



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso Di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Anno accademico 2025/2026

**Applicazione della metodologia Life
Cycle Assessment al processo di
riparazione tramite Directed Energy
Deposition**



UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA

Relatore:
Prof. Luca Iuliano

Candidata:
Bianca Bosco

Correlatrici:
Prof.essa Manuela Galati
Prof.essa Elena Bassoli

Referente aziendale:
Marchisio Giulia

Alla luce che mi circonda ogni giorno

Alla mia famiglia e ai miei amici

Ringraziamenti

Desidero ringraziare con tutto il cuore la mia famiglia, che mi ha sostenuto con pazienza e affetto lungo ogni tappa di questo percorso, rappresentando il punto di riferimento più solido nei momenti di difficoltà.

Un grazie sincero ai miei amici, per esserci stati con una parola di incoraggiamento, una risata al momento giusto e la capacità di rendere più leggero anche il periodo più intenso.

Ringrazio i miei colleghi universitari, compagni di studio e di avventura, con cui ho condiviso ansie, soddisfazioni e notti passate a prepararci: senza di voi questo cammino sarebbe stato molto più solitario.

Un ringraziamento speciale va al Professore Luca Iuliano, per l'opportunità di lavorare a questa tesi e alla correlatrice, la Professoressa Manuela Galati, per la disponibilità costante, la dedizione con cui ha accompagnato ogni fase della ricerca e per avermi spronato a dare sempre il meglio.

Desidero inoltre ringraziare l'Università di Modena e Reggio Emilia, in particolare la Professoressa Elena Bassoli e Giulia Colombini, per il prezioso supporto e la collaborazione che hanno reso possibile lo sviluppo di questo progetto.

Infine, un sentito grazie a tutto il team aziendale del CIM, per l'accoglienza e la professionalità dimostrate durante questa esperienza. Un ringraziamento particolare va a Giulia Marchisio e Michele Di Lena, figure di riferimento fondamentali, per la disponibilità, il supporto concreto e la fiducia riposta in me fin dal primo giorno.

Indice

<i>Elenco tabelle</i>	<i>v</i>
<i>Elenco figure</i>	<i>vii</i>
<i>Elenco Equazioni</i>	<i>xi</i>
<i>Terminologia</i>	<i>xiii</i>
<i>Abstract</i>	<i>xv</i>
<i>1. Primo capitolo – introduzione e review bibliografica</i>	<i>1</i>
1.1. Introduzione	1
1.2. DED – Directed Energy Deposition	5
1.3. LCA (Life Cycle Assessment)	9
1.3.1. Descrizione delle quattro fasi della LCA	9
1.3.2. Importanza e sfide dell’LCA.....	14
1.4. Analisi articoli	15
1.4.1. Tecnologie utilizzate e materiali	17
1.4.2. Scopo dell’analisi e confini del sistema	22
1.4.3. Raccolta dei dati.....	27
1.4.4. Valutazione dell’impatto ambientale	28
1.4.5. Integrazione tra Life Cycle Assessment (LCA) e Life Cycle Costing (LCC)	32
1.4.6. Research Gaps.....	34
2. Secondo capitolo – sperimentazione e definizione dell’LCI	37
2.1.1. Descrizione del sistema in analisi	38
2.1.2. Estrazione dei dati – Energia.....	43
2.1.3. Analisi preliminare - Energia	44
2.1.4. Contributi considerati - Energia	46
2.1.5. Casi di studio analizzati – Energia	47
2.1.6. Schematizzazione dei contributi di potenza e conversione in energia.....	61
2.2. Contributi di massa	65
2.2.1. Polvere metallica.....	66
2.2.2. Gas di protezione e di trasporto	69

2.3.	Life Cycle Inventory (LCI)	73
3.	<i>Terzo capitolo – applicazione a Casi studio e analisi dati</i>	75
3.1.	Costruzione della metodologia LCA per la sola fase di deposizione DED	75
3.2.	Caso studio n. 1 – layer 0.5 mm	76
3.3.	Caso studio n. 1 - Life Cycle Impact Assessment.....	81
3.4.	Caso studio n. 1 - Life Cycle Costing	86
3.5.	Caso studio n. 2 – layer 0.7 mm	90
3.6.	Caso studio n. 2 - Life Cycle Impact Assessment.....	92
3.7.	LCC dei Casi studio a confronto	94
	<i>Conclusion</i>	97
	<i>Bibliografia</i>	99

Elenco tabelle

Tabella 1 - classificazione e stima degli assorbimenti di potenza del sistema DED suddivisi per regimi di funzionamento (fissi, periodici e variabili).....	48
Tabella 2 – riassunto contributi	61
Tabella 3 – determinazione dei tempi per ogni prova per la definizione della curva di calibrazione.....	71
Tabella 4 – schematizzazione contributi dell’inventario	73
Tabella 5 - LCI caso studio n.1, teorico vs. sperimentale.....	79
Tabella 6 - fattori di caratterizzazione ottenuti da SimaPro	81
Tabella 7 - conversione dei dati di inventario di gas e energia.....	81
Tabella 8 - tabella riassuntiva con impatto totale caso studio n.1	82
Tabella 9 – confronto caso studio n.1 con sostituzione di una lama con post processing	85
Tabella 10 - costi per la fase di deposizione, legati esclusivamente al lavoro della macchina DED.....	87
Tabella 11 - costo riparazione, incluso la fase di post processing.....	89
Tabella 12 - confronto tra LCI teorico e sperimentale.....	90
Tabella 13 - tabella riassuntiva con impatto totale caso studio n. 2	92

Elenco figure

Figura 1 - concentrazione di CO2.....	1
Figura 2 – schema esplicativo della struttura del sustainable manufacturing (Dornfeld, 2013, p. 11) [2]	2
Figura 3 confronto tra andamento emissioni globali e valore di target da raggiungere [6]	3
Figura 4 - GHG per Stato (a) e per settore (b).....	4
Figura 5 - norma ISO 52900/2022 [7]	5
Figura 6 - rappresentazione della Laser-Based Metal Deposition [10]	6
Figura 7 -presentazione della DED (b) e del meltpool (c) [9].....	7
Figura 8 - principali elementi del ciclo vita di un componente prodotto in AM [15]	10
Figura 9 – scelta delle categorie di impatto da considerare.....	12
Figura 10- processo di definizione dell'LCIA [17].....	12
Figura 11 - distribuzione articoli analizzati nell'arco temporale indicato.....	15
Figura 12 - percentuale di articoli analizzati su una determinata tecnologia.....	17
Figura 13 - confronto tra componente sostituito e componente riparato [21]	18
Figura 14 - confronto tra tecnologia laser e ad arco (a), tra polvere e filo (b).....	18
Figura 15 - confronto tra Hybrid WAAM e CNC: flowchart (a) e consumo di materiale (b) e consumo energetico(c)	19
Figura 16 - percentuale di articoli analizzati su un determinato materiale.....	20
Figura 17 - consumo di materiale ed energia caso studio [11]	21
Figura 18 – schematizzazione confini dell’analisi, articolo [27].....	22
Figura 19 – riparazione vs sostituzione	23
Figura 20 - risultato del breakeven point.....	23
Figura 21 - laser-DED e arc-DED rispetto alla vita utile di un’elica di 20 anni	24
Figura 22 - identificazione del ciclo vita della paletta di turbina riparata con HAM.....	26
Figura 23 - confronto con tecnologia per la produzione tradizionale.....	26
Figura 24 -impatto ambientale delle diverse leghe [34]	29
Figura 25 - confronto CO2eq di due tecnologie differenti	29
Figura 26 – attribuzione dei pesi.....	31
Figura 24 - impatto ambientale vs impatto economico.....	33
Figura 25 - descrizione grafica del box e dei suoi accessori	38
Figura 26 - sistema di estrazione fumi.....	39
Figura 27 – laser CYFL-TERA HP CW YTTERBIUM FIBER LASER	39

Figura 28 – elettronica dietro il corpo macchina e sistema di ventilazione	40
Figura 29 - Chiller	41
Figura 30 - andamento periodico, riparazione del 24/10/25; effettiva deposizione durata 2 minuti e 30 sec.....	41
Figura 31 - powder feeder	41
Figura 32 – bombole di gas	42
Figura 33 - esempio smoothing dati in un diagramma che presenta grandi fluttuazioni	45
Figura 34 - rappresentazione dei contributi.....	46
Figura 35 - esperimento ruota dentata 4/11/25.....	47
Figura 36 - dati di partenza	49
Figura 37 - rimozione contributi periodici di chiller e ventola di raffreddamento elettronica	49
Figura 38- rimozione contributi fissi e contributo del laser in emissione	50
Figura 39 - rappresentazione delle connessioni elettriche e dei flussi di materiale	52
Figura 40 - ingrandimento dello schermo del computer di bordo e dei comandi applicabili.....	53
Figura 41 - sequenza di accensione e identificazione dei contributi fissi	54
Figura 42 – identificazione delle fasi	55
Figura 43 - rappresentazione accensione - spegnimento comandati del sistema estrazione fumi	56
Figura 44 - preparazione processo di deposizione 2 dicembre, la fase di dry-run non comporta variazioni.....	56
Figura 45 - potenze estratte 2 e 4 dicembre	58
Figura 46 - rappresentazione dei contributi del laser a potenza variabile.....	59
Figura 47 - andamento efficienza al variare della potenza emessa	60
Figura 48 - valori numerici associati.....	60
Figura 49- schema descrittivo dei contributi dell'LCI, focus sui consumi di materiale..	65
Figura 50 – regressione lineare per la definizione della portata di H13 in uscita dall'ugello.....	66
Figura 51 - relazione tra il parametro impostato da software e la portata stimata sperimentalmente	72
Figura 52 - contributi in gioco nella fase di deposizione	73
Figura 53 - confronto tra lama usurata e lama ripristinata	76
Figura 54 - fase di deposizione	76

Figura 55 - componente a processo conclusoo	77
Figura 56 -costruzione del corpo del dente e tagliente	77
Figura 57 - Carbon Footprint caso studio n. 1	82
Figura 58 – confronto durate riparazione e sostituzione.....	83
Figura 59 – confronto carbon footprint sostituzione vs. riparazione, escludendo postprocessing.....	84
Figura 60 - confronto carbon footprint sostituzione vs. riparazione, con post processing	85
Figura 61 – LCC del caso studio n.1	87
Figura 62 – LCC del caso studio n.1 con post processing.....	88
Figura 63 - confronto tra riparazione, sostituzione di una lama e sostituzione di due lame.....	89
Figura 64 - Carbon Footprint caso studio n. 2	93
Figura 65 – rappresentazione dei singoli contributi di costo nei due casi studio	94
Figura 66 – confronto economico dei due casi studio con la sostituzione di una e di due lame.....	95

Elenco Equazioni

Equazione 1 – Buy-To-Fly ratio	7
Equazione 2 – energia in funzione della potenza	34
Equazione 3 – energia in funzione dei contributi	51
Equazione 4 – potenza assorbita in funzione della potenza luminosa laser	60
Equazione 5 – energia in funzione dei contributi per un’ora di stampa	62
Equazione 6 – energia in funzione dei contributi	62
Equazione 7 – calcolo energia	63
Equazione 8 – errore relativo.....	63
Equazione 9 – portata totale di polvere	66
Equazione 10 – massa totale di polvere.....	67
Equazione 11 – massa depositata di polvere	67
Equazione 12 – efficienza di deposizione teorica.....	67
Equazione 13 – portata di gas di trasporto.....	72
Equazione 14 – portata di gas di protezione	72
Equazione 15 – portata di gas totale	72
Equazione 16 – calcolo energia	77
Equazione 17 – calcolo efficienza di deposizione teorica	78
Equazione 18 – calcolo efficienza di deposizione sperimentale.....	78
Equazione 19 – calcolo fattore di caratterizzazione dell’impatto ambientale della polvere di H13	82

Terminologia

CF – Carbon Footprint

DED – Directed Energy Deposition

DLF – Directed Light Fabrication

DMD – Direct Metal Deposition

EBAM – Electron Beam Additive Manufacturing

GHG – Green House Gas

LCA – Life Cycle Assessment

LCC – Life Cycle Costing

LCI – Life Cycle Inventory

LCIA – Life Cycle Impact Assessment

LENS™

LMD – Laser Metal Deposition

LSF – Laser Solid Forming

SDGs – Sustainable Development Goals

WAAM – Wired Arc Additive Manufacturing

Abstract

L'attuale transizione tecnologica verso metodologie di gestione del ciclo di vita del prodotto più sostenibili richiede un'analisi rigorosa delle possibili soluzioni volte all'estensione della vita utile dei prodotti. In questo contesto, i processi di riparazione e remanufacturing rappresentano valide alternative alla sostituzione integrale dei componenti industriali soggetti a usura. Tra queste tecnologie, i processi di additive manufacturing, quali il Directed Energy Deposition (DED), si distinguono per la capacità di apportare materiale in modo mirato esclusivamente nelle zone in cui il componente presenta danneggiamenti.

Il presente lavoro di tesi si propone di valutare l'impatto ambientale ed economico del processo di riparazione mediante DED, attraverso l'integrazione delle metodologie di Life Cycle Assessment (LCA) e Life Cycle Costing (LCC). In particolare, l'obiettivo del lavoro è lo sviluppo di un modello predittivo per la determinazione del Life Cycle Inventory (LCI) del sistema in esame, finalizzato alla stima dei consumi energetici e di materiale in funzione dei principali parametri di processo, al fine di prevedere il comportamento della deposizione prima dell'esecuzione dell'intervento di riparazione.

Il modello sviluppato è stato successivamente validato attraverso specifici casi studio industriali, relativi a lame Previero–Michelin, confrontando le prestazioni del processo di riparazione tramite DED con lo scenario tradizionale di sostituzione del componente. I risultati ottenuti evidenziano come la riparazione mediante DED consenta una significativa riduzione delle emissioni di CO₂ equivalente, individuando nel consumo energetico della macchina il principale hotspot ambientale. L'integrazione dell'analisi LCC ha infine permesso di valutare la convenienza economica dei diversi scenari considerati rispetto alla sostituzione del componente, fornendo una visione complessiva sull'applicabilità industriale della tecnologia in un'ottica di economia circolare

1. Primo capitolo – introduzione e review bibliografica

1.1. Introduzione

Negli ultimi decenni lo sviluppo industriale, pur avendo portato a enormi progressi tecnologici, ha avuto un significativo impatto sull'ambiente.

Quest'ultimo, oggi, è quantificabile attraverso vari parametri, in particolare **l'impronta di carbonio**, che misura l'influenza dell'attività umana sul pianeta.

Raccogliendo i dati da *Our World in Data* [1] *Figura 1*, si osserva come la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera sia in costante aumento, fenomeno che comporta un aggravamento dell'effetto serra e, di conseguenza, un progressivo riscaldamento globale. Questo determina alterazioni climatiche sempre più evidenti, come l'aumento delle temperature medie, lo scioglimento dei ghiacciai, l'innalzamento del livello del mare e la maggiore frequenza di eventi meteorologici estremi.

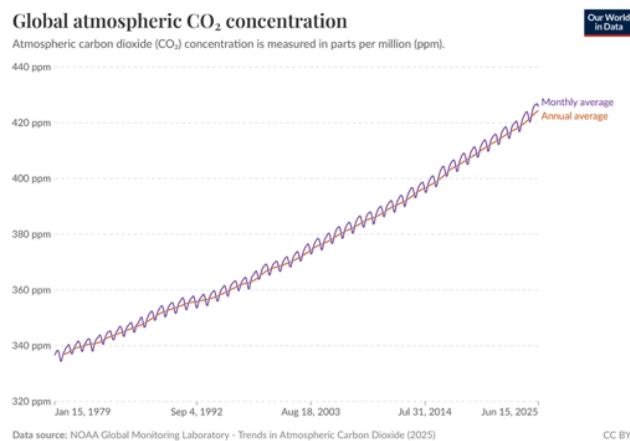


Figura 1 - concentrazione di CO₂

Le imprese hanno progressivamente riconosciuto l'importanza della sostenibilità ambientale, orientando le proprie strategie alla riduzione dell'impatto ambientale, con lo scopo di avvicinarsi quanto più possibile a un impatto quasi nullo, oltre a preservare il benessere umano ottimizzando l'uso delle risorse. Tuttavia, questa transizione deve essere

supportata anche da una convenienza economica, indispensabile affinché si possa definire una tecnologia sostenibile a tutti gli effetti.

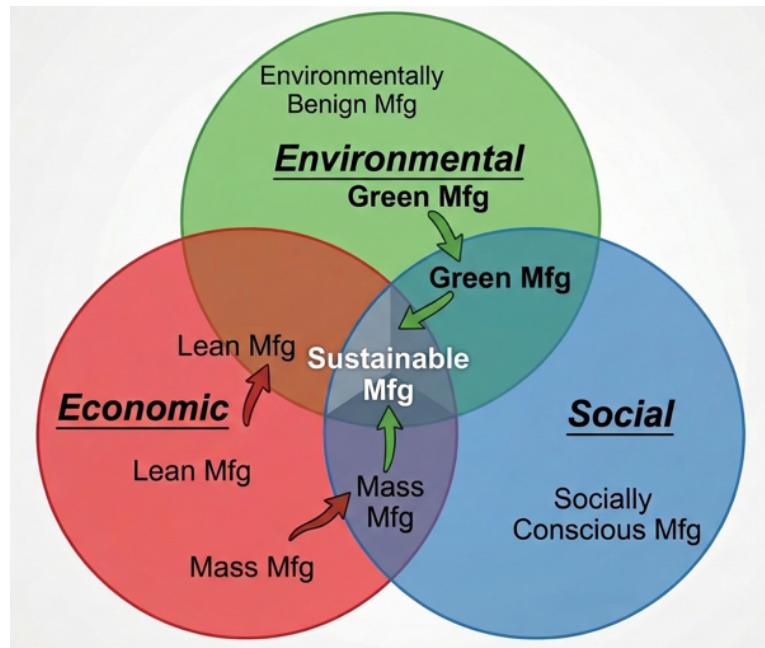


Figura 2 – schema esplicativo della struttura del sustainable manufacturing (Dornfeld, 2013, p. 11) [2]

Come descritto in letteratura [2], i costi di energia, di materiali e di gestione dei rifiuti sono destinati ad aumentare anche in virtù di normative sempre più stringenti. Infatti, negli Stati Uniti, ad esempio, gli interventi legislativi mirano a ridurre l’emissione di CO₂ dell’83% entro il 2050.

La transizione ecologica rappresenta una sfida strategica globale, necessaria a garantire un futuro sostenibile. Tale percorso è delineato da un quadro di obiettivi internazionali che mette l’accento sull’urgenza di decarbonizzare i sistemi produttivi.

A livello globale, la transizione ecologica è definita **dall’Agenda 2030** [3] per lo Sviluppo Sostenibile (UN, 2015), adottata dalle Nazioni Unite. Questa Agenda si articola in 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs – Sustainable Development Goals), con un interesse non solo ambientale, ma anche economico e sociale.

Gli SDGs fungono da bussola per gli sforzi di tutti i Paesi membri, evidenziando che lo sviluppo sostenibile richiede *cinque P*: Persone, Prosperità, Pace, Partnership, Pianeta [4].

L’Unione europea, in questo retroscena, ha assunto un ruolo di leadership, stabilendo obiettivi ancora più ambiziosi attraverso il **Green Deal Europeo** [5] (Commissione Europea, 2019). Questa strategia mira a rendere l’Europa il primo continente ad impatto

zero entro il 2050, obiettivo legalmente vincolante sancito dalla Legge europea sul clima ([6]: the *European climate law*).

Come tappa intermedia, il pacchetto legislativo “**Fit for 55%**” impone la riduzione delle emissioni nette di gas a effetto serra (GHG) di almeno il 55% rispetto ai livelli degli anni '90 entro il 2030. Per raggiungere tale risultato, l’UE agisce su tre pilastri fondamentali:

- Emissioni
- Fonti rinnovabili
- Efficientamento energetico

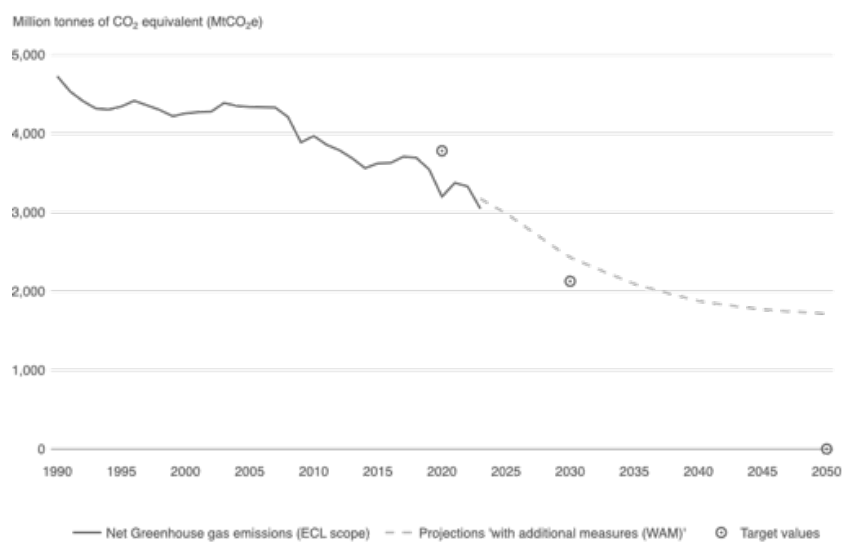
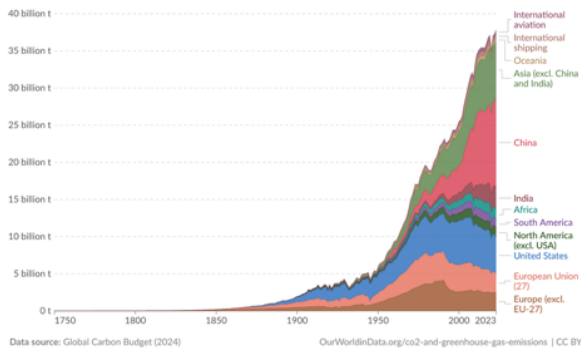


Figura 3 confronto tra andamento emissioni globali e valore di target da raggiungere [6]

Da notare che i settori manifatturiero e delle costruzioni rivestono un ruolo significativo: nel 2022 hanno infatti generato circa **6,26 miliardi di tonnellate di gas serra (GHG) in tutto il mondo** come indicato in *Figura 4*. [1]

Annual CO₂ emissions by world region

Emissions from fossil fuels and industry¹ are included, but not land-use change emissions. International aviation and shipping are included as separate entities, as they are not included in any country's emissions.

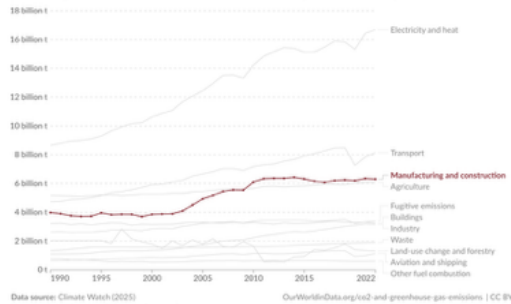


Data source: Global Carbon Budget (2024) | OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

1. Fossil CO₂ emissions This refers to the carbon dioxide released when burning fossil fuels or from certain industrial activities. Burning fossil fuels – coal, oil, and gas – produces CO₂ during transport (cars, trucks, planes), electricity generation, heating, and energy use in industry. This also includes flaring, which is the burning of extra gas during oil and gas extraction. Some industrial processes also release CO₂. This happens especially in cement and steel production, where chemical reactions (unrelated to burning fuel) produce carbon dioxide. These figures don't include CO₂ emissions from changes in land use, like deforestation or reforestation.

Greenhouse gas emissions by sector, World

Greenhouse gas emissions² are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents³ over a 100-year timescale.



Data source: Climate Watch (2025) | OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

Note: Land-use change emissions can be negative.

1. Greenhouse gas emissions A greenhouse gas (GHG) is a gas that causes the atmosphere to warm by absorbing and emitting radiant energy. Greenhouse gases absorb radiation that is reflected by Earth, preventing this heat from escaping to space. Carbon dioxide (CO₂) is the most well-known greenhouse gas, but there are others including methane, nitrous oxide, and in fact, water vapor. Human-made emissions of greenhouse gases from fossil fuels, industry, and agriculture are the leading cause of global climate change. Greenhouse gas emissions measure the total amount of all greenhouse gases that are emitted. These are often quantified in carbon dioxide equivalents (CO₂e) which take account of the amount of warming that each molecule of different gases creates.

2. Carbon dioxide equivalents (CO₂e) Carbon dioxide is the most important greenhouse gas, but not the only one. To capture all greenhouse gas emissions, researchers express them in "carbon dioxide equivalents" (CO₂e). This takes all greenhouse gases into account, not just CO₂. To express all greenhouse gases in carbon dioxide equivalents (CO₂e), each one is weighted by its global warming potential (GWP) value. GWP measures the amount of warming a gas creates compared to CO₂. CO₂ is given a GWP value of one. If a gas had a GWP of 10 then one kilogram of that gas would generate ten times the warming effect as one kilogram of CO₂. Carbon dioxide equivalents are calculated for each gas by multiplying the mass of emissions of a specific greenhouse gas by its GWP factor. This warming can be stated over different timescales. To calculate CO₂e over 100 years, we'd multiply each gas by its GWP over a 100-year timescale (GWP100). Total greenhouse gas emissions - measured in CO₂e - are then calculated by summing each gas' CO₂e value.

Figura 4 - GHG per Stato (a) e per settore (b)

In questo contesto si colloca la presente ricerca, il cui obiettivo principale è analizzare il ruolo della **fabbricazione additiva** in un mondo che impone limiti sempre più stringenti in termini di impatto ambientale e sulla salute umana.

Tra tutte le tecnologie *additive*, il focus è sulla tecnologia di **deposizione diretta**, poiché consente non solo di costruire da zero un componente, ma anche di ripararlo, estendendo la sua vita utile. Questa possibilità di riparare un componente rappresenta un vantaggio significativo, poiché consente di preservare il valore del componente che, se invece fosse giunto a fine vita, avrebbe poi subito un processo di recupero del materiale grezzo, con un valore nettamente inferiore rispetto a quello del componente originale o riparato.

Questo capitolo analizzerà innanzitutto la tecnologia e la metodologia alla base della nostra analisi; successivamente procederà alla valutazione degli articoli esaminati.

1.2. DED – Directed Energy Deposition

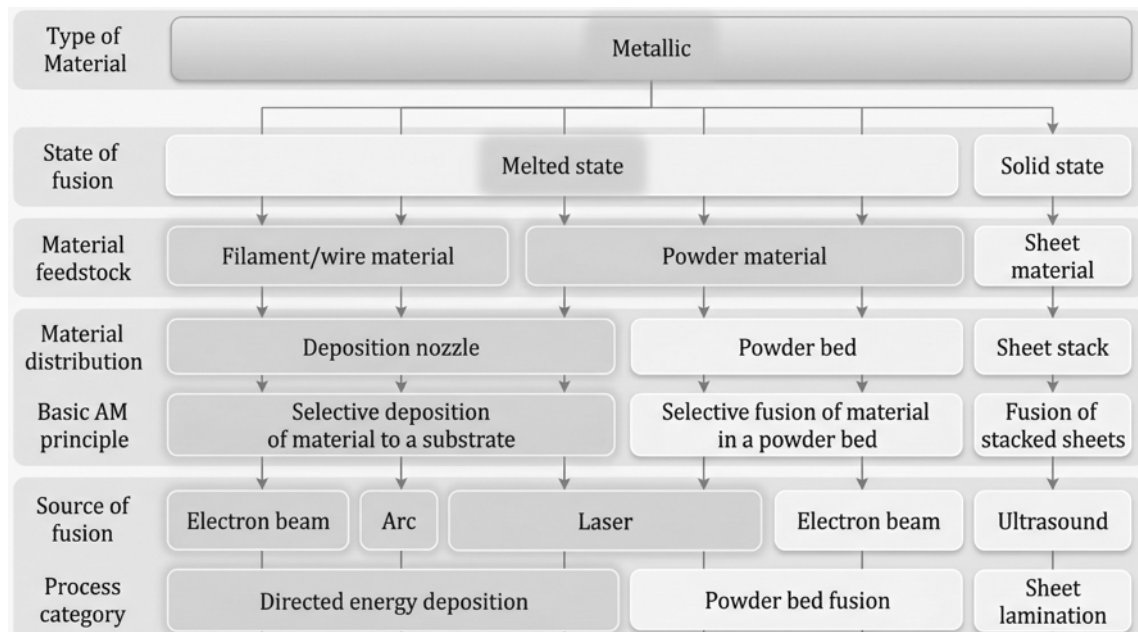


Figura 5 - norma ISO 52900/2022 [7]

Tra tutte le tecnologie di fabbricazione additiva sviluppate dagli anni '90 a oggi, ci focalizzeremo sulla Directed Energy Deposition, poiché, come già menzionato, consente di effettuare *riparazioni e remanufacturing*.

Il *remanufacturing* in particolare: è un modello di business importante per l'economia circolare, poiché riesce ad allungare la vita utile di componenti di un prodotto che altrimenti verrebbero considerati rifiuti. [8]

Più propriamente, la Directed Energy Deposition comprende diverse forme in base alla **fonte di energia** e al **materiale di apporto** utilizzato. Le tecnologie commercialmente disponibili vengono identificate con diverse denominazioni, tra cui: Laser Metal Deposition (LMD), Direct Metal Deposition (DMD), Laser Solid Forming (LSF), LENS™, Directed Light Fabrication (DLF), Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) e Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM). [9]

Nella scelta degli articoli analizzati, sono state considerate principalmente WAAM, LENS e LMD.

La Directed Energy Deposition, in generale, sfrutta una piattaforma e un ugello mobili per depositare, in direzione ortogonale alla superficie del componente da riparare, una certa quantità di filo o polvere metallica, che viene fusa localmente tramite un laser o un fascio di elettroni.

Il processo avviene nel cosiddetto **melt pool**, ovvero la pozza di fusione, dove le particelle di polvere/filo si uniscono al substrato sottostante, formando un legame tra il nuovo materiale depositato e la superficie del pezzo originale. Ciò consente di avere volumi produttivi elevati e di creare leghe in macchina, a differenza delle tecnologie a letto di polvere. Un limite importante è legato al tipo di materiali utilizzabili; infatti, non essendo in ambiente inerte (dato il volume di lavoro così ampio, sarebbe estremamente energivoro), non possono essere utilizzati materiali molto reattivi per il rischio di ossidazione e conseguente deterioramento del componente finale.

