



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in

Ingegneria Gestionale

A.A. 2020/2021

**Analisi della sostenibilità ambientale delle
lavorazioni ad asportazione di materiale**

Relatore:

Paolo C. Priarone

Candidato:

Marco Gendusa

Indice

<i>Introduzione</i>	<i>IV</i>
<i>Capitolo 1</i>	<i>1</i>
1.1 Macchine utensili	1
1.1.1 Analisi dei parametri delle macchine utensili	5
1.1.2 Fattori che influenzano la domanda di energia	6
1.2 Parametri in ingresso e in uscita dalle macchine utensili	7
1.3 Analisi dei livelli energetici	8
1.3.1 Classificazione a livello di processo	8
1.3.2 Classificazione a livello di sistema	11
<i>Capitolo 2</i>	<i>12</i>
2.1 Modelli Black-Box	15
2.1.1 Modelli Black-Box che considerano MRR	15
2.1.2 Modelli Black-Box che non considerano MRR	24
2.2 Modelli Bottom-Up	28
2.2.1 Modelli Bottom-Up che considerano le unità ausiliarie	28
2.2.2 Modelli Bottom-Up che non considerano le unità ausiliarie	34
Conclusioni	44
<i>Capitolo 3</i>	<i>46</i>
3.1 Fresatura	47
3.2 Tornitura	54
3.3 Rettifica	64
Conclusioni	66
<i>Capitolo 4</i>	<i>68</i>
4.1 Fluidi da taglio	69
4.1.1 Lubrorefrigerazione convenzionale	70
4.1.2 Taglio a secco	71
4.1.3 MQL	77
4.1.4 Nanofluidi	86
4.2 Raffreddamento criogenico	88
4.2.1 Aspetti economici	94
4.2.2 Effetti lubrorefrigeranti	95
4.3 Altri tipi di lavorazione	96
4.3.1 Lavorazione ibrida	96
4.3.2 Lavorazione a caldo	96
4.3.3 Raffreddamento ad alta pressione	97
4.3.4 HPJAM	98
Conclusioni	99
<i>Capitolo 5</i>	<i>101</i>

5.1 Ottimizzazione delle lavorazioni ad asportazione di materiale.....	101
5.2 Ottimizzazione delle 3E.....	102
5.2.1 Ottimizzazione della dimensione economica.....	102
5.2.2 Ottimizzazione della dimensione ambientale.....	104
5.2.3 Ottimizzazione della dimensione sociale	105
5.3 Approccio gerarchico alla strategia di risparmio energetico.....	107
5.4 Benchmarking energetico	108
5.4.1 Complessità del benchmarking energetico.....	109
5.5 Utensili da taglio	114
5.5.1 Materiale	114
5.5.2 Aumento dell'utilizzo dell'utensile.....	117
<i>Conclusioni.....</i>	<i>119</i>
<i>Appendice</i>	<i>127</i>
<i>Appendice 1</i>	<i>127</i>
<i>Appendice 2</i>	<i>131</i>
<i>Appendice 3</i>	<i>137</i>
<i>Bibliografia.....</i>	<i>141</i>
<i>Sitografia</i>	<i>159</i>

Introduzione

Lo sviluppo sostenibile è definito come “uno sviluppo che soddisfi i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri” [8].

Il tasso di crescita demografica mondiale registrato negli ultimi anni e la nuova globalizzazione devono far fronte alla sempre più crescente domanda mondiale di risorse e beni di consumo. Negli ultimi 30 anni, la domanda mondiale di energia è quasi raddoppiata; a livello mondiale, il settore industriale è responsabile di oltre il 35% del consumo totale di energia e di circa il 15% delle emissioni totali di CO₂. I processi produttivi e le attività manifatturiere svolgono un ruolo importante nel consumo energetico industriale e sono responsabili di circa il 90% del consumo energetico nel settore industriale. Secondo l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), le emissioni di CO₂ dovranno essere ridotte di circa il 25% entro il 2030 e dovranno raggiungere lo zero entro il 2070 per mantenere sotto i 2 °C l'aumento della temperatura globale.

La sfida che si è posta negli ultimi anni è come le industrie manifatturiere possano far fronte all'aumento della domanda di prodotti supportando contemporaneamente la sostenibilità ambientale. L'uso dell'elettricità proveniente da fonti non rinnovabili è uno dei principali fattori di aumento delle emissioni di anidride carbonica. Pertanto, l'industria deve essere in grado di aumentare la produzione e la produttività riducendo al contempo l'intensità energetica.

Le pratiche di lavorazione attuali sono ancora prevalentemente basate su modelli costi/profitti tradizionali, con l'obiettivo finalizzato al raggiungimento di un prodotto di qualità a basso costo e ad alto profitto. I requisiti ambientali vengono quindi trascurati in quanto considerati come qualcosa che genera ulteriori vincoli progettuali (soprattutto a livello legislativo) e aumenta i costi. Di conseguenza risulta improbabile che il paradigma della produzione finalizzato a massimizzare i ricavi cambi in modo significativo nel prossimo futuro. Tuttavia, l'integrazione dei requisiti ambientali in ogni singola fase dello sviluppo del prodotto e delle macchine, partendo dalla progettazione, è un approccio che porterebbe a un nuovo paradigma, raggiungendo così la produzione sostenibile.

Fare affidamento solo sulle politiche e sui regolamenti per ridurre le emissioni di anidride carbonica non è quindi sufficiente per raggiungere questo obiettivo. La produzione sostenibile non deve più risultare una mera pratica rispettosa della legge, bensì una grande opportunità per aumentare la concorrenza delle imprese nel mercato globale.

Anche se la produzione sostenibile è emersa solo di “recente” come disciplina per affrontare le questioni ambientali, economiche e sociali associate alla produzione, ha acquisito uno slancio significativo nell'ultimo decennio nel rendere una maggiore consapevolezza della necessità di sviluppare prodotti, processi e sistemi sostenibili per un maggiore benessere e prosperità della società, con benefici ambientali ed ecologici. Durante gli studi effettuati è emerso che sempre più aziende perseguono la produzione sostenibile per i seguenti motivi:

- vantaggi economici;
- impegno sociale nei confronti della propria comunità e delle parti interessate;
- conformità ai requisiti normativi;
- soddisfare le aspettative dei consumatori;
- premi e attenzione dei media.

Al giorno d'oggi, la questione energetica è diventata un punto focale per l'industria manifatturiera, ma non solo. L'importanza delle questioni energetiche aumenta rapidamente a causa dell'aumento dei costi energetici e delle sfide derivanti dalla riduzione delle emissioni di anidride carbonica. Migliorare l'efficienza energetica analizzando l'utilizzo dell'energia è un passo importante verso la riduzione dei gas serra e del consumo di energia. Pertanto, sia le industrie manifatturiere che i costruttori di macchine utensili hanno un forte incentivo a ridurre il consumo energetico e le emissioni di CO₂. L'industria manifatturiera, in particolare, ha un notevole potenziale per il risparmio energetico e la riduzione delle emissioni. La lavorazione meccanica è uno dei processi più importanti e diffusi impiegati nelle industrie manifatturiere. Di conseguenza, la riduzione del consumo energetico e delle emissioni di anidride carbonica potrebbe alleviare il carico energetico e migliorare le prestazioni ambientali dei processi di produzione.

Il consumo di energia rinnovabile potrebbe essere la soluzione migliore per ridurre l'impatto ambientale. Tuttavia, esiste una serie di barriere nella generazione di energia rinnovabile che è unica per ciascuno Stato: risulta pertanto essenziale ottimizzare l'utilizzo dell'energia elettrica. L'idea di sviluppo sostenibile è ben definita e implementata a livello macro-produttivo, ma emerge una grave mancanza di pratiche di implementazione. L'industria si sforza di raggiungere la sostenibilità attraverso cambiamenti nel prodotto, nei cicli dei materiali, nel recupero delle risorse e nelle innovazioni delle pratiche di produzione al fine di raggiungere gli obiettivi dello sviluppo sostenibile. Tuttavia, il divario tra scienza, definizione delle politiche e attuazione deve essere colmato.

Lo sviluppo di processi produttivi sostenibili sta diventando un aspetto sempre più rilevante per l'industria manifatturiera. La sostenibilità non riguarda solo le questioni ambientali; ma anche l'equità sociale e lo sviluppo economico.

Il tempo di produzione, l'energia elettrica e il suo consumo, i costi di produzione, le emissioni di CO₂, la gestione dei rifiuti, la salute e la sicurezza personale, il consumo di acqua sono le principali metriche sostenibili. I fattori di lavorabilità includono la qualità della superficie, la forza di taglio, la temperatura di taglio, le sollecitazioni residue e le caratteristiche del truciolo. La sostenibilità è quindi un concetto dinamico e multidimensionale [88], la cui origine deve partire da un sistema di valori, definito in un insieme di obiettivi che sono associati a tre principi fondamentali: economia, ecologia e equità. Le tre dimensioni, chiamate le 3E (*ecology, equity, environment*), interagiscono dinamicamente tra di loro; di conseguenza, bisogna agire in modo da soddisfare tutte e tre le sfere senza trascurarne nessuna.

La creazione di valore sostenibile di prodotti e servizi è diventata essenziale. I valori sostenibili consistono in valori economici, ambientali e sociali. I valori economici sono relativamente facili da calcolare. Tuttavia, i valori ambientali e sociali sono difficili da ottenere dal punto di vista dei processi produttivi.

Alla luce della teoria delle 3E, i principali requisiti della sostenibilità possono essere enunciati nell'utilizzo delle risorse rinnovabili, nella riduzione degli impatti ambientali, nel miglioramento della salute sul luogo di lavoro e della sicurezza personale, nel miglioramento della qualità della vita. Il settore manifatturiero è uno dei settori più idonei per l'applicazione dei principi di sostenibilità a causa dell'enorme utilizzo di risorse naturali e del suo impatto ambientale.

Il processo di lavorazione sostenibile può quindi essere descritto come il processo che migliora il rispetto dell'ambiente, riduce gli sprechi, riduce il consumo di energia, riduce i costi di lavorazione e migliora la sicurezza e la salute operativa.

Il concetto alla base delle 3E risiede nel fatto che le aziende dovrebbero concentrarsi tanto sulle questioni sociali e ambientali quanto sui profitti. In un contesto aziendale, questa idea si colloca in un quadro operativo denominato gestione del ciclo di vita [3] (LCA, Life-Cycle Assessment); essa integra i sistemi di gestione delle aree occupazionale, ambientale e della qualità ai sensi delle 3E. La prima, supportata da OHSAS-18001 [7] (Occupational Health and Safety Assessment Series), concretizza la strategia della dimensione sociale attraverso la Responsabilità Sociale dell'impresa e la salute e sicurezza sul lavoro; la seconda, la serie ISO-14000 [5], è uno standard internazionale di gestione ambientale che rende operativa ed efficace

la dimensione ambientale; infine, la serie ISO9000 [6] permette la gestione della qualità e della struttura della dimensione economica.

Questa prospettiva fornisce alla sostenibilità un carattere multidimensionale e complesso, comportando il soddisfacimento di più obiettivi simultanei, molti dei quali possono essere totalmente o parzialmente in conflitto: i miglioramenti in una dimensione possono infatti compromettere le altre due dimensioni. Per trovare un equilibrio, è essenziale un processo di ottimizzazione in grado di definire le priorità, selezionare e adeguare gli obiettivi, i bisogni e i requisiti.

Partendo dal concetto di sostenibilità, nei capitoli successivi saranno analizzate le macchine ad asportazione di materiale e il loro relativo consumo energetico, mediante un'analisi comparativa della letteratura dei diversi modelli sull'efficienza energetica delle operazioni di lavorazione ad asportazione di materiale. Verranno inoltre valutate le possibilità per ottenere una maggiore sostenibilità, energetica ma non solo, di questo tipo di lavorazioni. Tramite un'analisi critica, questa Tesi compilativa si prefigge l'obiettivo di definire lo stato dell'arte della sostenibilità delle lavorazioni ad asportazione di materiale, determinando le direzioni future per l'ottimizzazione di queste ultime.

Capitolo 1

Lavorazioni ad asportazione di materiale

Le lavorazioni per asportazione di materiale consistono in un processo in cui il prodotto finito viene ottenuto rimuovendo parte del materiale del grezzo sotto forma di truciolo. Ciò si ottiene imponendo il moto relativo tra il pezzo in lavorazione e un utensile opportunamente sagomato che provvede a tagliare il materiale separando il truciolo dal pezzo (Antonelli, Murari).

Le lavorazioni ad asportazione di materiale analizzate in questo lavoro sono state tornitura, fresatura, foratura e rettifica.

I processi come tornitura, fresatura e foratura sono ampiamente utilizzati nella produzione manifatturiera in quanto permettono di ottenere complesse geometrie 3D con elevata precisione dimensionale. La rettifica è utilizzata soprattutto per le operazioni riguardanti componenti di precisione, soprattutto per materiali duri o fragili come l'acciaio temprato e le leghe ad alte prestazioni, e per ottenere una finitura superficiale o una tolleranza elevata.

1.1 Macchine utensili

Nonostante le macchine utensili per le varie lavorazioni precedentemente illustrate compiano operazioni distinte, le singole unità principali e di supporto non sono fondamentalmente diverse l'una dall'altra. In questa sezione verrà fornita un'analisi generale sulla struttura delle macchine utensili per i vari processi di asportazione di truciolo.

Le macchine utensili possono essere assunte come costituite da due macro-componenti: unità principali e unità di supporto [8]. Le unità principali includono il telaio della macchina, gli assi rotanti e gli assi di avanzamento. Gli assi della macchina, a loro volta, sono costituiti da azionamenti, motori, inverter, guide e cuscinetti. Oltre al mandrino, che ha l'influenza più significativa sulla domanda di energia, i componenti di azionamento mettono in funzione elementi come tavole rotanti, slitte o altri sistemi ausiliari. Inoltre, i componenti principali includono anche i sistemi di controllo della macchina. Le unità di supporto includono invece vari sistemi ausiliari per fornire il fluido (refrigerante e/o lubrificante) alla macchina utensile. Di conseguenza, i componenti ausiliari tipici sono rappresentati dal sistema di raffreddamento,

dall'alimentazione del fluido da taglio, nonché dai sistemi idraulici e pneumatici. Le unità di supporto funzionano in modo continuativo e permanente, per mantenere le condizioni di processo desiderate. Ulteriori funzioni secondarie comprendono la rimozione dei trucioli, l'estrazione della nebbia oleosa, la preparazione e la distribuzione dei fluidi, nonché la fornitura di pressione idraulica e aria compressa. Le unità di supporto hanno un'influenza significativa sul fabbisogno energetico complessivo delle macchine utensili, in quanto operano prima, durante e dopo le operazioni di taglio.

Nella Figura 1.1 e nella Tabella 1.1 sono state rappresentate le componenti di una macchina utensile per il processo di asportazione di materiale.

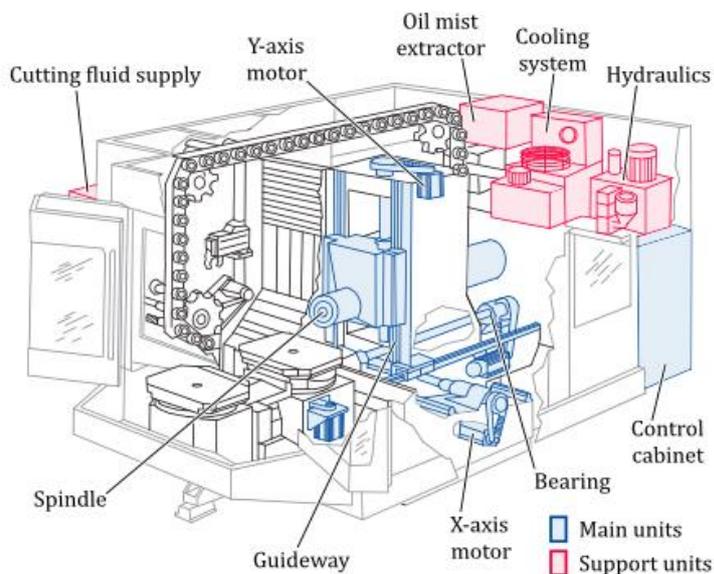


Figura 1.1 Struttura tradizionale di una macchina utensile [8]

Componente	Funzione
Motore mandrino	Fornire il movimento rotatorio per l'utensile da taglio o il pezzo in lavorazione
Assi motore	Fornire il movimento lineare o rotativo lungo gli assi
Motore idraulico	Fornire la pressione di serraggio per il pezzo
Motore pompe lubrificante	Alimentare la pompa del lubrificante
Motore pompe refrigerante	Alimentare la pompa del refrigerante
Pannello CNC	Recepire e trasferire le istruzioni del controllo numerico
Computer	Elaborare e visualizzare i dati di lavorazione
Illuminazione	Illuminare l'area di lavoro
Ventole	Raffreddare i componenti elettrici
Motore convogliatore truciolo	Convogliare il truciolo
Motore per cambio utensile	Cambiare l'utensile da taglio

Tabella 1.1 Componenti di una macchina utensile (adattata da [8])

A titolo esemplificativo, viene inoltre proposta l'analisi del consumo di potenza di una macchina utensile in un processo di tornitura. L'andamento del consumo di potenza totale nel tempo è rappresentato nella Figura 1.2 ed è stato misurato dal momento dell'accensione fino allo spegnimento completo della macchina [35]. Si è denotato un carico di base (*basic-state*), ovvero una richiesta fissa di energia necessaria per garantire la prontezza operativa della macchina, particolarmente elevato. Queste operazioni di preparazione culminano con il primo picco dell'immagine. Per muovere gli assi di avanzamento e ruotare il mandrino principale, come nel caso di taglio a vuoto (*air-cut-state*), è necessaria un'energia aggiuntiva, corrispondente al secondo picco. Solo una piccola parte dell'energia introdotta viene utilizzata per l'effettivo processo di asportazione del materiale (*cutting-state*). Inoltre, durante la lavorazione si verificano ulteriori perdite energetiche, ad esempio sotto forma di calore a causa dell'attrito. In particolare, come denota l'ultimo tratto del grafico, dopo il comando di spegnimento trascorre un certo lasso di tempo prima che tutti i componenti siano effettivamente inattivi e l'assorbimento di potenza della macchina utensile scenda a zero.

