

Proposta di una metodologia basata sul rischio per misurare la CO₂ a ciclo di vita



Un nuovo approccio basato sul rischio per misurare le emissioni di CO₂ del ciclo di vita, integrando LCA con strumenti finanziari come Discounted Cash Flow (DCF) e Real Options Analysis (ROA), metodo che fornisce ai project manager e ai leader del settore un modo più affidabile per valutare l'impatto reale degli investimenti in un'economia a zero emissioni nette

Alessandro Paravano, Ricercatore, Dipartimento di Ingegneria Gestionale
Alessandra Neri, Professore Associato, Dipartimento di Ingegneria Gestionale
Giorgio Locatelli, Professore Ordinario, Dipartimento di Ingegneria Gestionale
Enrico Cagno, Professore Ordinario, Dipartimento di Ingegneria Gestionale Politecnico di Milano
Giacomo Galeotti, Analista, Arthur D. Little

La valutazione della sostenibilità ambientale di un investimento nel lungo periodo – relativo, per esempio, a un impianto industriale o a una infrastruttura – unitamente alla tradizionale valutazione economico-finanziaria, sta diventando sempre più una necessità in ogni ambito di business. Eppure, tale valutazione, da effettuarsi nel lungo periodo e soggetta, per sua natura, a un contesto di

elevata incertezza, rimane sostanzialmente poco affidabile nei risultati, rendendola, di fatto, un mero esercizio di stile, spesso utile solo ai fini di comunicazione con gli stakeholder esterni.

Si vuole qui fare una proposta di una metodologia basata sul rischio per misurare la CO₂ a ciclo di vita, basato su metodologie robuste, che possa offrire una soluzione, almeno nella prospettiva della decarbonizzazione.

In termini più concreti, si pensi, per esempio, alla realizzazione di un impianto nucleare nelle vicinanze di un fiume. In che modo il verificarsi di un periodo di siccità potrebbe impattare sul suo funzionamento? Quali azioni ha a disposizione il gestore dell'impianto per limitare gli effetti della siccità? Come tutto ciò si traduce in termini di emissioni di CO_{2-eq} dell'impianto?

La metodologia che qui viene presentata consente alle aziende che pianificano, costruiscono, gestiscono o operano impianti e/o infrastrutture, di analizzare

“**Nel panorama industriale odierno, le aziende devono considerare la sostenibilità insieme alla fattibilità finanziaria quando pianificano progetti infrastrutturali ed energetici su larga scala. Tuttavia, i metodi tradizionali di valutazione del ciclo di vita (LCA) spesso sono carenti perché non tengono conto dei rischi operativi, dei tempi di riduzione della CO₂ o della flessibilità delle diverse tecnologie**”

le emissioni di CO_{2-eq} lungo l'intero ciclo di vita degli impianti, tenendo conto non solo delle differenti fasi di ciclo di vita dell'impianti, ma anche delle differenti opzioni a disposizioni per mitigare i rischi e sfruttare le opportunità legati alle specifiche tecnologie. La metodologia proposta integra aspetti cardine di Life Cycle Assessment (LCA) con il principio dei flussi di cassa scontati (DCF) e l'analisi opzioni reali (ROA), per valutare su indicatori ambientali l'impatto di un impianto e delle opzioni per la gestione dei rischi collegati. Questa metodologia, testata su casi concreti di impianti di generazione di energia elettrica, consente alle aziende decisioni più informate, sostenibili e orientate alla transizione net-zero.

I limiti del Life Cycle Assessment

Il cambiamento climatico è una sfida globale che richiede azioni concrete. La riduzione delle emissioni di CO_{2-eq} è la priorità dei tempi attuali, e la transizione net-zero passa anche attraverso una massiccia elettrificazione di settori come i trasporti e il riscaldamento. La metodologia LCA è uno degli strumenti maggiormente utilizzati per valutare l'impatto ambientale di prodotti, impianti e servizi lungo il loro ciclo di vita. Nel settore elettrico, per esempio, gli indicatori LCA misurano aspetti come i chilogrammi di CO_{2-eq} emessi per ogni kilowattora prodotto ([kg CO_{2-eq}/kWh]), o i chilogrammi di ossidi di azoto rilasciati ([kg NO_x/kWh]). Gli approcci tradizionali LCA, per quanto diffusi, hanno tre limiti principali che rischiano di portare a decisioni fuorvianti, specialmente nel caso di impianti di generazione elettrica.