Un'altra problematica è legata ai limiti imposti alle geometrie realizzabili; tuttavia, questo viene parzialmente risolto grazie alla possibilità di movimentare sia la testina sia la piattaforma.

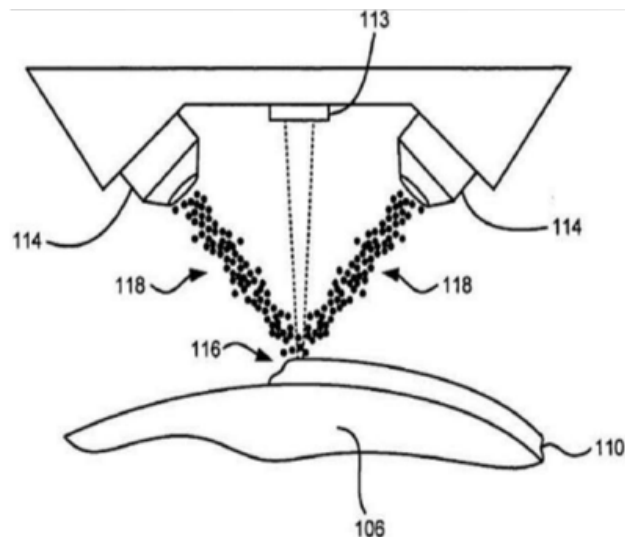


Figura 6 - rappresentazione della Laser-Based Metal Deposition [10]

I materiali più comunemente utilizzati sono gli acciai, le leghe di alluminio e di cobalto-cromo.

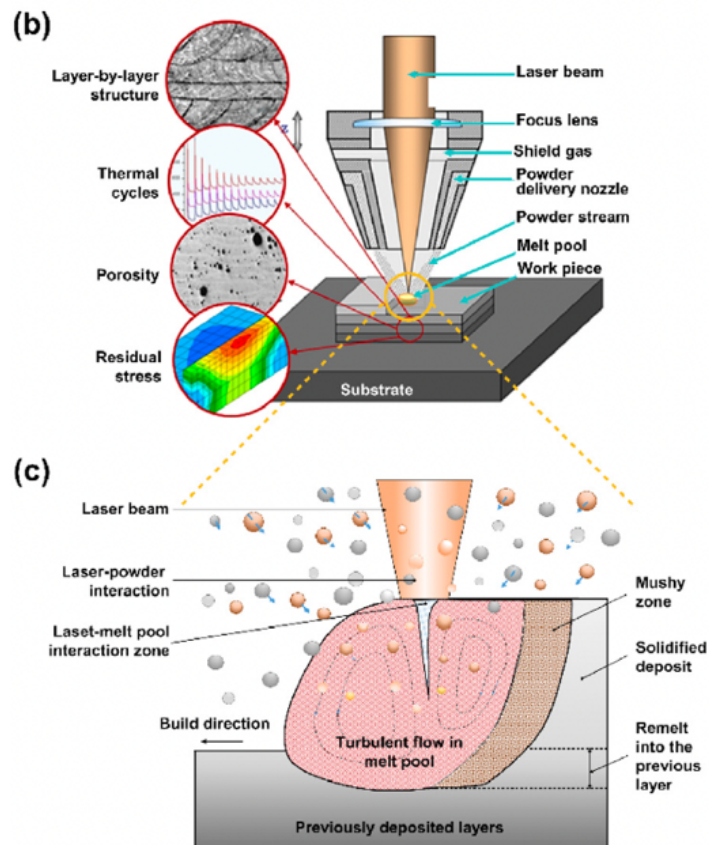


Figura 7 -presentazione della DED (b) e del meltpool (c) [9]

A livello di sostenibilità, le tecnologie additive sono interessanti rispetto a quelle tradizionali perché presentano un **rapporto Buy-to-fly** molto prossimo all'unità.

$$btf = \frac{\text{peso del materiale acquistato}}{\text{peso del componente finito}} \geq 1$$

Equazione 1 – Buy-To-Fly ratio

In particolare, se il BTF è basso, si ha un minore scarto di materiale, caratteristica dei processi additivi proprio perché si aggiunge materiale solo dove è necessario, mentre nelle tecnologie tradizionali, si tratta di un processo sottrattivo per cui si ha un BTF maggiore. [11]

Nell'efficienza del materiale va considerata, però, anche la tipologia di materiale di partenza. La **polvere**, quando viene espulsa dalla testina, non finisce interamente sul componente per effetto della diffusione delle particelle, per cui, rispetto ad altre tecnologie che usano il filo come materiale di partenza (come la WAAM), quelle a deposizione di polvere hanno un valore minore. Addirittura, nell'articolo di Z. Liu et al. del 2019 [12] si cita che la DED ha un'efficienza del materiale del 14%, motivo per cui risulta meno conveniente rispetto alla tecnologia tradizionale associata.

In realtà, più propriamente, questa efficienza dipende dai parametri di processo impostati e, per questo, non può essere definita in modo universale. Come discusso nel 2.2.1, aumentando il flusso di polvere espulso dall'ugello si ottiene una maggiore precisione nella deposizione, ma si registra anche un incremento del materiale scartato. Per tale motivo, si cerca di individuare un equilibrio tra qualità del componente e materiale disperso, che porta l'efficienza ottimale al 50%.

1.3. LCA (Life Cycle Assessment)

1.3.1. Descrizione delle quattro fasi della LCA

Al fine di valutare l'impatto ambientale della tecnologia di deposizione laser, è utile introdurre la metodologia del Life Cycle Assessment: una tecnica per tradurre i consumi di materiale ed energia in parametri relativi all'impatto ambientale e alla salute umana.

La struttura della metodologia LCA è definita in base alle normative ISO 14040/2021 e 14044/2021 [13] [14], che spiegano in modo esaustivo come applicarla.

In particolare, l'LCA è caratterizzato da quattro fasi portanti:

1. **definizione di goal & scope**
2. **Analisi dell'inventario (flussi in ingresso e uscita), LCI**
3. **Valutazione dell'impatto, LCIA**
4. **Interpretazione dei risultati.**

La fase di **definizione del goal & scope** costituisce un passaggio cruciale per la definizione degli obiettivi dello studio. All'interno di questa è possibile distinguere tre principali tipologie di analisi: classica, predittiva e comparativa.

L'analisi classica si concentra sull'esame del processo relativo alla singola tecnologia, per valutare gli impatti ambientali lungo le fasi considerate. L'approccio predittivo, invece, tiene in considerazione la prospettiva evolutiva della tecnologia analizzata, che, essendo in fase di sviluppo, può presentare caratteristiche nettamente diverse nel prossimo futuro rispetto a quelle attuali.

L'analisi comparativa, infine, risulta particolarmente rilevante poiché consente di confrontare l'impatto ambientale di diverse tecnologie, generando rappresentazioni grafiche e indicatori che chiariscono la sostenibilità relativa di ciascuna soluzione.

In aggiunta, si prevede in questa prima fase l'identificazione di **un'unità funzionale**, che nei casi analizzati in generale coincide con il componente stesso o, in alternativa, con un numero di cicli di utilizzo considerabili come la vita utile del componente, considerando una dimensione temporale dell'analisi.

Una volta definito il riferimento, è necessario definire i confini del sistema, che ci consentono di specificare tutte le fasi incluse nell'analisi dell'inventario del ciclo di vita successivo (LCI).

I confini del sistema possono essere stabiliti in diversi modi, a seconda delle fasi che si vogliono tenere in considerazione:

- L'approccio **cradle-to-grave** considera l'intero ciclo vita del prodotto, dalla produzione allo smaltimento finale
- Il **cradle-to-gate** e il **gate-to-grave** rappresentano varianti intermedie che considerano solo determinate fasi, escludendone altre.
- Infine, la modalità **gate-to-gate** si concentra sulla singola fase del processo.

In letteratura scientifica si evidenzia una maggioranza di studi che adottano l'approccio cradle-to-gate poiché la valutazione dell'impatto delle fasi di utilizzo del componente e di fine vita (end-of-life) risulta spesso complessa da quantificare.

È necessario definire le fasi del ciclo di vita di un componente prodotto in AM, come illustrate nella Figura 8.

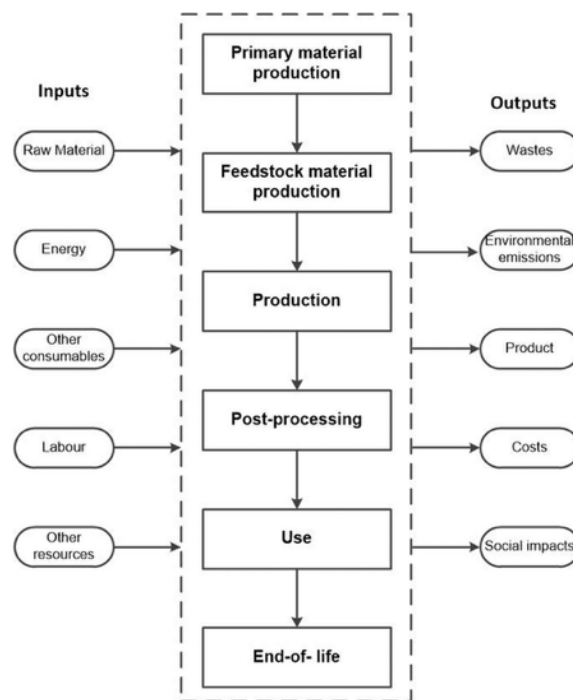


Figura 8 - principali elementi del ciclo vita di un componente prodotto in AM [15]

Nella terza fase dell'analisi del ciclo vita (LCA) si svolge la valutazione degli impatti del ciclo vita (**LCIA** – Life Cycle Impact Assessment), che ha lo scopo di convertire gli input e gli output dell'inventario (LCI) in impatti ambientali quantificabili.

Secondo la normativa ISO 14044/2006 questa fase può essere riassunta in quattro step fondamentali, di cui i primi due obbligatori mentre gli ultimi due facoltativi:

- Fase di **classificazione**;
- Fase di **caratterizzazione**;
- Fase di normalizzazione;
- Fase di ponderazione.

Il risultato di questa valutazione è un vero e proprio *profilo ambientale*, ovvero una lista di punteggi che rappresentano i diversi effetti ambientali associati al ciclo vita di un prodotto, tra cui il cambiamento climatico, il consumo idrico, l'uso del suolo e l'acidificazione del terreno, oltre a valutare l'impatto sulla salute umana. Tale profilo consente di identificare sia le categorie ambientali che presentano le prestazioni migliori o peggiori, sia le fasi del ciclo vita che contribuiscono in misura maggiore ai diversi impatti, e di trarre le conclusioni nella quarta fase del Life Cycle Assessment.

Le categorie **midpoint** descrivono gli impatti ambientali intermedi, come il Global Warming Potential (GWP), l'acidificazione o l'eutrofizzazione, e mantengono una forte correlazione con i flussi ambientali misurati e un livello di incertezza contenuto. Le categorie **endpoint**, invece, traducono tali risultati in danni finali su tre aree di protezione fondamentali: la salute umana (espressa in anni di vita persi), la qualità degli ecosistemi (perdite di specie nel tempo) e la disponibilità delle risorse naturali (valutata in termini di costi economici aggiuntivi per l'estrazione futura).

I due livelli (Figura 9) sono complementari, non vi è una scelta migliore dell'altra: il primo offre maggiore precisione scientifica, mentre il secondo garantisce una migliore interpretabilità dei risultati complessivi.

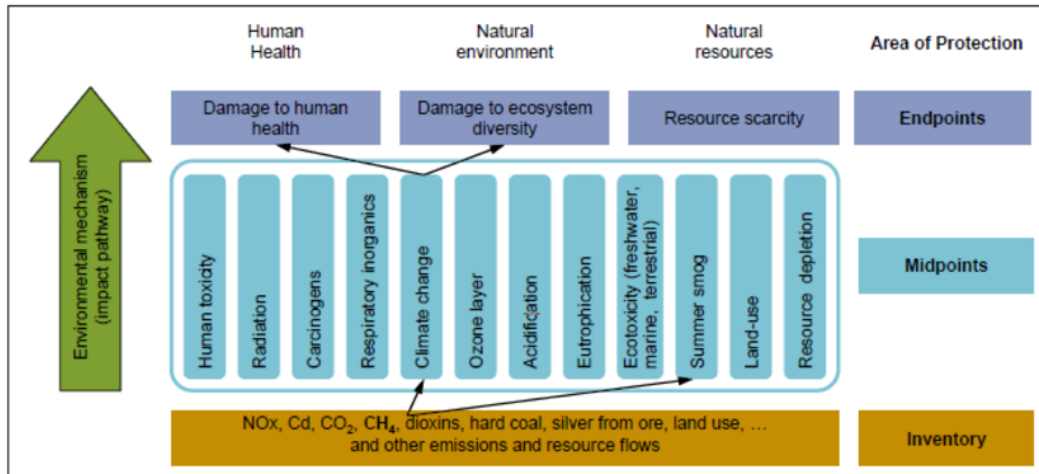


Figura 9 – scelta delle categorie di impatto da considerare

Una volta selezionate le categorie di impatto da considerare, si **classificano** tutti i flussi dell’LCI assegnandogli le categorie di impatto corrispondenti, cercando però di seguire il criterio dell’indipendenza, per evitare per quanto possibile intersezioni tra categorie che potrebbero portare a conteggi multipli [16]. Si quantifica l’effetto di ogni sostanza tramite i **fattori di caratterizzazione** e si sommano tutti i contributi ottenendo un risultato unitario per categoria.



Figura 10- processo di definizione dell'LCIA [17]

Infine, è possibile effettuare **Normalizzazione e Ponderazione** per confrontare, pesare e ordinare le varie categorie di impatto, segnalando quella che fornisce il contributo maggiore.

Tra i metodi più diffusi per la **caratterizzazione** si riporta il metodo **ReCiPe** [18], sviluppato nel 2008 grazie alla collaborazione tra il RIVM (National Institute for Public Health and The Environment) la Radboud University in Nimega, l’Università di Leiden e Pré Consultants.

Un altro aspetto caratteristico del metodo ReCiPe è la possibilità di adottare tre prospettive culturali, che riflettono diverse visioni temporali e gradi di precauzione nelle scelte ambientali. Avremo quindi la prospettiva I (*Individualist*) orientata al breve termine e basata su una visione ottimistica della capacità tecnologica dell'uomo di adattarsi agli impatti ambientali (orizzonti temporali ridotti: 20 anni). Infine, la E (*Egalitarian*) si basa su una visione precauzionale e considera tutti i potenziali percorsi di danno nel lungo periodo, anche quelli più incerti (ad esempio fino a mille anni per il cambiamento climatico). Più utilizzato, però, è l'approccio intermedio H (*Hierarchist*). Queste tre prospettive consentono di modulare la valutazione degli impatti in base all'orizzonte temporale e al livello di prudenza desiderato.

In letteratura sono presenti ulteriori metodologie per la determinazione dei fattori di caratterizzazione, tra cui **CML** e **Eco-indicator99**. Tuttavia, tali approcci non saranno oggetto di approfondimento nell'ambito del presente studio, al fine di focalizzare l'analisi sugli indicatori più pertinenti agli obiettivi della ricerca.

1.3.2. Importanza e sfide dell’LCA

La metodologia LCA ha le sue origini concettuali negli anni '70 del Novecento, ma ha raggiunto la standardizzazione internazionale solo nel 2006 con le norme ISO 14040 e 14044. La necessità di quantificare l’impatto ambientale e sulla salute umana di un prodotto o di un servizio è dettata da un insieme di *driver* strategici che ne rendono l’importanza evidente. L’LCA costituisce uno strumento decisionale quantitativo indispensabile per guidare l’innovazione fin dalle fasi iniziali di progettazione, consentendo l’individuazione dei punti critici e la definizione della traiettoria di sviluppo ottimale per minimizzare l’impatto ambientale. Le organizzazioni che integrano l’LCA nei processi decisionali e di analisi dei prodotti hanno una maggiore facilità a conformarsi agli standard ambientali, in costante evoluzione e sempre più stringenti. Inoltre, l’adozione dell’LCA e la comunicazione trasparente dei suoi risultati sono un vantaggio competitivo, poiché una parte significativa dei consumatori valuta positivamente le imprese che dimostrano un impegno chiaro per la sostenibilità (*green reputation*) [19].

Nonostante tutto questo, l’applicazione dell’LCA deve confrontarsi con diverse sfide che possono influire sulla robustezza e sulla comparabilità dei risultati. In primis, la necessità dell’acquisizione di dati completi e di elevata qualità per tutte le fasi del ciclo vita tenute in considerazione, in mancanza di questi si introducono stime e generalizzazioni che aggiungono incertezza e diminuiscono l’efficacia e l’accuratezza dell’analisi. Inoltre, l’analisi di prodotti con filiere produttive estese e articolate può risultare particolarmente complessa, aumentando il rischio di *gap* di dati e di potenziali inesattezze nella modellazione del sistema. Infine, trattandosi di una metodologia notoriamente recente, è possibile che gli operatori LCA facciano scelte diverse nell’applicarla, rendendo difficili i confronti diretti tra studi condotti da soggetti diversi e ostacolando così la piena comparabilità dei risultati.

1.4. Analisi articoli

In questa sezione viene presentata l'analisi della letteratura scientifica, uno strumento fondamentale per inquadrare lo stato dell'arte della ricerca.

L'obiettivo principale è quello di realizzare un'analisi LCA completa della tecnologia DED e sviluppare un confronto LCA tra la riparazione con DED e la sostituzione del componente tramite lavorazione tradizionale, per questo motivo è stato esaminato un *corpus* di 37 articoli pubblicati tra il 2011 e il 2025 (Figura 11).



Figura 11 - distribuzione articoli analizzati nell'arco temporale indicato

La ricerca ha preso in considerazione le stringhe “DED” e “LCA” utilizzando sia Scopus sia Google Scholar, focalizzandosi in particolare su articoli che trattano il remanufacturing o la riparazione tramite la tecnologia DED, oltre che, in generale, sulla sostenibilità e sull'impatto ambientale ed economico della tecnologia analizzata.

È innanzitutto opportuno svolgere un excursus sui principali **limiti dell'applicazione della metodologia LCA** all'ambito dell'Additive Manufacturing [20]. Dall'analisi della letteratura, e in particolare da uno studio del 2025, emerge chiaramente come l'LCA venga applicata di rado a queste tecnologie. Ciò è dovuto alla forte dipendenza della metodologia dalla qualità dei dati di input e dalle banche dati disponibili, alla carenza di informazioni ambientali dettagliate e alla possibilità di introdurre errori umani nella fase di raccolta dei dati, compromettendo così l'accuratezza complessiva della valutazione. Infatti, come dimostrano le statistiche citate dall'articolo di Kokare et al. [15] la maggioranza degli articoli analizzati nello studio si focalizza solo sul consumo energetico e non sullo svolgere l'intero LCA.

In generale, si dimostra che i flussi di materiale, energia e rifiuti risultano significativamente differenti rispetto a quelli dei processi di produzione tradizionale, introducendo complessità nella valutazione della sostenibilità ambientale delle tecnologie additive.

Le principali criticità individuate riguardano:

- (1) la definizione dei confini del sistema oggetto di studio;
- (2) la raccolta e la valutazione dei dati necessari all'analisi;
- (3) la quantificazione scientificamente accurata delle emissioni ambientali.

Si evidenzia inoltre come le variazioni in termini di materiale, dimensioni, geometria e complessità dei componenti possano incidere in modo significativo sulle prestazioni complessive di sostenibilità del processo. [11]

Lo scopo di questa tesi è definire e cercare di consolidare una metodologia strutturata per l'analisi del ciclo vita, fondamentale per le valutazioni di tipo socioeconomico e ambientale, ma che risulta di complessa applicazione nel contesto della manifattura additiva.

Questo obiettivo viene perseguito attraverso un'analisi preliminare dello stato dell'arte, finalizzata a inquadrare le conoscenze attuali e le principali criticità legate all'applicazione del metodo.

La trattazione degli articoli si articola inizialmente con una classificazione sulle tecnologie additive e sui materiali più impiegati. Successivamente, l'attenzione è rivolta agli obiettivi delle analisi condotte, alla definizione dei confini del sistema, nonché ai mezzi e alle strategie impiegate per la raccolta dei dati sperimentali, simulati o da letteratura.

Particolare attenzione è poi dedicata alle metodologie utilizzate per la conversione dei consumi energetici e di materiale in impatto ambientale, valutando le conclusioni che ne derivano. Infine, vengono esaminati gli studi che includono la valutazione di tipo economico (LCC) Life Cycle Costing, al fine di comprendere in che misura la prospettiva del costo lungo il ciclo vita venga integrata negli articoli.

1.4.1. Tecnologie utilizzate e materiali

L'analisi della letteratura, sintetizzata in Figura 12, stabilisce la prevalenza di studi focalizzati sulla tecnologia DED generica, che rappresenta la quota maggioritaria dei casi. Questa è seguita dalla tecnologia WAAM, che emerge come il secondo ambito di ricerca più approfondito nel campione di articoli esaminati, confermando la sua rilevanza nei processi di deposizione a filo. In questo scenario assume particolare interesse l'integrazione dei processi ibridi per la riparazione dei componenti metallici.

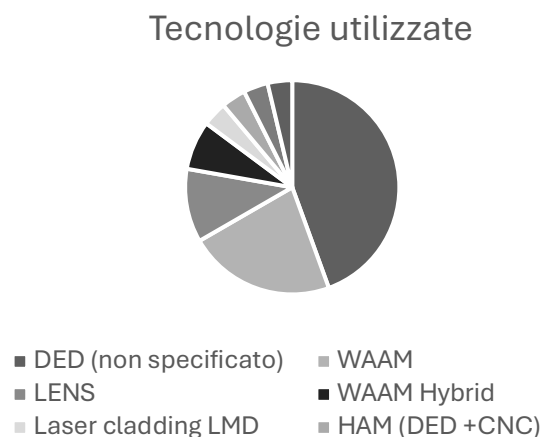


Figura 12 - percentuale di articoli analizzati su una determinata tecnologia

Un caso studio significativo [21] confronta la riparazione ibrida tramite WAAM e la tecnologia sottrattiva pura. I risultati evidenziano che l'energia grigia (ovvero *l'embodied energy*, che rappresenta tutta l'energia necessaria per l'intero ciclo vita di un prodotto) e le emissioni di CO₂ si riducono nettamente nel caso di riparazioni con WAAM.

Inoltre, come mostrato nella *Figura 13*, nel caso di riparazioni multiple la vita utile del componente si allunga significativamente. Tali evidenze conducono a una necessaria riconsiderazione del concetto tradizionale di End of Life (EoL), che non deve più essere inteso come una fase definitiva di dismissione del prodotto, bensì come una soglia di rigenerazione e di prolungamento funzionale.

In tale prospettiva, la riparazione non rappresenta solo un intervento di manutenzione, ma un vero e proprio strumento di economia circolare, per ridurre gli sprechi di materiale e minimizzare i costi di produzione del componente nuovo, oltre a restituire valore economico al bene stesso.

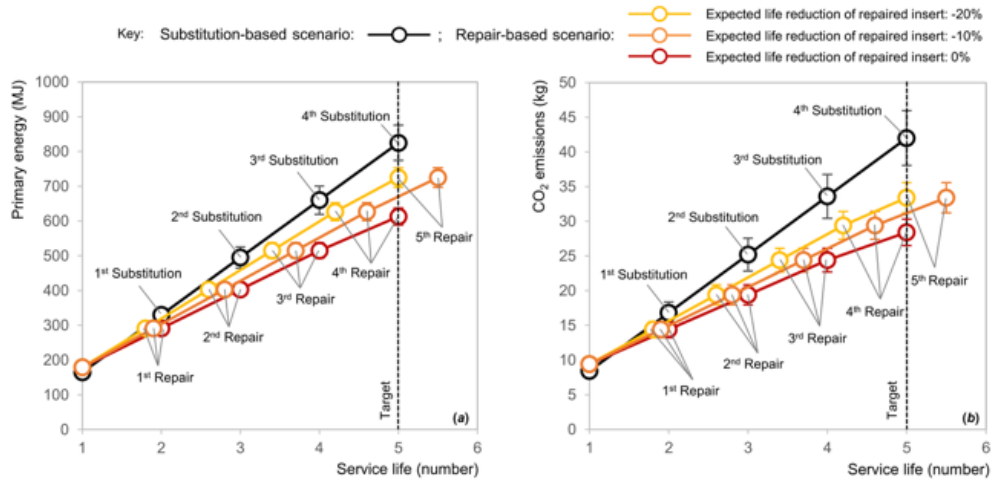


Figura 13 - confronto tra componente sostituito e componente riparato [21]

Tale dimostrazione riveste particolare rilevanza ai fini della nostra analisi.

Tuttavia, le tecnologie a deposizione di polvere presentano criticità più marcate, riconducibili alla necessità di trasformare la materia prima in polvere, un'operazione intermedia ad alto dispendio energetico. Risulta infatti che l'efficienza energetica della gas-atomizzazione è estremamente bassa, tipicamente dell'ordine dello 0,002–0,005% [22] e questo valore tende sempre di più ad essere basso tanto più si vuole una polvere fine e omogenea.

Inoltre, esse evidenziano una produttività e un'efficienza di utilizzo del materiale inferiori rispetto a quelle della WAAM, a causa delle maggiori perdite di polvere all'interno della camera di lavorazione [23]. Tuttavia, permettono di sviluppare geometrie più complesse e con maggiore precisione e, per questa ragione, risultano estremamente interessanti.

La Figura 14 presenta un confronto tra le tecnologie basate su sorgenti laser e quelle ad arco elettrico, mettendo inoltre in relazione i processi che impiegano polvere con quelli che utilizzano il filo come materiale di apporto.

Laser vs Arc			Powder vs Wire		
	Laser	Arc		Powder	Wire
Cost - capital	Very high (€200k - 4 kW)	Low (€25k - 4 kW plasma or CMT)	Cost	High	Medium
Cost - running	Medium	Low	Quality	Variable	High (Ti, Fe, Ni), variable Al
Efficiency - power source	25%	90%	Feeding	Complicated unless using side feed	Easy well established industrial process
Efficiency - coupling	40%	85%	Material efficiency	Typical 40-60%	100%
Safety issues	Very high	Medium	Safety issues	Yes (especially Ti/Al)	No
Build rate	Medium-high	High-very high	Recycling	Possible with processing	Not required
Feature size	0.2mm upwards	1mm upwards	Out of position deposition	No	Yes
			Rotation problem	Coaxial - no, side feed - yes	CMT - no, plasma - yes

Figura 14 - confronto tra tecnologia laser e ad arco (a), tra polvere e filo (b)

Un'altra tecnologia che si può trovare negli studi analizzati è quella ibrida: **HAM** (Hybrid Additive Manufacturing) sia nella tesi *Sustainability Assessment of Direct Energy Deposition (DED) based Hybrid Manufacturing using Life Cycle Assessment (LCA) Method* [24] e nell'articolo di Liu et al. *LCA-based environmental sustainability assessment of hybrid additive manufacturing of a turbine blade* [11]. In questi casi di studio si presentano le prestazioni della fresatura CNC rispetto alla HAM basata sulla DED, per comprendere i benefici ambientali della tecnologia ibrida, in particolare risulta che l'impatto ambientale può ridursi fino al 53% rispetto ad una tecnologia tradizionale, oltre al risparmio di risorse e alla ridotta impronta di carbonio.

L'ibridazione della tecnologia può essere accompagnata anche dalla tecnologia WAAM e non solo DED, come si può trovare nell'articolo *Integrated WAAM-Subtractive Versus Pure Subtractive Manufacturing Approaches: An Energy Efficiency Comparison* [25]. Qui l'attenzione è posta, non solo sull'energia consumata che risulta essere circa la metà rispetto alla tecnologia puramente sottrattiva, ma anche sul quantitativo di massa risparmiata.

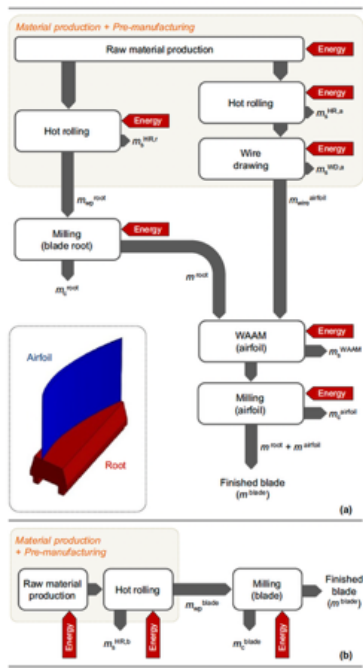


Fig. 2 Qualitative energy and material flowchart for a) the integrated additive-subtractive and b) the pure subtractive approaches

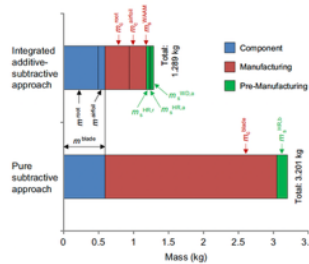


Fig. 5 Material usage results

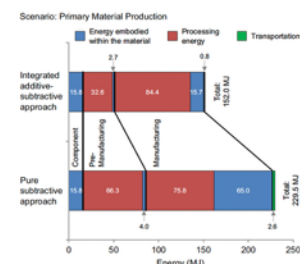


Fig. 7 Energy results breakdown

Figura 15 - confronto tra Hybrid WAAM e CNC: flowchart (a) e consumo di materiale (b) e consumo energetico(c)

Per quanto riguarda i materiali [26], la maggioranza degli articoli analizzati riporta una prevalenza di acciai (inox e da utensili), in particolare il 316 L, l'H13, AISI 4140 e ER70,

seguiti da leghe di titanio (Ti6Al4V) e da superleghe di Nichel (nichel-cromo e nichel-alluminio).

La motivazione per cui si sfruttano principalmente questi materiali è legata al trade-off ottimale tra lavorabilità e resistenza meccanica.