Gli stati emersi come più rilevanti sono standby, operativo (*basic-state*) e funzionante (*ready-state*). Inoltre, sono presenti anche transizioni energetiche come l'accensione o il riscaldamento, che tuttavia rappresentano una proporzione minore della domanda di energia. Tuttavia, gli stati energetici rilevanti variano a seconda di numerosi fattori.

Per quanto riguarda le caratteristiche della richiesta di potenza elettrica delle macchine utensili, si distinguono i profili di potenza stazionaria e non stazionaria dei vari componenti. Analizzando qualitativamente i diversi profili di potenza, è emerso come ad esempio l'aspirazione della nebbia oleosa abbia una richiesta di potenza stazionaria indipendente dalle condizioni della macchina in quanto sempre attiva nella maggior parte dei casi. Come questo, anche altri componenti possono mostrare profili di potenza non stazionari. Questo esempio mostra che un comportamento non stazionario non implica necessariamente una domanda di energia variabile, ma può anche rappresentare una domanda di energia fissa. Un ulteriore esempio può essere fornito dalla per il fluido da taglio, che viceversa può avere diversi livelli di richiesta di potenza in diversi stati operativi.

Per quanto riguarda la quota della domanda fissa di energia dei singoli componenti, i sistemi idraulico, di raffreddamento e di lubrificazione, in particolare, rappresentano una quota significativa del fabbisogno energetico complessivo.

Si può quindi concludere che, nel caso analizzato, la maggior parte della richiesta di potenza non deriva dalle operazioni di rimozione di materiale, bensì dall'avvio della macchina, dal motore del mandrino, dal servomotore, dalle pompe idrauliche e del liquido di raffreddamento. Il lettore può fare riferimento alla Figura 1.3, in cui è stata rappresentata la ripartizione del consumo medio di energia.

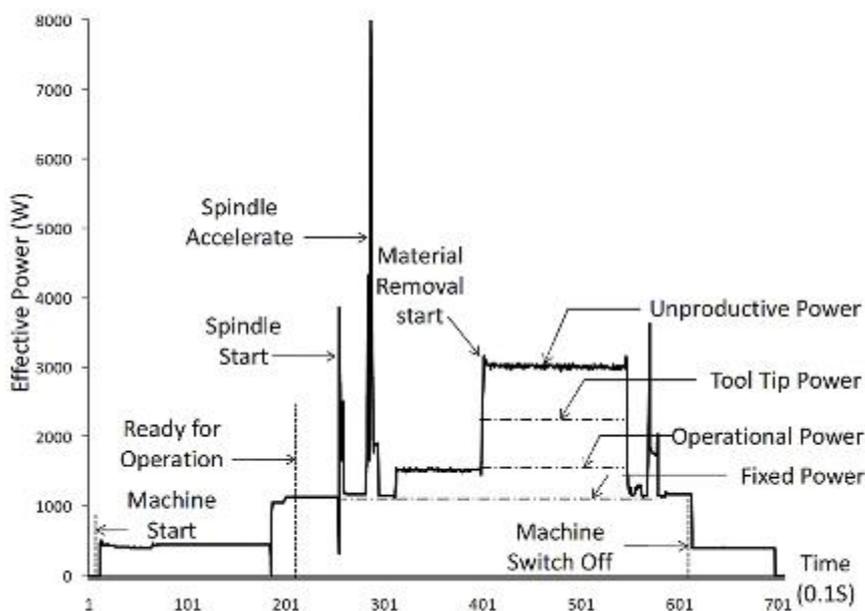


Figura 1.2 Consumo di potenza nel tempo di una macchina utensile [35]

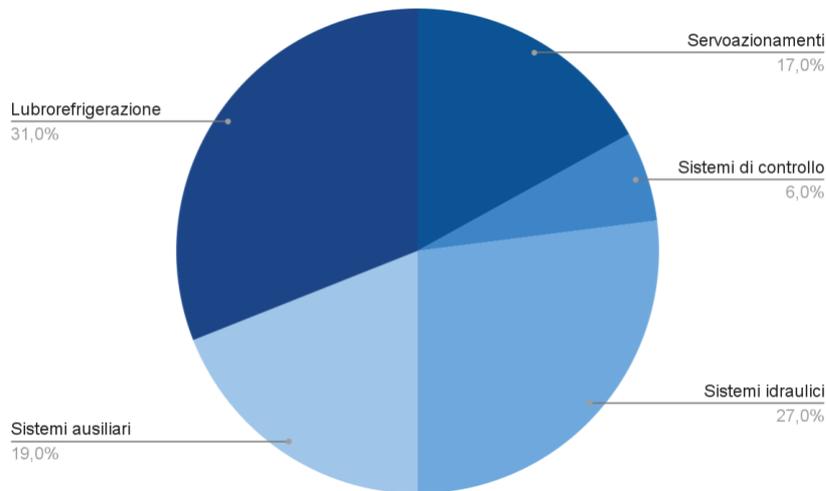


Figura 1.3 Ripartizione del consumo medio di energia di una macchina utensile (adattata da [35])

1.1.1 Analisi dei parametri delle macchine utensili

Sono diversi i parametri che vengono considerati nell'analisi della sostenibilità di processo ad asportazione di materiale [7]. Innanzitutto, il primo parametro considerato, direttamente collegato alla redditività, è il tempo di produzione, o tempo ciclo, che influenza anche i consumi di energia elettrica e di risorse. Il tempo di lavorazione determina la quantità di prodotti che vengono lavorati nell'arco temporale: obiettivo di ogni azienda è quindi quello di produrre il maggior numero di pezzi nel minor tempo possibile.

Il tempo ciclo è costituito da varie componenti. La prima, il tempo di attrezzaggio, è la somma dei tempi di serraggio del pezzo, di attrezzaggio dell'utensile da taglio e della preparazione all'operazione di taglio. Per quanto riguarda i tempi morti, questi comprendono l'avviamento e lo spegnimento della macchina, e il tempo di taglio a vuoto (*air-cut*), ovvero il tempo in cui l'utensile si muove ma non taglia il pezzo. Allo stesso modo, anche il tempo di taglio, di cambio utensile, di raffreddamento e lubrificazione fanno parte del tempo di lavorazione totale. Inoltre, anche altri fattori temporali, come il tempo di trasporto, il tempo di stoccaggio, il tempo di pulizia e di smaltimento influiscono sulla sostenibilità complessiva dei processi, sebbene siano più difficili da stimare.

Un altro importante fattore che determina la sostenibilità di un processo, e di cui sarà fatta un'ampia analisi nel Capitolo 2, è la richiesta di potenza dai diversi componenti della macchina utensile. Questa risulta difficile da determinare in quanto emerge complesso e dispendioso monitorare la richiesta di ciascun componente; le strutture di potenza nel processo di

lavorazione cambiano infatti a seconda degli stati di funzionalità delle macchine utensili. Tuttavia, in generale, la potenza massima viene consumata nelle fasi in cui tutti i componenti della macchina utensile sono attivi, o nelle fasi in cui i tempi risultano più dilatati.

Un ulteriore aspetto da considerare è la gestione degli scarti. Talvolta gli scarti delle lavorazioni possono rappresentare una percentuale significativa del prodotto di partenza; una corretta gestione degli scarti risulta quindi essenziale per raggiungere gli standard di sostenibilità. Per scarti non si intende solo il truciolo derivante dalla lavorazione, ma anche i prodotti lavorati e scartati durante i controlli di qualità. Per quanto riguarda il truciolo, per procedere al riciclo è essenziale che esso venga generato nel modo migliore possibile (impostando ad esempio determinati parametri di taglio), e che non venga “inquinato” dai liquidi lubrorefrigeranti.

Come evidenziato nel capitolo introduttivo, la sostenibilità ha allargato i suoi confini anche nell’ambito sociale. In particolare, i soggetti più a rischio sono gli operatori di macchina impiegati per le operazioni di lavorazione. Rumorosità, condizioni ambientali, rischio infortuni, sicurezza del posto di lavoro, esposizione a sostanze tossiche e ad alte temperature sono gli aspetti che influenzano e determinano una maggiore o minore sostenibilità sociale.

Infine, risulta essenziale considerare l’impatto ambientale della lavorazione. Questo è per lo più caratterizzato in termini di emissioni di CO₂ durante il processo di taglio. Non solo le attività dirette, ma anche quelle indirette che utilizzano energia contribuiscono alle emissioni di anidride carbonica. Pertanto, durante il processo di lavorazione ogni fase del processo contribuisce alle emissioni di anidride carbonica a seconda del tempo di processo corrispondente. Le emissioni di CO₂ totali per il processo di lavorazione sono la somma delle emissioni di anidride carbonica dovute alle attività della macchina utensile, ai componenti ausiliari, ai liquidi lubrorefrigeranti, alla pulizia e allo smaltimento degli scarti e dei rifiuti.

1.1.2 Fattori che influenzano la domanda di energia

L’energia assorbita dalle macchine utensili durante le fasi operative dipende da diversi fattori. La quota di energia fissa, che include l’energia necessaria per il funzionamento a vuoto della macchina, è determinata dalle caratteristiche della macchina utensile come modello, dimensioni, disposizione degli assi, masse in movimento, grado di automazione. La quota di energia variabile è invece influenzata dalla forma e dalle dimensioni della parte, oltre che dalla geometria e dal grado di usura dell’utensile. Caratteristiche del processo di taglio quali

parametri di taglio, metodi di raffreddamento e lubrificazione contribuiscono anch'essi al consumo energetico variabile.

Ulteriori fattori da prendere in considerazione per il consumo energetico sono infine l'ambiente di lavorazione, l'operatività della macchina, l'operatore di macchina, i guasti, la manutenzione e così via.

1.2 Parametri in ingresso e in uscita dalle macchine utensili

Analizzando il processo produttivo da un'altra prospettiva, questo può essere considerato il mezzo mediante il quale un input viene trasformato in un output [13]. In particolare, il personale addetto al processo, le varie informazioni (sul processo stesso, sulla produzione, ecc.), l'energia e il materiale rappresentano il flusso in ingresso, l'input appunto, che permette al processo di attivarsi. Dopodiché, questo converte l'input in un flusso in uscita che include il prodotto lavorato, il materiale di scarto, il consumo energetico e le emissioni.

L'analisi degli input e degli output della lavorazione, tuttavia, è complessa poiché soprattutto gli output sono diversi e dipendono da fattori correlati che non sempre risultano quantificabili. Nella Figura 1.4 sono stati rappresentati i flussi in ingresso e in uscita di una tipica macchina per la lavorazione dei metalli. Energia elettrica, aria compressa, fluidi da taglio e materia prima devono essere considerati come input principali a livello di macchina. Oltre al prodotto lavorato, gli output di base sono schegge o trucioli ricoperti di lubrorefrigerante (nella maggior parte dei casi ricoperti di olio) e calore. Inoltre, le quantità dei rispettivi flussi di energia e materiale sono anche determinate dal tipo di macchina e dai parametri di lavorazione. L'attrezzatura specifica della macchina comprende pompe, sistemi idraulici, mandrini, sensori e sistemi di filtraggio che utilizzano tutta l'energia elettrica per il funzionamento. Oltre a questo, i parametri del processo di lavorazione influiscono direttamente sul consumo di energia elettrica attraverso l'utilizzo e il controllo delle modalità di funzionamento dei componenti. Pertanto, nei capitoli seguenti sarà evidenziato che le condizioni di processo e il consumo di energia non sono statici, ma dipendono dalle condizioni specifiche del processo e dall'impostazione della macchina.

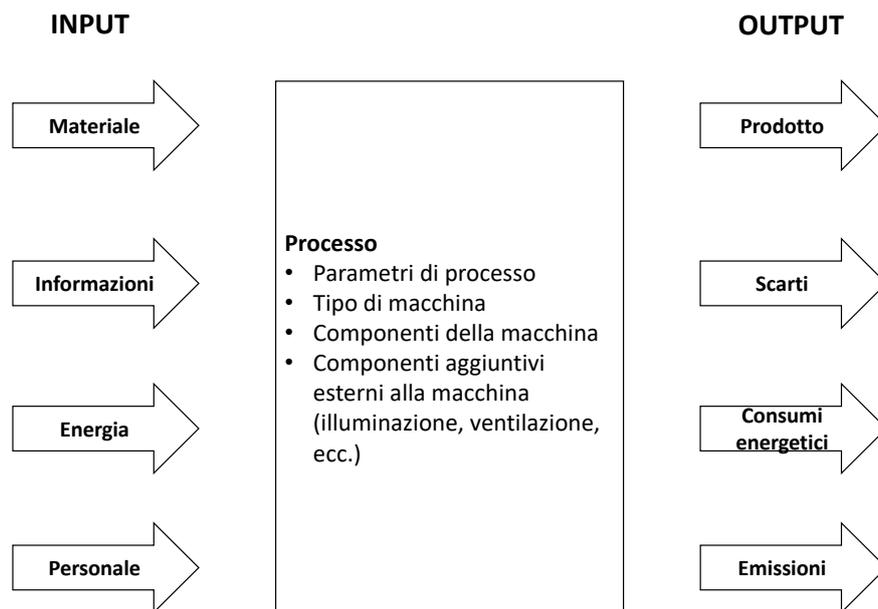


Figura 1.4 Flussi in ingresso e in uscita da un sistema di produzione (adattata da [13])

1.3 Analisi dei livelli energetici

In generale, il concetto di sostenibilità per le lavorazioni ad asportazione di truciolo si suddivide in tre livelli: livello di prodotto, di processo e di sistema [35]. Gli ultimi due livelli, in quanto dipendenti direttamente dalla lavorazione, sono quelli che sono stati presi in considerazione in questo lavoro [69].

Il livello di processo comprende le operazioni di asportazione e tutte quelle che ne permettono l'esecuzione, ossia le varie operazioni di preparazione al taglio e quelle ausiliarie. Il livello di sistema è invece più generico, comprende infatti tutte le fasi che precedono e seguono la rimozione del materiale.

1.3.1 Classificazione a livello di processo

In generale, il processo di asportazione di materiale include diversi stati di funzionalità della macchina utensile quali avviamento, calibratura, operazioni di taglio, operazioni di non-taglio e spegnimento della macchina a fine processo.

In base alle caratteristiche operative, il processo di lavorazione è stato classificato in due stati fondamentali: stato base e stato di taglio della macchina utensile. Nello stato base della macchina utensile viene considerata l'energia utilizzata per avviarla e per attivarne i diversi componenti, sia quelli principali che quelli ausiliari. Lo stato di taglio della macchina utensile comprende invece il consumo di energia durante l'asportazione del truciolo. È stato inoltre proposto un terzo stato della macchina utensile chiamato stato di pronto o inattività (*steady state*) [143]. Questo stato di transizione avviene tra lo stato di base e quello di taglio, e include l'energia consumata della regolazione utensile-pezzo e dell'impostazione dei parametri di taglio necessari.

