. Saxenian (1994) ha attribuito il successo della Silicon Valley a una combinazione di fattori, tra cui la presenza di università e centri di ricerca, la disponibilità di capitale di rischio e una cultura imprenditoriale favorevole all'innovazione. Tuttavia, questo modello non è esente da critiche, poiché spesso riproduce dinamiche di esclusione e disuguaglianza, sia a livello locale che globale.

Queste contraddizioni rendono le ZES un campo di studio cruciale per comprendere le trasformazioni socio-spaziali del capitalismo digitale, evidenziando come il progresso tecnologico ed economico spesso si realizzi attraverso meccanismi di esclusione, disuguaglianza e sfruttamento del lavoro e delle risorse naturali che ne rivelano il carattere tutt'altro che immateriale.