Tuttavia, nel processo DED si possono presentare criticità intrinseche legate all'interazione tra la sorgente energetica e il materiale:

- La **saldabilità** del materiale è legata alla formazione di fasi indesiderate che riducono la tenacità del materiale, compromettendone la duttilità, fenomeno particolarmente evidente nei metalli contenenti elevate percentuali di carbonio o elementi leganti come il cromo, responsabili della formazione di precipitati di carburi e di composti fragili.
- La seconda criticità è legata invece alla **capacità del materiale di assorbire l'energia** del laser: alcuni metalli come il rame, presentano una marcata riflettività alle lunghezze d'onda dell'infrarosso, riducendo drasticamente l'efficienza di assorbimento. Nel caso della DED, i laser più utilizzati sono proprio laser a diodi o a fibra (lunghezze d'onda intorno a 1060-1080 nm – vicine all'infrarosso) e laser a CO2 (lunghezze d'onda nell'ordine di 10600 nm – ovvero nell'infrarosso lontano).
- In aggiunta a tutto questo, non tutti i materiali sono facilmente **atomizzabili** o filabili e possono presentare problemi di ossidazione e **reattività**, imponendo quindi limiti notevolmente stringenti ai processi additivi.

Materiali utilizzati

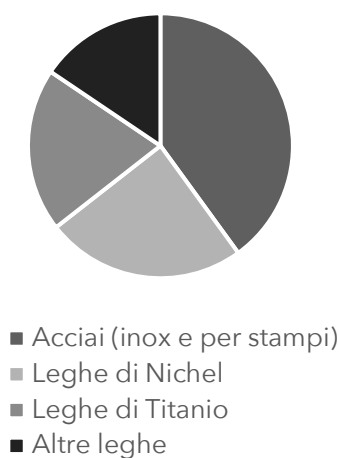


Figura 16 - percentuale di articoli analizzati su un determinato materiale

Un parametro cruciale per valutare la sostenibilità ambientale del processo riguarda l'efficienza di deposizione del materiale sulla superficie del componente. Questo valore indica la percentuale di polvere metallica effettivamente fusa rispetto a quella erogata. In letteratura, l'efficienza della tecnologia DED è oggetto di dibattito: alcuni studi riportano valori elevati fino all'80% [27], mentre in altri, come [12], è dell'14%. Tale discrepanza sottolinea come la gestione delle polveri perse costituisca tuttora una sfida e dipenda fortemente dal materiale impiegato.

Strettamente correlato all'efficienza è il *Buy-To-Fly ratio*, che misura il rapporto tra il materiale acquistato e quello effettivamente depositato sul componente. Questo rapporto permette di quantificare, in termini economici, lo spreco generato dalle diverse strategie produttive. Secondo l'analisi condotta da Liu et al. su *Green manufacturing open* [11], si riscontra una netta differenza tra le tecnologie analizzate: in particolare, la fabbricazione ibrida (additiva + sottrattiva) presenta un Buy-to-Fly 1,34:1 rispetto alla CNC tradizionale, che mostra un rapporto di 5,53:1, come riportato in *Figura 17*. Questo significa che se la materia prima ha un costo elevato, l'additiva risulta nettamente più conveniente.

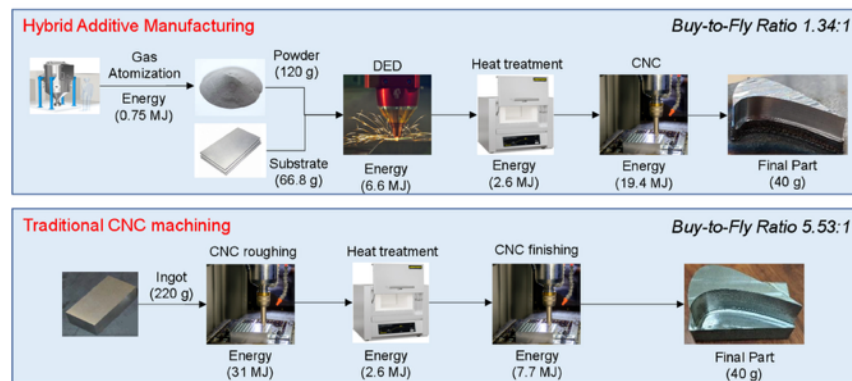


Figure 6. Energy and material consumption for the HAM/CNC process.

Figura 17 - consumo di materiale ed energia caso studio [11]

1.4.2. Scopo dell'analisi e confini del sistema

Nella maggior parte degli articoli scelti si cerca di confrontare le tecnologie tradizionali con quelle additive. In questo caso si parla di un **LCA comparativo**.

Ad esempio, Gouvenia et al. [27] nell'articolo *Life Cycle Assessment and Cost Analysis of Additive Manufacturing Repair Processes in the Mold Industry* mettono a confronto la tecnologia di riparazione convenzionale con la riparazione tramite DED sia in termini di sostenibilità ambientale che economici. In particolare, in questo caso studio si tiene in considerazione il processo che deve subire il componente da riparare, ovvero: preparazione della superficie (necessaria per la ripetibilità del processo), fase di deposizione della polvere (per la quale si considera anche la gas-atomizzazione della polvere) e successiva lavorazione meccanica per ottenere la superficie richiesta. La complessità insita nell'analisi dei processi di riparazione, in generale, è proprio il delimitare i confini del sistema.

In particolare, si sofferma anche sul definire il numero di cicli di utilizzo del componente rigenerato. Di fatto, un componente riparato non garantisce sempre le medesime prestazioni di durata di uno originale e, per questo, la vita utile viene stimata come una frazione di quella del pezzo standard.

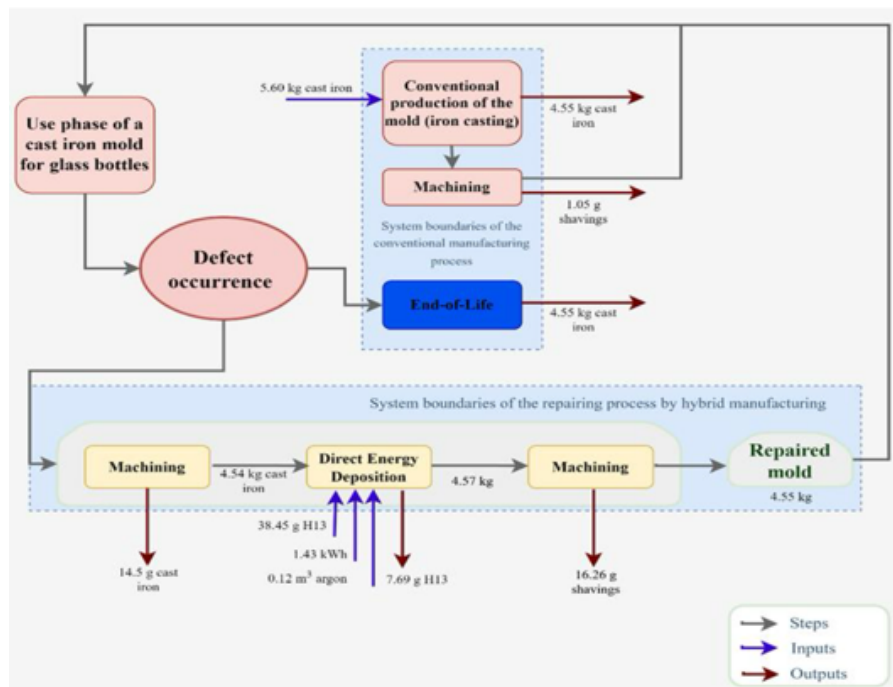


Figura 18 – schematizzazione confini dell'analisi, articolo [27]

Inoltre, se la vita utile dopo la riparazione è troppo breve, il vantaggio ambientale iniziale potrebbe essere annullato dalla necessità di interventi frequenti. Il difetto principale di

questo articolo è che i dati dell'LCI sono estratti da un manoscritto non reperibile, poiché mai pubblicato.

Un altro articolo che approfondisce il discorso della riparazione soffermandosi però sull'analisi del punto di break-even è *Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis* [28] nel quale si analizzano componenti critici come le palette di turbina.

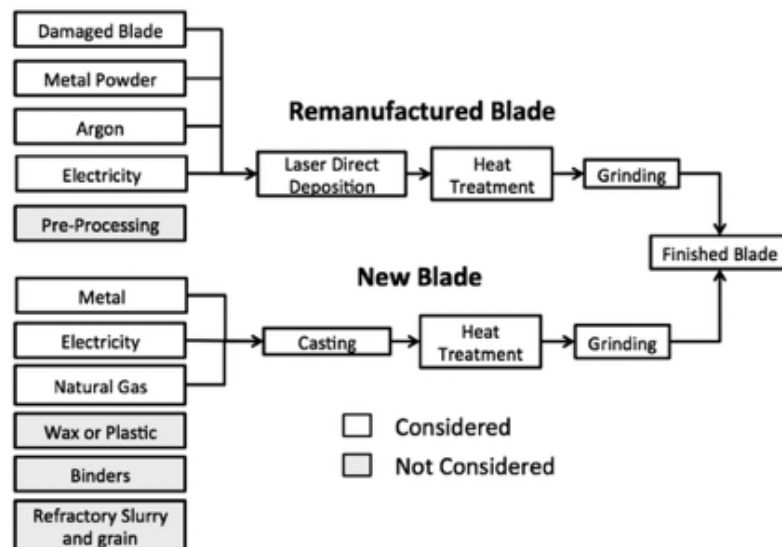


Fig. 11. System boundaries for the both processes.

Figura 19 – riparazione vs sostituzione

Si tratta sempre di un'analisi **comparativa**, tuttavia, l'attenzione in questo caso si sofferma sul punto di pareggio (*break-even point*). La sostenibilità della riparazione, in questo caso, non dipende solo dalla durata residua del pezzo, ma anche dalla sua complessità e dalla dimensione della parte da riparare (il punto di ottimo è raggiunto quando il volume è all'incirca il 10%).

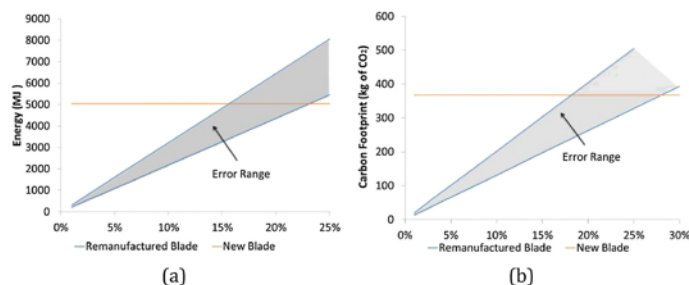


Fig. 12. (a) The total energy use and (b) potential environmental impacts of the LDD process in comparison with the investment casting process at different repair percentages.

Figura 20 - risultato del breakeven point

In questi casi si parla di confini **cradle-to-gate**, poiché si parte dalla materia prima e ci si ferma alla fase di utilizzo escludendola. Può essere definito anche **Cradle-to-cradle**,

poiché il fine vita di un pezzo diventa, tramite la riparazione, l'inizio di un nuovo ciclo produttivo.

Un altro esempio di **LCA comparativo** si trova nell'articolo *Comparative life cycle assessments of greenhouse gas emissions associated with directed energy deposition repairing and sand-casting replacement of a ship propeller* [29] nel quale si tratta la riparazione di un'elica navale danneggiata in lega di bronzo-alluminio, confrontandola con la sostituzione integrale ottenuta tramite fusione in sabbia.

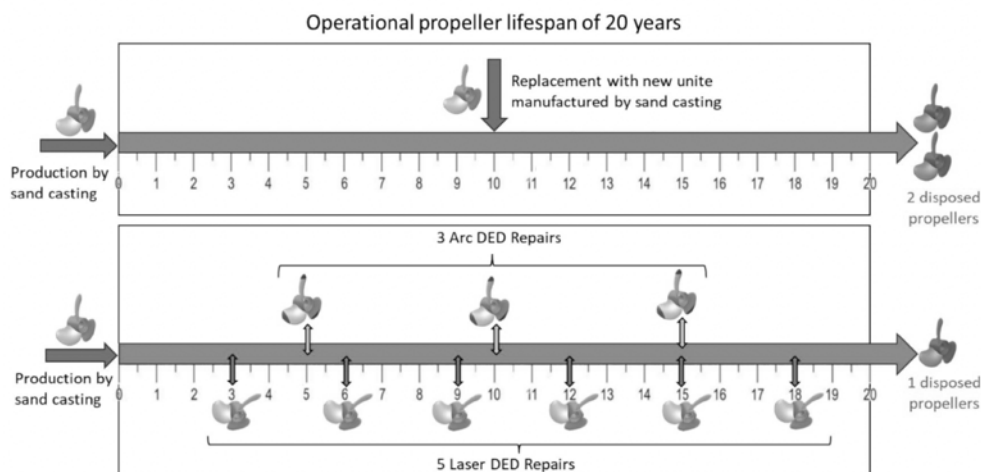


Fig. 1 Comparative analysis over timeframe of 20 years showing lifespan associated with propeller replacement (top image) versus lifespan if advanced DED repairs of hub and blade are performed

Figura 21 - laser-DED e arc-DED rispetto alla vita utile di un'elica di 20 anni

In questa analisi, si fa un confronto non solo con la sostituzione, ma anche tra riparazione arc-DED e riparazione laser-DED, evidenziando come la laser-DED venga utilizzata per le parti che richiedono maggiore qualità superficiale e precisione geometrica, mentre l'arc-DED per ricostruire grandi volumi di materiale e dove la velocità della riparazione è prioritaria rispetto alla precisione.

Gli autori, inoltre, sottolineano che per componenti come le eliche, la fase di utilizzo è cruciale, in particolare soffermandosi su quanto a lungo il pezzo riparato rimarrà in servizio rispetto al nuovo. Per questa ragione i confini considerati sono **Cradle-to-grave** e si include che l'investimento energetico della riparazione venga ripagato durante gli anni di funzionamento dell'elica.

Anche la **variabilità geografica** del *power mix* è un fattore importante quando si studia l'impatto ambientale. Infatti, se il mix energetico è ad alta impronta di carbonio, il vantaggio della riparazione potrebbe essere inferiore rispetto alla sostituzione, poiché la produzione della polvere metallica e dei macchinari DED richiedono molta elettricità. Per

questo la decarbonizzazione della rete elettrica agisce come moltiplicatore dei benefici ambientali della tecnologia additiva, rendendo la posizione degli impianti un fattore strategico.

Nel caso, invece, del **LCA predittivo**, la sfida principale è ottenere dati di inventario affidabili su processi che non sono ancora commercializzati. Due studi recenti [30] [31] illustrano efficacemente come l'analisi tramite i brevetti tecnologici possa essere impiegata come *foreground* per modellare i flussi di processo futuri.

Entrambi gli studi si concentrano su metodologie Directed Energy Deposition (DED): uno specifico sulla DED [30] brevettata a polvere e l'altro sulla WAAM [31] brevettata a filo ed arco elettrico.

Sotto il profilo analitico, entrambi gli articoli adottano una metodologia **gate-to-gate**, concentrando l'analisi sul consumo di energia elettrica, gas e polvere della macchina in esecuzione. Entrambi i testi, inoltre, puntano ad allineare la produzione di materiali ed energia a scenari temporali futuri (es 2030, 2035) in cui è prevista una decarbonizzazione delle reti energetiche.

Nell'articolo [30] *Prospective LCA of patented Direct Energy Deposition technology for additive manufacturing* l'attenzione è posta sull'ottimizzazione delle performance ambientali in base al materiale lavorato (**Titanio** e acciaio inox). Tuttavia, i risultati dimostrano che, sebbene il trend tenda a una riduzione degli impatti grazie alle innovazioni tecnologiche e alla decarbonizzazione, la sostenibilità risulta sempre molto legata al materiale impiegato e all'impatto che esso ha sul riscaldamento globale.

D'altra parte, in *Prospective life cycle assessment of future Wire Arc Additive Manufacturing deposition process for large-scale steel parts* [31] oltre a ricercare la riduzione dell'impatto ambientale grazie all'evoluzione delle tecnologie rispetto a quelle attuali, si propone di identificare quali varianti brevettate e quali configurazioni operative portino i maggiori benefici, definendo anche quali sono gli *hotspot* critici. A seguito dello studio, risulta che le tecnologie al plasma hanno efficienze e sostenibilità superiori rispetto a quelle ad arco elettrico e che il gas di schermatura **argon** è il principale responsabile degli impatti, contribuendo al carico ambientale per il 70%.

La definizione precisa dei limiti del sistema costituisce una fase fondamentale nell'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment (LCA). Tale attività risulta fondamentale non solo per garantire una corretta interpretazione dei risultati, ma anche

per consentire una strutturazione accurata del Life Cycle Inventory (LCI), in cui vengono esaminati e quantificati i flussi in ingresso e in uscita relativi a ciascuna fase del processo, con particolare attenzione ai contributi energetici e ai materiali coinvolti. Si osserva che nelle casistiche analizzate all'interno degli articoli trovati, la maggior parte dei casi riporta come modello scelto per i confini del sistema il Cradle-to-Gate, che interrompe l'analisi in corrispondenza della fase di utilizzo del prodotto, escludendola. Questa scelta è motivata dal fatto che è notevolmente complicato standardizzare i consumi relativi a questa fase perché dipendono strettamente dal tipo di componente e dall'utilizzo che se ne fa.

Un esempio di **Cradle-To-Gate** si trova nel caso di studio [11], in cui si analizza come *functional unit* una paletta di turbina.

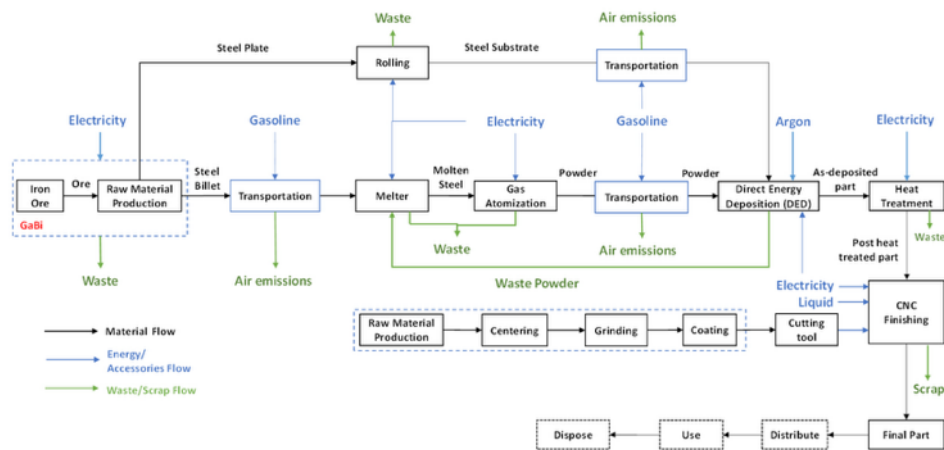


Figure 2. Detailed process flow diagram for HAM.

Figura 22 - identificazione del ciclo vita della paletta di turbina riparata con HAM

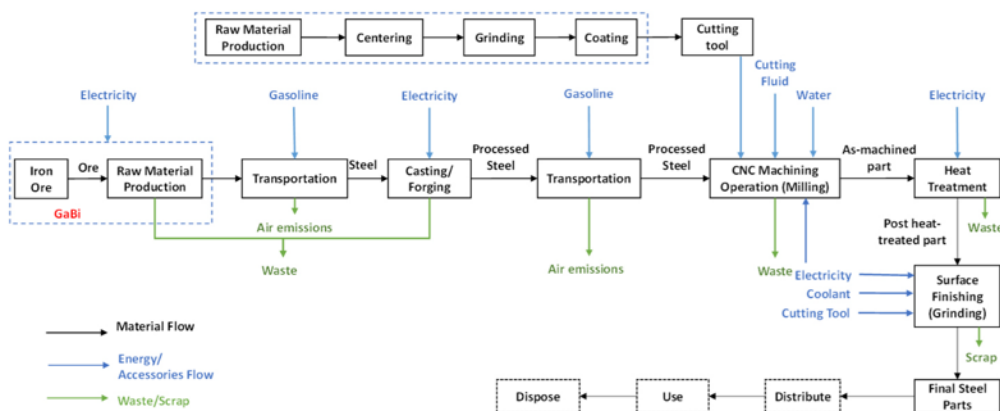


Figure 3. Detailed process flow diagram for CNC Machining.

Figura 23 - confronto con tecnologia per la produzione tradizionale

1.4.3. Raccolta dei dati

Per la costruzione del Life Cycle Inventory (LCI) è fondamentale raccogliere dati dettagliati riguardanti sia il consumo energetico, sia quello dei materiali, siano essi primari o ausiliari. Questa fase di raccolta dei dati è cruciale per ottenere un inventario accurato dei flussi di input e di output del sistema studiato.

Per la quantificazione di questi dati, generalmente si sfruttano tre principali modalità:

- l'utilizzo di database specializzati, quali USLCI, Ecoinvent o Chinese Lifecycle Database;
- la consultazione della letteratura scientifica e di studi precedenti;
- L'acquisizione diretta dei dati sperimentali da parte dell'esecutore delle prove.

L'*USLCI* [32](U.S. Life Cycle Inventory Database), sviluppato dal *National Renewable Energy Laboratory*, fornisce dati relativi ai processi produttivi e ai materiali del contesto industriale nordamericano e può essere integrato all'interno di software. *Ecoinvent* [33], sviluppato in Svizzera, è uno dei database più completi a livello internazionale e fornisce dati trasparenti e verificati su una vasta gamma di settori, costituendo un riferimento consolidato in ambito accademico e industriale.

Nella maggior parte dei casi, l'analisi si avvale di una combinazione integrata di tutte e tre le fonti informative a seconda della fase del ciclo vita che si tiene in considerazione.

Nel caso della fase di fabbricazione del componente mediante DED, i dati vengono generalmente raccolti tramite prove sperimentali di laboratorio, poiché nella letteratura scientifica e nei database ambientali non sono ancora disponibili dati sufficientemente standardizzati e rappresentativi. Si utilizzano spesso dati estrapolati dai database per valutare le fasi precedenti e successive alla deposizione.

1.4.4. Valutazione dell'impatto ambientale

Al fine di quantificare l'impatto ambientale di una determinata lavorazione, l'analisi sistematica della letteratura ha evidenziato l'impiego di software specifici per la valutazione del ciclo vita (LCA). Tali strumenti permettono di determinare i fattori di caratterizzazione per ogni flusso di inventario (input e output), convertendo i consumi di energia, polvere e gas in indicatori ambientali. Tra i software maggiormente utilizzati trovati nella ricerca spicca SimaPro, seguito da GaBi. Il database principale è Ecoinvent. Le metodologie di valutazione dell'impatto più ricorrenti sono ReCiPe, Eco-indicator 99 e CML 2001, applicate a diversi livelli di aggregazione: midpoint e endpoint. Sebbene tali metodi offrano una panoramica multicriterio dell'impatto, è possibile trovare articoli in cui l'analisi si focalizza solo su alcune categorie, ma in generale la principale è il Global Warming Potential, espresso in kgCO₂eq.

Nei casi in cui l'analisi è di tipo predittivo, è stato necessario utilizzare un database un database modificato sfruttando il tool di Python Premise, che consente di integrare i dati rilevati da Ecoinvent con le ipotesi evolutive dei settori energetici, industriali e dei trasporti, garantendo che i fattori di emissione siano coerenti con gli scenari futuri selezionati, come nel caso dell'articolo *Prospective LCA of patented Direct Energy Deposition technology for additive manufacturing* [30].

Nel caso in cui l'interesse sia di confrontare tecnologie o materiali differenti, è preferibile sfruttare la mono categoria del Global Warming Potential (GWP) ottenuta tramite la metodologia ReCiPe midpoint, in modo da poter confrontare i risultati in maniera limpida.

Un esempio significativo di questo approccio è riscontrabile nello studio *Carbon footprint of laser claddings: From raw materials and processing to wear protection solutions* [34], in cui viene condotta un'analisi LCA per valutare l'impronta di carbonio di diverse soluzioni di laser cladding (LMD, laser metal deposition) destinate alla protezione antiusura. La ricerca evidenzia come la scelta delle materie prime sia il fattore determinante per l'impatto ambientale totale, con variazioni estremamente marcate a seconda della lega scelta come evidenziato dalla Figura 24.

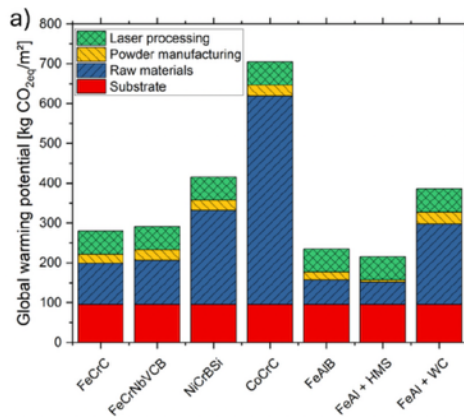


Figura 24 -impatto ambientale delle diverse leghe [34]

Analogamente, Pagone et al. nell'articolo Life cycle sustainability assessment of repair through Wire and Arc Additive Manufacturing [35] analizzano la tecnologia WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) confrontandola con la produzione ex novo dal punto di vista dell'impronta di carbonio. I risultati indicano che la riparazione tramite WAAM riduce l'impatto ambientale di molto, grazie all'elevata efficienza nell'uso delle risorse e all'evitata produzione primaria di acciaio. Lo studio conferma dunque che il beneficio ambientale è netto, anche nel caso vengano inclusi gli impatti legati ai trasporti.

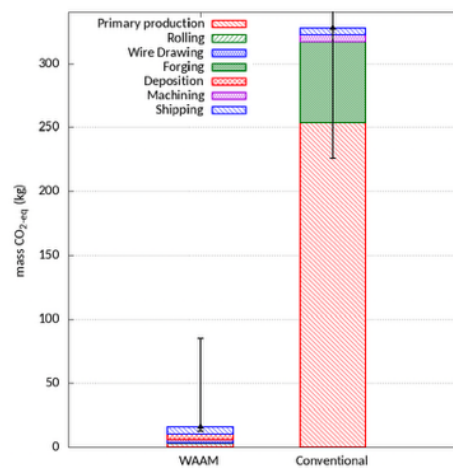


Figura 25 - confronto CO₂eq di due tecnologie differenti

in altri casi, l'analisi non si limita la Global Warming Potential, ma sfrutta molteplici indicatori per ottenere una valutazione più completa della sostenibilità. Questo approccio permette di avere una visione d'insieme delle interazioni tra processo e ambiente, come presentato nello studio di Liu et al. *LCA-based environmental sustainability assessment of hybrid additive manufacturing of a turbine blade* [11] sulla manifattura ibrida HAM.

Nello studio, che combina la deposizione diretta DED e la fresatura CNC, l'impatto ambientale è valutato quantitativamente secondo sei parametri principali della metodologia **CML 2001 midpoint**: GWP, AP (acidificazione), EP (eutrofizzazione), ADP (esaurimento delle risorse abiotiche) e ODP (riduzione dell'ozono). Questi permettono di evidenziare che la tecnologia HAM riduce l'impatto complessivo del 53% rispetto alla fresatura tradizionale, soprattutto grazie ad un buy-to-fly estremamente favorevole.

L'analisi identifica anche gli *hotspot* del processo ibrido, ovvero la fase di fabbricazione DED e il post processing CNC, che insieme concentrano il maggior consumo elettrico. Questo sottolinea che nonostante l'ottimizzazione rispetto alla fresatura tradizionale, l'efficienza energetica delle macchine rimane un fattore critico per l'ottimizzazione ambientale.

In conclusione, sono stati analizzati alcuni articoli che propongono un'analisi esaustiva di tutti i fattori di impatto sia nella prospettiva endpoint che midpoint, per fornire un quadro completo delle prestazioni ambientali.

Un esempio rilevante è reperibile in *Life Cycle Assessment and Cost Analysis of additive manufacturing repair processes in the mold industry* [27], in cui si analizzano i processi di riparazione additiva nell'industria degli stampi. Utilizzando il software SimaPro e il metodo ReCiPe 2016 endpoint (H), la ricerca valuta inizialmente 18 categorie di impatto. Successivamente, attraverso una revisione della letteratura, gli autori hanno assegnato un peso (da 1 a 10) per ogni categoria in base alla frequenza di utilizzo negli studi LCIA; il GWP riceve il punteggio massimo, essendo utilizzato nella maggior parte degli articoli. Sulla base di questa prioritizzazione, vengono selezionate le 7 categorie principali per l'analisi dettagliata.

#	Environmental Impact Categories Analyzed in LCA of AM	Weighting Scores
1	Global warming	10
2	Land use	6
3	Ozone formation, Human health	4
4	Ozone formation, Terrestrial ecosystems	4
5	Terrestrial acidification	4
6	Fossil resource scarcity	4
7	Fine particulate matter formation	3
8	Freshwater eutrophication	3
9	Ionizing radiation	2
10	Terrestrial ecotoxicity	2
11	Freshwater ecotoxicity	2
12	Marine ecotoxicity	2
13	Human carcinogenic toxicity	2
14	Human non-carcinogenic toxicity	2
15	Mineral resource scarcity	3
16	Marine eutrophication	2
17	Water consumption	1
18	Stratospheric ozone depletion	1

Figura 26 – attribuzione dei pesi

Similmente, in Life cycle assessment of metal products: A comparison between wire arc additive manufacturing and CNC milling [36] si confrontano la tecnologia WAAM con la fresatura CNC su tre geometrie differenti. Utilizzando SimaPro e il metodo ReCiPe midpoint (H), l'analisi considera i 18 indicatori standard, che successivamente vengono aggregati nei tre macro-indicatori endpoint:

- Salute umana
- Ecosistemi
- Risorse

I risultati dimostrano che la tecnologia WAAM risulti l'opzione ecologicamente preferibile per tutte e tre le geometrie analizzate, grazie ad un risparmio di materia prima che varia tra il 38% e il 68% rispetto al CNC. Questa riduzione comporta una decrescita dell'impatto ambientale complessivo tra il 12% e il 47%.

1.4.5. Integrazione tra Life Cycle Assessment (LCA) e Life Cycle Costing (LCC)

Un ulteriore aspetto emerso dall'analisi della letteratura riguarda la valutazione economica dei processi additive. È stato osservato che la maggior parte degli studi tende a scindere l'analisi ambientale da quella economica; sono infatti pochi gli articoli che applicano congiuntamente le metodologie di LCA e LCC.

Dalle ricerche si può vedere come la tecnologia DED, come del resto la maggior parte delle tecnologie di manifattura additiva, offre una significativa riduzione dei costi per lotto di produzione, da piccoli a medi, dove si abbattano i costi fissi legati al numero di macchinari necessari.

Inoltre, la letteratura evidenzia che l'impatto della complessità del design sul costo finale è sensibilmente inferiore rispetto alle tecnologie tradizionali, rendendo la produzione additiva competitiva per geometrie elaborate. Infatti, i casi studio analizzati, pur non tenendo in considerazione il costo, riportano sempre componenti con una certa complessità strutturale, come palette di turbine o elementi dotati di canali conformali. In questi scenari, il vantaggio è duplice poiché da un lato l'LCC beneficia della rigenerazione di un componente dal valore intrinseco elevatissimo (nel caso studio in cui il costo base dello stampo per bottiglie è di 1000€ [27]), evitando il costo di un nuovo acquisto e dell'eventuale recupero di materiale; dall'altro, l'LCA evidenzia un possibile risparmio di risorse, poiché l'energia necessaria e i materiali richiesti sono minori.