Ciascun componente della macchina utensile ha una diversa richiesta di potenza a seconda dell'operazione che sta svolgendo, risulta quindi difficile determinare la richiesta di potenza istantanea per ogni componente e per ogni stato. La domanda di potenza nel processo di lavorazione cambia quindi a seconda dello stato di funzionalità della macchina utensile (come mostrato precedentemente nella Figura 1.2); tuttavia è possibile frazionare la potenza totale di lavorazione in potenza al minimo, potenza impostata, potenza di taglio a vuoto, potenza di taglio, potenza durante la fase di taglio, potenza per il cambio dell'utensile da taglio, potenza di lubrificazione (non applicabile per le lavorazioni a secco). Inizialmente, all'accensione della macchina utensile si presenta la fase di avviamento e la potenza richiesta aumenta man mano che i diversi componenti della macchina utensile si attivano. Dopo la fase di avviamento, vengono accesi i sistemi di monitoraggio e i motori elettrici. Tuttavia, il mandrino e l'asse di avanzamento sono inattivi: questa fase è chiamata fase di attesa/di pronto, o fase di riposo. Durante questa fase di standby viene consumata una quantità costante, fissa, di energia. Una macchina utensile CNC consuma una quantità costante di energia durante la fase di inattività e la fase di settaggio, che include il collocamento e il serraggio del pezzo e l'eventuale cambio dell'utensile da taglio. La potenza di taglio è una quantità variabile di potenza e dipende dalle proprietà intrinseche della macchina utensile, dai parametri di processo, dal materiale di cui è composto il pezzo, dal materiale dell'utensile da taglio, dalla geometria dell'utensile da taglio e dai meccanismi di raffreddamento e di lubrificazione [28]. Analizzando più nello specifico gli stati macchina durante la prima fase, si evidenzia il consumo energetico da parte dell'inverter, dei servo azionamenti, dei monitor, dei sistemi PLC e dei componenti relativi all'illuminazione.

Passando alla fase di taglio a vuoto, al contributo dei componenti del primo stadio si aggiunge quello di ulteriori componenti come i servomotori per l'asse x e l'asse y, il motore del mandrino e il sistema meccanico per supportare il sistema del mandrino. Normalmente, i sistemi di

raffreddamento e di lubrificazione sono integrati nella macchina utensile; tuttavia, le macchine utensili più vecchie non sono dotate di tali meccanismi: può quindi manifestarsi un consumo energetico aggiuntivo per alimentare i sistemi di lubrorefrigerazione della macchina utensile. Infine, per quanto riguarda la fase di taglio, si manifestano gli stessi contributi macchina della seconda fase, ma con un consumo energetico maggiore dovuto all'operazione di taglio. La potenza quest'ultima fase non viene calcolata direttamente, ma ottenuta sottraendo la potenza di taglio a vuoto dalla potenza totale della macchina utensile consumata durante la lavorazione.

Una differente classificazione di processo può essere fatta sulla lavorazione, suddividendola in tre diversi livelli: livello macchina, livello mandrino e livello di taglio.

Il primo livello comprende l'energia consumata dall'intera macchina utensile, come i sistemi di controllo e monitoraggio, i motori del mandrino e di azionamento, i sistemi di raffreddamento e lubrificazione.

A livello di mandrino viene considerato solo il consumo energetico del motore mandrino, il cui consumo in generale costituisce almeno il 15% dell'energia totale e dipende principalmente da come è stata progettata la macchina utensile.

Prendendo in considerazione l'ultimo livello, in questo si include unicamente l'energia consumata durante il tempo di asportazione del materiale, che è indipendente dalla macchina utensile.

Più in generale invece, la classificazione può essere fatta per quanto riguarda il consumo energetico da parte delle operazioni di taglio (*Cutting Energy*, CE) e delle operazioni di non taglio (*Non-Cutting Energy*, NCE) [77].

CE è l'energia consumata effettivamente per l'operazione di taglio del materiale, mentre NCE include tutte le operazioni il percorso utensile, l'eventuale cambio utensile, la variazione della velocità di rotazione del mandrino, le operazioni di settaggio e di supporto alle operazioni di taglio. Il percorso utensile è definito come l'energia consumata dalla macchina utensile per spostare la fresa nella posizione corretta per iniziare le operazioni di taglio vero e proprio, mentre il cambio utensile è definito come l'energia consumata dalla macchina utensile per cambiare e selezionare l'utensile più adatto [77]. Il cambio della velocità di rotazione del mandrino è definito come l'energia consumata dalla macchina utensile quando il mandrino ruota da una velocità bassa ad una velocità alta, e viceversa.

In generale, NCE rappresenta almeno il 30% del consumo energetico totale della macchina utensile [78]. In base a questa distinzione, si possono adottare strategie di ottimizzazioni mirate a ridurre il consumo energetico di una o più fasi di ciascuna delle due componenti.

Queste classificazioni sono alla base per le modellazioni energetiche, per la selezione dei parametri di taglio ottimale e per l'ottimizzazione del processo che verranno analizzate nei capitoli successivi.

1.3.2 Classificazione a livello di sistema

Un'ulteriore classificazione è quella proposta da Dahmus e Gutowski [57], in cui il processo di rimozione del materiale rappresenta solo una parte delle operazioni che compongono il sistema. L'analisi da loro proposta è quindi a livello di sistema, in cui vengono considerate operazioni complementari quali la produzione del materiale da lavorare, la costruzione e la preparazione dell'utensile da taglio, la preparazione dei fluidi da taglio, la costruzione e la pulizia delle macchine utensili.

Da questa analisi energetica è emerso che l'energia richiesta per l'operazione di rimozione del materiale può essere relativamente piccola rispetto all'energia totale richiesta dalle macchine utensili durante la lavorazione. L'energia per la rimozione del materiale rappresenta infatti una componente altamente variabile del consumo totale di energia: dipende infatti dalla durezza del materiale, dai parametri di processi e da altri fattori. Di conseguenza, a seconda del processo di lavorazione, la parte costante del consumo energetico totale (rappresentata dal mandrino, dai sistemi di controllo e monitoraggio, dal cambio utensile, dai sistemi lubrorefrigeranti) può prevalere o meno sulla rimozione del materiale, continuando in ogni caso a rappresentare una parte significativa del consumo energetico totale. In altre parole, la richiesta di energia elettrica per portare la macchina in uno stato pronto e supportare le operazioni di non taglio può superare la quota di energia richiesta per l'operazione di taglio.

Inoltre, a seconda dell'intensità energetica dei materiali in lavorazione, l'energia di produzione del materiale può, in alcuni casi, superare di gran lunga l'energia richiesta per il funzionamento della macchina utensile [111]. Quest'ultima conclusione è valida per i materiali vergini, in quanto l'energia di produzione di un materiale riciclato e l'energia di rimozione del materiale possono essere dello stesso ordine di grandezza.

Capitolo 2

Modelli energetici

Il primo passo per la riduzione del consumo energetico delle macchine utensili e dei sistemi di produzione consiste nell'elaborazione di modelli per comprendere e caratterizzare il loro consumo energetico. Per preparare una revisione dello stato dell'arte nel campo della modellazione delle lavorazioni ad asportazione di materiale è stata condotta un'indagine dettagliata della letteratura. Le parole chiave e le stringhe utilizzate nella ricerca della letteratura includevano (ma non erano limitate a): “sustainability machining”, “energy efficiency machining”, “machinability”, “machining” + una combinazione di altre parole (come ad esempio “turning”, “steel”, ecc.).

Le riviste disponibili sui siti Web Science Direct, SpringerLink, Elsevier, ResearchGate e Google Scholar sono state analizzate per articoli di revisione e articoli di ricerca originali nelle aree sopra menzionate per una revisione della letteratura. Il periodo preso in considerazione ha riguardato gli ultimi 30 anni, dal 1990 al 2021, con particolare attenzione ai lavori pubblicati durante gli ultimi 10 anni. Di tutto l'insieme di articoli individuati, ne sono stati identificati 49, i più specifici e rappresentativi della modellazione del consumo energetico delle macchine utensili.

Dopo aver effettuato un'ampia indagine bibliografica come descritto in dettaglio sopra, i risultati della revisione della letteratura sono stati riassunti nelle sezioni successive.

Gli articoli sono stati classificati secondo due diversi tipi di modellazione di processo: approccio Bottom-Up (BU) e approccio Black-Box (BB).

Nei modelli BB si valuta l'effetto sulla variazione del parametro in uscita (in questo caso il consumo energetico) in funzione della variazione dei parametri di processo, senza tenere conto del consumo delle varie entità che costituiscono la macchina utensile. In altre parole, valutano la caratteristica energetica correlando empiricamente i parametri di lavorazione in ingresso con la domanda di energia.

Viceversa, in un approccio BU si scompone idealmente la macchina utensile andando a indentificarne tutti gli stati o componenti (pompe, elettronica, di controllo ecc.) e si valuta l'influenza della variazione dei parametri operativi su ciascun componente; il risultato del consumo totale sarà la sommatoria di tutti i contributi.

Di seguito, nella Figura 2.1 è stata rappresentata una linea temporale cronologica con gli articoli che sono stati presi in analisi.

1990 Cuppini et al. "Tool wear monitoring based on cutting power measurement" doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(90\)90052-C](https://doi.org/10.1016/0043-1648(90)90052-C)

2002 Draganescu et al. "Models of machine tool efficiency and specific consumed energy" doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00930-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00930-5)

2004 Shao et al. "A cutting power model for tool wear monitoring in milling" doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.05.003>

2006 Gutowski et al. "Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes"

2007 Xu et al. "Energy based cutting force model calibration for milling" doi: <https://doi.org/10.1080/16864360.2007.10738554>

2008 Astakhov e Xiao "A methodology for practical cutting force evaluation" doi: <https://doi.org/10.1080/10910340802306017>

2010 - Rajemi et al. "Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.025>
 - Hu et al. "Characteristics of additional load losses of spindle system of machine tools" doi: <https://doi.org/10.1299/jamdsm.4.1221>
 - Avram e Xirouchakis "Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.10.010>

2011 - Rajemi et al. "Calculation of optimum cutting parameters based on minimum energy footprint" doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.088>
 - Mori et al. "A study on energy efficiency improvement for machine tools" doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.088>
 - Diaz et al. "Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use" doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-19692-8_46
 - Kong et al. "Software-based tool path evaluation for environmental sustainability" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.08.005>
 - Neugebauer et al. "Structure principles of energy efficient machine tools" doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.06.017>
 - Kara e Li "Unit process energy consumption models for material removal processes" doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.018>

2012 - He et al. "Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining" doi: <https://doi.org/10.1177/0954405411417673>
 - Bi e Wang "Energy Modeling of Machine Tools for Optimization of Machine Setups" doi: [10.1109/TASE.2012.2195173](https://doi.org/10.1109/TASE.2012.2195173)
 - Balogun e Mativenga "Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.015>
 - Guo et al. "Optimization of energy consumption and surface quality in finish turning" doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.091>

2013 - Calvanese et al. "Analysis of energy consumption in CNC machining centers and determination of optimal cutting conditions" doi: https://doi.org/10.1007/978-981-4451-48-2_37
 - Salonitis e Ball "Energy efficient manufacturing from machine tools to manufacturing systems" doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.045>
 - Uluer et al. "A model for predicting theoretical process energy consumption of rotational parts using STEP AP224 features" doi: https://doi.org/10.1007/978-981-4451-48-2_23
 - Li et al. "Energy requirements evaluation of milling machines based on thermal equilibrium and empirical modelling" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.039>
 - Yoon et al. "Control of machining parameters for energy and cost savings in micro-scale drilling of PCBs" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.028>

2014 - Liu et al. "A method for predicting the energy consumption of the main driving system of a machine tool in a machining process" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.058>
 - Velchev et al. "Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.099>
 - Aramcharoen e Mativenga "Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.065>
 - He et al. "An energy-responsive optimization method for machine tool selection and operation sequence in flexible machining job shops" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.006>
 - Guo et al. "Energy-based optimization of the material stock allowance for turning- grinding process sequence" doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6139-2>
 - Yoon et al. "Empirical power-consumption model for material removal in three-axis milling" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.061>

2015 - Jia et al. "Energy modeling for variable material removal rate machining process: an end face turning case" doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8133-8>
 - Zhou et al. "An energy-consumption model for establishing energy-consumption allowance of a workpiece in a machining system" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.090>
 - Guo et al. "An operation-mode based simulation approach to enhance the energy conservation of machine tools" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.097>
 - Liu et al. "A hybrid approach to energy consumption modelling based on cutting power: a milling case" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.049>
 - Xie et al. "An integrated model for predicting the specific energy consumption of manufacturing processes" doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8033-y>

2016 - Cai et al. "Fine energy consumption allowance of workpieces in the mechanical manufacturing industry" doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.028>
 - Priarone et al. "Modelling of specific energy requirements in machining as a function of tool and lubricoolant usage" doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.108>
 - Zhao et al. "Energy consumption characteristics evaluation method in turning" doi: <https://doi.org/10.1177/1687814016680737>
 - Zhong et al. "Decision rules for energy consumption minimization during material removal process in turning" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.084>

2017 Zhou et al. "An improved cutting power model of machine tools in milling process" doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9929-x>

2018 - Priarone et al. "On the concurrent optimization of environmental and economic targets for machining" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.163>
 - Jia et al. "Energy modeling method of machine-operator system for sustainable machining" doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.030>
 - Shi et al. "A novel energy consumption model for milling process considering tool wear progression" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.239>
 - Bagaber e Yusoff "Energy and cost integration for multi-objective optimisation in a sustainable turning process" doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.096>
 - Asrai et al. "A mechanistic model of energy consumption in milling" doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1404160>

2019 - Shi et al. "An improved cutting power-based model for evaluating total energy consumption in general end milling process" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.323>
 - Wang et al. "An optimization model for energy-efficient machining for sustainable production" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.271>

2020 Khan et al. "Sustainability-based performance evaluation of hybrid nanofluid assisted machining" doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120541>

2021 Pawanr et al. "Modelling of variable energy consumption for CNC machine tools" doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.038>

Figura 2.1 Cronistoria dei modelli di sostenibilità sull'efficienza energetica delle macchine utensili

2.1 Modelli Black-Box

2.1.1 Modelli Black-Box che considerano MRR

Nel 2006 Gutowski et al. [138] hanno proposto un modello che, sebbene incompleto, si affermerà come base di partenza per la formulazione di molti modelli futuri:

$$E = (P_0 + kQ)t$$

dove E è il consumo totale di energia, P_0 la potenza inattiva, k la costante della forza di taglio, Q il tasso di rimozione del materiale, t il tempo del processo di taglio.

Il termine P_0 è funzione dall'attrezzatura e delle caratteristiche richieste per supportare il processo, mentre k deriva dalla fisica del processo. Ad esempio, per un utensile da taglio, P_0 dipende dalla pompa del liquido di raffreddamento, dalla pompa idraulica, dal computer e da altre apparecchiature, mentre k è strettamente correlata alla durezza del pezzo da lavorare e alle specifiche della meccanica di taglio.

In questo modello, il processo di rimozione del materiale è stato studiato considerando le apparecchiature ausiliarie, ad esempio le pompe del refrigerante, nonché la produzione di truciolo, la preparazione del fluido da taglio, la preparazione degli utensili, la costruzione e la pulizia di macchine utensili. Gutowski et al. hanno dimostrato che l'energia di taglio può essere relativamente piccola rispetto all'energia totale richiesta dalle macchine utensili durante la lavorazione e per le operazioni ausiliarie. Il modello trascura il termine k quando i fattori che lo influenzano cambiano. È inoltre difficile determinare i parametri k e P_0 .

Nel 2014, He et al. [154] hanno presentato un modello esteso rispetto a quello formulato da Gutowski nel 2006, proponendo un metodo di ottimizzazione del risparmio energetico che considera la selezione della macchina utensile e la sequenza operativa delle operazioni (job) che la macchina deve svolgere. L'ottimizzazione è avvenuta affrontando il problema dal punto di vista della ricerca operativa e dello scheduling.

$$E = P_0(t_w + t_s + t_g + t_c) + kv t_c$$

dove P_0 è la potenza assorbita dalla macchina; t_w è il tempo di attesa del prossimo job che la macchina deve svolgere; t_s è il tempo di setup; t_g è il tempo per cambiare, eventualmente, utensile; t_c è il tempo di taglio; k è l'energia specifica di taglio e v è il tasso di asportazione del materiale.

Il tempo totale di taglio viene quindi suddiviso in cinque componenti principali rispetto al modello di partenza; si nota inoltre che l'ultima componente kvt_c risulta inferiore rispetto al modello del 2006 in quanto viene giustamente considerato soltanto il tempo di taglio: il modello di He et al. appare quindi più preciso per la stima del consumo energetico.

L'ottimizzazione energetica proposta si basa sul fatto che l'energia per le operazioni di lavorazione può essere ottimizzata selezionando adeguatamente le macchine utensili, e l'energia inattiva delle macchine utensili per le operazioni di non lavorazione può essere ridotta ottimizzando la sequenza delle operazioni dei job. Il metodo proposto potrebbe aiutare il responsabile della produzione a prendere decisioni sul risparmio energetico durante la gestione delle operazioni di produzione dei sistemi delle macchine utensili.