1. Sottovalutazione dei rischi

Gli attuali modelli LCA considerano la vita operativa di impianti e infrastrutture non soggetta a rischi.

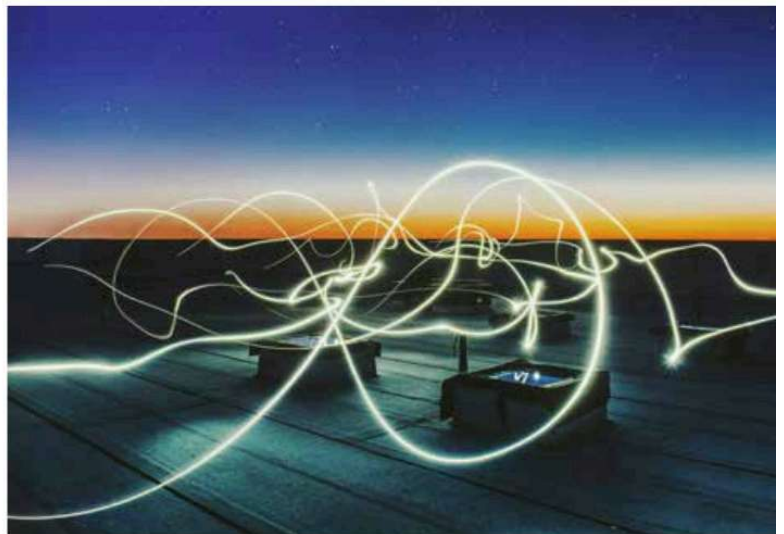
Tuttavia, tale modellazione spesso non rappresenta la vita operativa effettiva delle tecnologie. Per esempio, se da un lato gli impianti a ciclo combinato a gas naturale (CCGT) presentano un ciclo di vita relativamente stabile e prevedibile, dell'altro il nucleare risulta soggetto a numerose incertezze e rischi. Non è raro che i rischi si manifestino già in fase di costruzione, basti pensare che negli Stati Uniti, due dei quattro reattori nucleari pianificati sono stati abbandonati prima di essere completati. Anche la fase operativa non è esente da rischi, si pensi, per esempio, al referendum che in Italia ha portato alla chiusura anticipata degli impianti nucleari nel 1987. Questi eventi, spesso determinanti, non vengono considerati dai modelli LCA tradizionali. Tuttavia, identificare e analizzare i rischi è fondamentale per le aziende. Nella metodologia proposta, i rischi diventano parte integrante dell'analisi, offrendo una visione più realistica e affidabile per orientare investimenti e strategie.

2. Sottovalutazione dei tempi di produzione

Non tutti gli impianti contribuiscono alla decarbonizzazione con la stessa rapidità. Un parco eolico o un impianto solare possono essere costruiti in 1-2 anni, e iniziare quasi subito a generare energia. Un impianto nucleare, invece, richiede mediamente più di 10 anni per essere completato, posticipando notevolmente il suo impatto positivo sulle emissioni di CO_{2-eq}. Nella metodologia proposta, il fattore tempo è integrato nell'analisi, permettendo di valutare con precisione non solo gli impatti complessivi, ma anche il *quando* e il *come* le tecnologie iniziano realmente a contribuire alla transizione net-zero.

3. Sottovalutazione dei gradi di libertà

Infine, flessibilità, modularità e libertà di manovra sono elementi fondamentali nelle decisioni strategiche, soprattutto quando si parla di investimenti infrastrutturali e sono strettamente legate alla possibilità di prolungare la vita utile dell'impianto o adattarlo a nuove esigenze. Tuttavia, impianti e





tecnologie differenti offrono differenti gradi di libertà. Per esempio, infrastrutture modulari, come i sistemi componibili, offrono una riconfigurabilità non prevedibile rispetto agli impianti tradizionali *stick-built*. Un impianto eolico di generazione di energia è intrinsecamente più flessibile di un impianto nucleare. Un parco eolico, difatti, alla fine della sua vita

utile di 25-30 anni può essere aggiornato da un punto di vista tecnologico o dismesso, riconvertendo l'area per un altro uso; un impianto nucleare, invece, con un ciclo di vita di 100 anni, presenta una flessibilità quasi nulla. I modelli LCA tradizionali non prendono in considerazione i gradi di libertà connessi alle differenti tecnologie. La metodologia proposta integra questi aspetti, offrendo una visione più completa che considera non solo l'impatto ambientale, ma anche le

possibilità di adattamento e innovazione.