Un altro articolo che collega il lato economico a quello ambientale è [37], in cui si confrontano diverse tecnologie, evidenziando strutture di costo profondamente diverse. Mentre nella **WAAM** la voce di spesa principale è rappresentata dalle operazioni di post-processing, la tecnologia **Selective Laser Melting (SLM)** è fortemente condizionata dal costo della macchina e dai costi del personale (labour). Al contrario, nelle lavorazioni **CNC tradizionali**, il costo macchina domina il bilancio economico, seguito dal post-processing e dalla manodopera, rendendo questa tecnologia complessivamente più onerosa per geometrie complesse o per interventi di manutenzione specialistica.

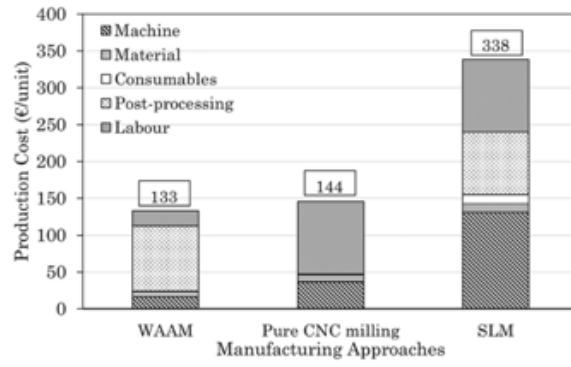


Fig. 11. Unit production cost for WAAM, pure CNC milling, and SLM approaches.

Figura 27 - impatto ambientale vs impatto economico

1.4.6. Research Gaps

Dall'analisi effettuata sugli articoli che applicano la metodologia del Life Cycle Assessment (LCA) alla tecnologia di Directed Energy Deposition (DED) sono emerse alcune lacune metodologiche che rendono necessario un approfondimento sperimentale. La principale criticità riscontrata è legata alla **mancanza di dati primari dettagliati**. Molti articoli presenti in letteratura riportano stime teoriche o un consumo nominale della macchina, senza una distinzione accurata tra i vari contributi. Un esempio emblematico è riscontrabile nello studio [11] relativo alla riparazione di una paletta di turbina calcolano l'energia associata a **tutto** il processo di deposizione tramite la seguente formula:

$$E = Pt = (\sqrt{3} * V * I * p_f) * \frac{t}{1000}$$

Equazione 2 – energia in funzione della potenza

Dove P è la potenza assorbita in watt, V è la tensione in Volt che corrisponde a 240 V, I è la corrente in Ampere e p_f è il fattore di potenza del sistema. Tale approccio, però, non consente di isolare i consumi specifici dei sottosistemi, portando a una visione aggregata che può nascondere inefficienze e opportunità di ottimizzazione.

Nel caso dell'articolo [27] si sottolinea un'altra problematica, le stime dei costi risultano parziali, a causa della natura confidenziale di molti dati industriali che impedisce la formulazione di un modello totalmente trasparente.

A questo, viene spesso associata una semplificazione eccessiva dei **confini del sistema** (*system boundaries*). Molti modelli trascurano la complessità reale, escludendo fasi che hanno un impatto ambientale ed economico non trascurabile.

È stato inoltre evidenziato che, nonostante la ricerca mirata a individuare casi di riparazione, la maggior parte degli articoli si concentra sulla **produzione ex novo** tramite tecnologia additiva e non sul processo di riparazione, che introduce variabili aggiuntive, come la rimozione del materiale danneggiato e la preparazione del substrato. Eppure, il recupero di un componente esistente risulta essere una strategia fondamentale per la sostenibilità, avendo il potenziale risparmio di risorse rispetto alla produzione di uno nuovo.

Infine, l'analisi ha riscontrato ulteriori aree di incertezza relative all'efficienza della polvere e all'uso dei gas inerti.

Per quanto riguarda quest'ultimo tema, negli articoli analizzati è stato riscontrato che la maggioranza utilizza gas argon e il calcolo del quantitativo di gas è spesso effettuato in

modo approssimativo, trascurando un contributo che può essere significativo nel bilancio ecologico complessivo.

Alla luce di queste evidenze, la fase sperimentale di questa tesi si pone l'obiettivo principale di superare le limitazioni sulla raccolta dei dati di inventario. L'analisi si focalizzerà non solo sul consumo energetico totale, ma sulla mappatura granulare di ogni flusso di input e output, con particolare attenzione al processo di riparazione e alla gestione ottimizzata dei gas e dei materiali di scarto.

2. Secondo capitolo – sperimentazione e definizione dell’LCI

Oltre alla definizione dello stato dell’arte dell’LCA applicato alla tecnologia DED, il presente lavoro si pone due obiettivi principali: in primo luogo, mappare e valutare il consumo di risorse primarie e di energia legate al processo di deposizione; in secondo luogo, definire un modello rigoroso per la stima preventiva dei contributi energetici e materie prime in funzione dello specifico scenario di produzione. Tali obiettivi sono stati perseguiti attraverso una campagna sperimentale condotta sul sistema Laserdyne 811 di Altform (ex Prima Additive).

Per il raggiungimento degli obiettivi prefissati, è stata condotta un’analisi circoscritta al perimetro del sistema DED (gate-to-gate), rilevando i dati di consumo durante la fabbricazione di campioni sperimentali (*test jobs*).

Successivamente, il modello predittivo sviluppato è stato validato sperimentalmente tramite dei casi studio dedicati (capitolo 3.2) e su questi sono stati effettuati anche la valutazione dell’impatto economico e di quello ambientale, facendo un confronto anche con la sostituzione del componente.

2.1.1. Descrizione del sistema in analisi

La macchina oggetto dell'analisi è la **Laserdyne 811** di **Prima Additive**. Al fine di caratterizzarne il comportamento energetico, è stata preliminarmente analizzata la configurazione del *box* di lavoro, al cui interno è presente la macchina in esame e i relativi sottosistemi. (Figura 28)

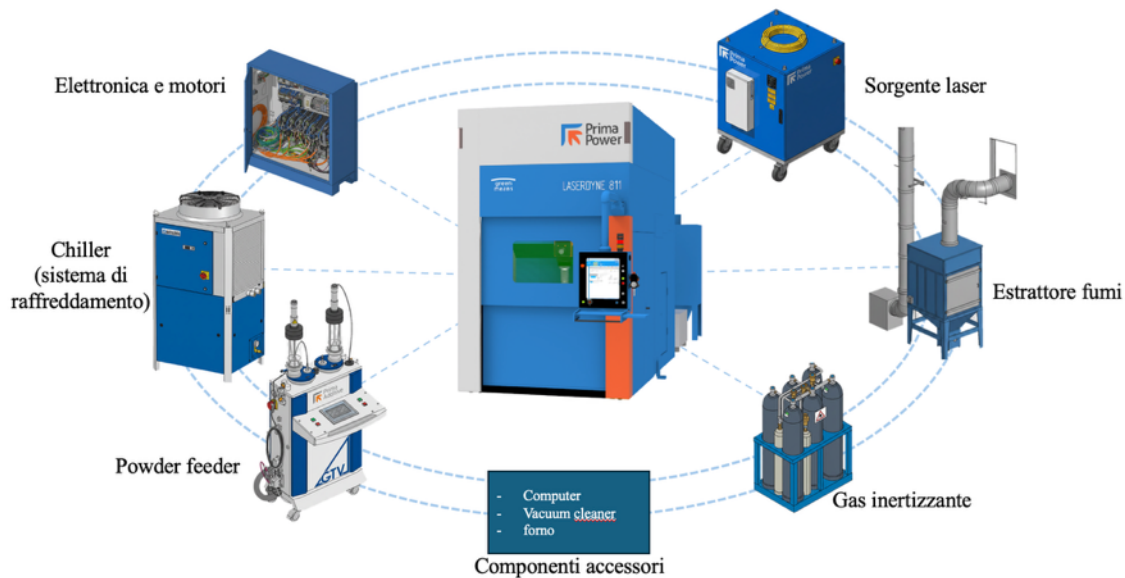


Figura 28 - descrizione grafica del box e dei suoi accessori

Per una corretta valutazione dei consumi energetici associati al processo di deposizione di polvere, non è sufficiente considerare esclusivamente l'assorbimento del modulo principale (in Figura 28, identificata con l'elemento al centro). Alla realizzazione della produzione, concorrono diversi sottosistemi ausiliari, sempre presenti all'interno del *box* di riferimento. Tali elementi, pur non intervenendo direttamente nella deposizione del materiale, risultano fondamentali per il corretto funzionamento e la stabilità del processo, influenzando in modo significativo il bilancio complessivo energetico.

Nello specifico, nel *box* è presente:

- Il **corpo macchina** rappresenta l'elemento principale. È un sistema di Additive Manufacturing multiasse, con una camera di lavoro di grandi dimensioni. La macchina integra una sorgente laser in fibra e una testa di deposizione, che permette il flusso di polvere metallica e di gas inerte. La flessibilità operativa e la capacità di gestire geometrie complesse sono assicurate da una **cinematica avanzata** che coordina i movimenti degli assi della testa con quelli della tavola porta-pezzo, consentendo di effettuare riparazioni e sostituzioni.

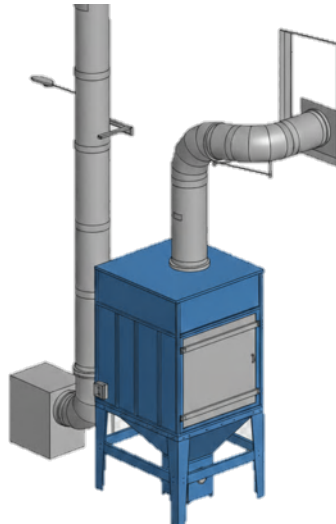


Figura 29 - sistema di estrazione fumi

- Il **sistema di estrazione dei fumi**, che svolge il ruolo di far evacuare i fumi dal volume di lavoro durante tutta la fase di deposizione e si disattiva 600 secondi dopo il termine. (Figura 29).
- Il contributo della **sorgente laser** *Figura 30*, che genera il fascio laser tramite una fibra ottica, presenta tre step caratteristici. Il primo è l'accensione della sorgente laser tramite manopola, il secondo è la condizione di laser armato (condizione "ready" o "armed") e infine il terzo, che si presenta in fase di deposizione e consolidamento del materiale, è legato all'emissione del laser, che dipende dalla potenza settata dal programma per la deposizione da effettuare. La valutazione riguardo le potenze caratteristiche di queste fasi, viene valutata nella prova presente nella sezione 2.1.5.3.

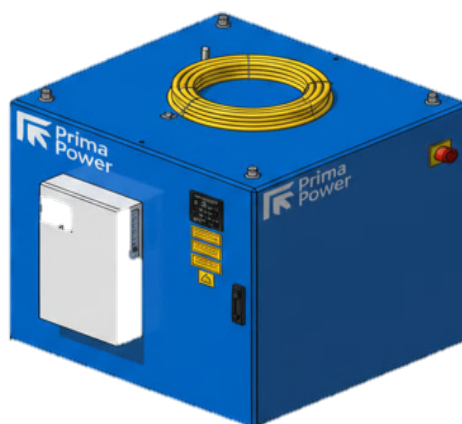


Figura 30 – laser CYFL-TERA HP CW YTTERBIUM FIBER LASER

- Un ulteriore contributo è fornito dai **motori** destinati alla **movimentazione degli assi**, i quali, per essere attivati, è necessario che si accenda anche il **PLC** della macchina
- un **sistema di ventilazione** Figura 31 di tutto il sistema elettronico, integrato nella macchina stessa, che entra in funzione ogni volta che la temperatura del vano motori raggiunge valori compresi tra 29.5°C e 30°C, questo succede in maniera periodica ogni 5 minuti per una durata di ca. 2 minuti.



Figura 31 – elettronica dietro il corpo macchina e sistema di ventilazione

- Il **sistema di raffreddamento** (o “*Chiller*”, Figura 32) per il laser e la testa di deposizione e ha il compito di mantenere la temperatura di uscita dell’acqua di raffreddamento entro un limite massimo di 22°C. Per questa ragione ha un comportamento periodico e si attiva quando la temperatura di uscita del circuito raggiunge il limite riportandola a 20°C. Questa operazione avviene sia a macchina pronta per l’esecuzione del processo che per la sua fase operativa vera e propria; tuttavia, nella prima condizione si attiva ogni 15 minuti per 2 minuti, mentre nella seconda ogni 5 minuti per 2 minuti, come la ventola per il raffreddamento dei motori.

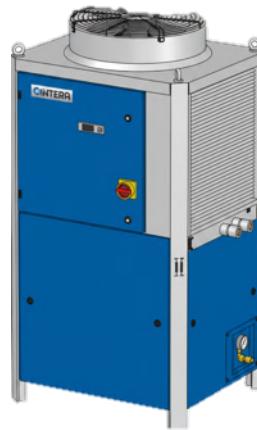


Figura 32 - Chiller

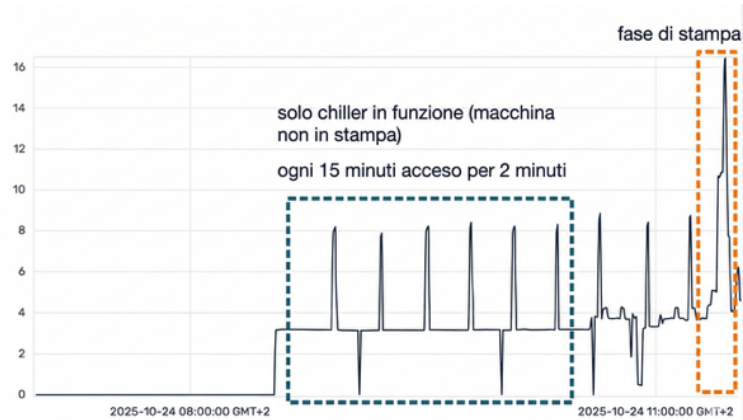


Figura 33 - andamento periodico, riparazione del 24/10/25; effettiva deposizione durata 2 minuti e 30 sec

- **Il Powder feeder**, che consente la deposizione della polvere tramite l'azione combinata della rotazione dei dischi sotto gli hopper (ovvero i contenitori in vetro) e quella della variazione di pressione del gas di trasporto della polvere. (Figura 34)



Figura 34 - powder feeder

- Oltre al gas di trasporto, la testina espelle anche il gas di protezione *shielding*. Questo arriva direttamente dalle **bombole** che si trovano all'esterno dello stabilimento.

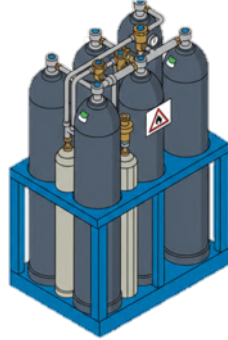


Figura 35 – bombole di gas

- **Il PC**, che viene percepito dal multimetro del box.
- oltre a questi, sono presenti il **forno in vuoto** e il *vacuum cleaner* che però si considerano esterni alla fase di esecuzione.

2.1.2. Estrazione dei dati – Energia

In questa fase risulta fondamentale caratterizzare tutti i contributi di potenza afferenti al *box* di produzione, a seconda di determinati parametri di processo al fine di determinare il consumo energetico.

Si procede dunque alla misurazione della potenza, l'obiettivo è valutare la potenza istantanea nel tempo, prendendo una misura ogni Δt , ottenendo poi una serie numerica il cui integrale è l'energia totale assorbita dal sistema. Questo metodo tiene in considerazione anche picchi e transitori, rendendo la misura più precisa e sensibile.

Per l'acquisizione dei dati si sfrutta **un database online di Siemens Industrial Edge** che registra in tempo reale i valori istantanei di tensione, corrente, potenza ed energia dell'intero *box* che ospita il sistema DED.

Fin dalle fasi iniziali della sperimentazione, è emersa in modo evidente la presenza di problematiche intrinseche al software stesso relative alla precisione nell'estrazione dei dati, che si manifestavano con la lettura di valori nulli e con fluttuazioni importanti nei *dataset*. Di conseguenza, è stato indispensabile eseguire un processo di pulizia preliminare dei dati nell'ambiente di programmazione Matlab, di cui parleremo in seguito, al fine di garantire l'affidabilità e la corretta successiva elaborazione dei dati.

L'analisi si è focalizzata sulla registrazione dei profili di potenza durante una specifica campagna sperimentale, riassunta di seguito:

- Accensione graduale dei contributi della macchina (22.10.25)
- Riparazione utensile parte 1 (23.10.25)
- Riparazione utensile parte 2 (24.10.25)
- costruzione cubetti (31.10.25)
- costruzione ruota dentata (4.11.25)
- riparazione denti lama trancia (20.11.25)
- costruzione provini di trazione in verticale (25.11.25)
- costruzione provini di trazione in orizzontale (26.11.25)
- prove misurazione contributi fissi (26.11.25)
- prove accensione solo laser da 600 W a 1100 W (2.12.25)
- prove accensione solo laser da 1200 W a 1500 W (4.12.25)
- prove flussaggio gas (16.12.25)
- Calcolo energia per la deposizione dei provini (19.12.25)

2.1.3. Analisi preliminare - Energia

La fase preliminare di bonifica dei dati costituisce una parte metodologica cruciale per garantire per un'accurata comprensione dei contributi energetici in esame. Il parametro fondamentale di tale analisi è il **tempo di campionamento**, ovvero ogni quanto viene estratto un dato. L'ampiezza esatta di questi intervalli non è un valore fisso ma viene scelta a posteriori nella fase di estrazione del file .csv.

Se in una fase esplorativa iniziale, l'obiettivo era quello di visualizzare e comprendere le variazioni macroscopiche dei contributi energetici sul grafico ($dt=30$ s), nelle sessioni successive si è reso necessario un progressivo affinamento dell'analisi e dunque un restringimento dell'intervallo di campionamento ($dt=1$ s).

Questo processo di affinamento è stato supportato anche da una **fase di pulizia dei dati** tramite *Data Cleaning* di MATLAB [38]. Questa estensione è in grado di identificare le anomalie e correggerle. In particolare, è stato affrontato il problema dei *missing data*, per i valori di potenza assenti o registrati come nulli. Tali anomalie possono essere derivanti da diversi punti critici nel processo di acquisizione, trasmissione o conversione dei dati. I dati mancanti, se non gestiti adeguatamente, possono compromettere significativamente la qualità dell'analisi. I metodi per affrontare i *missing data* dipendono dalla loro classificazione. Ci concentreremo su Dati *Missing Completely At Random* (MCAR), che si verificano quando la probabilità che un dato sia mancante è indipendente sia dai valori osservati che da quelli non osservati. A seconda della classe in cui si ritrovano i dati mancanti, è possibile selezionare il metodo di riempimento più adeguato. Un approccio generale è l'utilizzo del *Nearest Valid Value*, che consiste nel sostituire il valore mancante con il dato valido immediatamente precedente o successivo nella sequenza temporale.

Se i dati di potenza vengono letti ad intervalli di tempo Δt maggiore di 1 secondo, diventa necessario applicare un'approssimazione per rappresentare l'andamento della potenza all'interno di quell'intervallo. Le opzioni di questa approssimazione sono:

- **valore mediano**, scelto per l'analisi
- valore medio
- valore finale dell'intervallo

Quando si effettua un'aggregazione di questo tipo, i dati presentano una fluttuazione molto evidente, che, quando invece si considerano intervalli più ristretti, non si verifica.

Per questa ragione, con intervalli più ampi, devo necessariamente aggiungere un'ulteriore fase di *Smoothing* per attenuare l'oscillazione dei valori letti.

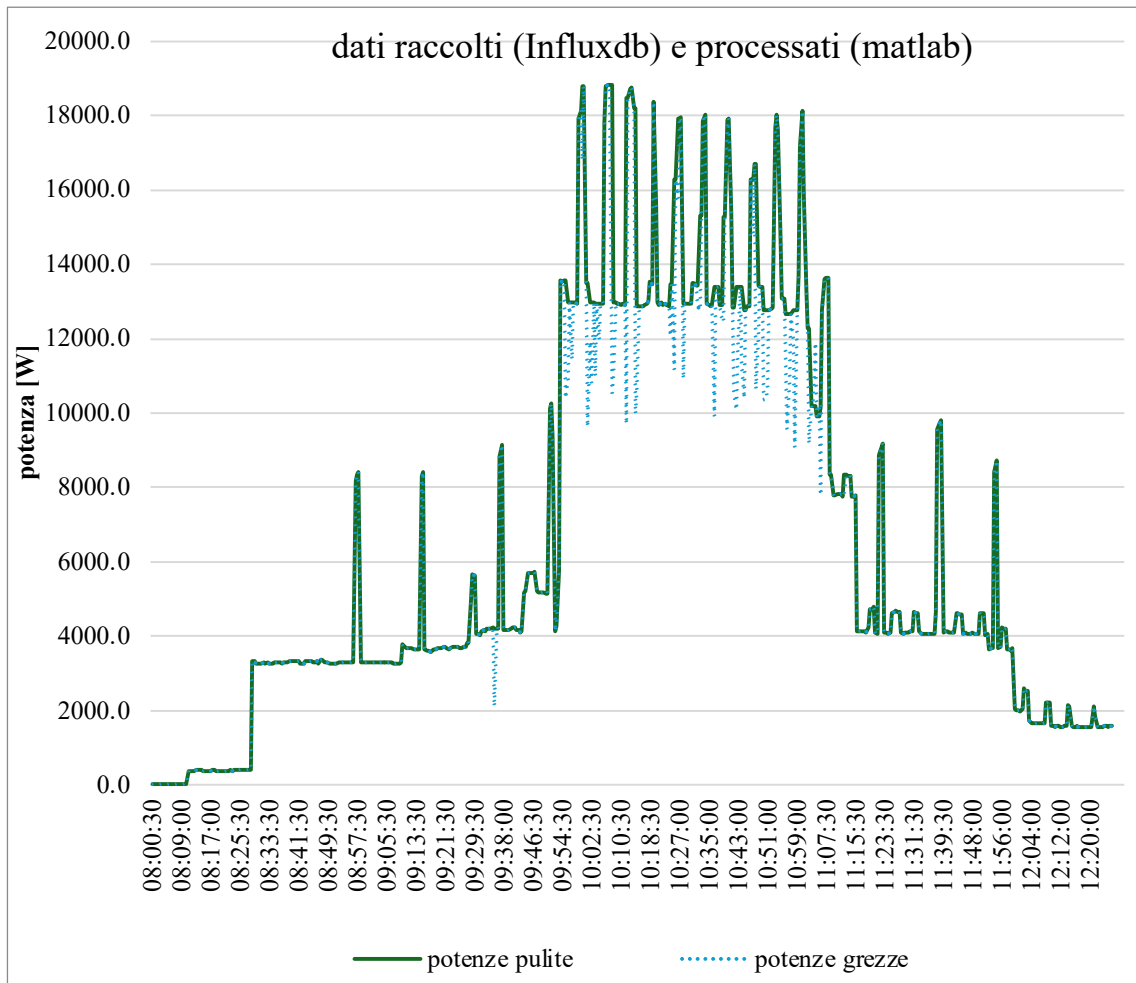


Figura 36 - esempio smoothing dati in un diagramma che presenta grandi fluttuazioni

2.1.4. Contributi considerati - Energia

Le prove sperimentali condotte sono state numerose, con priorità in questa fase iniziale di stabilire una metodologia efficace per l'interpretazione dei dati estratti. Di conseguenza, l'obiettivo delle prime operazioni di produzione o riparazione è stato esclusivamente rivolto alla valutazione di quali parametri di processo fornissero i *dataset* più rappresentativi e idonei per l'analisi.

Le esperienze di laboratorio svolte hanno permesso di evidenziare la necessità di una classificazione dei contributi energetici in funzione della modalità con cui essi si manifestano durante la fase di deposizione.

In particolare, tali contributi possono essere distinti in **tre categorie principali**, ciascuna caratterizzata da specifiche dinamiche di assorbimento e da un grado di continuità nel consumo di potenza diverso.

Tali categorie, rappresentate in *Figura 37*, sono:

- **Contributi fissi**, attivi per l'intera durata del processo e indipendenti dai parametri operativi, i quali generano un livello costante di assorbimento energetico che costituisce il plateau di base del consumo complessivo.
- **Contributi periodici**, che si ripetono nel tempo con una regolarità precisa.
- **Contributi variabili**, che mutano in funzione delle condizioni operative istantanee, dei parametri di processo e del percorso di deposizione, questi ultimi rappresentano quindi la parte più dinamica e dipendente dalla reale attività di fabbricazione.

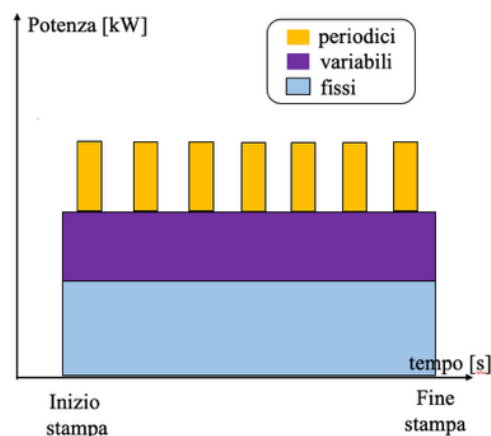


Figura 37 - rappresentazione dei contributi

2.1.5. Casi di studio analizzati – Energia

2.1.5.1. Costruzione ruota dentata (4.11.25)

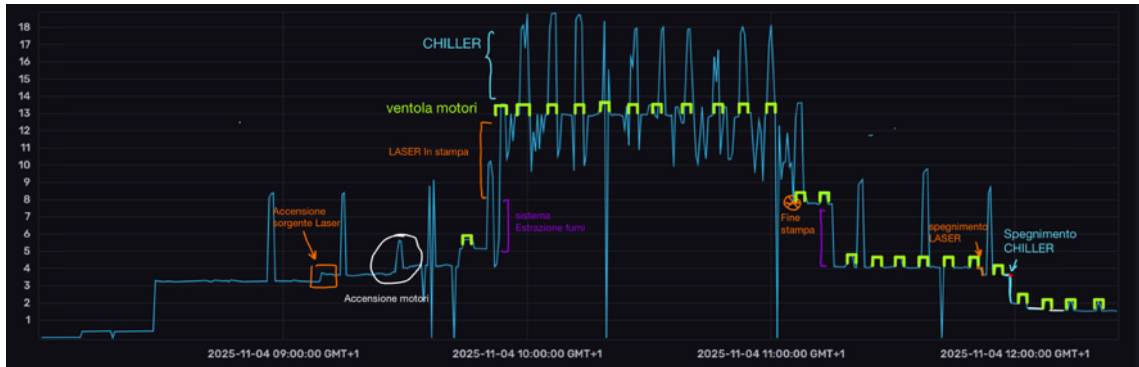


Figura 38 - esperimento ruota dentata 4/11/25

Un esempio significativo della metodologia di rilevazione dei diversi contributi energetici e la loro classificazione è riportato in *Figura 38*. Nello specifico, si riporta il grafico relativo alla costruzione di un'ora di una ruota dentata, estratto da *Influxdb*. Dal grafico è possibile distinguere chiaramente le diverse fasi operative:

- Una fase preparatoria, che comporta l'accensione del generale del box, che in questo caso comprende l'avviamento non solo del sistema principale e del Chiller ma anche della sorgente laser e dei motori, preceduti dal PLC.
- Fase di “*laser Armed*”: un contributo relativo allo stato di laser *ready*, regime di preaccensione fondamentale per la stabilità della sorgente e rappresentato da un gradino precedente l'inizio della deposizione. Tuttavia, inizialmente questo contributo era stato ignorato.
- Nel momento in cui la deposizione ha inizio, il laser inizia a fondere la polvere e si accende anche il sistema di estrazione dei fumi. La costruzione prosegue con un'alternanza di picchi e valli caratteristici dell'accensione periodica del Chiller e della ventola per il raffreddamento dei motori.

Nella Tabella 1 viene riportata la classificazione dei carichi di potenza del sistema Laserdyne 811, suddivisi in base alla loro natura operativa: fissi, periodici e variabili.

<i>contributi fissi</i>	<i>Stima iniziale potenze</i>
	Chiller acceso 1.5-1.7 kW
	Laser "ready" 0.6-0.8 kW
	Macchina accesa (PLC acceso e luci) 1.3- 1.5 kW
	Estrazione fumi (durante l'emissione del laser è sempre in funzione) 3.7 kW
	Motore in tensione 0.5-0.6 kW
<i>contributi periodici</i>	
	Picco del Chiller 24 minuti in 1 ora 4-6 kW
	Ventola motori 24 minuti in 1 ora 0.4-0.6 kW
<i>contributi variabili</i>	
	Laser in emissione $?\frac{P_{set}}{\eta}$
	Powder feeder ?
	Movimentazione assi ?

Tabella 1 - classificazione e stima degli assorbimenti di potenza del sistema DED suddivisi per regimi di funzionamento (fissi, periodici e variabili)

Una volta identificate tutte le potenze caratteristiche, e puliti i dati tramite *Data Cleaner*, sono stati scalati prima di tutto i contributi periodici, che sono quelli maggiormente identificabili nel grafico (Figura 40), e successivamente si scalano tutti i contributi fissi per come sono stati identificati in questa prima fase, come viene rappresentato in Figura 41.