I risultati hanno inoltre mostrato che è possibile ottenere un maggiore risparmio energetico integrando la selezione della macchina utensile con la sequenza operativa rispetto a considerarle come due entità separate. Inoltre, sono emerse strette relazioni tra il consumo energetico totale, l'energia inattiva, l'energia di lavorazione, il tempo di inattività e l'intervallo di tempo.

Nel 2011 Kara e Li [118] hanno sviluppato un modello di consumo energetico di processo unitario utilizzando metodi sperimentali per osservare il consumo energetico relativo ai parametri di processo al fine di determinare il consumo energetico. Hanno identificato le due costanti specifiche per ogni macchina utensile, proponendo un modello empirico basato su questi coefficienti specifici per prevedere in modo affidabile il consumo di energia del processo.

$$SEC = C_0 + \frac{C_1}{MRR}$$

dove SEC è il consumo specifico di energia; MRR il tasso di asportazione del materiale; C_0 e C_1 sono i coefficienti specifici della macchina utensile.

Gli esperimenti sono stati progettati sulla base delle variabili di processo e della metodologia della superficie di risposta (RSM). Un confronto tra le stime del modello e le quantità di energia

misurate ha rivelato una coerenza superiore al 90%. Tuttavia, l'energia stimata non include il consumo energetico di avviamento, standby, bloccaggio e posizionamento del pezzo. Questi contributi sono stati trascurati volontariamente in quanto rappresentano meno del 10% del consumo totale di energia e non sono stimabili con una misurazione immediata.

Nello studio effettuato, la formulazione del consumo specifico di energia è stata derivata separatamente per le operazioni con e senza liquido refrigerante, ma non è stato dimostrato come i cambiamenti che avvengono in altre sotto unità ausiliarie influenzino il consumo energetico totale. Inoltre, il consumo energetico dovuto alla rotazione del mandrino e all'attrito dipende fortemente dai parametri di processo, fatto che non è stato preso in considerazione durante la formulazione del modello.

Applicando il modello in un caso di studio, hanno mostrato come venga consumata meno energia quando i tassi di rimozione del materiale sono più elevati (SEC decresce in funzione di MRR seguendo un'iperbole).

Questo è considerato come il primo modello Black-Box valido per più tipi di lavorazione che, seppur esteso nel tempo, rimane un valido riferimento anche per le macchine più moderne.

Nel 2012, Guo et al. [156] hanno sviluppato un modello rispetto ai parametri di taglio, determinando quelli ottimali al fine di ottenere il minimo consumo energetico e finiture superficiali precise durante le operazioni di tornitura. Rispetto ai modelli precedenti, per la prima volta è stata presa in considerazione la qualità del prodotto lavorato rappresentando quindi un'estensione del modello di Kara e Li del 2011.

$$SEC = C_0 v_c^\alpha f^\beta a_p^\gamma D^\phi + \frac{C_1}{v_c f a_p}$$

dove v_c è la velocità di taglio; f la velocità di avanzamento; a_p la profondità di taglio; D il diametro finale del pezzo; α , β , γ , ϕ , C_0 e C_1 sono costanti empiriche che si possono determinare sperimentalmente in base al materiale del pezzo, all'utensile e alla macchina.

Il modello si può estendere alle operazioni di fresatura e rettifica, nonostante presenti limitazioni simili a quelle di Kara e Li.

Nel 2013, Li et al. [71] hanno presentato un modello di consumo energetico esteso rispetto a quello proposto da Kara e Li nel 2011, definendo più chiaramente i coefficienti specifici della

macchina utensile. La modellazione più completa del processo ha permesso di ottenere un'accuratezza della stima dei consumi del 97%, rispetto all'84% fornita dal modello del 2011.

$$SEC = k_0 + k_1 \frac{n}{MRR} + \frac{k_2}{MRR}$$

dove SEC è il consumo specifico di energia; MRR il tasso di asportazione del materiale; k_0 è il coefficiente di fabbisogno energetico in funzione dell'operazione di taglio (equivalente al coefficiente C_0 del modello del 2011); k_1 è il coefficiente in funzione del motore del mandrino; k_2 è il coefficiente costante legato all'utensile; n è la velocità del mandrino.

Il modello proposto analizza il consumo energetico delle varie fasi di lavorazione, considerando sia le operazioni di taglio (*normal cutting*) che non di taglio (*air cutting*). I coefficienti k_0 e k_1 non vengono definiti come costanti ma dipendenti rispettivamente dalle condizioni di taglio (fisica del processo, materiale del pezzo, geometria dell'utensile, spessore del truciolo, fluidi da taglio) e dal motore mandrino, ovvero dal funzionamento meccanico di quest'ultimo. Il coefficiente k_2 può invece essere calcolato direttamente sommando la potenza assorbita dalla macchina in standby e la perdita di potenza del motore del mandrino. Il calcolo dei coefficienti rimane comunque una stima che, seppur generalmente affidabile, per alcuni modelli di macchina può risultare imprecisa e difficile da ricavare.

Emerge così che questo modello è un'estensione in quanto aggiunge la dimensione della velocità del mandrino (introducendo di conseguenza una terza costante), considerando la potenza di rotazione del mandrino, mentre il modello precedente non teneva conto del fatto che SEC varia al variare della velocità del mandrino quando MRR è fisso.

Nel 2014, Guo et al. [157] hanno proposto un modello per il processo di rettifica, simile a quello del 2012 valido per il processo di tornitura.

$$TSE = C_0' v_w^{e_1'} f^{e_2'} a_p^{e_3'} v_s^{e_4'} D^{e_5'} + \frac{C_1'}{v_w f a_p}$$

dove v_w è la velocità del pezzo; f è la velocità di avanzamento; a_p è la profondità di taglio; v_s è la velocità della mola; D il diametro del pezzo finale; C_0' e C_1' sono i coefficienti specifici della macchina utensile; $e_1', e_2', e_3', e_4', e_5'$ sono gli esponenti dei parametri di rettifica.

Come si può notare, l'avanzamento e la profondità di taglio presentano un'influenza significativa sul consumo di energia. L'applicazione di una maggiore velocità di avanzamento o di una maggiore profondità di taglio porterà a una drastica riduzione dell'energia per i processi di lavorazione. Tuttavia, in tali condizioni si osserverà una forte usura dell'utensile e un deterioramento della qualità della superficie del pezzo.

Nel 2015, Guo et al. [158] hanno proposto un'ulteriore estensione al modello del 2012, che era già stato affinato nel 2014, servendosi di un approccio sviluppato tramite un sistema CAM.

Rispetto al modello iniziale, la potenza del motore viene classificata in condizioni di scarico (*air cutting*) e condizioni di taglio. Vengono inoltre presi in considerazione i contributi degli assi di lavorazione e dei componenti ausiliari.

Per considerare questi aspetti, sono però state fatte delle assunzioni che minano l'accuratezza del modello: l'energia consumata durante le fasi di standby e di carico/scarico degli utensili non è considerata, l'inerzia del pezzo è trascurata, l'effetto dell'usura dell'utensile continua a non essere calcolato. Infine, l'accuratezza del modello viene compromessa dalla difficile stima del comportamento dinamico degli assi.

Nonostante queste limitazioni, il risparmio energetico stimato da questo modello presenta un'incertezza inferiore al 10%.

Sempre nel 2015, Liu et al. [92] hanno proposto un nuovo modello per la previsione del consumo energetico nei processi di fresatura, partendo da quello di Li et al. del 2013 e considerando due soli coefficienti. Utilizzando il modello di forza di taglio stabilito, la potenza di taglio sulla punta dell'utensile viene ottenuta analiticamente. Inoltre, la relazione tra la potenza totale consumata dalla macchina utensile e la potenza di taglio sulla punta dell'utensile è stata caratterizzata empiricamente.

$$SEC = \frac{C_0}{MRR} + C_1 \frac{P}{MRR}$$

dove \underline{P} è la potenza di taglio media, definita come somma delle potenze medie dovute alla rotazione e all'avanzamento; C_0 è il coefficiente correlato alla potenza di taglio a vuoto e C_1 è il coefficiente di proporzionalità della potenza di taglio.

È stato inoltre condotto uno studio comparativo tra il modello proposto e i modelli di Kara e Li del 2011 e Li et al. del 2013, in varie condizioni di taglio. La formulazione della previsione

energetica di Liu et al. risulta più precisa rispetto ai modelli precedenti in quanto più sensibile alle variazioni significative dei parametri di lavorazione. Il modello proposto risulta comunque da verificare su altri tipi di processo.

Partendo dal modello di Li et al. del 2013, nel 2016 Zhao et al. [40] hanno proposto un'estensione di questo considerando il consumo di potenza a vuoto del mandrino e quello delle pompe di refrigerante.

$$SEC = k_0 + \frac{k_1}{MRR} + \frac{k_2}{MRR}n$$

dove k_0 , k_1 , k_2 sono coefficienti ricavati empiricamente e n è la velocità di rotazione del mandrino.

Il modello continua a tralasciare gli effetti dell'utensile (cambio e usura), concentrandosi unicamente sull'operazione di taglio.

Nel 2016, Zhong et al. [109] hanno presentato un modello esteso rispetto a quello di Li et al. del 2013:

$$SEC = \frac{P_{fixed}}{MRR} + \frac{kn + b}{MRR} + \frac{\lambda v_c^\alpha f^\beta a_p^\gamma}{MRR}$$

dove P_{fixed} è la potenza fissa assorbita dalla macchina; n è la velocità di rotazione del mandrino; k e b sono i coefficienti specifici del motore del mandrino; $\alpha, \beta, \gamma, \lambda$ sono i coefficienti relativi agli utensili macchina, materiali del pezzo da lavorare, utensili da taglio e così via; a_p è la profondità di passata. Si può notare come i tre coefficienti siano stati definiti in maniera più esaustiva e di come siano tutti e tre correlati a MRR .

Il modello è valido sia per MRR costante che variabile. È emerso che a una certa velocità di asportazione del materiale, SEC è direttamente proporzionale a velocità di rotazione del mandrino, velocità di taglio, velocità di avanzamento e profondità di taglio. L'impatto della velocità di avanzamento su SEC è inferiore a quello della velocità di taglio e della profondità di taglio, il che significa che possono essere preferiti set di parametri di taglio con un'elevata velocità di avanzamento.

Nel 2017, Zhou et al. [75] hanno proposto un modello esteso affrontando le limitazioni di quello di Kara e Li del 2011, principalmente l'effetto che la velocità di rotazione n ha per determinare SEC.

$$SEC = \frac{P_{cut}}{MRR} = \frac{P_{standby} + P_{spindle}(n) + P_{material}}{MRR}$$

Questo modello definisce la potenza del mandrino in funzione della velocità di rotazione n . Viene inoltre studiata la relazione tra la potenza dovuta alla rimozione del materiale $P_{material}$ e n . Non sono inoltre presenti coefficienti nelle formule, e MRR è considerata una variabile indipendente.

Il modello considera velocità di avanzamento, larghezza e profondità di passata come variabili indipendenti. Cambiando queste variabili e utilizzando lo stesso MRR , è emerso che $P_{material}$ è debolmente influenzata. In generale, SEC dipende principalmente da MRR e n , e mostra poca sensibilità rispetto alle stesse variabili di prima.

Jia et al. [129] nel 2015 hanno proposto un metodo per il calcolo dell'energia assorbita durante un'operazione di tornitura a tasso di asportazione variabile, considerando gli impatti dei parametri di taglio sull'energia di taglio del materiale oltre che il cambiamento dinamico della potenza di taglio del materiale.

$$E = \int_0^T \lambda v_c(t)^\alpha f(t)^\beta a_p(t)^\gamma dt$$

dove λ , α , β , γ sono costanti; v_c è la velocità di taglio; f è la velocità di avanzamento; a_p è la profondità di taglio.

Si nota come il tasso di asportazione MRR sia stato scomposto in tre funzioni piuttosto che essere trattato come una singola variabile. Considerando appieno l'impatto di ciascun parametro di taglio sulla potenza di taglio, il modello sarà più coerente con il comportamento di consumo energetico di taglio del materiale della lavorazione effettiva.

Dato che il modello presentato si è focalizzato unicamente sull'operazione di taglio, per avere il quadro completo sul consumo energetico di tutto il processo bisognerà abbinarlo ad altri modelli energetici.

Nel 2018, Asrai et al. [115] hanno proposto un modello che mappa il flusso di energia all'interno di una macchina utensile, basandosi esclusivamente sui meccanismi attivi di conversione dell'energia. Per la modellazione, Asrai et al. partono dai modelli Li et al. del 2013 e Gutowski del 2006, espandendoli:

$$P(f, s, MRR) = C + (A_f f + B_f f^2 + C_f f^3 + D_f f^4) + (A_s s + B_s s^2 + C_s s^3 + D_s s^4) + (E + F_f f + F_s s + G_s s^2 + G_f f^2)MRR + K MR$$

Questa è un'equazione predittiva per il consumo di potenza di una fresatrice durante un processo di taglio, in funzione della velocità di avanzamento, velocità del mandrino e tasso di rimozione del materiale.

Per quanto riguarda la stima dei coefficienti dell'equazione, questa potrebbe risultare non immediata e complessa: è stata perciò proposta una forma semplificata del modello, ma meno precisa di quella completa:

$$P(f, s, MRR) = C + E(MRR) + F_f f(MRR)$$

dove C è una costante.

Questa formulazione risulta più adatta ai dati sperimentali. In ogni caso, entrambi i modelli proposti necessitano di ulteriori indagini, con misurazioni più accurate su una più ampia varietà di macchine, utensili da taglio, materiale da lavorare e range di potenza della macchina.

Nel 2019, Shi et al. [67] hanno proposto un modello costituito da due parti: la prima (coerente con quanto enunciato da Li et al. nel 2013) dovuta ai componenti ausiliari e alla rotazione del mandrino, e la seconda dovuta al taglio del pezzo. La prima parte è stata modellata in funzione della velocità di rotazione del mandrino, mentre la seconda parte è stata considerata proporzionale alla potenza di taglio. Il modello ha ereditato anche la teoria presentata da Gutowski et al. nel 2006.

$$SEC = \frac{P_{idle}}{MRR} + \frac{P_{cutting}}{\eta MRR}$$

dove P_{idle} è coerente con Li et al. del 2013 e include una parte di potenza in standby e una parte di rotazione del mandrino; $P_{cutting}$ è la potenza di taglio; η è il coefficiente di efficienza di taglio.

Quando la macchina utensile è inattiva, il consumo totale di potenza è uguale al consumo di energia in modalità inattiva in quanto $P_{cutting}$ è pari a zero. Shi et al. hanno inoltre notato che nelle stesse condizioni di taglio, diversi materiali richiedono diverso consumo di energia dalla macchina utensile. Ciò è dovuto al fatto che i materiali più duri di solito richiedono un maggiore potenza di taglio grazie alle maggiori forze di taglio.

Il modello proposto considera la maggior parte dei parametri di taglio (profondità di taglio, larghezza di taglio, avanzamento, velocità di rotazione, ecc.) durante il calcolo della potenza di taglio. A differenza di altri modelli, questo modello necessita di una sola calibrazione per una macchina utensile.

Nel 2014 Velchev et al. [131] hanno proposto un modello energetico calcolando il consumo energetico durante le fasi di taglio e di cambio utensile:

$$E = SEC MRR t_m + P_0 t_c \frac{t_m}{T}$$

dove t_m è il tempo di taglio, t_c è la durata del cambio utensile, P_0 è la potenza in fase di riposo, T è la durata dell'utensile. MRR , SEC , t_m e T sono funzioni dei parametri di taglio. È uno dei pochi modelli in cui è stata considerata l'influenza dell'utensile.

È stata determinata l'influenza della velocità di avanzamento e della profondità di taglio sul consumo energetico, ottenendo un minor consumo di energia se con determinate condizioni di lavorazione vengono selezionati i valori massimi possibili di avanzamento e profondità di taglio.

Rimane un modello limitato alle sole operazioni di taglio, non prendendo in considerazione le altre fasi della lavorazione e non considerando l'apporto delle unità ausiliarie.

Xie et al. [63] nel 2015 hanno presentato un modello integrato per la previsione del consumo energetico specifico (SEC) del mandrino, prendendo in considerazione le caratteristiche dinamiche della potenza di taglio del materiale, l'influenza delle macchine utensili e del materiale del pezzo, e i parametri di taglio sull'energia di taglio totale del materiale.

$$SEC = \frac{\int P_i(t)dt}{\int MRR(t)dt}$$

Analizzando quindi la potenza P_i assorbita dal mandrino, questa viene scomposta in perdita di potenza principale del motore, perdita di potenza degli avvolgimenti del motore, perdita di carico aggiuntiva del mandrino, perdita di potenza meccanica del rotore, energia del campo magnetico del motore, perdita di potenza meccanica della trasmissione meccanica sistema di trasmissione, l'energia cinetica del sistema di trasmissione, potenza di taglio.