Questo studio propone una nuova metodologia, che dà priorità alle azioni che offrono più rapidi benefici climatici, e fornisce ai project manager e ai leader del settore un modo più affidabile per valutare l'impatto reale degli investimenti in un'economia a zero emissioni nette

Come superare i limiti?

1. Scontare la CO₂: l'integrazione del Discounted Cash Flow (DCF) nel Life-Cycle Assessment (LCA)

L'economia insegna che, quando i flussi di cassa sono molto lontani nel tempo, il valore reale di una somma incassata fra molti anni può essere anche molto inferiore al suo valore attuale. Cosa succede se applichiamo lo stesso principio alle emissioni di gas serra, valutati in CO_{2-eq} che avvengono in momenti temporali differenti?

Questa prima domanda guida lo sviluppo della metodologia: integrare il framework del Discounted Cash Flow (DCF) con l'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) per affrontare i limiti dei modelli LCA tradizionali legati all'integrazione del fattore tempo. Focalizzandoci sulla valutazione di flussi di emissioni di CO_{2-eq}, la nostra metodologia propone di scontarli, con un approccio del tutto analogo a quello usualmente

utilizzato per i flussi di cassa finanziari. La metodologia darà di fatto un peso maggiore alla riduzione immediata delle emissioni di CO_{2-eq} rispetto a interventi ritardati nel tempo, che rischiano di aggravare il cambiamento climatico e aumentare i costi futuri, valorizzando i differenti flussi a un tasso di sconto sociale (*social discount rate*), che riflette le priorità della società sul presente rispetto al futuro. La nostra metodologia supera dunque di LCA tradizionali legati alla mancata integrazione del fattore tempo, offrendo una visione più realistica e strategica del valore ambientale degli impianti lungo tutto il loro ciclo di vita. Per i manager e i decisori, questo significa avere uno strumento che non solo valuta l'impatto ambientale, ma guida le scelte verso soluzioni che massimizzano il valore della decarbonizzazione nel tempo.

2. Dare valore alla flessibilità: l'integrazione dell'analisi delle Opzioni Reali (ROA)

Se ogni impianto e tecnologia ha un grado di flessibilità intrinseca differente, risulta cruciale determinare il valore di questo differente grado di libertà decisionale. L'analisi delle opzioni reali permette di quantificare il valore della flessibilità nelle decisioni valutando da un punto di vista finanziario rischi e opportunità di differenti investimenti. Cosa succede se applichiamo lo stesso principio per valutare, da un punto di vista ambientale, opzioni per la mitigazione dei rischi? Questa seconda domanda guida lo sviluppo della metodologia: integrare ROA con l'analisi LCA per affrontare i limiti dei modelli LCA tradizionali legati alla sottovalutazione della natura dinamica delle tecnologie. L'integrazione della ROA può di fatto guidare strategie di mitigazione dei rischi ambientali. Investire in tecnologie modulari avanzate o soluzioni a zero emissioni significa creare opzioni per ridurre i rischi futuri, valorizzando la sostenibilità



ambientale nel lungo termine. Con la ROA, offriamo ai manager uno strumento per prendere decisioni strategiche che massimizzano il valore ambientale e mitigano i rischi, oggi e domani.

Metodologia proposta

La nostra metodologia segue tre fasi principali:

- 1. Analisi del rischio** - Per ogni applicazione si identificano e analizzano i rischi nelle differenti fasi del ciclo di vita della tecnologia e le relative emissioni di CO_{2-eq}.
- 2. Identificazione delle opzioni** - Si identificano le opzioni concrete per gestire e mitigare i rischi, e per aumentare la flessibilità e l'adattabilità nel ciclo di vita dell'impianto.
- 3. Valutazione dell'opzione e interpretazione dei risultati** - Attraverso un modello matematico che integra DCF e ROA, si calcolano il valore delle strategie di mitigazione, fornendo indicazioni quantitative ai decisori.