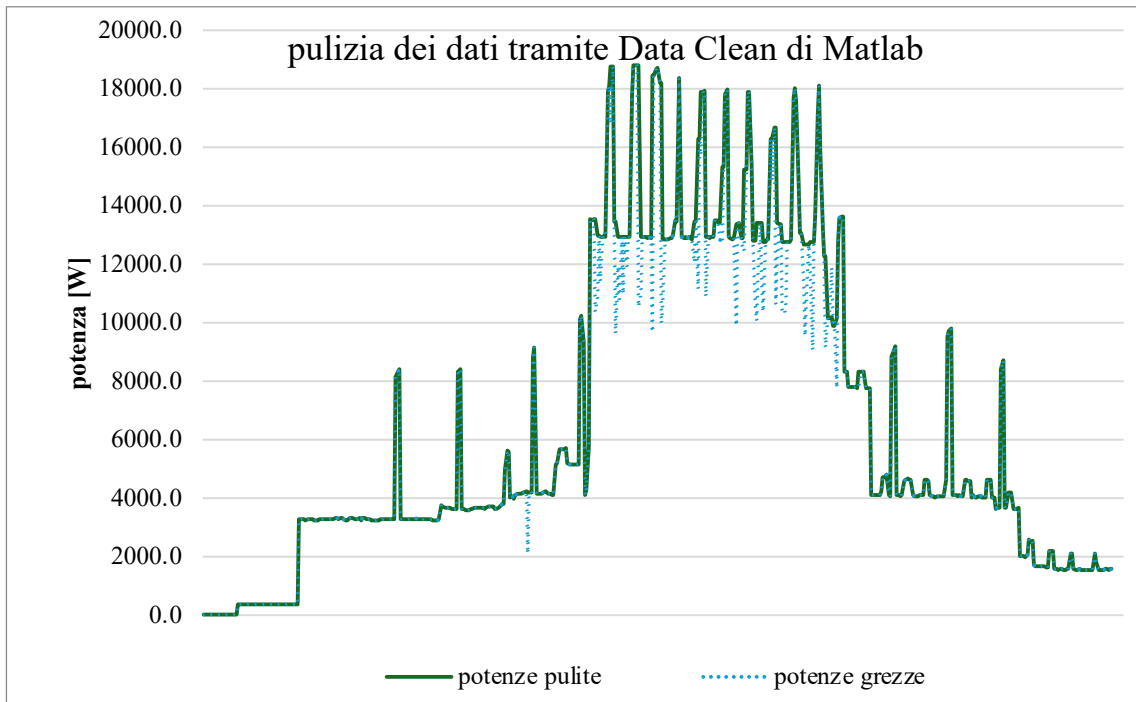


Figura 39 - dati di partenza

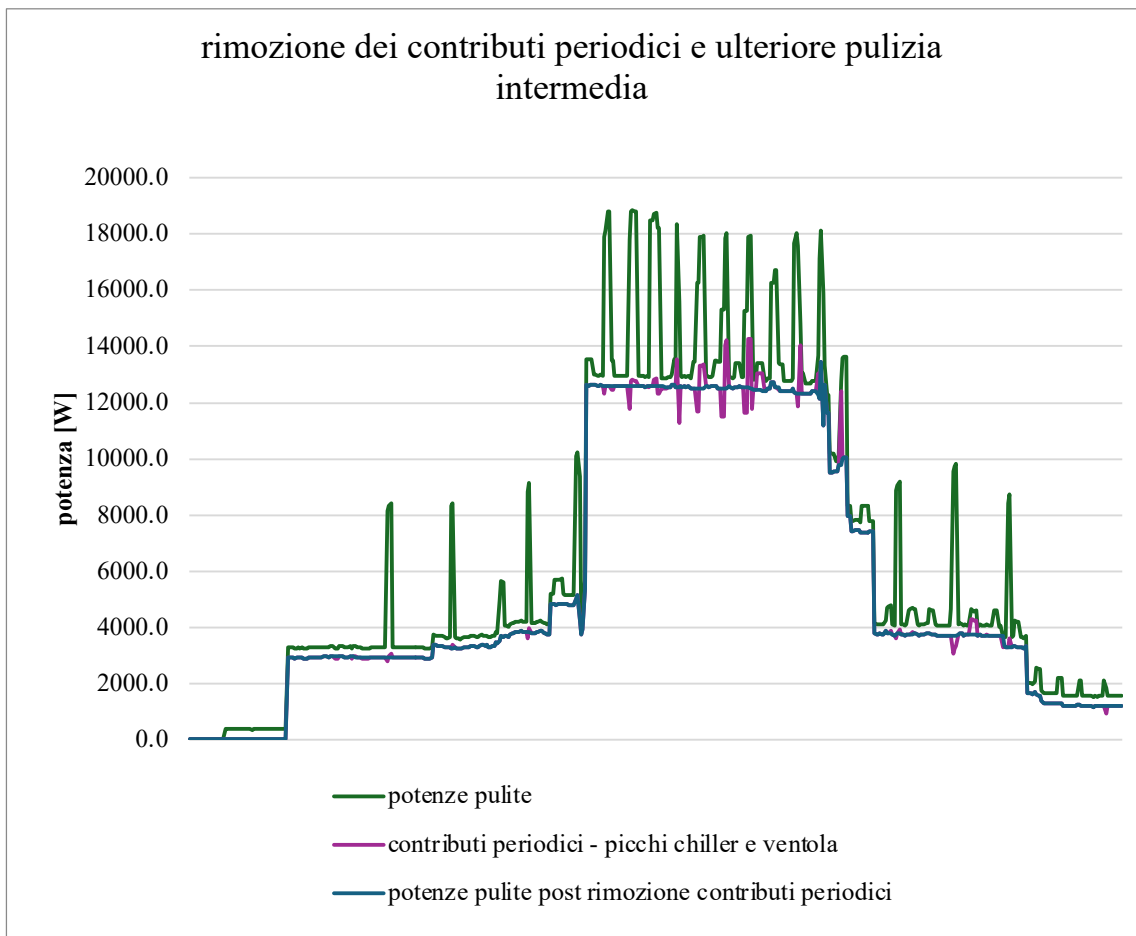


Figura 40 - rimozione contributi periodici di chiller e ventola di raffreddamento elettronica

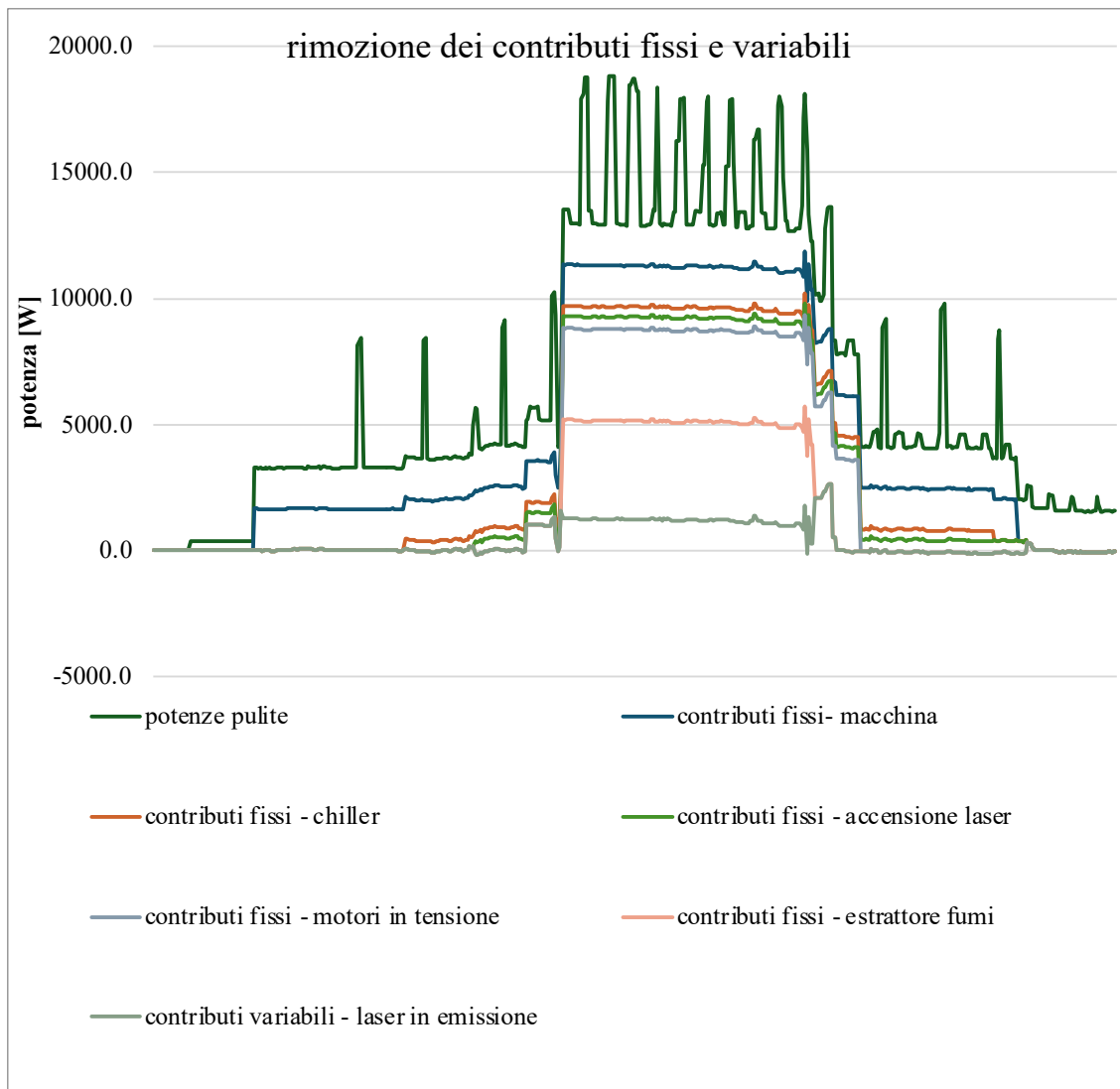


Figura 41- rimozione contributi fissi e contributo del laser in emissione

L'analisi iniziale ha evidenziato una serie di criticità metodologiche e di acquisizione dei dati che ci danno delle indicazioni per le stampe successive.

Il primo elemento da sottolineare, riguarda la **pulizia dei dati** che deve essere effettuata in maniera più efficiente possibile, poiché in questo esempio emerge un'anomala oscillazione del profilo di potenza assorbita in corrispondenza del punto di spegnimento del laser, molto probabilmente influenzata dalla scelta **dell'intervallo di campionamento** troppo ampio (30 s) che comporta un'approssimazione del valore caratteristico di potenza all'interno dell'intervallo.

In secondo luogo, è stata riscontrata la presenza di un **delta di potenza** assorbita di più di 1 kW durante la fase di emissione del laser, la cui origine non è stata immediatamente identificata.

Di fatti, inizialmente era stata effettuata una stima preliminare della potenza assorbita dal laser in fase di emissione sulla base dell'efficienza nominale dichiarata dal costruttore (25-30%), la quale ha determinato una sottostima dell'assorbimento reale. Questa discrepanza ha reso indispensabile la controverifica effettuata nelle prove del 2 e 4 dicembre, per il calcolo della potenza assorbita dal laser in emissione.

Oltre a questo, è stato necessario integrare nel modello la potenza dissipata dal laser nello stato “armed” (o “ready”), un contributo che inizialmente era stato trascurato. Le prove sperimentali del 25 novembre hanno permesso di quantificare tale assorbimento con un valore definito di 980 W.

Questi dati sono stati valutati in maniera approssimativa per comprendere l'andamento dei vari contributi e una prima stima dell'energia assorbita.

Viene identificata dunque una prima formulazione per il calcolo energetico, scritta come segue:

$$E_{assorbita,1h} = \left(\sum_{j=1}^n P_{j,fissi} \right) * 1h + \sum_{k=1}^m P_{k,periodici} * t_k + P_{laser} * t_{laser\ acceso} + \sum_{i=1}^l P_{i,variabili} * t_i$$

Equazione 3 – energia in funzione dei contributi

2.1.5.2. *Accensione in sequenza dei contributi + inizio di una deposizione (25.11.25)*

Come sottolineato, è stato necessario affinare la stima delle potenze assorbite. Per fare questo è stata effettuata una prova con l'accensione sequenziale di tutti i contributi, leggendo la variazione a ogni accensione. Il processo in esame è stato la produzione di 3 provini di trazione in 316L posizionati in verticale. Il tempo di campionamento in questo caso è stato ridotto a 1s, riducendo così le oscillazioni dei valori di potenza e dunque migliorando la precisione e incrementando notevolmente il numero di dati da elaborare. Per questo è stato necessario considerare, non tutta la durata del processo, bensì solo la fase iniziale e finale separatamente.

La procedura operativa di avvio del macchinario è stata dunque analizzata in termini di assorbimento di potenza elettrica:

1. Nella condizione iniziale, l'unico consumo registrato è imputabile all'illuminazione che comporta un dispendio di 400 W. La prima fase operativa consiste nell'accensione della macchina centrale, necessaria per alimentare di tutte le altre componenti (Figura 42) Questa operazione si esegue attivando il generale tramite manopola e premendo il pulsante di avviamento (identificato come A nel computer di bordo in Figura 42). L'avvio della macchina comporta un primo incremento di potenza assorbita, che si stabilizza intorno ad 1.6 kW.

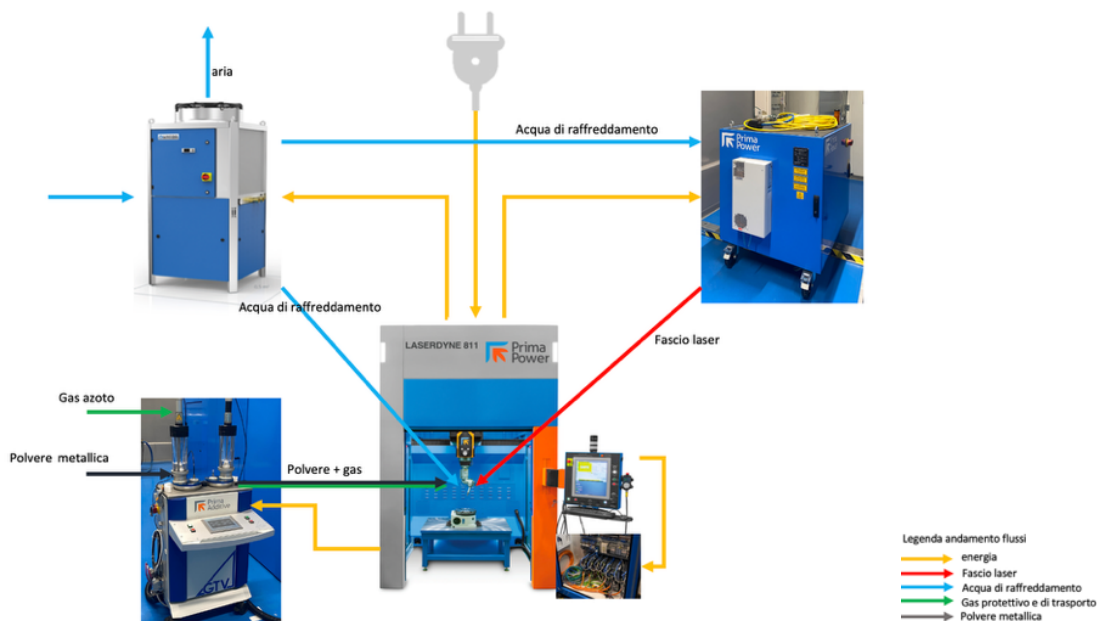


Figura 42 - rappresentazione delle connessioni elettriche e dei flussi di materiale

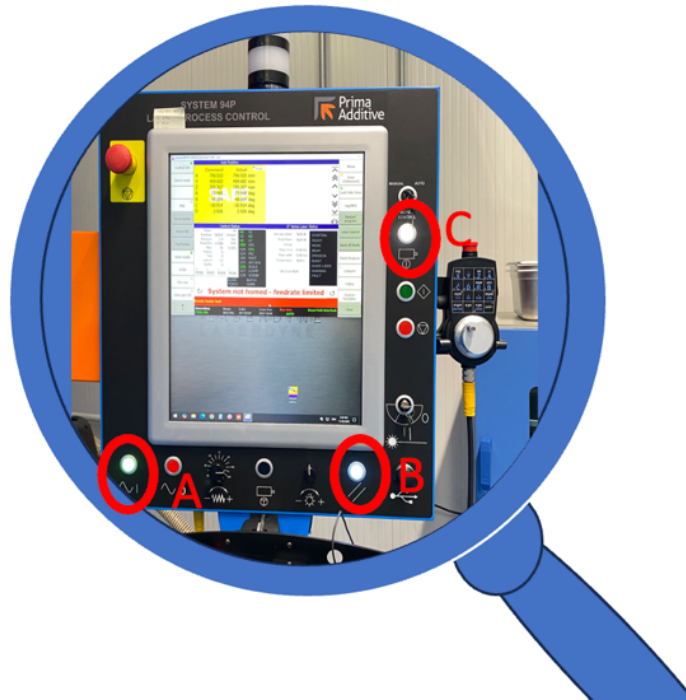


Figura 43 - ingrandimento dello schermo del computer di bordo e dei comandi applicabili

2. Successivamente viene attivato il *powder feeder* da manopola, il cui contributo di potenza risulta minimo, ca. 50 W. L'aumento più significativo si registra con l'accensione del *chiller* tramite manopola, che fa salire l'assorbimento complessivo a 3.3 kW.
3. Il passo seguente consiste nell'attivazione della sorgente laser che determina un incremento di circa 330 W. È necessario avviare preventivamente il *chiller* poiché in caso contrario il sistema genera un errore e impedisce l'accensione della sorgente laser.
4. Completata questa fase, vengono avviati il computer dedicato al software MasterCAM, il PLC della macchina tramite il pulsante B mostrato in figura 31 e i motori che vengono messi in tensione mediante il pulsante C. Infine, sul computer di bordo è presente anche una chiavetta di abilitazione che consente di attivare la modalità di *laser armed*, la quale comporta un picco di potenza di circa 1 kW e corrisponde al contributo che era stato trascurato al punto 2.1.5.1. Tale

impostazione viene automaticamente disattivata ogni volta che la porta della macchina viene aperta o quando viene disabilitata la funzione *lock side door*.

Una volta completate tutte le operazioni riassunte *Figura 44*, il sistema risulta pronto per la fase di emissione e consolidamento del materiale.

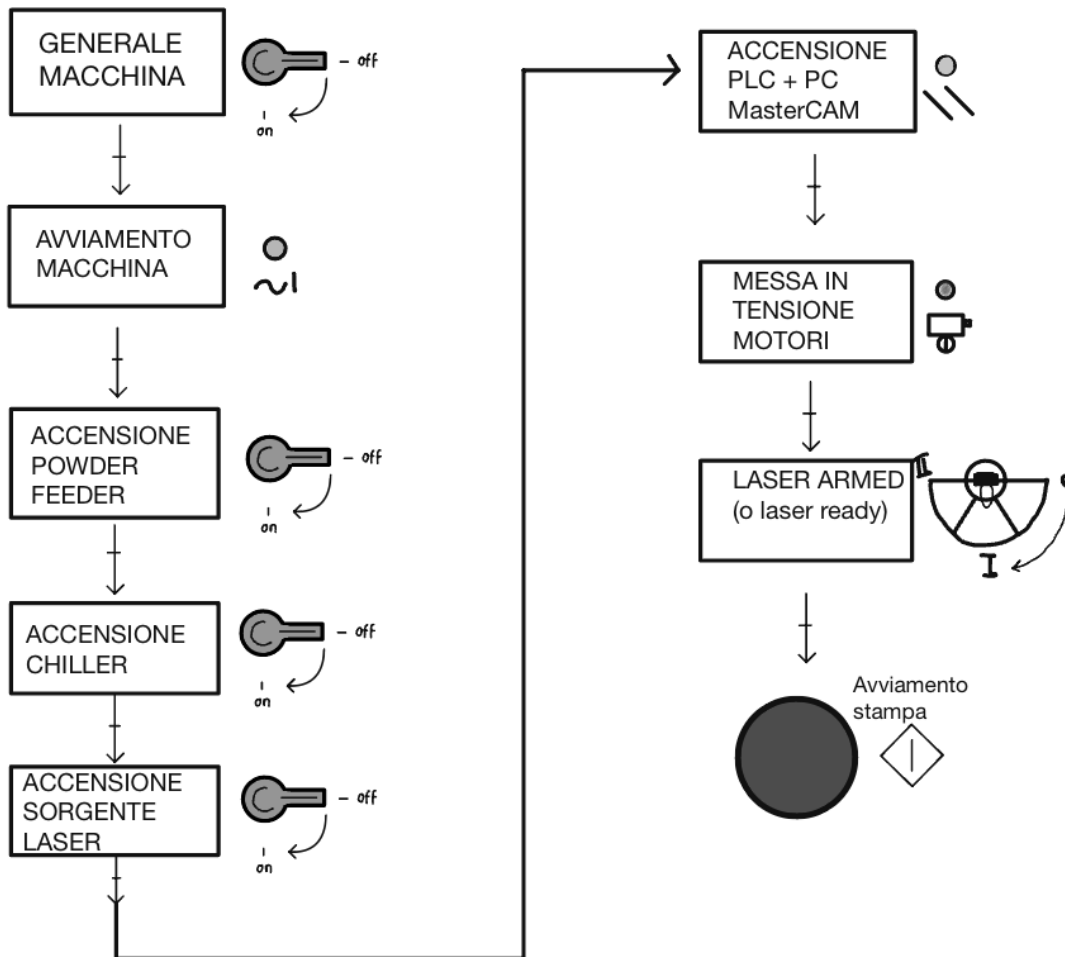


Figura 44 - sequenza di accensione e identificazione dei contributi fissi

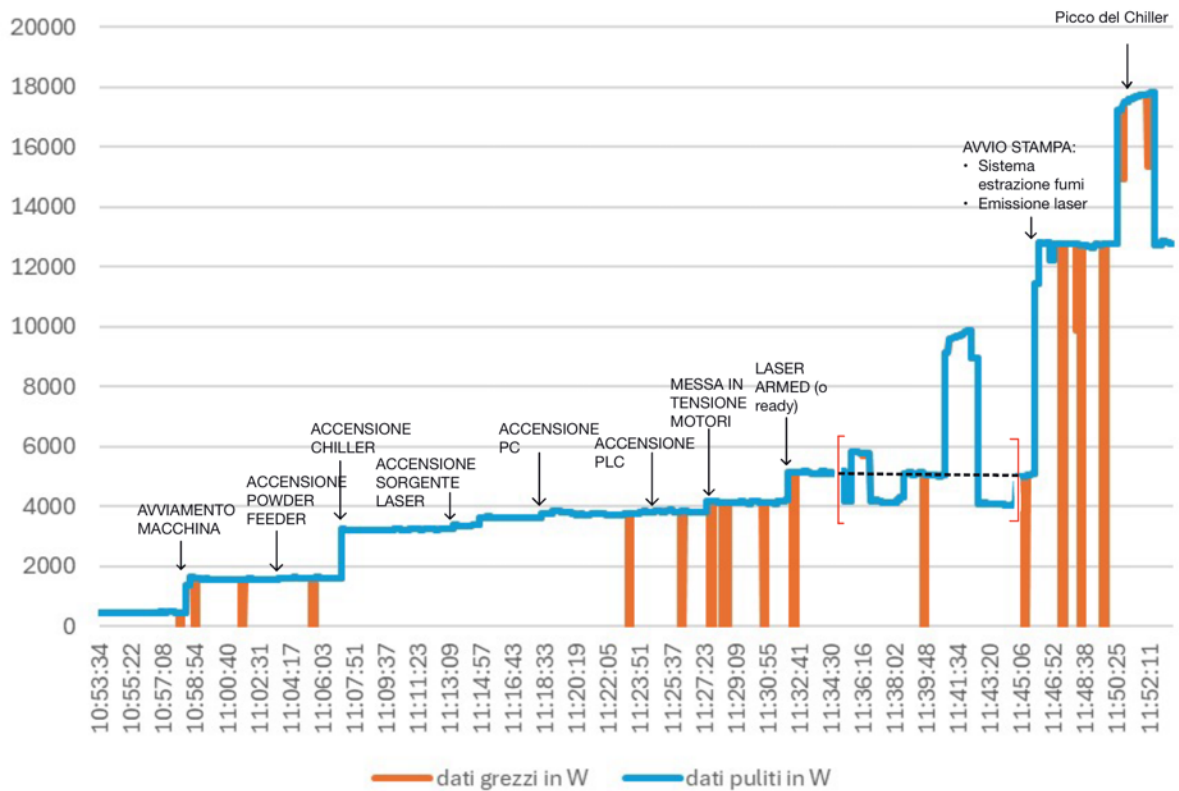


Figura 45 – identificazione delle fasi

Questa sequenza di accensione è necessaria per individuare e quantificare i contributi fissi che costituiscono il *plateau* di base durante la fase di deposizione.

A tale *plateau*, durante la fase di deposizione effettiva, si sommano anche i seguenti contributi energetici:

- **Sistema di estrazione fumi:** questo contributo è assimilabile ad un contributo fisso, poiché rimane costante nel tempo e non varia al modificarsi dei parametri di processo. Calcolando la variazione si ottiene 3.65 kW.

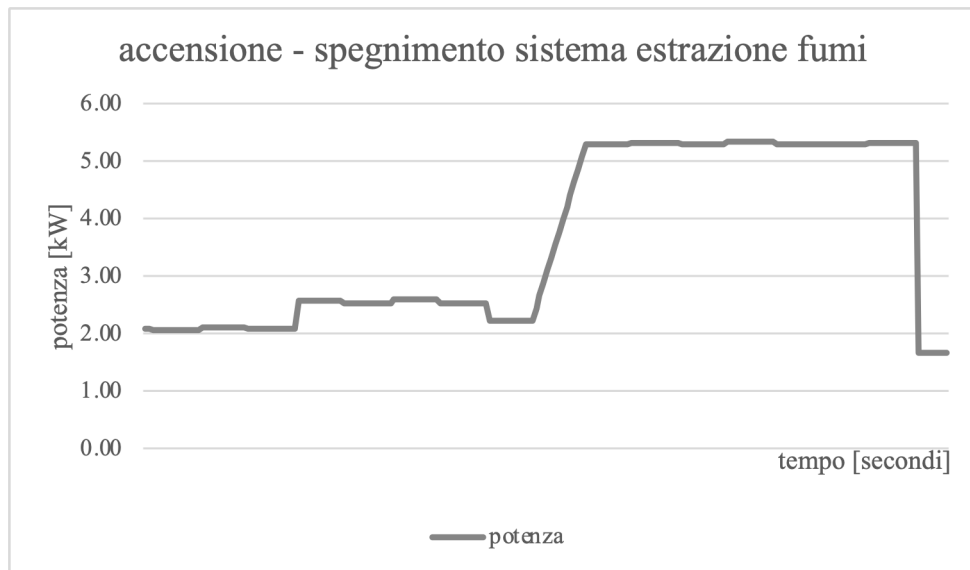


Figura 46 - rappresentazione accensione - spegnimento comandi del sistema estrazione fumi

- **Powder feeder in funzione:** oltre alla sua semplice accensione, il *powder feeder* deve movimentare i dischi al di sotto degli *hopper* per consentire la distribuzione della polvere. Tuttavia, il contributo energetico associato a tale operazione risulta trascurabile¹.
- **Movimentazione degli assi:** anche in questo caso, si può considerare trascurabile, poiché durante le prove di *dry run* non si è osservata alcuna variazione significativa di potenza assorbita.

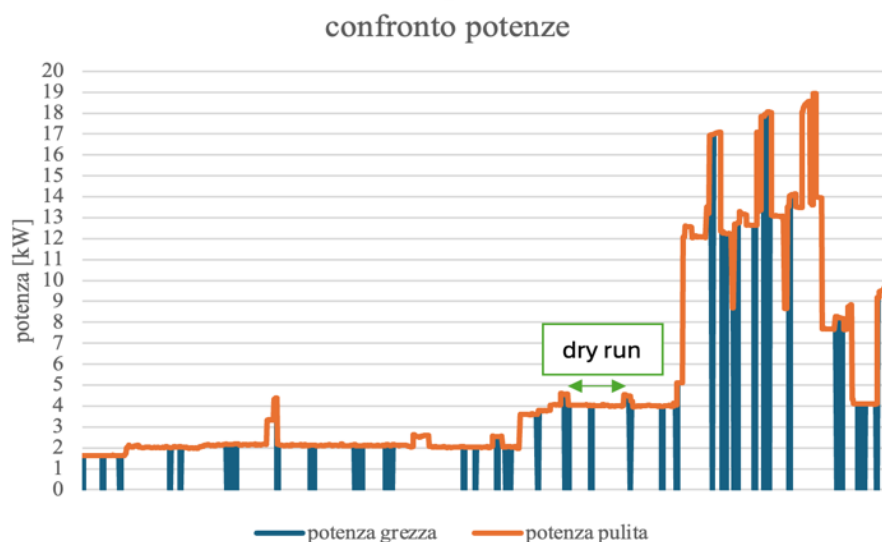


Figura 47 - preparazione processo di deposizione 2 dicembre, la fase di dry-run non comporta variazioni

¹ È stata effettuata una “saldatura” (solo laser senza polvere) e confrontata con una deposizione (laser e polvere) con stessa potenza del laser e stessa velocità: la potenza assorbita nei due casi risulta identica.

- **Emissione del laser:** la potenza assorbita dipende direttamente dai parametri di processo impostati, risultando quindi variabile in funzione della potenza richiesta.

A questo punto è necessario soffermarci sull'identificazione, in fase di deposizione, della potenza assorbita dall'unico contributo significativo ancora ignoto: la sorgente laser in emissione.

2.1.5.3. Definizione della potenza assorbita dal laser (2 e 4/12/25)

Nelle prove sperimentali condotte il 2 e 4 dicembre sono state realizzate diverse *saldature* con l'obiettivo di analizzare la potenza elettrica assorbita al variare della potenza luminosa desiderata dalla sorgente laser. Facendo riferimento alla metodologia proposta dall'articolo *Energy consumption monitoring in DED-LB for enhancing the process sustainability* [39], è stato possibile costruire un diagramma che correla la potenza emessa con quella assorbita, ottenendo così l'andamento dell'efficienza del sistema.

Il piano sperimentale ha previsto un intervallo di potenze laser comprese tra 600 a 1500 W, con step di 100 W. Nella prova del 2 dicembre sono stati analizzati valori compresi tra 600 W e 1100 W, mentre nella prova del 4 dicembre sono stati esaminati i livelli di potenza da 1100 W a 1500 W.

Per il programma del 2 dicembre, sono state realizzate delle tracce di dimensione pari a 130 x 20, in modo da garantire un'emissione continuativa di almeno 3 minuti. Tale durata è stata scelta in modo che il segnale utile non venisse mascherato dai picchi di potenza del *Chiller* e della ventola. Tra una potenza e la successiva è stato impostato un tempo di attesa di 20 secondi, così da facilitare l'identificazione delle diverse fasi nel profilo di potenza. In modo analogo, nelle prove del 4 dicembre sono state sviluppate deposizioni di 130 x 40 mm per ciascun livello di potenza. L'aumento della dimensione del lato corso è stato introdotto per ridurre il rischio di riflessione del fascio laser alle potenze più elevate eliminando l'*overlap* tra i cordoni. Inoltre, il tempo di attesa previsto è stato leggermente maggiorato, pari a 30 secondi.