MRR è calcolata considerando la variazione nel tempo della profondità di taglio, della velocità di avanzamento e della velocità di taglio.

Questo è un modello di consumo energetico che assume forme diverse a seconda della fase del processo di lavorazione. I modelli SEC precedenti trattavano il tasso di rimozione del materiale come una variabile globale, non fornendo l'impronta energetica per il processo di lavorazione e non fornendo supporto adeguato alla pianificazione del processo.

2.1.2 Modelli Black-Box che non considerano MRR

Nel 1990 Cuppini et al. [19] hanno proposto un primo modello sulla potenza di taglio in base all'usura dell'utensile, assumendo una relazione lineare tra potenza di taglio e usura dell'utensile:

$$P_m = \alpha VB + \beta$$

dove α e β sono costanti empiriche e VB è l'usura sul fianco dell'utensile.

È chiaro che si tratta di un modello impreciso (l'usura dell'utensile viene infatti calcolata indirettamente monitorando la potenza assorbita dal mandrino) e che non considera tutte le altre variabili che influiscono alla determinazione della potenza di taglio totale. È comunque un primo tentativo di modellazione che, seppur approssimativo, manifesta la necessità di avere un riferimento per poter ottimizzare il consumo energetico.

Nel 2002 Draganescu et al. [27] hanno introdotto un modello dettagliato del consumo energetico specifico basato sui parametri di taglio durante le operazioni di fresatura.

L'energia specifica consumata è stata così espressa:

$$E_{cs} = \frac{\pi D F_t}{3.672 \times 10^6 s_z t B z \eta}$$

dove D è il diametro dell'utensile; s_z la velocità di avanzamento; t la profondità di taglio; B la lunghezza del contatto dell'utensile; z il numero di avanzamenti (denti) dell'utensile; $F_t = f(v; s_z; t; B, z; A)$ la componente tangenziale delle forze di taglio come funzione polinomiale del secondo ordine, con i logaritmi naturali dei suddetti parametri, compresi la velocità di taglio, v , e la non simmetria della fresatura, A , ottenuta anche mediante modellazione statistica; $\eta = f(v; D; F_t)$ l'efficienza della macchina.

L'energia specifica consumata può essere minimizzata, rispettando determinate condizioni. I parametri di taglio hanno una grande influenza sull'energia consumata specifica, sia per l'efficienza della macchina utensile che per la quantità di trucioli.

L'energia consumata E_c può essere determinata moltiplicando l'energia specifica consumata E_{cs} con il volume totale di materiale rimosso Y , cioè:

$$E_c = Y E_{cs}$$

In condizioni di taglio normali, con utensili standard e per parametri di taglio non elevati, è possibile determinare l'energia specifica consumata per il taglio di materiali diversi, su macchine utensili diverse. Utilizzando le energie specifiche consumate, si può determinare l'energia consumata per una certa quantità di materiale. Questo è di grande importanza per stabilire la quantità di energia elettrica necessaria per svolgere le varie operazioni di fresatura. In questo studio si sono anche stabilite le relazioni tra efficienza e parametri di taglio, forze di taglio tangenziali e parametri di taglio, consumo energetico specifico e parametri di taglio utilizzando lo stesso utensile da taglio, materiale e macchina variando unicamente i parametri di taglio. Sebbene questo modello sia stata una buona base per ulteriori studi, stima solo l'energia consumata per il processo di taglio e non tiene conto del consumo energetico delle sub unità. Inoltre, questo non è un modello generico valido per altri processi di asportazione di materiale e per macchine utensili diverse da quelle prese in considerazione per la sua formulazione.

Nel 2004 Shao et al. [45] hanno elaborato un modello per il calcolo della potenza di taglio media nelle operazioni di fresatura:

$$P_m = ZnDa_p \frac{kh^{-c} f_z \cos(\phi_{in}) - f_z(\cos(\phi_{in} + \emptyset)) + vHVB\emptyset}{2}$$

dove Z è il numero di denti della fresatrice; D è il diametro dell'utensile; k è la costante della forza di taglio; C è lo spessore medio del truciolo; v è il coefficiente di attrito tra il pezzo e l'utensile; H è la durezza su scala Brinell; \emptyset è l'angolo di immersione; ϕ_{in} è l'angolo di taglio quando un dente della fresatrice penetra nel materiale del pezzo; VB è l'usura sul fianco dell'utensile.

Durante gli esperimenti di validazione del modello è emerso che sono presenti fluttuazioni intrinseche nei segnali di potenza di taglio a causa del carico di taglio intermittente nell'operazione di fresatura. Queste fluttuazioni rendono quindi molto difficile utilizzare il modello di potenza per prevedere il segnale di potenza istantaneo. Tuttavia, il modello risulta più preciso nel calcolo della potenza media.

Con condizioni di taglio variabili, risulta necessario implementare una strategia di monitoraggio dell'usura degli utensili affinché il modello risulti affidabile.

Nel 2018 Shi et al. [66] hanno proposto un modello di consumo energetico in funzione dell'usura dell'utensile, dei principali parametri di taglio (ad esempio velocità di avanzamento, velocità di rotazione, profondità di taglio) e delle proprietà della coppia utensile-pezzo (ad esempio geometria, coefficienti della forza di taglio) per un processo di fresatura a tre assi:

$$P = P_0 + f(VB)P_{cutting}^0$$

dove P_0 è la potenza assorbita senza considerare l'usura dell'utensile; $f(VB)$ è una funzione polinomiale del valore dell'usura sul fianco dell'utensile che caratterizza l'incremento della forza di taglio; $P_{cutting}^0$ è la potenza media di taglio durante un periodo di rotazione senza considerare l'usura dell'utensile. $f(VB)$ può essere stimata tramite il consumo di energia totale, il potere di taglio iniziale e l'usura dell'utensile.

Il modello proposto può essere un valido complemento alla modellazione del consumo energetico totale. Tuttavia, $f(\underline{VB})$ può variare a seconda delle diverse combinazioni utensile-pezzo e compromettere l'accuratezza della previsione di consumo energetico.

Nel 2019 Wang et al. [52] hanno proposto un metodo basato sullo Standard for the Exchange of Product model data-Numerical Control (STEP-NC). STEP-NC, o ISO14649, è una serie di standard per rimediare alle carenze della ISO6983 focalizzandosi sul processo di lavorazione piuttosto che sulle operazioni della macchina utensile. Consiste in un gruppo di strutture dati costruito con linguaggio EXPRESS per descrivere contenuti di alto livello per un pezzo da produrre (ad esempio geometrie, processi di lavorazione e risorse di lavorazione). Con il supporto delle informazioni ottenute tramite STEP-NC, è possibile eseguire la valutazione energetica e l'ottimizzazione di questa. L'aspetto principale di STEP-NC è che è basata sulle caratteristiche della macchina e orientata alla fase di lavoro: le features vengono applicate per rappresentare il materiale da rimuovere e la fase di lavoro è impiegata per descrivere le informazioni di processo, ad esempio i parametri di lavorazione.

Il modello ha l'obiettivo di minimizzare la seguente equazione:

$$SEC = \frac{E_{part}}{V_{part}}$$

dove E_{part} rappresenta il consumo energetico della parte lavorata e V_{part} rappresenta il volume della parte.

I principali vantaggi di questo modello possono essere riassunti come segue: l'uso di STEP-NC fa sì che il calcolo del consumo energetico rappresenti l'energia di lavorazione di un intero pezzo da una prospettiva olistica; potrebbe ottimizzare il consumo di energia regolando le risorse di lavorazione, i parametri, le strategie, le operazioni, ecc.; sono stati considerati i principali fattori che contribuiscono al consumo di energia (ad esempio i parametri della lavorazione). Tuttavia, il modello formulato traslascia gli altri contributi energetici provenienti dal pezzo stesso, come l'energia consumata per produrlo, per trasportarlo e il percorso che effettua durante la lavorazione.

Nel 2021 Pawanr et al. [125] hanno stabilito un modello che considera i parametri di taglio e l'energia consumata durante il processo di tornitura frontale.

$$E_c = \beta_0 + \beta_1 v + \beta_2 f + \beta_3 d + \beta_{11} v^2 + \beta_{22} f^2 + \beta_{33} d^2 + \beta_{12} vf + \beta_{13} vd + \beta_{23} df$$

dove v, f, d sono rispettivamente la velocità di taglio, la velocità di avanzamento e la profondità di taglio; β_0 è una costante; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ sono i coefficienti di regressione lineare; β_{ii} sono i coefficienti dei termini al quadrato; β_{ij} sono i coefficienti di interazione tra i parametri.

Il modello è limitato alla sola operazione di taglio, ma considera MRR variabile. Gli esperimenti effettuati dimostrano l'accuratezza alle diverse combinazioni dei parametri di processo considerati, nonostante vengano trascurati i contributi delle unità ausiliarie.

2.2 Modelli Bottom-Up

2.2.1 Modelli Bottom-Up che considerano le unità ausiliarie

Nel 2012 He et al. [155] hanno modellato l'energia consumata nelle operazioni di lavorazioni a controllo numerico. Hanno sviluppato il modello identificando l'energia delle sub unità di consumo, determinando il consumo energetico mediante i tempi di messa in servizio delle sotto unità.

$$E_{total} = E_{spindle} + E_{feed} + E_{tool} + E_{cool} + E_{fix}$$

dove $E_{spindle}, E_{feed}, E_{tool}, E_{cool}$ e E_{fix} sono rispettivamente i consumi energetici da parte del mandrino, avanzamento degli assi, sistema cambio utensile, pompa del refrigerante e parte fissa per il mantenimento degli stati operativi della macchina (ventilatori e servosistema).

È emerso che il consumo di energia della lavorazione a controllo numerico dipende in particolar modo dagli stati operativi dei componenti macchina controllati da codici NC.

Questo non è un modello generale valido per tutte le macchine utensili (sono infatti richiesti i parametri di potenza per una specifica macchina utensile); inoltre, non riesce a modellare il consumo di energia relativo al numero di cambi utensile, ai cambi di velocità del mandrino e ai sistemi di monitoraggio. A differenza di modelli precedentemente formulati, considera però

il consumo energetico di alcune unità ausiliarie, senza però fornirne un'enunciazione soddisfacente.

Nel modello proposto nel 2012 da Balogun e Mativenga [143], l'energia consumata è stata divisa in tre gruppi: di base, di predisposizione al taglio e di taglio. L'energia di base è definita come l'energia necessaria per avviare e attivare il computer, l'illuminazione, le ventole di raffreddamento, i sistemi di lubrificazione ed energia consumata dai motori scarichi e così via. Il modello ha assunto la stessa potenza assorbita dalle operazioni di non taglio (P_{air}) di Diaz et al. del 2011:

$$E_t = P_b(t_b + t_r + t_c) + P_r t_r + P_{air} t_{air} + (P_r + P_{cool} + kv)t_c$$

dove P_b , P_r , P_{cool} sono rispettivamente le potenze degli stati base e di preparazione al taglio, e la potenza richiesta dalle pompe del refrigerante; t_b e t_r sono i tempi per raggiungere gli stati base e di preparazione al taglio; k è l'energia specifica di taglio; v è il tasso di asportazione del materiale; t_{air} rappresenta la durata delle operazioni di taglio a vuoto (quando l'utensile non è a contatto con il grezzo di fabbricazione).

Il modello, elaborato sia per operazioni di fresatura che di tornitura, ha preso anche in considerazione la durata dell'utensile: l'equazione proposta può infatti essere riscritta in funzione di T , appunto la durata dell'utensile. Non risulta però valido per tutte le macchine utensili più utilizzate, e trascura l'energia consumata dall'asse della macchina e la sua dipendenza dagli assi e dal piano di interpolazione.

Nel 2013 Calvanese et al. [85] hanno modellato il consumo energetico sulla base dei moduli funzionali, tra cui mandrino, asse, refrigeratori, sistema di cambio utensile, componenti ausiliari, e processo di taglio.

$$E_{total} = E_{fixed} + E_{axes} + E_{axis\ chillers} + E_{spindle} + E_{spindle\ chiller} + E_{chip\ conveyor} \\ + E_{tool\ changer} + E_{pallet\ clamp}$$

dove E_{fixed} è l'energia richiesta per la preparazione all'operazione di taglio; E_{axes} è l'energia richiesta per muoversi lungo gli assi; $E_{axis\ chillers}$ è l'energia richiesta dai refrigeratori lungo gli assi; $E_{spindle}$ è l'energia richiesta sia per il taglio che quella persa dal mandrino;

$E_{spindle\ chiller}$ è l'energia richiesta dai refrigeratori del mandrino; $E_{chip\ conveyor}$ è l'energia richiesta per l'asportazione del truciolo; $E_{tool\ changer}$ è l'energia richiesta per il cambio utensile; $E_{pallet\ clamp}$ è l'energia richiesta per il serraggio del pezzo da lavorare.

Il modello, seppur prenda in considerazione praticamente tutte le operazioni della lavorazione, non considera l'effetto dell'usura dell'utensile, del movimento su più assi e dell'energia della punta dell'utensile.

Nel 2013 Salonitis e Ball [69] hanno classificato il consumo energetico totale delle macchine utensili in energia di processo (l'energia consumata durante il processo di taglio) ed energia periferica (l'energia consumata dalle sub unità periferiche), proponendo un approccio diverso e non considerando le energie medie. Hanno anche diviso l'energia periferica in energia di fondo, che è l'energia consumata da una macchina utensile in posizione di pronto, indipendentemente dal fatto che venga eseguito o meno un processo di taglio (incluso il consumo energetico in standby e delle pompe di refrigerazione), ed energia di carico, che è l'energia assorbita durante il processo di taglio e dipende da parametri di taglio.

$$E_{total} = E_{process} + E_{background} + E_{load}$$

Il modello non fornisce informazioni dettagliate sul consumo energetico di tutte sub unità ausiliarie, trascurando le operazioni di taglio a vuoto.

Nello stesso anno, Uluer et al. [82] hanno proposto un modello per il calcolo del consumo energetico analizzando il consumo energetico a livello di sistema e suddividendolo in energia diretta e indiretta. A differenza di altri modelli, l'energia di taglio è stata calcolata moltiplicando il volume del truciolo rimosso per l'energia di taglio specifica, fornendo così un metodo coerente per una modellazione basata sui componenti.

$$E_{part} = E_{th} + E_{aux-var} + E_{aux-const} + E_{handling} + E_{indirect}$$

dove E_{th} è l'energia teorica consumata durante il processo di asportazione; $E_{aux-var}$ è l'energia ausiliaria variabile (che varia a seconda del tipo di operazione svolta dalla macchina); $E_{aux-const}$ è l'energia ausiliaria costante; $E_{handling}$ è l'energia consumata dall'attrezzatura per

spostare il pezzo; $E_{indirect}$ è l'energia indiretta allocata per il mantenimento dell'ambiente di lavoro (ad esempio l'illuminazione).

È un modello abbastanza completo su cui però non è stato eseguito alcun esperimento di convalida.

Nel 2014 Aramcharoen e Mativenga [2] si sono concentrati sugli stati macchina notando come esista un enorme divario tra i modelli di sviluppo e la capacità di collegare un modello al percorso utensile per catturare l'effetto delle variabili di taglio e consentire quindi una pianificazione del processo che permetta un significativo risparmio energetico.

$$E_{total} = E_{basic} + E_{tool} + E_{spindle} + E_{cutting} + E_{feed} + E_{cutting-fluid}$$

dove l'energia di base E_{basic} è l'energia (costante) richiesta quando l'utensile è acceso ma senza mandrino in funzione, senza movimento di avanzamento e senza taglio (mantiene la macchina utensile in fase operativa e pronta per le attività di taglio). Dipende dalla progettazione della macchina utensile e dai suoi moduli (ad esempio servosistema, motore del ventilatore, computer, controller e illuminazione).

L'energia di cambio utensile E_{tool} è l'energia necessaria (fissa per ogni cambio utensile) per cambiare gli utensili da taglio. Il cambio utensile include il movimento della torretta utensile per il cambio degli utensili, l'idraulica per scaricare e caricare l'utensile da taglio.

L'energia del mandrino $E_{spindle}$ è influenzata dall'energia richiesta per il modulo di trasmissione del mandrino per farlo ruotare (variabile a seconda del modello di mandrino e dal range delle velocità).

L'energia di taglio $E_{cutting}$ è l'energia (variabile) utilizzata per tagliare il pezzo rimuovendo il materiale del pezzo sotto forma di truciolo.

L'energia di avanzamento E_{feed} è l'energia necessaria per muovere il piano di lavoro o l'utensile da taglio lungo gli assi x, y e z a una data velocità di avanzamento (dipende dal movimento dell'utensile).

L'energia di erogazione del fluido da taglio $E_{cutting-fluid}$ è l'energia (costante) necessaria ai motori per erogare il liquido di raffreddamento tramite le pompe del fluido da taglio.