Caso Studio: Valutazione della mitigazione del rischio di siccità per un impianto nucleare

Il presente caso studio vuole dimostrare l'applicabilità pratica della metodologia per la mitigazione dei rischi in un contesto di incertezza. Il caso di riferimento è un impianto nucleare costruito nei pressi di un fiume, in relazione al quale viene valutato la mitigazione del rischio di siccità, un fenomeno sempre più rilevante in Italia e a livello globale, che causerebbe una carenza d'acqua necessaria per il raffreddamento dell'impianto. L'impianto si considera già costruito. Le valutazioni portate a termine non riguardano dunque la convenienza o meno relativa alla costruzione dell'impianto, bensì l'analisi di un'opzione progettuale per la mitigazione del rischio specifico di siccità. Il caso analizzato è stato selezionato considerando due aspetti principali: le caratteristiche del rischio analizzato e la disponibilità di dati pubblici per sviluppare un caso realistico, secondo la familiarità del Professor Locatelli con la tecnologia.

1. Il rischio siccità e l'opzione di mitigazione

La frequenza degli eventi di siccità a livello globale è aumentata significativamente negli ultimi 80 anni. La siccità è uno dei rischi principali per gli impianti nucleari costruiti sui fiumi, in virtù della necessità di acqua per il raffreddamento dei reattori. Qualora non fosse disponibile sufficiente acqua del fiume, affinché sussistano le condizioni di estrema sicurezza, la potenza del reattore nucleare deve essere ridotta o, nel caso limite, il reattore deve essere temporaneamente spento, andando, in entrambi i casi, a limitare il potenziale di decarbonizzazione dell'impianto. A titolo



esemplificativo, si pensi al fenomeno di siccità che ha colpito la Francia nel 2022, causando una riduzione della produzione energetica nucleare fino al 40% della capacità massima tra i mesi di luglio e agosto. Questo ha avuto forti ripercussioni sia sulla stabilità del sistema energetico sia sulla riduzione delle emissioni di CO_{2-eq}. Per mitigare il rischio di siccità, è stata identificata come possibile opzione la costruzione di un bacino di backup, con la funzione di raccogliere acqua da utilizzare in caso di necessità, garantendo la continuità operativa dell'impianto nucleare. Il bacino di backup per immagazzinare acqua e garantirne la disponibilità durante periodi di siccità si considera dotato di pompe e infrastrutture ausiliarie. La costruzione e l'operatività di tale infrastruttura comporta costi in termini economici (esclusi dalla nostra analisi), ma anche di emissioni di CO_{2-eq}. L'obiettivo è quindi valutare la convenienza della costruzione del bacino sotto il profilo ambientale, considerando i flussi di emissioni di CO_{2-eq}, e quale debba essere il suo dimensionamento ottimale.

Integrando la gestione del rischio, i principi finanziari e le valutazioni dell'impatto ambientale, le aziende possono prendere decisioni più intelligenti e sostenibili che favoriscano la transizione verso emissioni nette pari a zero



Tabella 1 – Caratteristiche principali dell'impianto selezionato

APR 1000 MWe	Sistema di raffreddamento
<ul style="list-style-type: none"> 700 MWth Efficienza $\eta = 0,37$ Temperatura del vapore vivo 295°C Vita utile prevista dell'impianto di 60 anni Prodotto in Corea dalla Korea Hydro Nuclear Power Corporation 	<ul style="list-style-type: none"> Un paio di torri di raffreddamento evaporative a ventilazione forzata Riserva d'acqua di backup di 31.000 m³ Eventuale riserva d'acqua più grande di 0,9 milioni di m³ Vita utile della riserva prevista di 20 anni Pompa aggiuntiva richiesta di 1,5 m³

2. Impianto e sito

È stato selezionato come caso di riferimento la centrale nucleare di Caorso, nei pressi del fiume Po. Il fiume svolge un ruolo cruciale per il raffreddamento dell'impianto, ma è anche soggetto a variazioni di portata legate alla siccità. La scelta dell'impianto è ricaduta su un reattore di tipo "Acqua leggera - PWR", una tecnologia ben documentata e sviluppata, con taglia di circa 1 GW. Ciò consente di simulare un caso verosimile e di comprendere le implicazioni di un'opzione progettuale specifica: la costruzione di un bacino di backup per garantire la continuità operativa in caso di siccità. In **Tabella 1** sono riportate le principali caratteristiche del reattore.