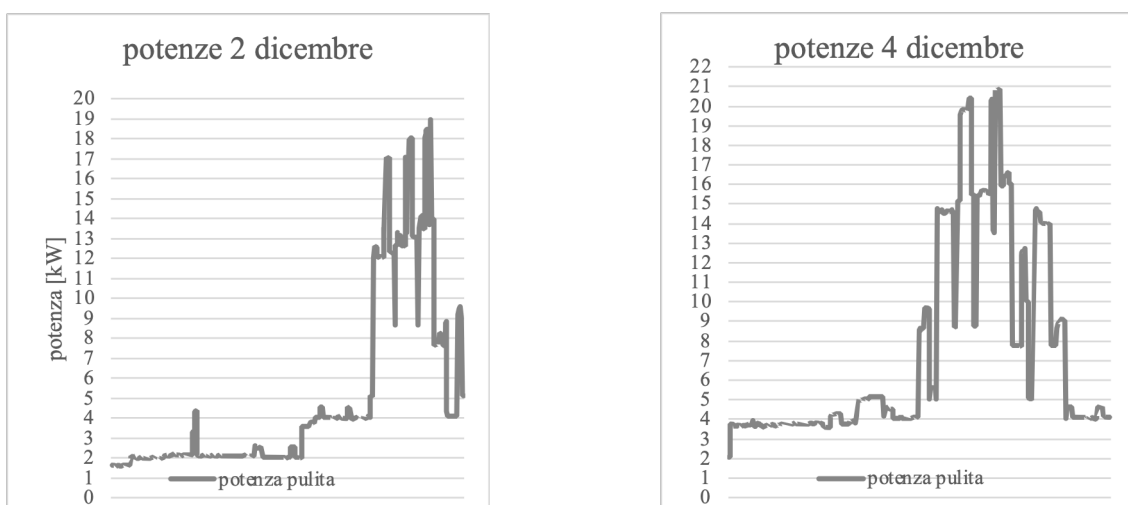


Figura 48 - potenze estratte 2 e 4 dicembre

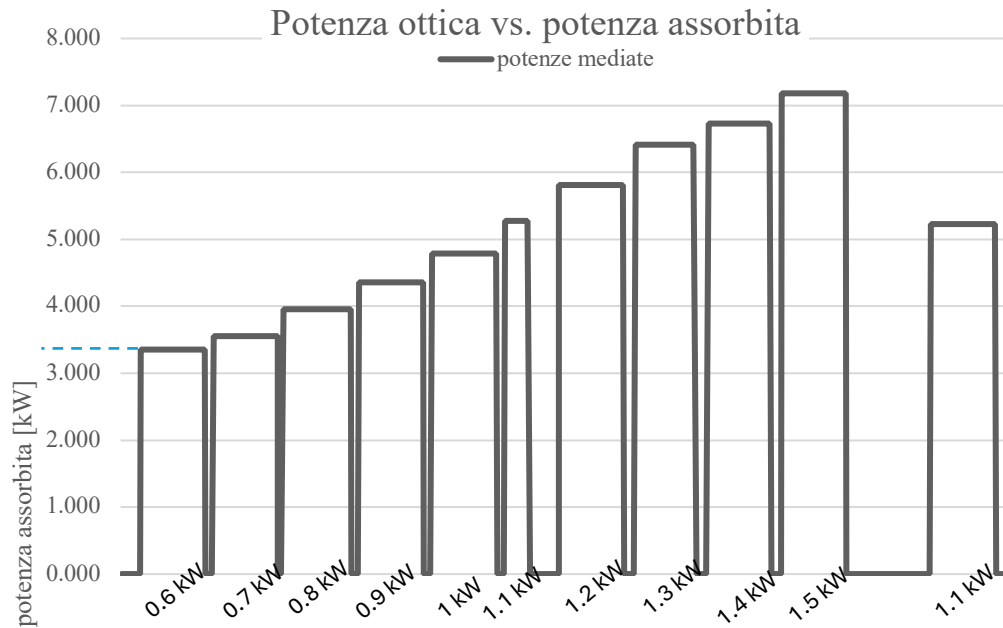


Figura 49 - rappresentazione dei contributi del laser a potenza variabile

Una volta rimossi tutti i contributi fissi, pari a:

- Avviamento della macchina, accensione del *chiller*, del *powder feeder*, della sorgente laser, del PC e del PLC, messa in tensione dei motori e attivazione della modalità *laser armed*, che complessivamente corrispondono all'assorbimento di **5.1 kW**.
- Sistema di estrazione dei fumi, il cui contributo è pari a **3.65 kW**

E sottratti inoltre i contributi periodici, che si presentano ogni 5 minuti per una durata di circa 2 minuti:

- Picchi del *chiller*, con una potenza compresa tra **4.4 e 4.9 kW**
- Gradini della ventola di raffreddamento dell'elettronica con una potenza variabile tra **0.4 e 0.6 kW**

Il segnale risultante contiene esclusivamente i contributi variabili associati alla potenza del laser. Come mostrato in Figura 49, ciò consente di estrapolare in modo diretto la potenza assorbita al variare della potenza emessa dalla sorgente laser, costruendo quindi il grafico in Figura 50 che permette l'identificazione dell'andamento dell'efficienza.

Dall'analisi dei dati sperimentali si osserva dunque che, alle basse potenze, l'efficienza del sistema risulta significativamente ridotta, mentre tende a stabilizzarsi attorno al 21% per valori di potenza più elevati. È inoltre evidente come l'efficienza misurata sia sensibilmente inferiore rispetto a quella dichiarata dal costruttore del laser: la scheda tecnica infatti riporta per la potenza massima emessa di 3 kW un assorbimento pari a 12 kW, corrispondente ad un'efficienza teorica del 30%.

La discrepanza tra i valori ottenuti sperimentalmente e quelli nominali può essere attribuita a diversi fattori, tra cui le condizioni operative reali e l'usura della sorgente laser. Tali considerazioni evidenziano l'importanza di una caratterizzazione energetica sperimentale, necessaria per descrivere in modo accurato il comportamento effettivo del box.

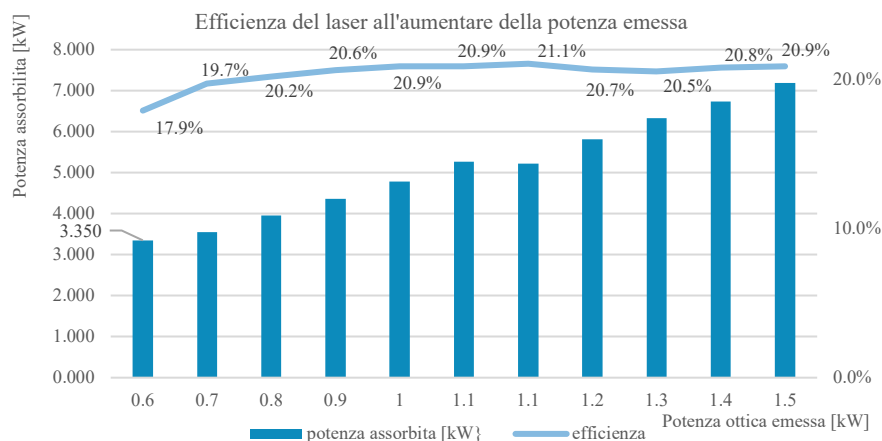


Figura 50 - andamento efficienza al variare della potenza emessa

potenza nominale laser [kW]	potenza assorbita [kW]	efficienza
0.6	3.350	17.9%
0.7	3.552	19.7%
0.8	3.958	20.2%
0.9	4.360	20.6%
1	4.786	20.9%
1.1	5.272	20.9%
1.2	5.810	20.7%
1.3	6.330	20.5%
1.4	6.727	20.8%
1.5	7.181	20.9%

Figura 51 - valori numerici associati

$$Potenza_{assorbita} = \frac{Potenza_{luminosa\ emessa}}{\eta}$$

Equazione 4 – potenza assorbita in funzione della potenza luminosa laser

2.1.6. Schematizzazione dei contributi di potenza e conversione in energia

Dalle numerose prove effettuate, otteniamo il seguente risultato riportato in Tabella 2. Quello che si evidenzia è che l'errore è dell'ordine di 100 W, in particolare risulta che:

	Macchina (comprende motori, PLC e elettronica)	sistema estrazione fumi	Powder feeder	chiller	laser	potenza
contributi fissi	ON (2.08 kW)	ON (3.65 kW)	ON - trascurabile (0.05 kW)	ON (1.65 kW)	ON (0.41kW) + <i>armed</i> (0.98kW)	5.2 + 3.65 kW
Contributi periodici	ventilazione ON (0.4 - 0.6 kW)	\	\	ventilazione ON (4.4 - 4.9 kW)	\	0.5 + 4.7 kW (2 minuti ogni 5 minuti)
Contributi variabili	trascurabile	\	trascurabile	\	In emissione	In funzione della potenza emessa

Tabella 2 – riassunto contributi

Un ulteriore aspetto rilevante è legato allo scostamento dei dati teorici rispetto a quelli sperimentali. Una volta completata la procedura di scalatura di tutti i contributi energetici

precedentemente identificati, è possibile osservare che l'errore residuo si attesta sull'ordine di 100 W.

Sulla base di tali premesse, l'energia totale assorbita per l'intero processo può essere stimata mediante la seguente espressione:

$$E_{assorbita,1h} = \left(\sum_{j=1}^n P_{j,fissi} \right) * 1h + \sum_{k=1}^m P_{k,periodici} * t_k + \sum_{i=1}^l P_{i,variabili} * t_i$$

Equazione 5 – energia in funzione dei contributi in un'ora

Che si traduce in:

$$E_{assorbita,1h} = \left(\sum_{j=1}^n P_{j,fissi} \right) * 1h + \sum_{k=1}^m P_{k,periodici} * t_k + P_{assorbita\ laser} * t_{laser\ acceso}$$

Equazione 6 – energia in funzione dei contributi

Dove t_k corrisponde a 24 minuti e rappresenta il tempo complessivo in cui troviamo accesi i due contributi periodici nell'arco di un'ora.

È inoltre necessario specificare il tempo di accensione del laser, $t_{laser\ acceso}$, poiché la sorgente laser non emette per il 100% della durata della deposizione. Durante il processo, infatti, sono presenti delle pause operative o movimentazioni rapide tra una deposizione e l'altra che devono essere opportunamente considerate. Su un processo di un'ora è possibile stimare che tali pause raggiungano un massimo di 5 minuti, durante i quali il laser non emette. Ne consegue che il tempo di emissione effettivo è inferiore alla durata totale del *job* e deve essere considerato per una corretta valutazione dei contributi variabile.

Si riporta di seguito un **esempio** relativo ad una prova e alla stima preliminare del consumo energetico associato ad essa:

Si analizza un processo di durata 21 minuti e 38 secondi in cui la sorgente laser opera ad una potenza di 0.8 kW, che corrisponde ad una potenza assorbita di 4.79 kW. I contributi fissi e periodici sono stati ricavati dalla tabella riportata nella sezione precedente (2.1.5.3). Sulla base di tali valori è possibile stimare l'energia assorbita in funzione della durata del processo.

Si consideri l'intervallo compreso tra le 16:12 e 16:34 dell'11 dicembre, durante il quale la macchina ha eseguito il processo. L'energia assorbita è stata calcolata come segue:

$$E[kWh] = (5.1 + 3.65)kW * \left(\frac{21}{60} + \frac{38}{3600}\right)h + (0.5 + 4.7) kW * \frac{5}{60}h + 3.96 kW * \frac{20}{60}h = \mathbf{4.90 kWh}$$

Equazione 7 – calcolo energia

I dati registrati dal contatore, che rappresenta la cumulata dell'energia nel tempo, tra inizio e fine deposizione, comportano la seguente variazione di energia nell'intervallo:

$$\Delta E = 44364 - 44358.7 = 5.3 kWh$$

Per valutare la significatività dell'errore rispetto al valore sperimentale, si considera l'errore percentuale:

$$errore \% = \frac{|valore\ sperimentale - valore\ stimato|}{valore\ sperimentale} * 100 = \frac{0.4}{5.3} * 100 \approx 7.6\%$$

Equazione 8 – errore relativo

Il risultato evidenzia uno scostamento del 7.6% tra il valore stimato dal modello e quello misurato. Sebbene tale differenza non sia trascurabile, risulta comunque coerente con la natura del modello adottato, che si basa su potenze medie e su tempi operativi idealizzati. Nella pratica, infatti, alcuni sottoinsiemi – come il *chiller* - non seguono cicli perfettamente regolari: l'attivazione del sistema di ventilazione potrebbe non avvenire esattamente ogni 5 minuti, così come la durata del ciclo potrebbe non corrispondere sempre ai 2 minuti assunti dal modello. Questa variabilità introduce inevitabilmente una discrepanza tra il comportamento reale della macchina e la sua rappresentazione semplificata, rendendo sensato lo scostamento osservato.

2.2. Contributi di massa

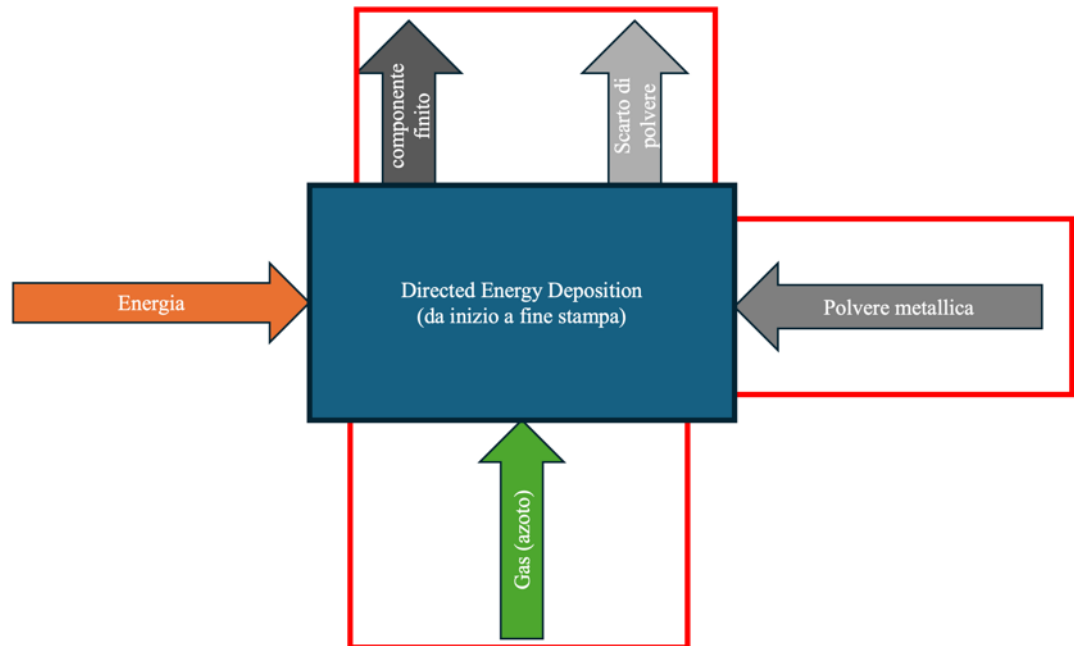


Figura 52- schema descrittivo dei contributi dell'LCI, focus sui consumi di materiale

Dopo aver analizzato i contributi energetici, è necessario valutare e quantificare i contributi di massa per poter poi passare alla costruzione dell'inventario. Questi è possibile distinguerli in:

- Materiale principale: polvere metallica, sia la frazione depositata sul componente che quella scartata
- Materiale secondario: elementi ausiliari, come il gas inerte di protezione e di trasporto.

2.2.1. Polvere metallica

L'obiettivo centrale di questa sezione è definire un modello predittivo accurato per il consumo, in termini di massa, di polvere metallica. Oltre alla stima dell'erogazione totale, il modello si propone di valutare la quota parte che si è realmente depositata e consolidata sul componente, per fare in modo di valutare l'efficienza di deposizione di polvere e confrontare la crescita teorica con quella che si ottiene sperimentalmente.

Per modellare accuratamente il consumo di materiale, si è proceduto alla caratterizzazione sperimentale della portata in uscita dall'ugello. Attraverso prove di flussaggio su materiali differenti, è stato definito un legame diretto tra il numero di giri del disco del *powder feeder* [rpm] e la portata effettiva di polvere [g/min]. i dati raccolti, indicati in Figura 53, identificano un rapporto di linearità tra i dati in ingresso e in uscita, se si mantiene la portata di carrier gas fissa a 5 l/min.

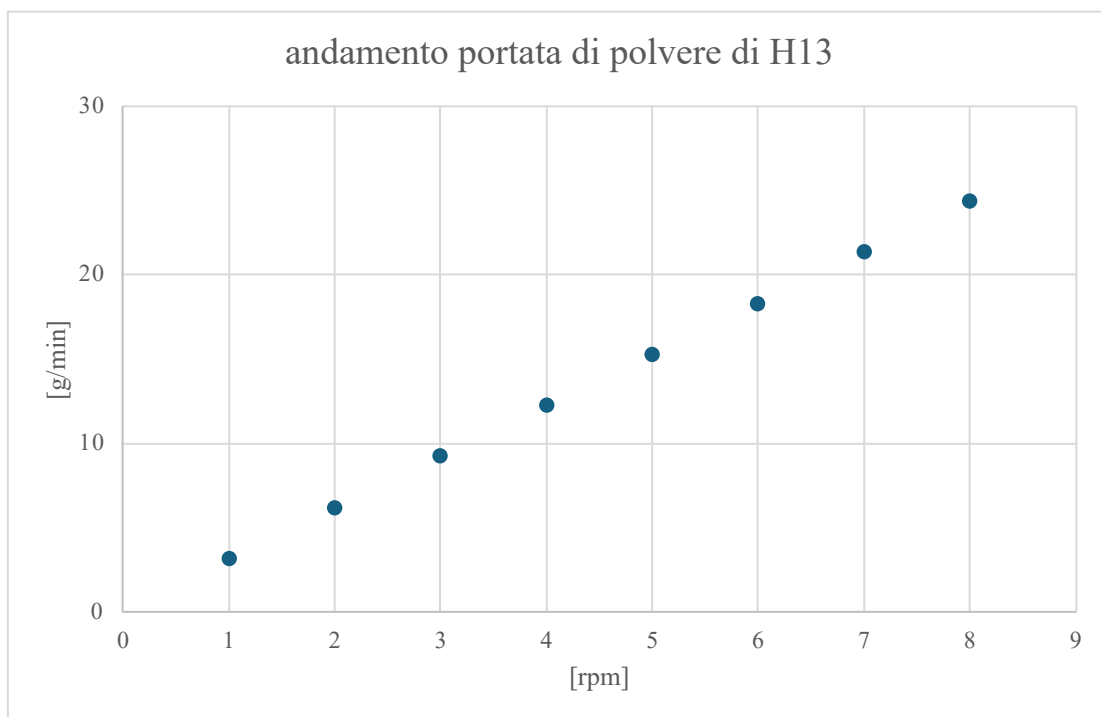


Figura 53 – regressione lineare per la definizione della portata di H13 in uscita dall'ugello

Quindi possiamo assumere come informazione nota a priori, sulla base del materiale scelto e del numero di giri dei dischi (per scelta progettuale teniamo costante il carrier gas durante la deposizione):

$$\dot{m}_{totale} = f(n_{disco}[rpm], materiale)$$

Equazione 9 – portata totale di polvere

La massa di materiale totale consumata sarà:

$$m_{totale} = \dot{m}_{totale} \cdot t_{stampa}$$

Equazione 10 – massa totale di polvere

Dove t_{stampa} è l'intervallo temporale dall'inizio alla fine della deposizione, poiché il flussaggio di polvere non si interrompe mai in questa fase.

Contemporaneamente posso definire il **materiale depositato** effettivamente sul componente tramite la densità, assumendo 0% di porosità, e il volume del solido, ottenuto dal modello CAD, in questa maniera:

$$m_{depositata} = \rho V$$

Equazione 11 – massa depositata di polvere

La differenza tra la m_{totale} e $m_{depositata}$ rappresenta tutta la **polvere dispersa**, dovuta a *splatter*, dispersione e polvere genericamente non entrata nel *melt pool*. Questa frazione di polvere, a differenza di altre tecnologie additive, non viene riutilizzata poiché perde le sue proprietà originarie e quindi costituisce uno scarto di materiale.

Si definisce ora l'efficienza teorica di deposizione nel seguente modo:

$$\eta = \frac{m_{depositata}}{m_{totale}} = \frac{\rho V}{\dot{m}_{totale} \cdot t_{stampa}}$$

Equazione 12 – efficienza di deposizione teorica

Da alcune prove effettuate, si è notato una discrepanza tra l'efficienza di deposizione teorica e quella reale misurata pesando il componente prima e dopo la riparazione.

Lo scostamento tra il volume reale del materiale depositato e il modello CAD nominale generalmente viene compensato dai margini di tempo di scansione. Tuttavia, l'adozione di parametri di processo non standard può introdurre una cinetica di crescita del materiale non prevedibile che determina un risultato dell'efficienza di deposizione differente da quello atteso. L'affidabilità predittiva del modello riguardo al quantitativo di polvere scartata risulta infatti strettamente legata alla stabilità del set di parametri analizzato, come dimostrato nel caso dell'acciaio H13 dove, operando con una potenza laser pari al 40% del valore massimo e un valore di portata di polvere correlata a 4 rpm, si è ottenuto un valore di efficienza del 39% confermato ripetutamente dalle evidenze sperimentali. L'utilizzo di parametri differenti da quelli di consueto uso ha generato uno scostamento

considerevole tra efficienza teorica e sperimentale, come verrà approfondito nel capitolo successivo.

Un ulteriore riscontro emerge dalle prove condotte sui provini in acciaio 316L, nelle quali l'efficienza teorica di deposizione risulta al 25% per il set di parametri analizzati, misurando poi la massa consolidata e il totale della massa usata, si ottiene un risultato di efficienza analogo.

Sotto il profilo di efficienza produttiva, se si aumenta il volume depositato nell'unità di tempo, questo può generare un effetto favorevole, in quanto consente una potenziale riduzione dei tempi complessivi di realizzazione del componente. Tuttavia, è necessario evidenziare come tale fenomeno debba essere mantenuto entro limiti rigorosi: una crescita inaspettata del volume, può innescare un processo di *remelting*. Questa condizione altera la geometria del punto di convergenza della polvere e il laser interagisce con la superficie in una zona di sovra-focalizzazione, innescando la rifusione eccessiva o instabile, mentre la polvere non riesce a confluire correttamente nel *melt pool*. Ciò comporta una drastica riduzione dell'efficienza di cattura, aumentando la quota di materiale scartato.

In sintesi, la metodologia per la previsione del consumo totale di polvere ha una buona accuratezza, poiché è vincolato a prove sperimentali precedenti, che trovano un riscontro nella realtà. Il problema principale rimane la valutazione della polvere consolidata rispetto a quella scartata.

2.2.2. Gas di protezione e di trasporto

2.2.2.1. *Classificazione gas inertizzanti*

Nel processo di Directed Energy Deposition (DED) in analisi è possibile impiegare due tipologie di gas inertizzante: argon e azoto.

Nella pratica viene adoperato l'azoto, perché presenta un'impronta significativamente inferiore rispetto all'argon, sia in termini di produzione che di trasporto. Questo vantaggio è principalmente legato alla sua abbondanza nell'atmosfera: l'azoto costituisce circa il 78% dell'aria [40], mentre l'argon è presente solo allo 0.93%.

La produzione industriale dell'azoto può avvenire tramite tecnologie di basso impatto energetico. Al contrario, l'argon viene generalmente ottenuto tramite distillazione frazionata dell'aria liquida, un processo ad alto consumo energetico e con costi ambientali più elevati. [41]

Entrambi i gas risultano essere inerti e atossici. L'azoto in alcuni casi può reagire ma solo con metalli altamente reattivi, per questo il loro impatto ambientale non è diretto, ma dipende principalmente dal consumo energetico associato alla loro produzione, compressione e distribuzione.

Dal punto di vista applicativo, l'azoto quindi viene preferito in contesti dove non è richiesta un'elevata purezza e dove i materiali impiegati non presentano elevata reattività.

Questo è il caso tipico della tecnologia DED, che opera in ambienti aperti o semi- aperti. In tali condizioni, la presenza residua di ossigeno è inevitabile e dunque rende inefficace l'impiego di gas ad alta purezza come l'argon [42].

2.2.2.2. *Misurazione sperimentale del quantitativo di gas utilizzato*

Una volta definito il tipo di gas utilizzato, è necessario arrivare a comprendere come misurare la portata di questo gas. Non è necessario stimare il consumo energetico per la produzione perché il gas viene acquistato già in bombole e non viene prodotto in azienda.

L'obiettivo primario è stato validare i valori forniti dal software *MasterCAM*, verificando la corrispondenza tra i parametri impostati ed il consumo reale. Il *software* consente la gestione distinta delle due funzioni principali del gas: il trasporto della polvere e la protezione del *melt pool*.

Per quanto riguarda il **gas di trasporto**, responsabile della veicolazione della polvere metallica dal powder feeder alla testa di deposizione fino all'espulsione effettiva, il sistema opera ad anello chiuso. Il *powder feeder* riceve un *set-point* di portata e restituisce un feedback in L/min. In questo caso, ci aspettiamo la convergenza tra il valore nominale impostato e il dato sperimentale.

Al contrario, il **gas di protezione** presenta una complessità maggiore, essendo privo di un sistema di controllo attivo della portata lungo la linea. Nel linguaggio di programmazione macchina (GCode), il parametro definito in MasterCAM non viene tradotto in termini di flusso, ma bensì come un comando di pressione:

M302 PR [valore della portata dello shielding gas]

Data l'assenza di una strumentazione adeguata alla misurazione della portata, si è resa necessaria l'implementazione di una metodologia sperimentale per la valutazione del flusso. Il metodo adottato prevede l'impiego di un volume di controllo deformabile (contenitore con capacità nota di 7 L). Cronometrando il tempo di riempimento del volume alla pressione ambiente, è possibile ricavare la portata volumetrica reale attraverso il rapporto tra il volume e l'intervallo temporale misurato.

Oltre ad un errore di risoluzione temporale legato al tempo di reazione dell'uomo, si ha anche un'evidente incertezza del volume occupato dal fluido soprattutto per quanto riguarda le portate basse. Questo esperimento ci consente però di determinare che i L/min impostati per *il carrier gas* sono indicativamente corretti, mentre per i valori di portata di *shielding* arriviamo a dei valori nettamente più elevati rispetto al valore effettivamente impostato da programma.

parametro shielding	tempo di riempimento		portata	valore di trend	scarto
	[-]	[s]			
0.5	60	1.00	7.0	14.3	7.3
0.5	66	1.10	6.4	14.3	7.9
0.5	68	1.13	6.2	14.3	8.1
0.5	70	1.17	6.0	14.3	8.3
1	30	0.50	14.0	17.9	3.9
1	19.5	0.33	21.5	17.9	3.7
1	19.9	0.33	21.1	17.9	3.2
1	19.9	0.33	21.1	17.9	3.2
1	22	0.37	19.1	17.9	1.2
1	23	0.38	18.3	17.9	0.4
1.5	17	0.28	24.7	21.5	3.2
1.5	17.5	0.29	24.0	21.5	2.5
1.5	18.3	0.31	23.0	21.5	1.5
1.5	19	0.32	22.1	21.5	0.6
1.5	17	0.28	24.7	21.5	3.2
2	15	0.25	28.0	25.0	3.0
2	16.2	0.27	25.9	25.0	0.9
2	14.8	0.25	28.4	25.0	3.3
2	16	0.27	26.3	25.0	1.2
2.5	13	0.22	32.3	28.6	3.7
2.5	13.8	0.23	30.4	28.6	1.8
2.5	13	0.22	32.3	28.6	3.7
2.5	15	0.25	28.0	28.6	0.6
3	11.4	0.19	36.8	32.2	4.6
3	12.7	0.21	33.1	32.2	0.8
3	12.5	0.21	33.6	32.2	1.4
3	13	0.22	32.3	32.2	0.1
3.5	11.24	0.19	37.4	35.8	1.5
3.5	10.6	0.18	39.6	35.8	3.8
3.5	11.7	0.20	35.9	35.8	0.1
4	10.91	0.18	38.5	39.4	0.9
4	10.7	0.18	39.3	39.4	0.2
4	10.8	0.18	38.9	39.4	0.5
4	11	0.18	38.2	39.4	1.2
4.5	9.4	0.16	44.7	43.0	1.7
4.5	9.6	0.16	43.8	43.0	0.7
5	9	0.15	46.7	46.6	0.1
5	9	0.15	46.7	46.6	0.1
5	9.55	0.16	44.0	46.6	2.6
5	10	0.17	42.0	46.6	4.6
5.5	8.53	0.14	49.2	50.2	1.0
5.5	8.85	0.15	47.5	50.2	2.7
5.5	9.9	0.17	42.4	50.2	7.8
5.5	8	0.13	52.5	50.2	2.3

Tabella 3 – determinazione dei tempi per ogni prova per la definizione della curva di calibrazione

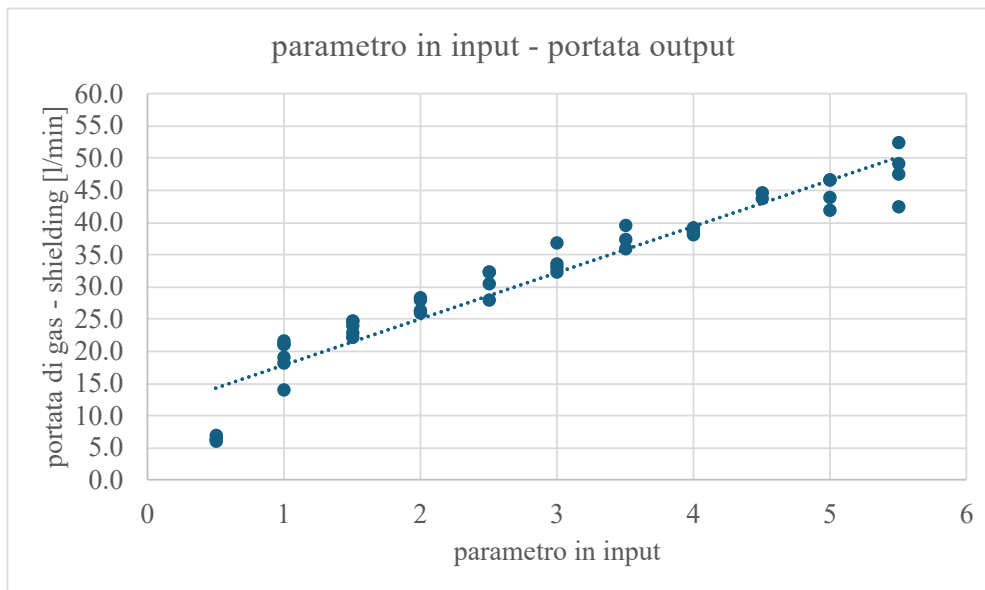


Figura 54 - relazione tra il parametro impostato da software e la portata stimata sperimentalmente

Come si nota dal grafico in *Figura 54*, l'andamento della portata di gas di protezione rilevata manifesta una proporzionalità di tipo lineare rispetto ai valori impostati dal software, nonostante la stima effettuata.