Aramcharoen e Mativenga hanno proposto quindi un modello in grado di gestire gli stati energetici per i movimenti di interpolazione, modellando la domanda di energia dei diversi assi

della macchina, aspetto che non era ancora stato approfondito. Il modello risulta più completo di altri, ma non considera tutte le unità ausiliarie (ad esempio i sistemi di monitoraggio).

Nel 2016 Priarone et al. [103] hanno proposto un modello completo per l'analisi energetica a livello di sistema dei processi di lavorazione, che include tutte le attività relative alla produzione del materiale da lavorare, alla rimozione del materiale, alla produzione e all'utilizzo degli utensili e fluidi da taglio.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 = \frac{P_{standby}t_1}{\eta} + \frac{Pt_2}{\eta} + \frac{P_{standby}t_3}{\eta} \frac{t_2}{T_E} + y_E \frac{t_2}{T_E} + y_W m_W + y_L q_L t_2$$

dove $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6$ sono rispettivamente l'energia richiesta dalla macchina per il setup, lavorazione, cambio utensile e l'impronta energetica dovuta all'utilizzo dell'utensile, al materiale del pezzo lavorato e all'uso dei liquidi lubrificanti e refrigeranti. $P_{standby}$ è la potenza assorbita dalla macchina quando posta in modalità standby; P è la potenza totale; η è il coefficiente di conversione energetica; t_1, t_2 e t_3 sono i tempi di setup, di taglio e di cambio utensile; T_E è la durata di una superficie di taglio; y_E, y_L, y_W sono rispettivamente l'energia grigia per superficie di taglio, del fluido da taglio e del materiale del pezzo lavorato; m_W è il peso del pezzo da lavorare; q_L è il tasso di consumo del fluido da taglio.

Il coefficiente di conversione energetica η è stato introdotto per tenere conto delle perdite di energia che si verificano nelle varie fasi della produzione di elettricità a partire da fonti energetiche primarie. Il modello può essere anche utilizzato per stimare il consumo energetico in base a diversi tipi di lavorazione (a secco, a flusso continuo o MQL), che influenzano principalmente il termine dell'equazione E_6 .

Nel 2018, Priarone et al. [102] hanno proposto un modello energetico esteso rispetto a quello del 2016. Sono stati considerati sia i contributi diretti (setup, taglio, cambio utensile) che quelli indiretti (produzione e utilizzo dell'utensile da taglio, materiale del pezzo lavorato, fluidi per la lavorazione, pulizia da truciolo).

$$E = \left(\frac{P_{stb}t_1}{\eta} + \frac{Pt_2}{\eta} + \frac{P_{stb}t_3}{\eta} \frac{t_2}{T} \right) + (y_{TE} \frac{t_2}{T} + y_W V_W + y_L q_L t_2 + y_{CL} V)$$

dove P_{stb} è la consumata dalla macchina durante la fase di standby; q_L è il tasso di consumo del fluido da taglio; t_1 è il tempo di setup della macchina; t_2 è il tempo di taglio; t_3 è il tempo per cambiare l'utensile; T è la durata di una superficie di taglio dell'utensile; V è il volume del materiale asportato al tempo t_2 ; V_W è il volume del pezzo da lavorare; y_{TE} è l'energia grigia per superficie di taglio; y_L è l'energia grigia del fluidi di taglio; y_W è l'energia grigia del pezzo da lavorare; y_{CL} è l'energia richiesta per le operazioni di pulizia; η è il coefficiente energetico di conversione.

Il modello non considera tutte le unità ausiliarie, tralasciando il contributo dell'operatore della macchina.

Nel 2018 Jia et al. [130] hanno presentato un nuovo modello per colmare un gap che nessun modello aveva mai considerato prima: il consumo energetico dell'operatore della macchina. Il sistema considerato è stato quindi quello della macchina più l'operatore della stessa. Il consumo totale di energia è stato così enunciato:

$$TEC = MEC + OEC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \left(\int_0^{t_{ij}} P_{ij}^{mt}(t) dt \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{u_i} \left(\int_0^{t_{ik}} P_{ik}^{op}(t) dt \right)$$

dove P_{ij}^{mt} è la funzione di potenza della macchina utensile nella sotto-fase j della fase di lavorazione i , con t_{ij} la durata della sottofase j della fase di lavorazione i ; P_{ik}^{op} è la funzione di potenza dell'operatore macchina nella sottofase k della fase di lavorazione i , con t_{ik} la durata della sottofase k della fase di lavorazione i .

Come mostrato, il modello energetico del sistema macchina-operatore può essere determinato considerando sia l'energia della macchina che l'energia dell'operatore. Le proporzioni di MEC e OEC in ogni fase di lavorazione possono essere così analizzate e può essere così identificata la componente principale, in modo da attuarvi le strategie di ottimizzazione energetica.

Tuttavia, il modello non ha preso in considerazione tutti gli aspetti dell'operatore (come l'età, l'orario di lavoro mattutino o notturno, e l'esperienza). Ci sono quindi ancora ampi margini per migliorare l'accuratezza e l'applicabilità del modello proposto.

Nel 2020 Khan et al. [5] hanno proposto un modello energetico dettagliato classificando l'energia in tredici componenti:

$$E = E_i + E_{su} + E_a + E_{cs} + E_{tc} + E_l + E_{Wp} + E_{CT} + E_{fix} + E_F + E_{Np} + E_{Cp} + E_d$$

dove $E_i, E_{su}, E_a, E_{cs}, E_{tc}, E_l, E_{Wp}, E_{CT}, E_{fix}, E_F, E_{Np}, E_{Cp}, E_d$ sono rispettivamente l'energia a vuoto, di setup, taglio a vuoto, taglio materiale, cambio utensile, lubrificazione, del materiale, utensile, fissa, fluidi, nanoparticelle, pulizia, smaltimento.

È quindi un modello onnicomprensivo, che considera tutte le fasi del processo. L'energia totale di taglio risulta fortemente influenzata dall'applicazione di nanofluidi e dipende principalmente dalla velocità di avanzamento della lavorazione. L'energia totale necessaria per produrre una parte risulta ampiamente influenzata dal materiale utilizzato.

Gli aspetti sostenibili come la gestione dei rifiuti, la salute del personale e la sicurezza non sono stati però considerati nella formulazione del modello. L'alto costo dei nano materiali e dei nanofluidi e la stabilità a lungo termine di questi ultimi sono delle limitazioni, in quanto non applicabili in tutti i processi di lavorazione. I parametri di processo come la durezza del materiale e la selezione del materiale del pezzo (vergine o riciclato) non sono stati approfonditi. Risulta dunque uno tra i modelli Bottom-Up più completi.

2.2.2 Modelli Bottom-Up che non considerano le unità ausiliarie

Nel 2007 Xu et al. [89] hanno modellato la potenza della lavorazione scomponendola in due parti: P_f , la potenza necessaria ad avviare il motore del mandrino, e P_c , la potenza utilizzata durante la fase di taglio.

$$P_m = P_e \eta_e = P_f + P_c = P_t \eta_e + K_{TC} Q + K_{TE} A$$

Dove K_{TC} (energia di taglio utensile-pezzo) e K_{TE} (forza di contatto utensile-pezzo) sono assunti uniformi sul taglio di calibrazione. L'effetto della variazione dei due coefficienti è ridotto al minimo selezionando la geometria di taglio appropriata per la calibrazione. È chiaramente un modello base che considera solo l'operazione di taglio, tralasciando tutte le altre operazioni che consumano quantità di energia superiori.

Nel 2008 Astakhov e Xiao [140] hanno modellato la potenza di taglio P_c utilizzando elementi legati alla forza di taglio: la potenza richiesta durante la rimozione dello strato più esterno del

pezzo P_{pd} , la potenza richiesta a livello utensile-truciolo P_{fR} , la potenza richiesta a livello utensile-pezzo P_{fF} e la potenza richiesta per la formazione di nuove superfici P_{ch} . Infine, è stata presa in considerazione anche la potenza richiesta per l'asportazione di materiale dall'area del pezzo che oppone meno resistenza P_{mn-ce} (minor cutting edge).

$$P_c = P_{pd} + P_{fR} + P_{fF} + P_{ch} + P_{mn-ce}$$

Si tratta di un modello pratico: la potenza totale di taglio viene semplicemente scomposta nei vari contributi, senza considerare le altre operazioni.

Nel 2010 Rajemi et al. [83] hanno modellato l'energia consumata per produrre un pezzo durante le operazioni di tornitura in base a una specifica energia di taglio. Il modello è focalizzato sulla determinazione e sull'ottimizzazione dell'impronta energetica, non sulla domanda di energia diretta. È stata sviluppata un'equazione per determinare la durata ottimale dell'utensile per l'energia minima e sono state per questo valutate anche le velocità di taglio ottimali. È emerso che la lavorazione a tassi di produzione inferiori riduce il tasso di energia effettiva richiesta per i processi di lavorazione.

L'energia totale E richiesta nelle operazioni di tornitura è stata considerata come un aggregato dall'energia consumata dalla macchina durante le seguenti operazioni: setup, taglio, cambio utensile, produzione dell'utensile da taglio e produzione del materiale da lavorare. Similmente a come è stato assunto in molti altri studi, l'energia del materiale del pezzo non è stata considerata in quanto indipendente dalla strategia di lavorazione e perché non influisce sull'ottimizzazione dei parametri di produzione. Inoltre, i produttori hanno limitate opportunità di ridurre l'energia incorporata nel materiale del pezzo da lavorare.

$$E = P_0 t_1 + (P_0 + kv)t_2 + P_0 t_3 \frac{t_2}{T} + y_E \frac{t_2}{T}$$

dove P_0 è la potenza consumata dai moduli macchina; t_1 è il tempo di setup della macchina; k è l'energia specifica di taglio; v è il tasso di rimozione del materiale; t_2 è il tempo di taglio; t_3 è il tempo richiesto per il cambio utensile; T è la durata dell'utensile (tool life); y_E è l'impronta energetica dell'utensile.

I parametri critici per la durata ottimale dell'utensile che richiedono un'energia minima sono la potenza richiesta per avviare la macchina utensile e metterla in condizione di riposo, l'impronta

energetica per la produzione dell'utensile, il tempo di cambio dell'utensile e gli esponenti della velocità di taglio nell'equazione della durata dell'utensile.

La velocità di taglio per l'energia minima e , di conseguenza, il tempo ciclo di lavorazione, è fortemente influenzata dal modo in cui viene richiesta l'energia dall'utensile da taglio. In generale, più alto è considerato il fabbisogno energetico per gli utensili, più è probabile che il processo di lavorazione debba essere eseguito a una velocità di taglio relativamente più bassa per far rendere al meglio gli utensili. Inoltre, nella ricerca di condizioni di taglio che soddisfino sia il criterio dell'energia minima che del costo minimo, è necessario tenere in considerazione l'impronta energetica degli utensili da taglio.

Il modello, sebbene di una classificazione differente, ingloba la formulazione di Gutowski et al. del 2006 considerando i vari contributi energetici ma tralasciando le operazioni di taglio a vuoto e quelle ausiliarie.

Nel 2011 Mativenga e Rajemi [101] hanno proposto un modello esteso rispetto a quello del 2010, considerando anche il consumo energetico da parte del mandrino. Viene quindi definito in maniera più completa la durata dell'utensile T , aggiungendo il termine $a_p^{1/\gamma}$ al denominatore:

$$T = \frac{A}{V^{1/\alpha} f^{1/\beta} a_p^{1/\gamma}}$$

dove A è una costante, V è la velocità di taglio in m/min; f è la velocità di avanzamento in mm/giro; a_p è la profondità di taglio; α, β, γ sono esponenti definiti in base al valore della costante A .

Nel 2010 Hu et al. [127] hanno modellato il consumo energetico delle macchine utensili attraverso il consumo energetico del mandrino e diviso la potenza assorbita dal mandrino in tre sottogruppi: potenza in standby, potenza di taglio e perdita di carico aggiuntiva.

È stato compiuto un passo avanti nella modellazione del consumo di energia considerando le perdite di carico aggiuntive. Il sistema del mandrino della macchina è infatti costituito dal sistema elettrico e dalle trasmissioni meccaniche: il motore, facente parte del sistema elettrico, è soggetto a perdite di carico costituite dalla perdita dell'avvolgimento dello statore, dalla perdita del rotore e dalla perdita del carico vagante. Quindi, la potenza assorbita dal mandrino non viene completamente impiegata per la lavorazione, ma bisogna considerare anche la

potenza aggiuntiva che viene richiesta a causa delle perdite di carico. Hu et al. hanno modellato il consumo di energia derivante da perdite di carico aggiuntive come una funzione quadratica:

$$P = P_u + (1 + a_0)P_c + a_1P_c^2$$

dove P_u è la potenza in standby, P_c è la potenza di taglio, a_0 e a_1 sono i coefficienti di perdita di carico aggiuntiva.

Dai risultati di un caso studio su un tornio CNC, le perdite di carico aggiuntive risultano funzione del secondo ordine della potenza di taglio, e i coefficienti di perdita di carico aggiuntiva risulta una funzione del primo ordine della potenza di taglio. Inoltre, le perdite di carico aggiuntive sono una funzione del secondo ordine della coppia di taglio o della velocità del mandrino quando l'altro è assunto invariabile, e i coefficienti di perdita di carico aggiuntiva è funzione del primo ordine della coppia di taglio o della velocità del mandrino quando l'altra è assunta invariabile.

Si può notare come questo modello non consideri la potenza assorbita dai componenti ausiliari, e di come i coefficienti a_0 e a_1 siano difficili da determinare in quanto funzione sia dei parametri di taglio che di altri coefficienti (come quello di smorzamento e quello di perdita di carico isolata).

Nel 2012, Hu et al. hanno validato il modello presentato nel 2010 proponendo una metodologia di monitoraggio. Basandosi sulla loro formulazione in tre componenti, hanno misurato in modo diverso il consumo energetico costante, variabile e la perdita di carico aggiuntiva. Il primo è stato misurato all'avvio della macchina e memorizzato nel database, essendo un consumo indipendente dal processo. Il secondo, dipendente direttamente dal processo, è stato misurato mediante dei sensori in linea, durante la lavorazione. Le perdite di carico aggiuntive sono state invece calcolate in un secondo momento, indirettamente, attraverso la potenza in ingresso e la potenza di taglio del mandrino della macchina utensile.

Questo modello è stato utilizzato per classificare piuttosto che prevedere il consumo di energia, poiché risulta complesso e dispendioso stimare in maniera puntuale la funzione di perdita di carico aggiuntivo.

Nel 2010 Avram e Xirouchakis [99] hanno sviluppato un nuovo modello per calcolare l'energia consumata in un processo di tornitura 2.5D in base alla velocità di avanzamento e ai valori

della velocità del mandrino. Hanno considerato non solo queste ultime, ma anche le informazioni sul numero di bocche di taglio, angolo dell'elica, angolo laterale, profondità di taglio, larghezza di taglio ed energia di taglio specifica per il materiale selezionato.

La novità del modello è risieduta nel considerare l'energia consumata dal mandrino e dagli assi di avanzamento rispetto al regime sia stazionario che transitorio. L'energia totale consumata è stata quindi definita nella seguente formulazione:

$$E_{DE} = E_{aY} + E_{SY} + E_{dY} + E_{run} + E_{cut}$$

dove E_{aY} è l'energia per accelerare il mandrino lungo l'asse y, E_{SY} è l'energia consumata dal mandrino durante lo stato stazionario sull'asse y, E_{dY} è l'energia consumata per decelerare il mandrino lungo l'asse y, E_{run} è l'energia consumata dal mandrino nello stato stazionario, E_{cut} è l'energia consumata durante il processo di taglio del materiale.

Il modello è stato validato da studi che ne hanno verificato l'accuratezza, pari a circa l'80%; non considera però il consumo energetico da parte dei componenti ausiliari, ed è stato inoltre formulato per un particolare processo, appunto la fresatura 2.5D.

Nel 2011 Mori et al. [81] hanno proposto un'analisi più concreta per ridurre il consumo di energia, concentrandosi sui motori del mandrino e sui servomotori, che hanno le più elevate esigenze energetiche nelle macchine utensili. Per modellare il consumo energetico complessivo di una macchina utensile, il processo di lavorazione è stato suddiviso in una serie di diverse operazioni: posizionamento del mandrino dopo il cambio utensile e l'accelerazione, taglio del metallo, ritorno del mandrino nella posizione di cambio utensile una volta completato il taglio del metallo e arresto del mandrino. Nello studio è stato misurato il consumo energetico di diverse operazioni di lavorazione in varie condizioni di taglio, determinando le condizioni di taglio ottimali per ridurre il consumo di energia applicando il metodo Taguchi.

$$E = P_1(T_1 + T_2) + P_2T_2 + P_3T_3$$

dove P_1 è il consumo energetico costante durante il funzionamento della macchina indipendentemente dallo stato macchina; T_1 è il tempo di ciclo durante lo stato di non taglio, T_2 è il tempo di ciclo durante stato di taglio; P_2 è la potenza assorbita dal mandrino e dal servomotore per il taglio (che varia con le condizioni di taglio); P_3 è la potenza assorbita per

posizionare il pezzo da lavorare e per accelerare/decelerare il mandrino alla velocità desiderata; T_3 è il tempo necessario per posizionare il pezzo e per accelerare il mandrino.