3. Risultati e analisi

La metodologia ha permesso di ottenere una stima del valore atteso del risparmio di CO_{2-eq} grazie alla costruzione del bacino. I risultati sono rappresentati attraverso tre curve probabilistiche legate a tre casistiche, riportate in **Figura 1**:

- **Caso base** - Rappresenta un contesto di incertezza bilanciata: l'investimento nel bacino si traduce in un risparmio positivo di CO_{2-eq}, giustificando la sua realizzazione.
- **Best case** - Considera un contesto di alta probabilità di siccità: l'investimento nel bacino è quasi sempre conveniente (circa il 97% delle

simulazioni).

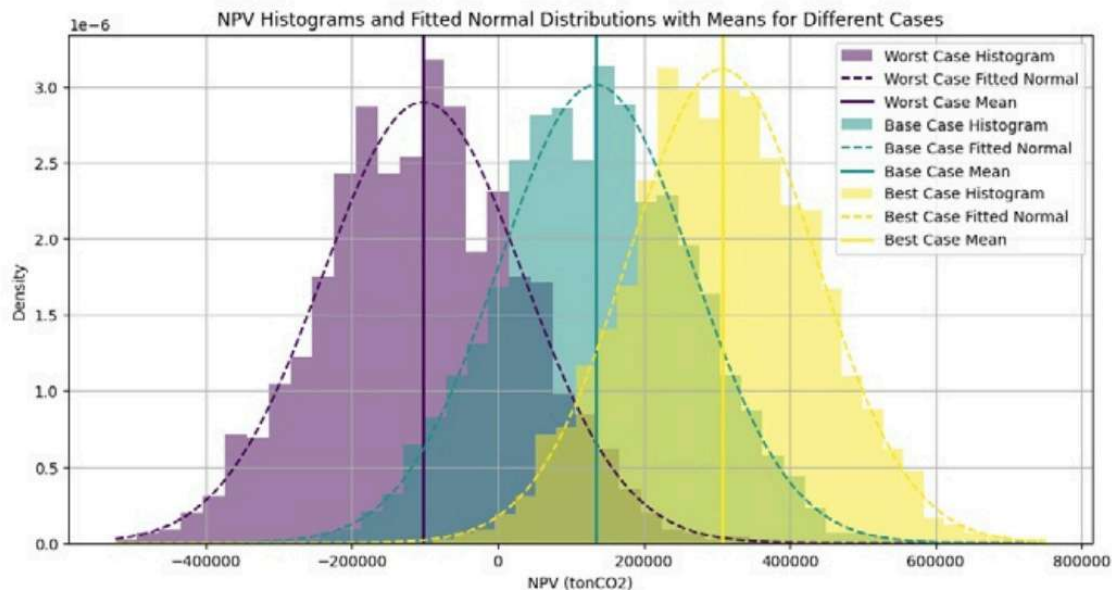
- **Worst case** - Considera un contesto di bassa probabilità di siccità: la convenienza dell'investimento nel bacino diminuisce, ma l'investimento rimane giustificato in alcuni casi specifici.

Attraverso analisi di sensitività è stato possibile determinare, per lo specifico caso in esame, la dimensione ottimale del bacino. La dimensione ottimale risultata essere di circa 12,5 giorni equivalenti di produzione, corrispondenti a 0,45 milioni di metri cubi di acqua. Questo equilibrio permette di massimizzare il risparmio di CO_{2-eq} senza aumentare inutilmente le emissioni associate alla fase di costruzione (**Figura 2**).

Conclusioni: una nuova metodologia per decisioni strategiche e sostenibili

Il caso analizzato dimostra la flessibilità e la scalabilità della metodologia applicata. Grazie all'utilizzo di dati pubblici e a una rigorosa analisi delle incertezze, è stato possibile sviluppare scenari verosimili e trarre conclusioni utili per i decisori. Più in generale la metodologia proposta è utile per la pianificazione e gestione delle grandi infrastrutture, offrendo