Sebbene dunque si renda necessaria l'esecuzione di test più rigorosi per affinare la precisione dei dati e superare il carattere approssimativo delle misurazioni, i risultati ottenuti consentono già di formulare una stima preliminare dei parametri indicativi del processo.

Otterremo il seguente risultato, per la portata di gas di trasporto:

$$\dot{m}_{carrier} = \dot{m}_{carrier\ set}$$

Equazione 13 – portata di gas di trasporto

Mentre per la portata di gas di protezione:

$$\dot{m}_{shielding} = a * \dot{m}_{(shielding\ set)} + b$$

Equazione 14 – portata di gas di protezione

Dove *a* e *b* indicano i coefficienti della regressione e valgono:

$$a = 7.2$$

$$b = 10.7$$

E dunque, complessivamente:

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{shielding} + \dot{m}_{carrier}$$

Equazione 15 – portata di gas totale

2.3. Life Cycle Inventory (LCI)

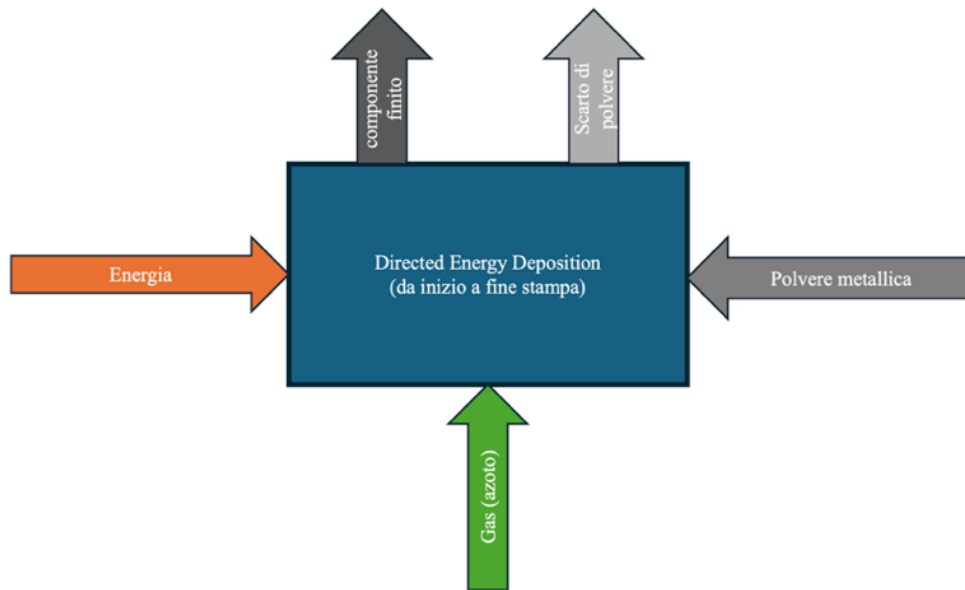


Figura 55 - contributi in gioco nella fase di deposizione

Una volta determinati tutti i contributi energetici e di materiale, è possibile andare a farne una stima per un'ora di deposizione in questa maniera:

contributo	Formulazione
Energia [kWh]	$E_{assorbita} = \sum P_{fissi} \cdot t_{stampa} + \sum P_{period} \cdot t_{period} + P_{assorbita\ laser} \cdot t_{laser\ acceso}$
Portata di polvere [g/min]	$m_{totale} = \dot{m}_{totale} \cdot t_{stampa}$ $\eta = \frac{m_{depositata}}{m_{totale}} = \frac{\rho V}{\dot{m}_{totale} \cdot t_{stampa}}$ <p>Valida solo per alcuni parametri di processo definiti</p>
Portata di Gas (azoto) [L/min]	$m_{shielding} = f(m_{(shielding\ set)})$ $m_{carrier} = m_{carrier\ set}$

Tabella 4 – schematizzazione contributi dell'inventario

3. Terzo capitolo – applicazione a Casi studio e analisi dati

3.1. Costruzione della metodologia LCA per la sola fase di deposizione DED

L'obiettivo è valutare impatto ambientale ed economico del processo DED, oltre che validare il modello predittivo. La struttura della metodologia si articola nelle seguenti fasi:

- a. **Goal & scope definition:** studiare l'impatto ambientale ed economico del processo di deposizione considerando ogni accessorio acceso e ogni contributo energetico necessario al processo, l'analisi è stata effettuata utilizzando componenti diversi e materiali diversi. I confini del sistema considerati sono gate-to-gate, focalizzato sull'intervallo temporale compreso tra l'avvio e la fine della fase di deposizione.
- b. **Life Cycle Inventory (LCI):** definizione dei **consumi** energetici e di materie prime in input e i corrispondenti output (emissioni, scarti di polvere) necessari per popolare il modello di calcolo.
- c. Valutazione degli Impatti (**LCIA**) e dei Costi (**LCC**): traduzione dei dati di inventario in indicatori di impatto ambientale attraverso la **Life Cycle Impact Assessment (LCIA)** e la determinazione dei costi industriali associati mediante il **Life Cycle Costing (LCC)**.
- d. **Interpretazione** dei risultati: l'approccio integrato tra LCIA e LCC permette di identificare i punti critici del processo.

3.2. Caso studio n. 1 – layer 0.5 mm

Al fine di validare il modello di stima delle risorse fondamentali di processo e l'acquisizione dei dati, è stato condotto un test sperimentale di riparazione della lama Previero – Michelin, componente critico sfruttato per la sminuzzatura della gomma naturale, materiale primario per la formazione degli pneumatici. Il processo di riparazione, reso necessario dall'usura della superficie del componente che lo rende non idoneo agli standard funzionali, è stato svolto su un totale di 8 sezioni per una durata complessiva di 1 ora e 55 minuti.

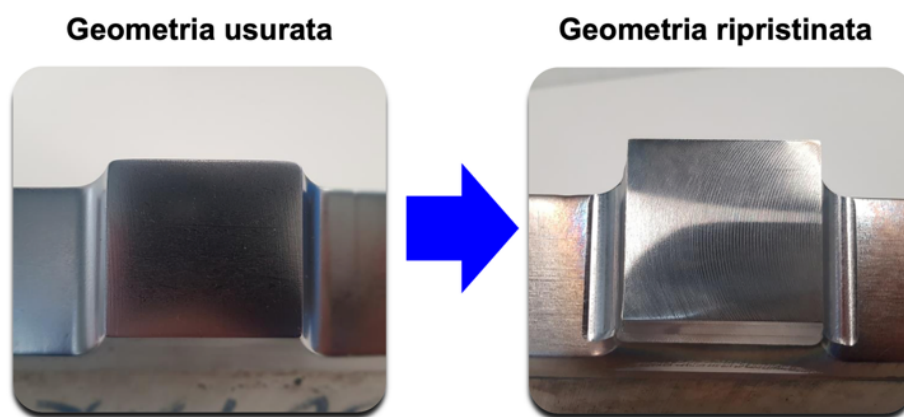


Figura 56 - confronto tra lama usurata e lama ripristinata

Questa operazione avviene mediante il riporto di acciaio per utensili H13, depositato in due fasi sequenziali: la ricostruzione volumetrica del dente e quella successiva del tagliente.

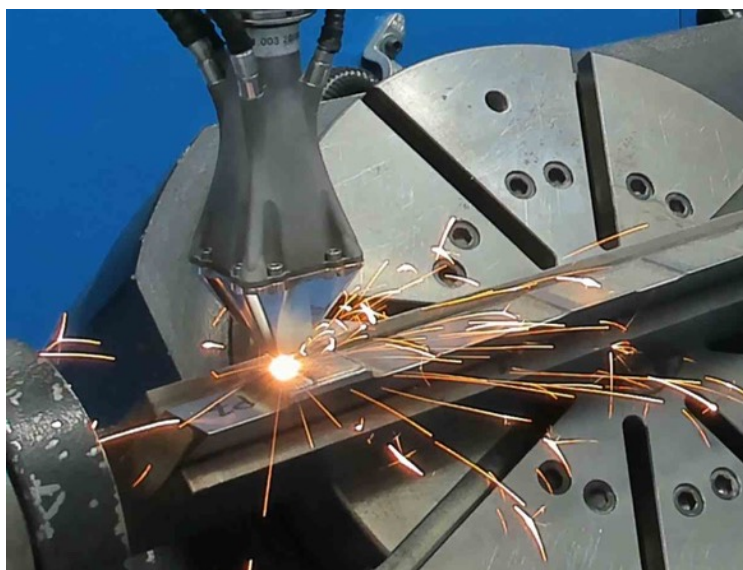


Figura 57 - fase di deposizione

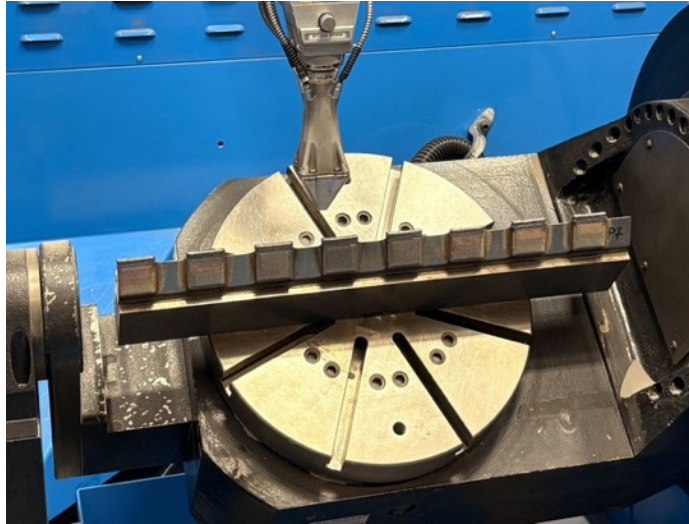


Figura 58 - componente a processo concluso

Una volta definito il CAD e il CAM del pezzo (Figura 59), sono stati estrapolati i volumi depositati, le dimensioni delle parti riportate, la massa di polvere espulsa e i parametri di processo specifici del materiale.

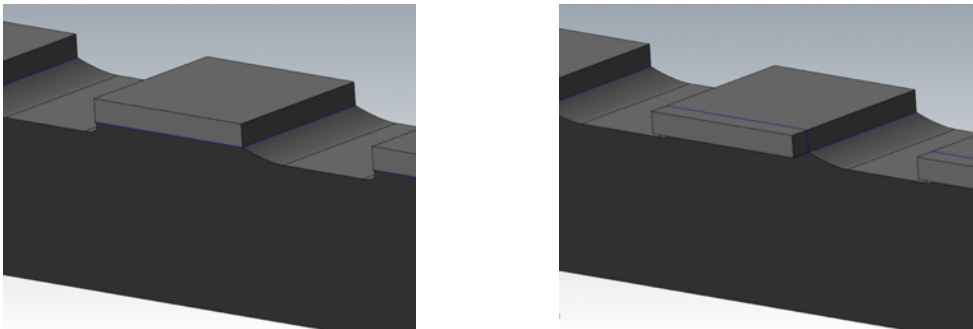


Figura 59 -costruzione del corpo del dente e tagliente

Oltre a questi, sono stati integrati i valori di potenza e le relative efficienze raccolte nella sezione 2.1.6. per gli intervalli di tempo specifici del caso studio analizzato, per effettuare il **computo energetico** per il componente analizzato:

$$E_{assorbita} = \left(\sum_{j=1}^n P_{j,fissi} \right) * t_{stampa} + \sum_{k=1}^m P_{k,periodici} * t_k + P_{assorbita\ laser}$$

$$* t_{laser\ acceso} = 32.3 \text{ kWh}^2$$

Equazione 16 – calcolo energia

² Per ragioni di riservatezza non vengono riportati i dati sperimentali esatti che hanno condotto al risultato presentato

Confrontando questo valore con quello estrapolato dal contatore che riporta la cumulata dell'energia:

$$\Delta E = 33.6 \text{ kWh}$$

Si ottiene dunque un errore residuo del 4%.

Per quanto riguarda la **polvere metallica**, è stato necessario misurare inizialmente il quantitativo di polvere immessa nell'*hopper* del powder feeder e pesare la lama usurata. Successivamente tramite i parametri di processo è stata calcolata l'efficienza teorica di deposizione tramite il volume del CAD, formula descritta nella sezione 2.2.1, e si confrontata con quella calcolata dalle masse sperimentalmente:

$$\eta = \frac{m_{depositata}}{m_{totale}} = \frac{\rho V}{\dot{m}_{totale} \cdot t_{stampa}} = 0.39$$

Equazione 17 – calcolo efficienza di deposizione teorica

Mentre l'efficienza reale di deposizione risulta:

$$\eta = \frac{m_{depositata}}{m_{totale}} = 0.38$$

Equazione 18 – calcolo efficienza di deposizione sperimentale

In particolare, la massa totale utilizzata sperimentalmente è:

$$m_{totale} = 1.567 \text{ kg}$$

Mentre la massa depositata è:

$$m_{depositata} = 0.600 \text{ kg}$$

L'adozione di questo specifico set di parametri permette di riscontrare una chiara coerenza tra l'efficienza di deposizione teorica e i risultati ottenuti in fase sperimentale, garantendo il controllo sulla cinetica di crescita del componente.

Parallelamente a tale validazione, risulta di fondamentale importanza determinare la massa di materiale che, sulla base del modello teorico, si prevede di impiegare nel processo.

$$m_{totale} \approx 1.410 \text{ kg}$$

L'analisi dei dati sperimentali ha evidenziato un'ulteriore quota di materiale non recuperato, pari a circa 150 grammi di scarto, riconducibile ad uno scostamento temporale tra la pianificazione teorica e l'esecuzione reale. Nello specifico, si è riscontrato che il

tempo effettivo di deposizione è risultato superiore di 5 minuti rispetto a quello previsto da software.

Per quanto riguarda il consumo di **azoto**, la validazione sperimentale diretta non è percorribile a causa delle limitazioni strumentali. Pertanto, si è proceduto effettuando una stima tramite prove riportate nella sezione 2.2.2.2 mantenendo un margine cautelativo.

Il calcolo è stato impostato considerando i due flussi principali previsti dal set-up:

1. Gas di trasporto: caratterizzato da una portata costante di 5 L/min
2. Gas di protezione: il cui valore nominale impostato da software (pari a 5) corrisponde ad una portata effettiva di 46.6 L/min come riportato in Tabella 3.

Considerando la durata totale dell'operazione, si ottiene 6210 L alla pressione ambiente.

Si può convertire questa quantità in kg $m = V \cdot \rho = 6210L \cdot 0.001165 \frac{kg}{L} = 7.235 kg$, in alternativa può esser utile convertire questo quantitativo in metri cubi, 6.21 m³.

Riportando tutti i risultati, si ottiene il seguente LCI:

	Teorico	Sperimentale
Consumo energetico	32.3 kWh	33.6 kWh
Efficienza polvere	39%	38%
Consumo di gas	6.21 m ³	-

Tabella 5 - LCI caso studio n.1, teorico vs. sperimentale

Per quanto concerne il consumo energetico, lo scostamento tra il dato predetto e quello misurato è minimo, a conferma dell'accuratezza del modello nel recepire i carichi elettrici della sorgente laser e dei sistemi ausiliari.

Analogamente, l'efficienza di deposizione della polvere, mostra una correlazione quasi perfetta, con una variazione di appena un punto percentuale tra il valore teorico e quello sperimentale. Questo riscontro è fondamentale, poiché valida la capacità del modello di prevedere correttamente la quota parte di materiale che viene effettivamente consolidata nel *melt pool* rispetto allo scarto generato.

La convergenza di questi parametri dimostra che, all'interno del regime operativo studiato, il modello redatto possiede un'elevata capacità predittiva e accuratezza

scientifico. Esso può quindi essere considerato uno strumento robusto per la generazione dell'inventario dei dati, garantendo che le analisi LCIA e LCC condotte sui processi di riparazione DED riflettano fedelmente le reali dinamiche industriali del sistema.

3.3. Caso studio n. 1 - Life Cycle Impact Assessment

Definito l'inventario del ciclo di vita (LCI), si è proceduto alla quantificazione degli impatti ambientali associati ai flussi energetici e ai gas tecnici. Nello specifico, l'analisi si è focalizzata sul Global Warming Potential (GWP), espresso in chilogrammi di CO₂ equivalente. Tali fattori di caratterizzazione sono stati determinati mediante il software SimaPro 10.3.0.1 che integra i dati di inventario tramite il database Ecoinvent 3.10.

Sebbene il software consenta l'applicazione di metodologie più articolate come ReCiPe 2016, sia a livello Midpoint (che analizzano i singoli problemi ambientali) che Endpoint (che aggregano gli impatti in categorie come il danno alla salute umana o all'ecosistema), si è ritenuto opportuno limitare l'analisi al solo parametro GWP. Questa scelta è motivata dalla necessità di garantire maggiore immediatezza nella visualizzazione e nell'interpretazione dei risultati.

Elemento da convertire	Fattore di caratterizzazione
1kg di N ₂	0.191 kgCO ₂ eq
1kWh (LV)	0.417 kgCO ₂ eq
1kWh (MV)	0.385 kgCO ₂ eq

Tabella 6 - fattori di caratterizzazione ottenuti da SimaPro

Facendo riferimento, dunque, al caso studio della lama Previero:

Quantità da inventario	Fattore di caratterizzazione
7.235kg di N ₂	1.38 kgCO ₂ eq
33.6 kWh (LV)	14.10 kgCO ₂ eq

Tabella 7 - conversione dei dati di inventario di gas e energia

Per quanto riguarda invece la polvere, è stato necessario reperire i coefficienti di impatto tramite un'analisi della letteratura scientifica.

In particolare, sono stati reperiti 2 articoli che riportano l'uso dell'acciaio H13 per utensili in LCA. In particolare, in *Life Cycle Assessment and Cost Analysis of additive manufacturing repair processes in the mold industry* [27], si definisce l'impatto

ambientale totale per la produzione di uno stampo pari a 2.62 kgCO₂eq. In tale contesto, l'energia elettrica contribuisce per il 43%, l'argon per il 34% e la polvere di H13 per il 9%.

Considerando la massa di polvere impiegata nel processo citato è pari a 30.45 grammi (ovvero 0.03845 kg) l'impatto assoluto attribuibile al materiale è:

$$GWP_{H13} = \frac{2.62 \cdot 0.09}{0.03845} = 6.13 \frac{kgCO_2eq}{kg}$$

Equazione 19 – calcolo fattore di caratterizzazione dell'impatto ambientale della polvere di H13

Quantità da inventario	Fattore di caratterizzazione
7.235kg di N2	1.38 kgCO ₂ eq
33.6 kWh (LV)	14.10 kgCO ₂ eq
1.567 kg di polvere di H13	9.6 kgCO ₂ eq
Totale	25.1 kgCO ₂ eq

Tabella 8 - tabella riassuntiva con impatto totale caso studio n.1

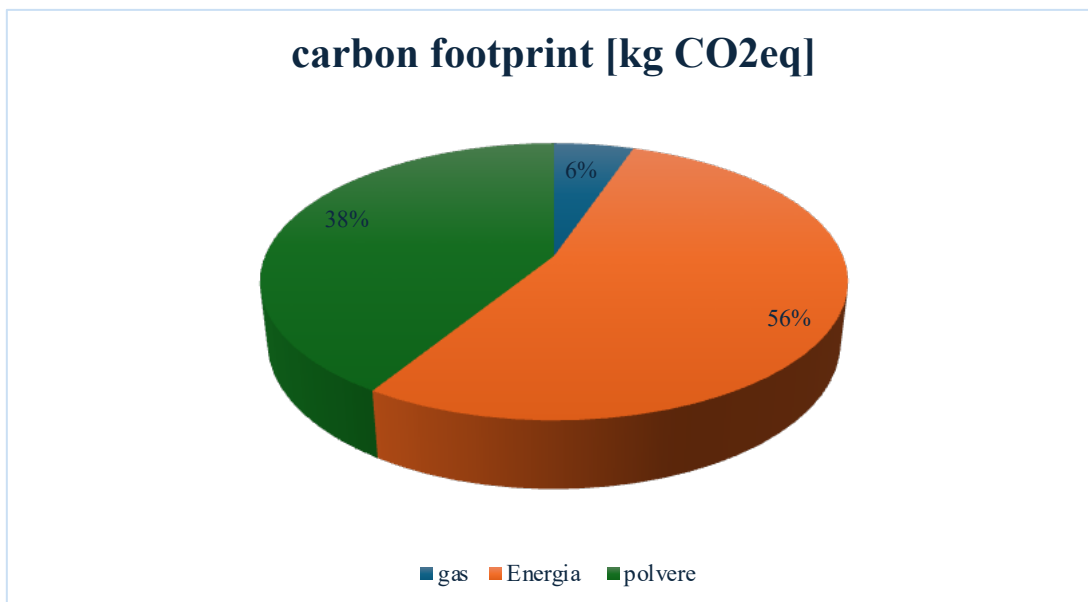


Figura 60 - Carbon Footprint caso studio n. 1

La scomposizione del profilo ambientale evidenzia come oltre la metà dell'impronta di carbonio totale sia generata dal fabbisogno energetico della macchina durante la fase di

deposizione. L'energia elettrica, con l'incidenza del 56%, si conferma essere l'*hotspot* ambientale principale, seguita dalla polvere metallica (38%), il cui peso ecologico è influenzato dalle fasi a monte di estrazione e atomizzazione del materiale. Al contrario, l'utilizzo dell'azoto come gas inerte risulta avere un ruolo secondario (6%), confermando la bontà della scelta rispetto all'argon in un'ottica di riduzione degli impatti. Tale distribuzione suggerisce che le strategie di decarbonizzazione più efficaci debbano passare attraverso l'efficientamento energetico e l'ottimizzazione dell'efficienza di deposizione.

Dunque, complessivamente, il processo di deposizione per la riparazione della lama Previero comporta un *carbon footprint* pari a 25.1 kgCO₂eq.

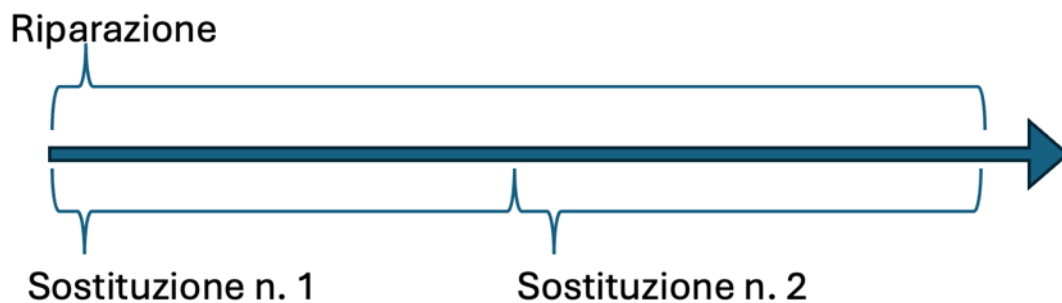


Figura 61 – confronto durate riparazione e sostituzione

L'analisi di sostenibilità assume il massimo significato quando il processo di riparazione tramite Directed Energy Deposition (DED) viene confrontato con lo scenario di sostituzione tradizionale. Anche in assenza di dati specifici relativi alla produzione primaria del componente, è comunque possibile effettuare una stima cautelativa basata sull'impatto della materia prima. Considerando che il grezzo della lama in acciaio AISI D2 ha una massa pari a 12 kg e che il fattore di emissione associato all'estrazione e alla prima lavorazione di tale lega è compreso tra i 2.5 e i 3.5 kgCO₂eq/kg di materiale, la produzione del materiale vergine per un singolo componente comporta un impatto di 30 kgCO₂eq.

Se si estende il confronto alla vita utile del componente, le differenze diventano ancora più marcate. Le evidenze sperimentali mostrano infatti che la riparazione mediante il riporto in H13 garantisce una durata operativa doppia rispetto alla lama originale. Ne consegue che, nello stesso intervallo temporale in cui la lama riparata assolve la propria

funzione, lo scenario tradizionale richiederebbe la produzione di due nuove lame, portando l'impatto della sola materia prima a 60kgCO₂eq (Figura 62).

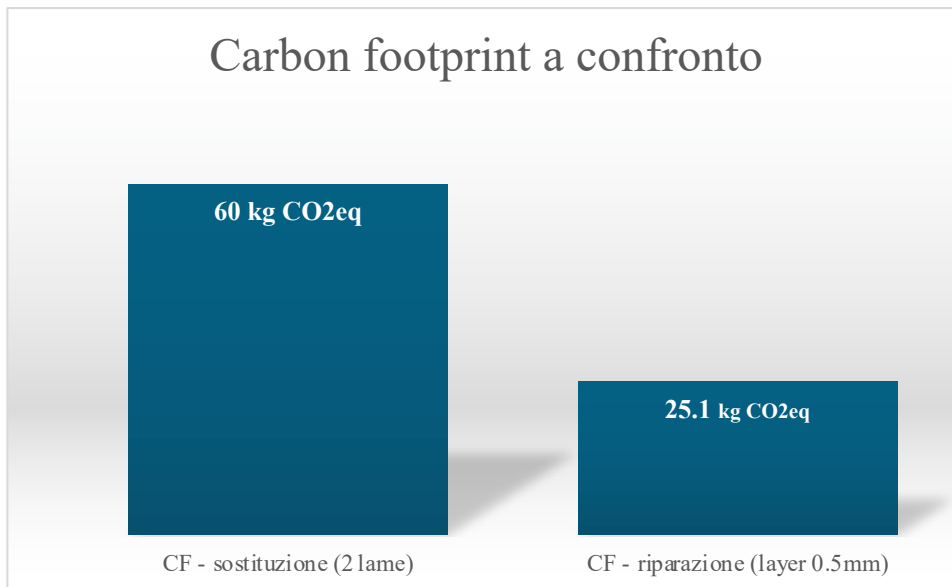


Figura 62 – confronto carbon footprint sostituzione vs. riparazione, escludendo postprocessing

A questo punto è necessario includere anche le lavorazioni di asportazione di truciolo, che contribuiscono all'impronta di carbonio complessiva. Nel caso della riparazione, sulla base dei dati estratti dal software SimaPro, la quantità di materiale da rimuovere dopo il processo DED è pari a circa 0.4kg. Considerando un fattore emissivo di 2.05 + 0.31 kgCO₂eq per kg di materiale asportato, l'impatto associato risulta pari a circa 1kgCO₂eq. Nel caso della sostituzione della lama, la lavorazione meccanica di ciascuna richiede la rimozione di circa 4kg di materiale. Applicando un fattore emissivo pari a 1.42kgCO₂eq/kg, l'impatto complessivo per una lama risulta 5.68 kgCO₂eq. Dunque, per due lame risulta essere 11.4 kgCO₂eq.

Le ipotesi adottate dal software però non tengono conto del tempo di lavorazione né l'usura effettiva degli utensili, ma ci permettono di dare una stima sulla base del volume di materiale rimosso e sulla lega utilizzata.

Anche includendo tali contributi, il divario tra i due scenari rimane sostanziale. Il valore di 60 kgCO₂eq, a cui si sommano i 5.68kgCO₂eq per le lavorazioni meccaniche, risulta comunque nettamente superiore rispetto al processo di riparazione.

		Fase di asportazione di materiale:
Riparazione della lama	Per il processo: 25.1 kgCO ₂ eq	1 kgCO ₂ eq
Sostituzione di una lama	Per il materiale: 30 kgCO ₂ eq	5.68kgCO ₂ eq

Tabella 9 – confronto caso studio n.1 con sostituzione di una lama con post processing

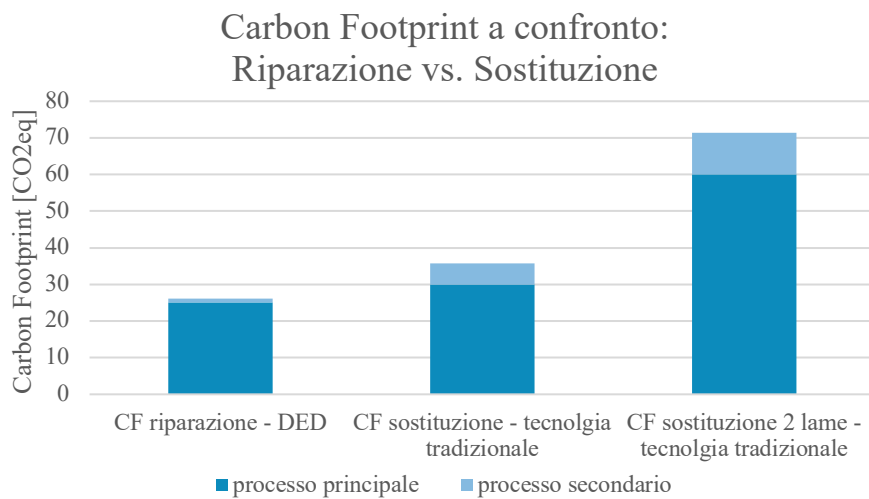


Figura 63 - confronto carbon footprint riparazione vs. sostituzione, con post processing

3.4. Caso studio n. 1 - Life Cycle Costing

Sotto il profilo economico, la competitività della tecnologia DED è strettamente legata alla struttura del costo orario del sistema Laserdyne 811, la quale risulta fortemente influenzata dalla natura sperimentale del contesto di analisi. In un centro di ricerca, infatti, i **costi fissi annui** presentano un'incidenza elevata a causa di un volume di produzione notevolmente ridotto. Tali costi comprendono non solo l'ammortamento del capitale investito nella macchina, ma anche gli oneri per i software dedicati e i canoni di aggiornamento di questi ultimi, la manutenzione ordinaria, gli affitti e i costi generali di gestione della pilot line.

Dalle analisi condotte, emerge chiaramente come la convenienza economica del processo sia direttamente proporzionale alla saturazione della capacità produttiva della macchina: un maggior numero di ore operative fisse corrisponde ad una minore quota di costi fissi imputabile alla singola riparazione, riducendo drasticamente i costi fissi.