Il modello proposto non fornisce informazioni sul calcolo della potenza di ciascun processo, considerando solo i processi di foratura e fresatura. Inoltre, non tiene conto della variazione di energia consumata dalla punta dell'utensile in base al materiale in lavorazione, della durata dell'utensile, del dispendio energetico dell'asse di avanzamento, della variazione di energia consumata dal mandrino in base alla velocità del mandrino e delle unità ausiliarie.

Sempre nel 2011, Diaz et al. [95] hanno modellato il consumo energetico di una fresatrice misurando anche l'energia assorbita dalla macchina durante il taglio a vuoto, ovvero quando la macchina è in funzione ma non rimuove alcun materiale. In questo studio, sono stati condotti una serie di esperimenti con profondità di taglio e larghezza di taglio variabili per dimostrare l'effetto della velocità di rimozione del materiale sul consumo energetico di un centro di lavoro a tre assi. Hanno studiato la relazione tra consumo di energia e tempo di lavorazione e confermato che, sebbene il consumo di energia aumenti con tassi di asportazione di materiale più elevati, il consumo energetico totale del centro di lavoro non aumenta a causa della riduzione del tempo di lavorazione totale. Hanno anche esaminato l'effetto del materiale del pezzo sulla quantità di potenza assorbita dalla macchina.

$$E = (P_{cut} + P_{air})\Delta T$$

dove P_{cut} è la potenza assorbita durante le operazioni di taglio, P_{air} è la potenza assorbita durante le operazioni di taglio a vuoto e ΔT è il tempo del processo.

La mancanza di questo modello è che non tiene in considerazione né la potenza assorbita dalla macchina per avviarsi e prepararsi alle operazioni di taglio né il consumo di potenza delle unità ausiliarie. Inoltre, il modello teorico non è stato adeguatamente confrontato con i dati sperimentali al fine di dimostrare la coerenza dello stesso.

Nel 2011 Kong et al. [20] hanno sviluppato un modello per stimare il consumo energetico di una macchina utensile a controllo numerico computerizzato classificando il consumo energetico in costante, tempo di esecuzione o taglio. Hanno anche studiato gli effetti di diversi percorsi utensile sul consumo energetico di una macchina utensile utilizzando uno strumento software di analisi dei processi con una API (Application Programming Interface).

$$E_{machine} = E_{const} + E_{run-time-transient} + E_{run-time-steady} + E_{cut}$$

dove E_{const} è la frazione di energia consumata non legata alla lavorazione e E_{cut} è l'energia consumata durante le fasi di taglio. A causa dell'inerzia dei servo motori che pilotano il mandrino e gli assi, ci vuole un certo tempo per raggiungere una velocità di avanzamento o di rotazione specifica per gli assi della macchina o per il mandrino. Quindi l'energia richiesta per far funzionare gli assi e il mandrino è stata divisa due parti: lo stato stazionario ($E_{run-time-steady}$) quando il motore del mandrino e gli azionamenti degli assi mantengono un valore specificato, e lo stato transitorio ($E_{run-time-transient}$) quando il mandrino e gli azionamenti dell'asse accelerano o decelerano per raggiungere i valori specificati. Si è ipotizzato che solo la velocità di avanzamento e la velocità del mandrino influenzino e sono proporzionali a $E_{run-time-steady}$.

Tuttavia, nel modello non sono stati considerati gli effetti dei cambi utensile, del movimento individuale dell'asse di avanzamento, del refrigerante e delle unità ausiliarie.

Nello stesso anno Neugebauer et al. [111] hanno modellato il consumo energetico delle macchine utensili identificando gli elementi che consumano energia al di fuori dell'operazione di taglio, al fine di utilizzare le macchine utensili in modo più efficiente. Vengono quindi considerate solamente le operazioni secondarie:

$$E_{total} = E_{use,prim} + E_{use,sec} + E_{loss}$$

dove $E_{use,prim}$ è l'energia consumata dalle unità ausiliarie; $E_{use,sec}$ è l'energia consumata da quei processi macchina non direttamente imputabili al processo di lavorazione (operazioni di movimentazione e bloccaggio, nonché processi di controllo, monitoraggio e misurazione); E_{loss} è l'energia dissipata a causa di inefficienze (attriti, perdite elettriche, ecc.).

Non riescono però a modellare efficacemente il consumo energetico dei componenti ausiliari; il modello è inoltre impreciso in quanto il focus è a livello di sistema e non considera nel dettaglio i consumi dei componenti principali della macchina, che sono quelli relativamente più semplici da misurare.

Mentre gli studi precedenti sulla modellazione energetica si sono fermati all'ottimizzazione ad alto livello dei sistemi produttivi (i dati di consumo energetico erano statici e di poco valore), nel 2012 Bi e Wang [163] hanno proposto un modello energetico basato sull'analisi cinematica e dinamica delle macchine. Hanno definito e utilizzato le relazioni esplicite tra i parametri di lavorazione e il consumo energetico per ottimizzare i processi produttivi per ridurre l'utilizzo di energia. Il consumo di questa dipende infatti non solo dai parametri di lavorazione, ma anche dagli utensili da taglio e dai materiali del pezzo. In altre parole, tutti questi parametri sono fortemente legati allo stato di funzionamento delle macchine utensili.

Il modello formulato è il seguente:

$$E = \int_{t_{begin}}^{t_{stop}} \left[\sum_{i=0}^{i=n_l} (f_i(t) v_i(t)) + \sum_{j=0}^{j=n_r} (\tau_j(t) \omega_j(t)) \right] dt$$

dove E è il consumo di energia sotto un dato carico esterno; n_l e n_r è il numero dei giunti lineari e rotativi; $f_i(t)$ è la funzione della forza motrice di un motore rotativo in funzione rispetto al tempo; $\tau_j(t)$ è la funzione del momento torcente di un motore rotativo rispetto al tempo; $v_i(t)$ è la funzione della velocità lineare rispetto al tempo; $\omega_j(t)$ è la funzione della velocità angolare rispetto al tempo.

In questa ricerca ci si è concentrati sulla modellazione energetica di una macchina a cinematica parallela Exechon per la sola operazione di taglio. Il modello è quindi fortemente legato a questo caso di studio (con le conseguenti limitazioni) e non considera tutti gli aspetti (tra cui l'usura dell'utensile e il tipo di materiale lavorato), ma si è voluto evidenziare il punto di vista innovativo che hanno voluto proporre i ricercatori.

Nel 2013 Yoon et al. [49] hanno ulteriormente classificato il consumo energetico delle macchine utensili in energia di base, energia del mandrino, energia della fase ed energia di rimozione del materiale. L'energia di base rappresenta il consumo energetico delle sotto unità ausiliarie e dei sistemi di controllo, che si presume siano costanti. L'energia di rimozione del materiale è l'energia consumata durante il processo di rimozione del materiale. L'energia della tavola e l'energia del mandrino, che sono l'energia richiesta per la rotazione del mandrino e il movimento della tavola, hanno una relazione di potenza basata sulla velocità di rotazione e sulla velocità di avanzamento. Hanno sviluppato un modello empirico eseguendo studi sperimentali e adattando i dati osservati.

$$E_t = E_{basic} + E_{stage} + E_{spindle} + E_{machining}$$

dove E_{basic} è l'energia consumata per avviare la macchina e prepararla a operare e per azionare le unità ausiliarie; E_{stage} è l'energia consumata nelle fasi di non taglio; $E_{spindle}$ è l'energia consumata dal mandrino; $E_{machining}$ è l'energia consumata per l'asportazione del materiale.

Le varie fasi secondarie di posizionamento del pezzo e cambio utensile, oltre che l'apporto da parte dell'operatore macchina, non vengono considerate. Inoltre, il modello è stato testato e applicato a una lavorazione su micro-scala: potrebbe quindi risultare impreciso per le lavorazioni su scala normale.

Nel 2014, Yoon et al. [48] hanno esteso il modello del 2013 approfondendo l'effetto dei parametri di processo sull'energia richiesta per la rimozione del materiale. In particolare, hanno analizzato la differenza di consumo energetico tra condizioni di taglio con utensile molto usurato e utensile poco usurato, utilizzando la metodologia della superficie di risposta RSM. Viene quindi proposta una nuova formulazione per la potenza assorbita durante la fase di asportazione del materiale, che ricorda in parte quella di Cuppini et al. del 1990:

$$P_{machining} = f_1(n, f, a_p) + f_2(n, f, a_p)VB(t)$$

dove n, f, a_p sono rispettivamente la velocità di rotazione, velocità di avanzamento e profondità di taglio; VB è l'usura sul fianco dell'utensile.

Nel 2014 Liu et. al. [28] hanno proposto un modello suddividendo il processo in tre periodi (avvio, inattività e taglio) e sommando il dispendio energetico di ciascuna fase.

$$E = E_s + E_i + E_c$$

Dove E_s è l'energia richiesta per l'avvio, E_i è l'energia richiesta per i periodi di inattività e E_c è l'energia richiesta per le operazioni di taglio.

La stima dell'energia per l'avvio e dei periodi di inattività risulta accurata, mentre la stima per l'energia di taglio si dimostra meno precisa (per calcolarla si ricorre quindi ai codici di controllo numerico).

Il modello non considera inoltre l'usura dell'utensile, le unità ausiliarie e le variazioni dei parametri di taglio: è quindi molto generico, ma offre buoni spunti per stimare il consumo energetico nelle fasi macchina individuate.

Nel 2015 Zhou et al. [151] hanno proposto un nuovo approccio per stabilire la richiesta di energia (ECA, Energy Consumption Allowance) in un sistema di lavorazione, scomponendo ciascuna fase del processo di lavorazione del pezzo in step (ECS, Energy Consumption Steps). A loro volta, gli ECSs possono essere scomposti in sub-ECSs o BECS (Basic Energy Consumption Steps), che può essere considerata come l'unità di questa modellazione energetica. Pertanto, qualsiasi processo di lavorazione complesso può essere caratterizzato in modo uniforme attraverso diversi tipi di BECs.

L'intero processo di lavorazione di un pezzo contiene una varietà di procedure di lavorazione. Il pezzo deve essere trasportato da un impianto di lavorazione all'altro e potrebbe essere necessario stoccarlo temporaneamente da qualche parte. Pertanto, considerando il percorso del pezzo, il suo ECS può essere suddiviso in ECS di lavorazione, ECS di stoccaggio e ECS di trasporto. Viene inoltre considerato il sistema ausiliario dell'officina comprendente compressori d'aria, illuminazione, ventilazione, riscaldamento, condizionatori d'aria e altri impianti di produzione ausiliari.

Il metodo è risultato interessante, ma di difficile applicazione a causa del consumo energetico complesso e vario dei vari sottosistemi. L'ECA è infatti di difficile applicazione a causa delle enormi fonti e procedure di consumo di energia, alle complicate leggi sul consumo di energia e alla difficoltà a determinare il consumo energetico nell'industria manifatturiera meccanica. Pertanto, l'ECA manca di applicazione pratica nell'industria manifatturiera meccanica. Può essere utilizzato non solo per calcolare il consumo energetico dell'intero processo di lavorazione, ma anche per gestire e controllare ogni procedura di consumo energetico dell'intero processo di produzione.

Nel 2016 Cai et al. [149] hanno proposto un nuovo approccio rispetto a quello ECA del 2015. Introducendo il concetto di FECA (Fine Energy Consumption Allowance) si è contribuito a rafforzare il monitoraggio e la gestione dell'energia e a migliorare l'efficienza energetica.

Per colmare le lacune dell'ECA tradizionale, è stato proposto il nuovo concetto di FECA, un criterio quantitativo del consumo energetico di ciascun processo e sotto processo per l'unità pezzo lavorato sotto specifiche condizioni. La FECA consiste in uno o più insiemi di alberi di dati per l'oggetto di produzione piuttosto che un semplice valore numerico. Le informazioni sul

consumo di energia e le informazioni sul tempo per ciascun processo e sotto processo, come le informazioni sulla potenza per le macchine utensili e le informazioni sul tempo per il processo di lavorazione, sono tutte prese in considerazione. La differenza più marcata tra i due approcci (ECA e FECA) è che la FECA non considera solo l'ECA totale del pezzo, ma evidenzia anche l'ECA di ciascun processo e sotto processo.

Nel 2018 Bagager e Yusoff [121] hanno proposto un modello energetico per il processo di tornitura a secco. L'energia è stata classificata in energia diretta comprendente l'energia di avviamento, di setup, del mandrino senza taglio, di taglio, cambio utensile ed energia indiretta comprendente l'energia dell'utensile da taglio e il fluido da taglio.

$$E = P_0 t_0 + P_{st} t_{st} + P_{air} t_{air} + (P_{air} + kV) t_c + P_{st} t_t \frac{t_c}{T}$$

dove P_0, P_{st}, P_{air} sono rispettivamente la potenza assorbita dalla macchina durante l'avviamento; il setup e la rotazione del mandrino; $t_0, t_{st}, t_{air}, t_t, t_c$ sono i tempi avviamento, rotazione mandrino in fase setup, fase di non taglio, cambio utensile, taglio; k è l'energia specifica di taglio; V il tasso di asportazione del materiale; T è la durata dell'utensile. Si può notare come la formulazione inglobi quella di Gutowski et al. del 2006.

Rispetto ad altri modelli, quello proposto può essere adattato considerando il liquido refrigerante (aggiungendo un termine all'equazione) o la lavorazione con fluidi lubrificanti.

Conclusioni

L'analisi del consumo energetico delle macchine utensili è un primo passo fondamentale verso la riduzione della quantità totale di energia consumata durante le operazioni di asportazione di materiale.

Un sistema di monitoraggio dell'energia risulta quindi indispensabile per ottenere informazioni sui flussi di energia. Uno degli sviluppi più importanti in questo settore è un approccio basato su software per il razionamento automatico dell'energia.

Tra le tecniche di monitoraggio energetico sviluppate, le più promettenti sono i sistemi di monitoraggio automatizzato. Le tecniche di monitoraggio automatizzato possono essere

utilizzate con sistemi complessi in cui non è possibile utilizzare tecniche di monitoraggio manuale.

I modelli energetici presi in esame, ritenuti la chiave per una lavorazione efficiente dal punto di vista energetico, sono stati sviluppati principalmente per uno specifico processo di lavorazione o una particolare macchina utensile. Si ritiene che tre gruppi di fattori (la struttura della macchina utensile, le condizioni di setup e i parametri di lavorazione) abbiano il maggiore impatto sul consumo energetico (la struttura della macchina utensile su tutti).

Le condizioni di setup, tra cui la selezione del lubrificante, l'angolo di spoglia dell'utensile, l'angolo obliquo dell'utensile e la geometria del pezzo lavorato, in alcuni casi risultano essere più influenti dei parametri di lavorazione. I risultati della ricerca sembrano concordare sul fatto che la velocità di avanzamento e la velocità di taglio apportano contributi importanti, seguiti dalla profondità di taglio e dalla larghezza di taglio. Questo aspetto sarà indagato in dettaglio nel Capitolo 3.

Modelli di consumo energetico indipendenti dal tipo di macchine utensili e settaggio, piuttosto che modelli energetici fisici o teorici di una macchina utensile, possono fornire un potente strumento per ridurre il consumo di energia. Tuttavia, un singolo modello non può modellare adeguatamente il consumo di energia, deve essere costruito su diversi livelli. Non si evidenzia la convergenza verso un modello onnicomprensivo, nonostante negli anni si siano continuamente migliorati i modelli formulati nel passato recente. Si evidenzia piuttosto un gap tra i due tipi di modellazione, Black-Box e Bottom-Up: i progressi compiuti da una modellazione non vengono adeguatamente presi in considerazione dall'altra, manifestando così un progresso tecnologico e scientifico che prosegue su due binari praticamente paralleli invece di convergere in una simbiosi sinergica.

Combinando modelli BB e BU con modelli a eventi discreti di alto livello, uniti alle conoscenze derivate dell'esperienza umana, nel prossimo futuro potrebbe rivelarsi efficace un nuovo modello energetico ibrido. La vera sfida è sita nell'integrazione dei diversi modelli: mettere semplicemente insieme i vari modelli non sembra infatti una soluzione funzionale.