Figura 1 - Risultati circa il risparmio di CO₂ nell'esercizio dell'opzione



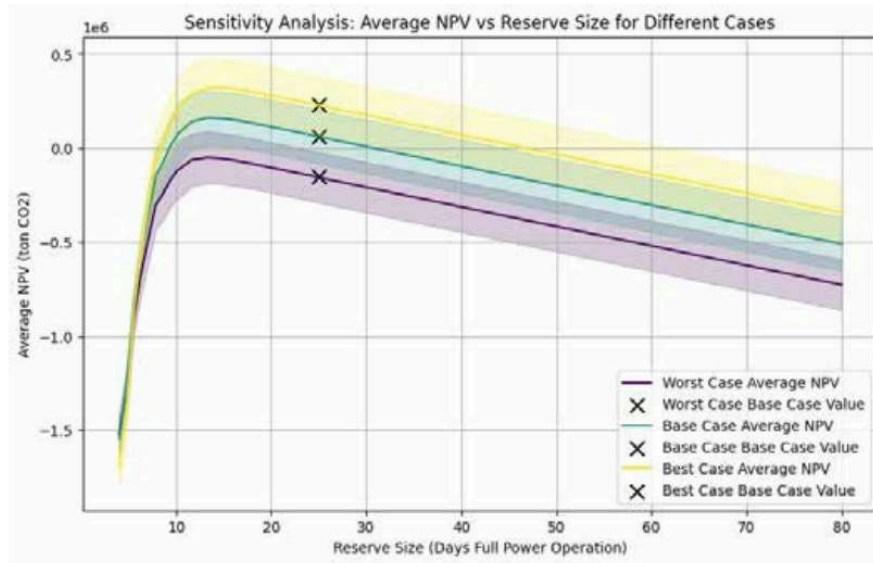


Figura 2 - Analisi di sensitività circa il dimensionamento del bacino

soluzioni flessibili e scalabili applicabili a una vasta gamma di settori: dai trasporti (metropolitane e autostrade), agli impianti industriali, fino agli impianti di generazione di energia.

La metodologia proposta è altamente personalizzabile, garantendo analisi più accurate e decisioni meglio informate. Il vantaggio offerto rispetto alle metodologie di analisi tradizionali è l'inclusione e valutazione di rischi e i gradi di libertà da un punto di vista di sostenibilità ambientale. Grazie alla sua natura integrata, la metodologia permette non solo di ottimizzare l'uso delle risorse e ridurre i rischi, ma anche di massimizzare i benefici ambientali, offrendo una visione olistica per scelte progettuali più solide. In un mondo sempre più influenzato dai cambiamenti climatici e dalla necessità di una transizione net-zero, la metodologia qui proposta si configura come un passo avanti necessario. È uno strumento che trasforma la complessità in opportunità, aiutando i manager a pianificare infrastrutture resilienti, sostenibili e pronte per il futuro.

Ringraziamenti

Questa ricerca è supportata dal progetto "2022J534JS - Toward net-zero infrastructure: advancing the environmental and economic appraisal of power plants (NE2AP)", finanziato dal PRIN 2022, Italia.

Data la natura di questo progetto di ricerca, che mira a produrre ricerca di base finanziata con fondi pubblici e i cui risultati sono destinati a essere diffusi e resi accessibili al pubblico, i casi presentati sono stati selezionati in base alla disponibilità e accessibilità dei dati pubblici.

I casi sono stati scelti per la loro convenienza nell'illustrare il potenziale della metodologia proposta e non rappresentano un giudizio di merito sulla tecnologia stessa. I casi sono stati selezionati in base alle esperienze e competenze dei ricercatori che



hanno condotto lo studio. In particolare, il caso nucleare è stato scelto dal Professor Locatelli, che vanta una vasta esperienza nel settore nucleare. La responsabilità per il contenuto della ricerca è esclusivamente degli autori.



SOSTENIBILITÀ



Alessandro Paravano

Alessandro Paravano, PhD, è Ricercatore e docente presso il Politecnico di Milano e l'Osservatorio Space Economy. I suoi principali interessi di ricerca comprendono lo studio del valore generato da progetti complessi nei contesti di Net-Zero Transition e Space Economy. È autore di oltre 20 articoli *peer-reviewed* e atti di conferenze. Vincitore di premi di ricerca da parte di prestigiose istituzioni quali, Project Management Institute, Commissione Europea, Agenzia Spaziale Italiana, International Astronautical Federation. Social Media Editor del Project Management Journal. MSc Con Lode e PhD Con Lode in Ingegneria Gestionale al Politecnico di Milano.



Alessandra Neri

Alessandra Neri è Professore Associato presso il Dipartimento di Management, Economia e Ingegneria Industriale del Politecnico di Milano. I suoi principali interessi di ricerca si comprendono lo studio del paradigma della sostenibilità e della transizione circolare nelle imprese, nelle filiere e nei sistemi industriali attraverso l'adozione di interventi e il supporto di tecnologie digitali. Ha collaborato come ricercatrice in diversi progetti di ricerca incentrati sulla transizione industriale verso la sostenibilità.