Parallelamente, si distinguono i **costi variabili**, ovvero quegli oneri che si attivano direttamente in fase di deposizione e che includono il consumo di gas tecnici, l'energia elettrica, la polvere metallica e i materiali consumabili soggetti ad usura oltre ai costi di smaltimento legati al processo. Questi ultimi due termini vengono trascurati poiché minimi.

È, dunque, possibile affermare che lo scenario attuale rappresenta una sovrastima del costo unitario rispetto ad una potenziale produzione industriale. In un impianto produttivo reale, la distribuzione dei costi fissi e dei costi di progettazione su volumi di scala renderebbe la riparazione tramite DED una soluzione non solo tecnicamente superiore per il ripristino funzionale della lama, ma anche economicamente più vantaggiosa rispetto all'acquisto di componenti nuovi.

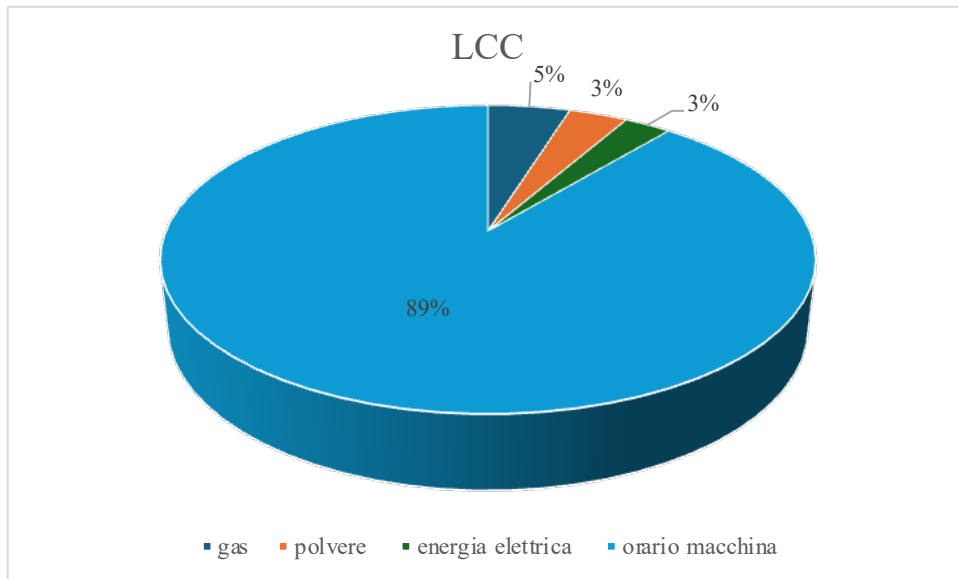


Figura 64 – LCC del caso studio n.1

LCC	%
gas	5%
polvere	3%
energia elettrica	3%
orario macchina	89%

Tabella 10 - costi per la fase di deposizione, legati esclusivamente al lavoro della macchina DED

Un'analisi economica completa richiede il confronto tra il costo della riparazione e quello della sostituzione integrale, includendo necessariamente gli oneri legati alla fase di post processing. Nel caso della lama riparata, infatti, vanno considerati i costi per le operazioni di sgrossatura e rettifica affidate a fornitori esterni per la rimozione del sovrametallo. Se limitassimo l'analisi al singolo intervento manutentivo, il processo additivo potrebbe risultare meno competitivo rispetto all'acquisto di un ricambio nuovo a causa dell'incidenza di tale lavorazione accessoria.

Tuttavia, il bilancio economico muta radicalmente nel momento in cui si adotta una prospettiva basata sulla vita utile del componente riparato. La strategia di riparazione, come già detto nelle sezioni precedenti, garantisce una maggiore durabilità del materiale depositato (H13), validando la convenienza dell'additive sul lungo periodo.

È doveroso precisare che tale vantaggio è subordinato alla verifica che il componente rigenerato presenti una vita utile paria almeno al doppio di un ricambio originale, ipotesi ampiamente supportata dalle evidenze sperimentali.

Qualora la durata operativa della lama fosse inferiore sensibilmente, la necessità di interventi più frequenti eroderebbe il risparmio generato, spostando il break-even point a sfavore della tecnologia additiva.

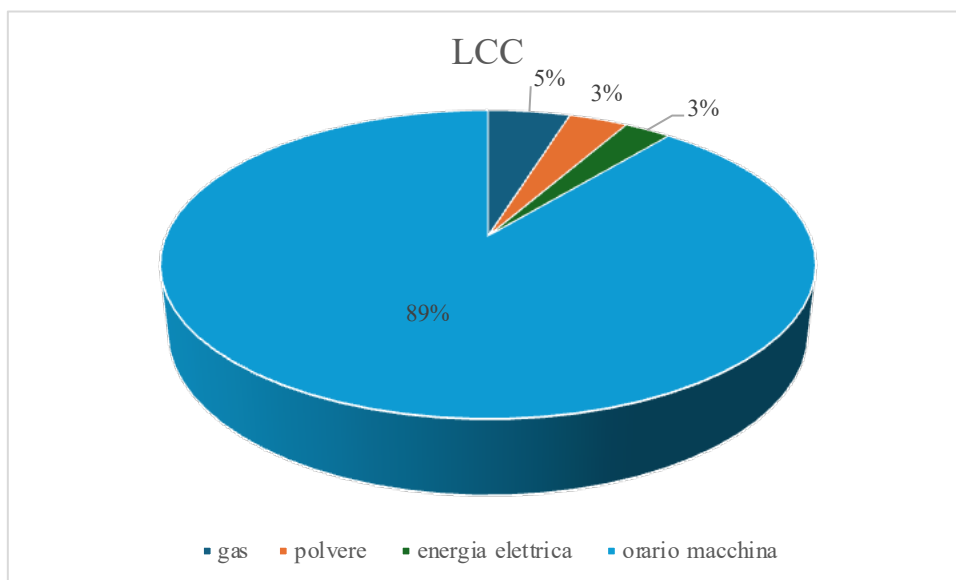


Figura 65 – LCC del caso studio n.1 con post processing

LCC	%
costo gas	3%
costo polvere	2%
costo energia elettrica	2%
costo orario macchina	57%
post processing	36%

Tabella 11 - costo riparazione, incluso la fase di post processing

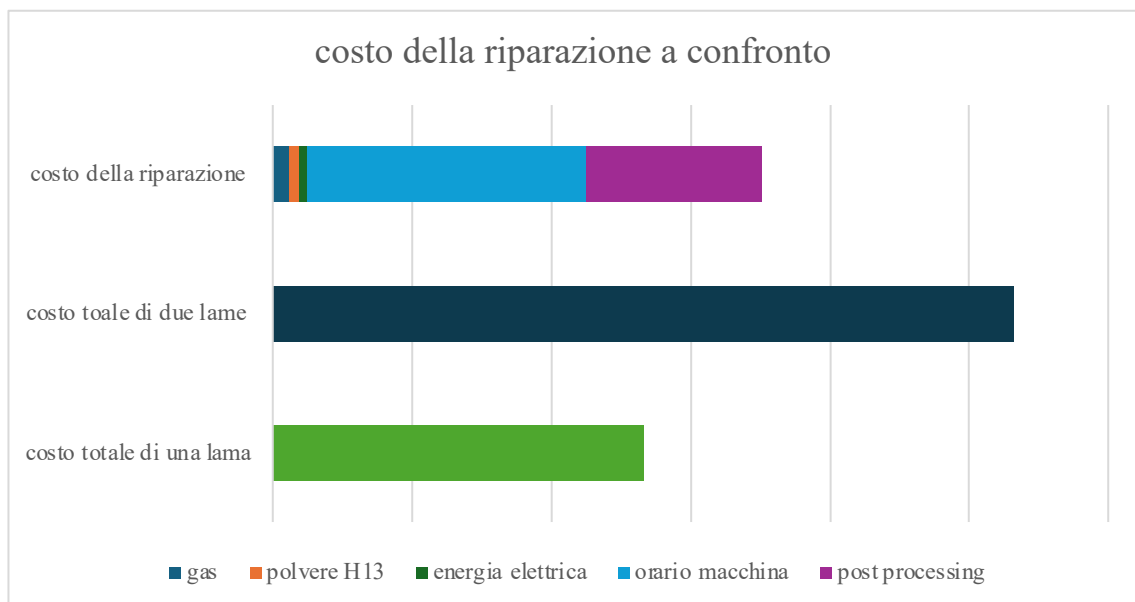


Figura 66 - confronto tra riparazione, sostituzione di una lama e sostituzione di due lame

3.5. Caso studio n. 2 – layer 0.7 mm

La variazione dei parametri di processo considerando la medesima riparazione, consente di verificare la robustezza e l'affidabilità del modello sviluppato per la determinazione del Life Cycle Inventory, garantendo che le correlazioni individuate mantengano la loro validità scientifica anche in condizioni operative differenti. Questo approccio permette di analizzare la sensitività del sistema al cambiamento di variabili critiche e confermare la solidità del modello.

La scelta di testare nuovi set di parametri risponde tuttavia non solo all'obiettivo di validazione. Nel contesto analizzato, il costo principale risulta essere legato strettamente al tempo macchina, come stabilito nella sezione 3.4. la possibilità di ridurre la durata della deposizione risulta quindi un fattore strategico sia in termini di produttività, sia in termini di costo complessivo della lavorazione.

Dall'analisi dei risultati in Tabella 12 emerge come il modello predittivo mostri un'elevata affidabilità per quanto concerne il consumo energetico, confermandosi uno strumento solido per la stima degli input di potenza. Al contrario, per quanto riguarda l'efficienza di deposizione del materiale, si riscontrano scostamenti significati dovuti all'adozione di parametri di processo notevolmente differenti. In questo scenario, l'utilizzo di una potenza laser quasi doppia rispetto al caso precedente, congiuntamente ad una velocità di scansione ridotta e ad una portata massica di polvere nettamente superiore (un'altezza del layer di 0.7 mm anziché 0.5 mm) ha determinato una cinetica di crescita volumetrica incontrollata.

	Teorico	Sperimentale
Consumo energetico	29.2 kWh	29.2 kWh
Efficienza polvere	34%	45%
Consumo di gas	3.1 m ³	-

Tabella 12 - confronto tra LCI teorico e sperimentale

Il volume reale depositato è risultato essere circa il doppio rispetto a quello nominale del CAD, innescando una forte discrepanza tra l'evidenza sperimentale e le assunzioni teoriche del modello. Se ne conclude che la capacità di prevedere con precisione il quantitativo di materiale effettivamente consolidato è circoscritta a regimi operativi

specifici, ovvero a quelle condizioni di processo in cui la crescita del volume si mantiene coerente con la geometria nominale. Al di fuori di questo intervallo di stabilità, la discrepanza è troppo grande per assumere accurata la previsione del materiale depositato. Sarebbe necessario introdurre nel modello un fattore di correzione geometrico che tenga conto della densità di energia fornita al materiale, per prevedere la sovra-crescita volumetrica anche in regimi ad alta produttività.

3.6. Caso studio n. 2 - Life Cycle Impact Assessment

Una volta completata la raccolta dei dati primari per il LCI, si è proceduto alla loro conversione in indicatori di impatto ambientale. I risultati ottenuti evidenziano un'impronta di carbonio pari a 22.7 kgCO₂eq, un valore inferiore rispetto ai 25.1 kgCO₂eq riscontrati nel caso studio precedente. Sebbene questo decremento suggerisca un miglioramento sotto il profilo della sostenibilità ambientale, è fondamentale sottolineare come tale dato sia influenzato da una dinamica di processo non ancora pienamente ottimizzata.

La significativa discrepanza riscontrata nella crescita del componente rispetto al modello CAD nominale rappresenta infatti una variabile critica che non può essere trascurata. Questa mancanza di controllo implica che il miglioramento dell'impatto ambientale è in parte condizionato da una geometria finale che non rispetta fedelmente le specifiche di progetto.

Pertanto, sebbene l'analisi LCA confermi la validità del metodo di calcolo, la futura attività di ricerca dovrà focalizzarsi prioritariamente sulla stabilizzazione della cinetica di crescita del materiale.

Quantità da inventario	Fattore di impatto
3.6 kg di N ₂	0.69 kgCO ₂ eq
29.2 kWh (LV)	12.2 kgCO ₂ eq
1.61 kg di polvere di H13	9.9 kgCO ₂ eq
Totale	22.8 kgCO ₂ eq

Tabella 13 - tabella riassuntiva con impatto totale caso studio n. 2

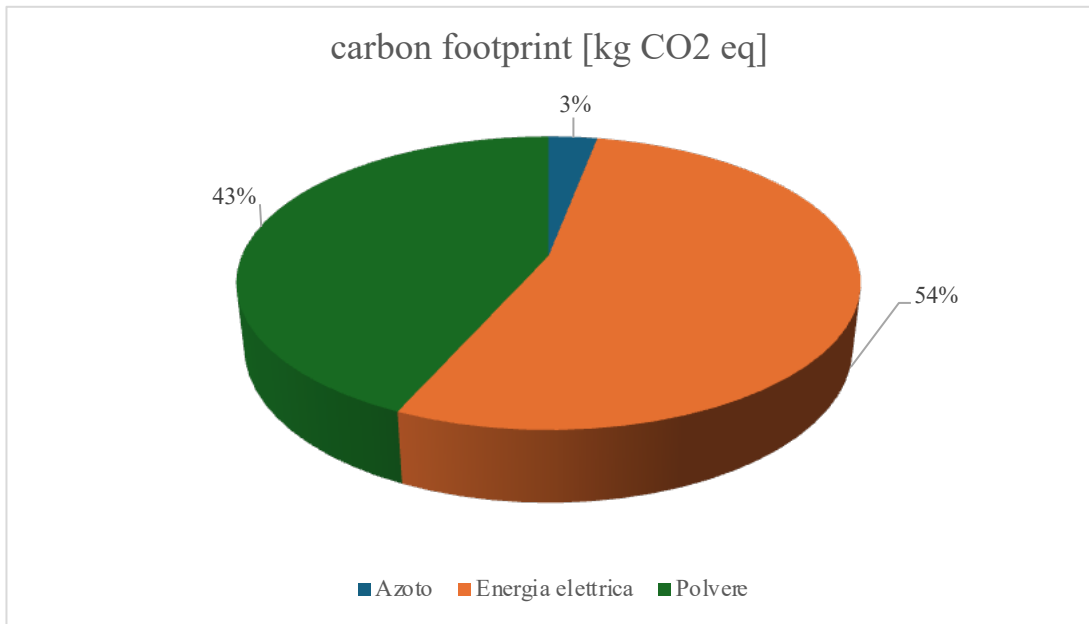


Figura 67 - Carbon Footprint caso studio n. 2

3.7. LCC dei Casi studio a confronto

Il confronto tra i due casi studio evidenzia come l'*hotspot* economico del processo di deposizione sia rappresentato, in entrambi gli scenari, dall'incidenza del costo orario del sistema. Si osserva una correlazione lineare tra la durata della fase di deposizione e l'onere finanziario complessivo: la variazione dei parametri di processo nel secondo caso studio ha permesso di contrarre il tempo di deposizione a una sola ora, dimezzando di fatto l'impatto dei costi legati al tempo macchina rispetto al primo scenario.

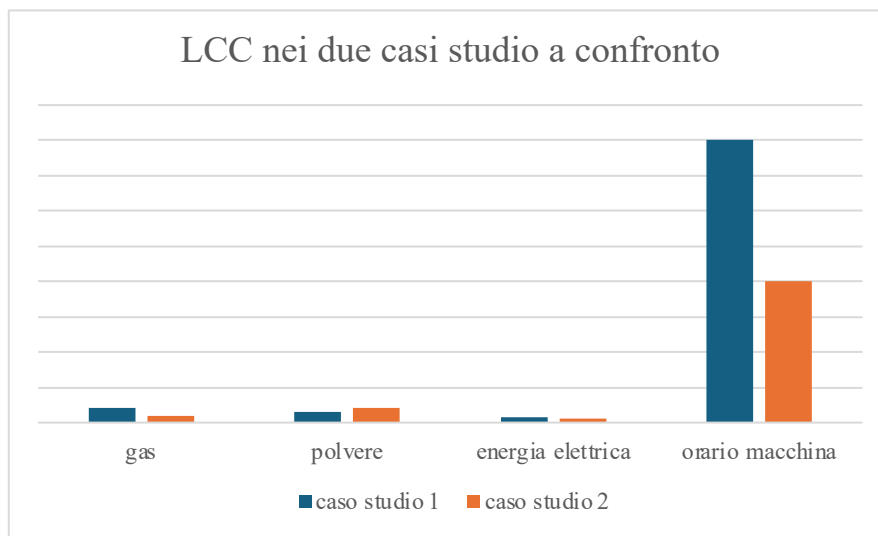


Figura 68 – rappresentazione dei singoli contributi di costo nei due casi studio

Questa riduzione è di fondamentale importanza poiché dimostra che la sostenibilità economica non dipende dal costo dei materiali di per sé, ma è strettamente legata all'efficienza temporale del processo. La riduzione del tempo impiegato della macchina per la costruzione abbassa la quota dei costi fissi, migliorando il margine di convenienza. Di contro, i parametri di processo del secondo caso studio, necessitano di una maggiore analisi per comprendere le proprietà meccaniche e la crescita effettiva del componente finale.

Includendo, infatti, la fase di post-processing nell'analisi comparativa dei costi, emerge un incremento critico per il secondo caso studio. Tale aumento è direttamente riconducibile alla quantità di materiale che effettivamente si consolida sul componente: l'ipotesi di dover asportare un volume di materiale doppio rispetto al caso studio n. 1

determina, di riflesso, un raddoppio dei costi di lavorazione, evidenziando così quale impatto può avere la crescita non controllata del componente.

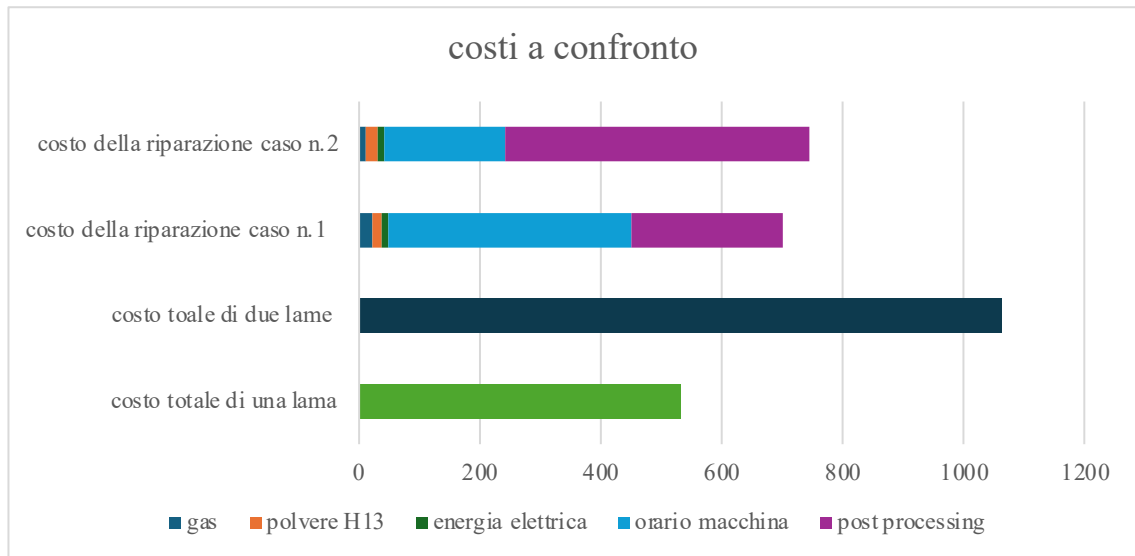


Figura 69 – confronto economico dei due casi studio con la sostituzione di una e di due lame

Conclusione

Il presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di valutare la sostenibilità ambientale ed economica dei processi di riparazione tramite tecnologia Directed Energy Deposition (DED), sfruttando la metodologia Life Cycle Assessment (LCA).

Attraverso lo sviluppo di un modello di inventario per il sistema Laserdyne 811, sono stati analizzati e confrontati due scenari operativi ben distinti: il primo, basato sui parametri di processo standard attualmente impiegati presso il CIM per la riparazione delle lame Previero usurate, e il secondo, ottenuto ipotizzando di massimizzare la produttività riducendo così il tempo macchina.

L'analisi comparativa della riparazione tramite DED con la sostituzione delle lame ha confermato inoltre la netta superiorità della deposizione diretta a livello di impatto ambientale, grazie alle superiori proprietà meccaniche conferite al componente tramite il riporto in acciaio H13. Sul piano economico, tuttavia, il vantaggio risulta meno marcato a causa dell'elevata incidenza del costo orario del sistema e delle operazioni di post-processing. In tal senso, lo studio ha dimostrato come la riduzione del tempo di deposizione rappresenti la variabile critica per incrementare l'efficienza di processo, a patto però di mantenere la crescita del componente coerente con il valore nominale.

In ottica di sviluppi futuri, emerge dunque chiara la necessità di ottenere una correlazione diretta tra i parametri di processo definiti e il volume di materiale effettivamente consolidato sul componente. Tale avanzamento permetterebbe di ottimizzare il design nominale da CAD, minimizzando il materiale in eccesso consolidato e, di conseguenza, riducendo il costo della fase di finitura superficiale. Si rende inoltre necessaria anche una caratterizzazione delle proprietà meccaniche relative al secondo caso studio, in modo tale poter affermare che l'altra produttività garantisca la medesima durabilità e stabilità strutturale del caso standard, in modo tale da assicurare il componente riparato nel tempo.

Bibliografia

- [1] H. R. M. e. a. Ritchie, «Our World In Data,» 2025. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>.
- [2] D. A. Dornfeld, *Green Manufacturing Fundamentals and Applications*, 2013.
- [3] United Nations, «TRANSFORMING OUR WORLD: THE 2030 AGENDA FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT,» 2015.
- [4] A. (. I. p. l. S. Sostenibile), «Obiettivi di Sviluppo Sostenibile,» [Online]. Available: <https://asvis.it/goal-e-target-obiettivi-e-traguardi-per-il-2030/>. [Consultato il giorno 11 novembre 2025].
- [5] European Commission, *The European Green Deal*, 2019.
- [6] E. Union, *Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 (European Climate Law)*, 2021.
- [7] *norma ISO 52900/2022*.
- [8] «Circularity, Remanufacturing: i vantaggi e il potenziale circolare, Circularity.,» n.d.. [Online]. Available: <https://circularity.com/circularguide/remanufacturing/>. [Consultato il giorno 2025].
- [9] M. D. B. Z. A. L. V. S. B. A. B. J. M. S. E. J. L. N. E. David Svetlizky, «Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges, and applications,» in *Materials Today* , vol. 49, 2021, pp. 271-295.
- [10] D. J. a. B. Stucker, «Laser Based Metal Deposition (LBMD) of Implant structures». U.S Brevetto 7,001,672, 21 febbraio 2006.
- [11] F. I. I. Z. E. M. G. Zhichao Liu, «LCA-based environmental sustainability assessment of hybrid additive manufacturing of a turbine blade,» *Green Manufacturing Open*, vol. 10.20517/gmo.2022.08, 2023.
- [12] Z. L. Q. J. W. C. T. L. H.-C. Zhang, «Comparative study for environmental performances of traditional manufacturing and directed energy deposition processes,» *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. %1 di %2https://doi.org/10.1007/s13762-017-1622-6.
- [13] *norma ISO 14040/2021*.
- [14] *norma ISO 14044/2021*.
- [15] J. O. R. G. Samruddha Kokare, «Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review,» *Journal of Manufacturing Systems*, 2023.
- [16] M. Miraglia, *STIMA DELL'INCERTEZZA NELL'ANALISI DEL CICLO DI VITA (LCA): APPLICAZIONE DELLA NORMA UNI AD UN CASO STUDIO*, bologna : alma mater studiorum - università di bologna , 2018.
- [17] C. Stefano, https://settimanadellasostenibilita.it/wp-content/uploads/2025/01/2025.01_Form2h_CarbonFootprint_LCA.pdf, Atlante, 2025.
- [18] R. U. N. Z. S. (. R. U. N. P. E. (. R. U. N. G. S. (. R. U. N. F. V. (. N. T. M. V. M.A.J. Huijbregts (author), ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact

assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization, 2016.

- [19] promotergroup.eu, [Online]. Available: <https://www.promotergroup.eu/index.php/servizi/certificazioni-qa/life-cycle-assessment-lca>. [Consultato il giorno 18 novembre 2025].
- [20] H. G. A. A. S. A. G. Jocelyn Ke Yin Lee, «Strategies to overcome barriers to LCA adoption in additive manufacturing,» *Technology in Society*, 2025.
- [21] G. C. ., A. R. C. ., F. B. Paolo C. Priarone, «Life-cycle energy and carbon saving potential of Wire Arc Additive Manufacturing for the repair of mold inserts,» *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.10.007>, 2021.
- [22] M. D. a. C. Weiß, «Energy Consumption in Metal Powder Production,» *Berg Huetttenmaenn Monatssh*, Vol. %1 di %2<https://doi.org/10.1007/s00501-020-01068-w>, 2021.
- [23] WAAM3D, «DED-BASED ADDITIVE MANUFACTURING AND WAAM'S CONTINUED RISE,» 2023. [Online]. Available: <https://www.waam3d.com/blog-posts/ded-based-additive-manufacturing-and-waams-continued-rise>.
- [24] F. Islam, *Sustainability Assessment of Direct Energy Deposition (DED) based Hybrid Manufacturing using Life Cycle Assessment (LCA) Method*, West Virginia University, 2021.
- [25] G. C. . F. M. . G. V. . G. I. . P. C. Priarone³, «Integrated WAAM-Subtractive Versus Pure Subtractive Manufacturing Approaches: An Energy Efficiency Comparison,» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2020.
- [26] †. H. W. a. J. Z. T. M. J. E. b. J. M. A. B. a. ., A. W.-H. a. A. D. d. W. Z. T. DebRoy, «Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties,» in *Progress in Materials Science*, 2018.
- [27] S. M. P. ., S. C. J. R. M. ., J. S. S. E. a. L. O. Joana R. Gouveia, «Life Cycle Assessment and Cost Analysis of Additive Manufacturing Repair Processes in the Mold Industry,» *sustainability - MDPI*, 2022.
- [28] C. P. Y. C. S. F. Z. K. R. J. Michael Wilson, «Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis,» *Journal of Cleaner Production*, 2014.
- [29] L. H.-o. V. M. P. P. C. K.-F. F. W. & K. A. Afaf Saai, «Comparative life cycle assessments of greenhouse gas emissions associated with directed energy deposition repairing and sand-casting replacement of a ship propeller,» in *Progress in Additive Manufacturing*, 2025.
- [30] B. Ö. D. L. Christian Spreafico, «Prospective LCA of patented Direct Energy Deposition technology for additive manufacturing,» in *32nd CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2025)*.
- [31] S. K. R. G. Christian Spreafico, «Prospective life cycle assessment of future Wire Arc Additive Manufacturing deposition process for large-scale steel parts,» *Environmental Impact Assessment Review*, 2026.
- [32] N. R. E. L. (NREL, «U.S. Life Cycle Inventory (USLCI) Database [Online],» [Online]. Available: <https://www.lcacommons.gov/nrel/search>. [Consultato il giorno 23 oct. 2025].

- [33] E. Association, «Ecoinvent Database [Online],» [Online]. Available: <https://www.ecoinvent.org>. [Consultato il giorno 23 oct. 2025].
- [34] G. P. H. Rojacz, «Carbon footprint of laser claddings: From raw materials and processing to wear protection solutions,» *Surface & Coatings Technology*, 2025.
- [35] J. A. a. F. M. Emanuele Pagone, «Life cycle sustainability assessment of repair through Wire and Arc Additive Manufacturing,» *REWAS 2022: Developing Tomorrow's Technical Cycles*, vol. I, 2022.
- [36] S. K. J. O. J. C. M. R. G. Rafaela C. Reis, «Life cycle assessment of metal products: A comparison between wire arc additive manufacturing and CNC milling,» *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2023.
- [37] J. O. b. R. G. Samruddha Kokare a, «A LCA and LCC analysis of pure subtractive manufacturing, wire arc additive manufacturing, and selective laser melting approaches,» *Journal of Manufacturing Processes*, 2023.
- [38] «What Is Data Cleaning? - MATLAB & Simulink,» [Online]. Available: <https://it.mathworks.com/discovery/data-cleaning.html>. [Consultato il giorno 1 dicembre 2025].
- [39] J. I. A. A. L. O. U. Aizpea Urresti, «Energy consumption monitoring in DED-LB for enhancing the process sustainability,» *Procedia CIRP*, pp. 210-213, 2024.
- [40] P. M. M. I. G. -. A. C. I. Sonia Dondi, «Azoto: evoluzione tecnologica e sostenibilità ambientale,» *Tecnologie & iniziative*, 2025.
- [41] GENERON, «Argon vs. azoto per l'inertizzazione atmosferica,» 2020. [Online]. Available: <https://stcharlesthemartyr.org/it/argon-vs-azoto-per-linertizzazione-atmosferica/>.
- [42] K. -. s. f. researching, «Perché l'argon è migliore dell'azoto per un'atmosfera inerte? Garantire reattività e stabilità assolute,» 2025. [Online]. Available: <https://it.kindle-tech.com/faqs/why-is-argon-better-than-nitrogen-for-conducting-reactions-under-an-inert-atmosphere>.
- [43] M. B. I. M. R. H. Jeremy Faludi, «Environmental Impacts of Selective Laser Melting: Do Printer, Powder, Or Power Dominate?,» *Journal of Industrial Ecology*, vol. <https://doi.org/10.1111/jiec.12528>, 2016.
- [44] S. S. GmbH, «GaBi Life Cycle Assessment Software and Database [Online,» [Online]. Available: <https://gabi.sphera.com>. [Consultato il giorno 23 oct. 2025].
- [45] b. ., V. F. a. ., *. ., A. G. D. a. ., B. P. a. Simone Donadello a, «Interplay between powder catchment efficiency and layer height in self-stabilized laser metal deposition,» *Optics and Lasers in Engineering*, 2022.
- [46] «NOXERIOR,» [Online]. Available: <https://www.noxerior.com/technology/pressure-swing-adsorption-psa.html>.
- [47] D. G. M. K. T. H. G. H. K. E. F. Y. J. C. Jennifer Bennett, «Repairing Automotive Dies with Directed Energy Deposition: Industrial Application and Life Cycle Analysis,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018.