Giorgio Locatelli

Giorgio Locatelli è Professore Ordinario presso la School of Management del Politecnico di Milano, dove ha creato e gestisce la specializzazione in "Complex Projects Business". Dal 2006 ha svolto ricerche su progetti e programmi infrastrutturali. Ha ottenuto oltre 1,7 milioni di euro in fondi per la ricerca, ed è incluso dal 2020 nella lista Stanford-Elsevier "World's top 2% of scientists". È formatore e consulente per aziende pubbliche e private. È autore di oltre 160 pubblicazioni internazionali indicizzate Scopus sottoposte a peer review con oltre 4.600 citazioni. Ha vinto il "IPMA Global Research Award" 2023. È Co-Editor-in-Chief del *Project Management Journal* e membro del comitato editoriale di IPMJ, CME e PNE.



Enrico Cagno

Enrico Cagno è Professore Ordinario presso il Dipartimento di Management, Economia e Ingegneria Industriale del Politecnico di Milano. Docente in numerosi corsi master nazionali e internazionali. I suoi principali interessi di ricerca sono relativi ai temi della Sostenibilità Industriale, con particolare focus su ecoefficienza, efficienza energetica e delle risorse, e nella propositiva della Supply Chain e per le PMI, e dell'Analisi di Rischio. È autore di più di quattrocento pubblicazioni, ed è incluso nella lista TOP2% dei migliori scienziati del mondo. È membro dell'editorial board e revisore di numerose riviste scientifiche internazionali e comitati scientifici. Ha promosso e coordinato numerosi progetti e programmi di ricerca e di consulenza, dallo sviluppo strategico a quello organizzativo per numerose imprese e gruppi internazionali e pubbliche amministrazioni.



Giacomo Galeotti

Giacomo Galeotti è Analista presso Arthur D. Little, dove si occupa di consulenza strategica con un focus su Data science, modelli di previsione e gestione dell'energia. Ha conseguito una laurea triennale in Ingegneria Fisica e una magistrale in Ingegneria Gestionale. Le sue competenze includono l'analisi di dati su larga scala, lo sviluppo di modelli di intelligenza artificiale e *machine learning*, nonché l'integrazione di soluzioni tecnologiche per l'ottimizzazione dei processi aziendali. Ha esperienza in gestione e sviluppo di architetture *cloud*. I suoi interessi professionali spaziano dalla modellazione della rete elettrica di distribuzione alla gestione intelligente delle reti energetiche e alla previsione della domanda di energia, gas e teleriscaldamento.

Risk-based methodology to measure CO₂ lifecycle

In today's industrial landscape, businesses must consider sustainability alongside financial feasibility when planning large-scale infrastructure and energy projects. However, traditional Life Cycle Assessment (LCA) methods often fall short because they do not account for operational risks, the timing of CO₂ reductions, or the flexibility of different technologies. This paper introduces a risk-based approach to measuring lifecycle CO₂ emissions, integrating LCA with financial tools like Discounted Cash Flow (DCF) and Real Options Analysis (ROA). This method provides project managers and industry leaders with a more reliable way to assess the real impact of investments in a net-zero economy. The limitations of traditional LCA create challenges for decision-making in industrial plants and energy projects. First, conventional models assume stable operations, but real-world projects face risks such as regulatory changes, extreme weather, or supply chain disruptions. Second, LCA does not consider how quickly a project can start reducing emissions—solar and wind farms can be built in a few years, while nuclear plants may take over a decade. Third, flexibility in project design is not accounted for, meaning decision-makers may miss opportunities to adapt to changing conditions. This paper proposes a new methodology that addresses these gaps. By discounting CO₂ emissions over time, our approach prioritizes actions that deliver faster climate benefits. Additionally, incorporating ROA helps businesses assess the value of flexibility in project design—such as modular construction or backup systems—that can reduce long-term risks. A real-world case study demonstrates this approach, analyzing a nuclear power plant located near a river where droughts could disrupt operations. The study evaluates the feasibility of building a backup water reservoir to mitigate this risk. The results show that considering risk-adjusted CO₂ savings and flexibility leads to more informed decisions that balance sustainability with operational reliability. This methodology provides a practical framework for making strategic investments that align with financial goals and sustainability targets for industrial plant operators, energy companies, and project managers. By integrating risk management, financial principles, and environmental impact assessments, companies can make smarter, future-proof decisions that support the transition to net-zero.