Capitolo 3

Analisi dei parametri di taglio

Per aumentare la sostenibilità ambientale nelle lavorazioni ad asportazione di materiale sono richiesti non solo i miglioramenti che verranno proposti nel Capitolo 4 e nel Capitolo 5, ma anche l'ottimizzazione dell'energia legata ai parametri di taglio.

Analogamente a quanto svolto nel Capitolo 2, è stata preparata una revisione dello stato dell'arte nel campo dell'ottimizzazione dei parametri di taglio delle lavorazioni ad asportazione di truciolo. Le parole chiave e le stringhe utilizzate nella ricerca della letteratura includevano (ma non erano limitate a): "parameters in machining", "optimal parameters" + una combinazione di altre parole (come ad esempio "turning", "milling", ecc.).

Le riviste disponibili sui siti Web Science Direct, SpringerLink, Elsevier, ResearchGate e Google Scholar sono state analizzate per articoli di ricerca originali nelle aree sopra menzionate. Il periodo preso in considerazione ha riguardato gli ultimi 12 anni, dal 2010 al 2021. Considerando che ciascun caso studio è specifico (dipende dal tipo di macchina utensile, dall'utensile, dall'esperienza dell'operatore, dal materiale lavorato, ecc.) ma fa riferimento a un modello energetico generico, la revisione della letteratura avrebbe dovuto includere un numero troppo elevato di articoli. Per questo, si è stabilito che, di tutto l'insieme di articoli individuati, un numero di documenti analizzati pari a 29 potesse fornire una panoramica rappresentativa ed esauriente.

I risultati della revisione della letteratura sono stati riassunti nelle sezioni successive, classificati per le operazioni di fresatura, tornitura e rettifica.

La selezione degli utensili da taglio e delle condizioni di taglio sono elementi essenziali nella pianificazione del processo. Questo compito viene tradizionalmente svolto sulla base dell'esperienza, con l'ausilio dei manuali tecnici di lavorazione e dei cataloghi utensili, ma i dati forniti da queste fonti sono in realtà valori di partenza e non risultano ottimali per il risparmio energetico. Chi pianifica il processo continua a incontrare grandi difficoltà a causa della mancanza di dati sui numerosi nuovi utensili da taglio con diversi materiali, rivestimenti, geometria e configurazioni di scanalatura del truciolo per un'elevata resistenza all'usura e un'efficace rottura del truciolo. Inoltre, è difficile trovare dati specifici sulle misure delle

prestazioni di lavorazione rilevanti come la durata dell'utensile, la rugosità superficiale, la forma del truciolo e così via a causa della mancanza di informazioni affidabili o di modelli predittivi per queste misure. Di conseguenza, chi pianifica il processo si trova costretto a scegliere e consigliare condizioni di taglio subottimali. Spesso, infatti, non viene selezionato l'utensile da taglio corretto, i parametri di taglio selezionati non sono adeguati a quel certo tipo di lavorazione e la maggior parte degli utensili viene utilizzata fino alla loro piena capacità di durata. Queste pratiche non sono ottimali e non permettono un effettivo risparmio energetico, oltre che incidere negativamente sui costi totali del processo.

Molti studi analizzano l'ottimizzazione dei parametri di taglio, considerando obiettivi come il tasso di asportazione del materiale e la rugosità superficiale, senza tener conto di fattori sostenibili, come l'energia consumata durante la lavorazione. Questo tipo di ottimizzazione è denominato ottimizzazione tradizionale degli obiettivi.

Esiste però una condizione ottimale per ogni operazione di taglio: questa condizione può consentire un certo margine per lavorare con risultati ottimali, aprendo così la possibilità di bilanciare contemporaneamente altre operazioni di taglio. Tale punto ottimale dipende principalmente dal tipo di materiale e dalla complessità del pezzo lavorato. Una volta trovata la condizione ottimale, è possibile massimizzare i vari parametri come la velocità di rimozione del materiale, la rugosità superficiale, la durata dell'utensile o il consumo di energia.

Nei processi di lavorazione, i criteri di ottimizzazione più comunemente utilizzati sono il tasso di asportazione del materiale, la rugosità superficiale, la forza di taglio, la durata dell'utensile e il consumo energetico. Tuttavia, gli approcci a obiettivo singolo hanno un valore limitato per fissare i parametri di taglio ottimali, dove obiettivi diversi e contraddittori devono essere ottimizzati contemporaneamente. Pertanto, nell'ottimizzazione dei parametri di taglio sono stati riportati approcci multi-obiettivo.

3.1 Fresatura

Nel 2010 Fratila e Caizar [22], applicando la metodologia Taguchi, hanno ottimizzato i parametri di taglio nella spianatura, un tipo di processo di fresatura, durante la lavorazione della lega di alluminio AlMg₃, al fine di ottenere la migliore rugosità superficiale e il minimo consumo di energia.

I parametri valutati sono stati la velocità di taglio, la profondità di taglio, la velocità di avanzamento e il tasso di lubrificazione.

Nella valutazione della rugosità superficiale, il parametro più significativo è risultato la velocità di avanzamento. Hanno inoltre notato che impostando profondità di taglio minima, velocità di avanzamento minima, velocità di taglio massima e portata di lubrificante minima si è ottenuta una rugosità superficiale minore.

Risultati simili sono stati ottenuti utilizzando la tecnica MQL e la lubrificazione convenzionale. Infine, nella valutazione del consumo energetico, i parametri più significativi sono risultati la profondità di taglio e la velocità di taglio. La potenza consumata diminuiva con la diminuzione del tasso di lubrificazione, mentre aumentava all'aumentare dei tre parametri rimanenti.

Le condizioni di taglio ottimali della lega AlMg₃ sono state ottenute impostando la profondità di taglio minima, la velocità di avanzamento minima, la velocità di taglio minima e la portata massima di lubrificante. La tecnica di lavorazione MQL non ha determinato un aumento significativo della potenza di taglio rispetto alla lubrificazione convenzionale.

Nel 2011 Mori et al. [81] hanno esaminato le condizioni di taglio per una maggiore efficienza, riducendo al minimo la resistenza al taglio e diminuendo il tempo di lavorazione.

È necessario sottolineare che velocità di taglio e di avanzamento eccessive possono causare una rapida usura dell'utensile con conseguente scheggiatura prematura di questo o una finitura ruvida a causa delle eccessive vibrazioni. Pertanto, è stata considerata la ricerca di condizioni di taglio ottimali che non causino l'usura prematura dell'utensile o vibrazioni di lavorazione compromettenti la qualità del prodotto.

Per determinare l'impatto delle condizioni di taglio sul consumo energetico, sono stati misurati il consumo energetico totale della macchina e il consumo energetico del mandrino. Le misurazioni del consumo energetico sono state effettuate per tre casi: foratura, fresatura di finitura e fresatura frontale. Per ciascun caso di lavorazione sono stati utilizzati utensili specifici e materiali differenti.

Le misurazioni sono state effettuate variando quattro parametri (velocità di taglio, velocità di avanzamento per giro o per dente, profondità di taglio in direzione assiale e profondità di taglio in direzione radiale) in tre fasi (valori mediano, minimo e massimo dell'intervallo consigliato dal produttore dell'utensile), concludendo che il consumo di energia per la foratura e la fresatura può essere ridotto impostando condizioni di taglio elevate ma all'interno di un intervallo di valori (determinato sperimentalmente dal produttore dell'utensile) che non comprometta la durata dell'utensile e la finitura superficiale, riducendo allo stesso tempo il periodo di lavorazione.

Nel 2013, Campatelli et al. [36] hanno analizzato l'effetto delle variazioni simultanee di quattro parametri di taglio (velocità di taglio, velocità di avanzamento, profondità di taglio radiale e assiale) sul consumo di energia durante la fresatura dell'acciaio al carbonio. A tal fine è stato utilizzato il metodo della superficie di risposta RSM, un insieme di tecniche matematiche e statistiche utili per modellare la relazione tra i parametri di input (condizioni di taglio) e le variabili di output (consumo di energia). RSM consente infatti di ridurre il numero complessivo di test richiesti e aiuta a descrivere e identificare con grande accuratezza l'effetto delle interazioni di diverse variabili indipendenti sulla risposta quando queste vengono variate simultaneamente. RSM viene così abbinata a una formula di regressione quadratica da applicare ai dati sperimentali.

Il modello sviluppato ha evidenziato che per ottenere un minor impatto ambientale è necessario aumentare il più possibile il tasso di asportazione di materiale scegliendo velocità di taglio, avanzamento e sezione del truciolo il più grande possibile, avendo cura di mantenere la compatibilità con i parametri di lavoro dell'utensile. L'opzione migliore è risultata quindi l'impostazione di elevati livelli dei parametri di processo. Questa soluzione era però in parte limitata dall'effetto dell'usura degli utensili, limite che, nelle condizioni di lavorazione consigliate dal produttore, non risultava però particolarmente critico.

Nel 2013 Yan e Li [60] hanno presentato un metodo di ottimizzazione multi-obiettivo per ottimizzare i parametri di taglio nel processo di fresatura al fine di valutarne sostenibilità, tasso di produzione e qualità di taglio. Questi fattori sono stati valutati rispettivamente in base a energia di taglio (CE), tasso di asportazione di materiale (MRR) e rugosità superficiale (SR), che sono stati ottimizzati contemporaneamente.

I parametri valutati sono stati la velocità del mandrino, la velocità di avanzamento, la profondità di taglio e la larghezza di taglio.

In termini di MRR e CE, si è notato che essi dipendono principalmente dalla larghezza di taglio, mentre la velocità del mandrino, la velocità di avanzamento e la profondità di taglio sembravano avere un effetto leggermente inferiore. I risultati hanno anch'essi mostrato un effetto significativo della larghezza di taglio su SR, mentre gli altri parametri non lo hanno influenzato significativamente.

In sintesi, le tre risposte (MRR, CE e SR) dipendevano dai parametri analizzati e l'effetto principale sulle risposte è dovuto all'ampiezza del taglio. L'impostazione della velocità del mandrino e della velocità di avanzamento a un livello basso, della profondità di taglio e della larghezza di taglio a un livello elevato ha prodotto il massimo MRR e il minimo CE, mentre

l'impostazione della velocità del mandrino e della profondità di taglio a un livello medio, larghezza di taglio ad alto livello e la velocità di avanzamento a basso livello ha prodotto la minima rugosità superficiale.

I parametri di fresatura ottimali determinati dall'analisi relazionale grigia e della metodologia della superficie di risposta sono risultati bassa velocità del mandrino, massima velocità di avanzamento, massima profondità di taglio e massima larghezza di taglio. La larghezza di taglio era il parametro più influente, seguito dalla profondità di taglio, dalla velocità di avanzamento e dalla velocità del mandrino. Si evidenzia che la combinazione ottimale di questi parametri non coincide con quella raccomandata dal produttore della macchina utensile, portando a una riduzione dell'energia di taglio di circa il 20%.

Il metodo di ottimizzazione proposto è uno strumento molto utile per l'ottimizzazione multi-obiettivo dei parametri di taglio, evidenziando che il taglio con mandrino impostato a bassa velocità è più efficiente dal punto di vista energetico rispetto al taglio con velocità suggerita dal produttore.

Nel 2013 Li et al. [59] hanno studiato l'ottimizzazione delle operazioni di fresatura su leghe di alluminio, mostrando che gli obiettivi di basso consumo energetico e alta velocità di produzione possono essere raggiunti contemporaneamente attraverso l'ottimizzazione dei parametri di taglio.

I parametri di taglio considerati sono stati la velocità di taglio e la velocità di avanzamento, mentre la profondità di taglio non è stata valutata una variabile pratica da ottimizzare in quanto fissata dal progettista di processo in base alla sua esperienza o facendo riferimento ai manuali di lavorazione. Dagli esperimenti effettuati si è concluso che aumentando la velocità di avanzamento e diminuendo adeguatamente la velocità di taglio si può ridurre significativamente il consumo energetico e migliorare la velocità di produzione.

Nel 2016 He et al. [68] hanno presentato un metodo per ottimizzare i parametri di lavorazione considerando il trade-off tra consumo energetico, tempo di lavorazione, forza di taglio e le loro relazioni con i parametri di lavorazione. Il metodo proposto è stato validato per il processo di fresatura, ma può essere esteso ad altri processi di lavorazione.

In particolare, sono stati raggiunti la riduzione del consumo energetico, il miglioramento del tempo di lavorazione e la riduzione al minimo della forza di taglio attraverso la combinazione di una velocità di taglio relativamente elevata, velocità di avanzamento elevata, profondità di taglio ridotta e larghezza di taglio ridotta.

La diminuzione della velocità di taglio e il simultaneo aumento della velocità di avanzamento, della profondità di taglio o della larghezza di taglio ha comportato una riduzione del consumo di energia ma un aumento della forza di taglio e dei tempi di lavorazione, tuttavia l'aumento è stato accettabile.

Aumentando la velocità del mandrino, la velocità di taglio, la velocità di avanzamento, la profondità di taglio o la larghezza di taglio si è ridotto il tempo di lavorazione, aumentando però il consumo di energia e la forza di taglio.

Aumentando la velocità del mandrino o la velocità di taglio, riducendo la velocità di avanzamento, la profondità di taglio o la larghezza di taglio si è ridotta la forza di taglio, aumentando però il consumo di energia e il tempo di lavorazione.

I risultati dell'ottimizzazione hanno consigliato la combinazione di velocità di rotazione del mandrino relativamente elevata o velocità di taglio elevata, velocità di avanzamento elevata, profondità di taglio ridotta e larghezza di taglio ridotta.

Nel 2016 Wang et al. [9] hanno esaminato il consumo specifico di energia per la formazione di trucioli durante per fresatura della lega di alluminio 7050-T7451. Dall'analisi del consumo di energia durante la formazione del truciolo, hanno determinato principalmente tre componenti: l'energia di deformazione plastica nella zona di deformazione primaria, l'attrito tra l'interfaccia del truciolo e l'energia cinetica del truciolo rimosso.

Sono stati studiati gli effetti della velocità di taglio, dello spessore del truciolo e dell'angolo di spoglia dell'utensile sul consumo di energia di taglio. L'intervallo di velocità di taglio esaminato è stato impostato da 1000 a 4500 m/min. Sono stati selezionati tre spessori del truciolo (0.05 mm, 0.1 mm e 0.2 mm) e tre angoli di spoglia dell'utensile (0° , 10° e -10°), traendo le seguenti conclusioni:

- tra le tre componenti energetiche, l'energia di deformazione plastica è risultata la più grande (80%). All'aumentare della velocità di taglio, la proporzione di energia di deformazione plastica diminuiva mentre quella di energia cinetica del truciolo aumentava. La proporzione del lavoro di attrito rimaneva approssimativamente costante in tutta la gamma di velocità di taglio esaminata.
- con la diminuzione dell'angolo di spoglia dell'utensile, aumentava il consumo specifico di energia. I risultati hanno indicato che angoli di spoglia positivi dell'utensile riducevano il consumo energetico totale.
- con la diminuzione dello spessore del truciolo, aumentava il consumo specifico di energia.

- l'energia specifica di taglio manifestava una stretta relazione con la progettazione strutturale delle macchine utensili poiché la potenza massima delle macchine utensili ne era direttamente influenzata. Di conseguenza hanno dedotto se l'energia di taglio specifica venisse ridotta attraverso l'ottimizzazione dei parametri di taglio, il costo del mantenimento della macchina utensile potrebbe essere anch'esso ridotto.

Nel 2016 Li et al. [15] hanno analizzato il consumo energetico di un processo di spianatura multi-passata proponendo un modello di ottimizzazione dei parametri multi-obiettivo per massimizzare l'efficienza energetica e minimizzare i costi di produzione. Il modello multi-obiettivo ottenuto non era nient'altro che il miglior trade-off di quelli mono obiettivo.

Quando il processo di ottimizzazione mirava a massimizzare l'efficienza energetica, è stato ricercato un tasso di asportazione di materiale (MRR) più elevato possibile (nell'intervallo dei parametri consentiti) poiché maggiore è MRR, minore è il consumo specifico di energia (SEC). Tuttavia, l'aumento di MRR incrementava l'usura dell'utensile, con conseguente aumento dell'energia di cambio utensile; pertanto, MRR non poteva raggiungere valori troppo elevati.

Analizzando le variazioni di SEC, il suo valore diminuiva aumentando la velocità di taglio fino a un certo limite, superato il quale tornava a crescere, mentre diminuiva sempre all'aumentare della velocità di avanzamento e della profondità di taglio. In generale, aumentando la velocità di taglio, la velocità di avanzamento e la profondità di taglio si sono ridotti sia il consumo di energia che i tempi di produzione, e quindi il SEC. L'influenza della velocità di taglio sulla durata dell'utensile è risultata molto più significativa di quella degli altri parametri di taglio: una velocità di taglio troppo elevata riduceva la durata dell'utensile, con conseguente aumento dell'energia per il cambio dell'utensile e del SEC.

Allo stesso modo, quando il processo di ottimizzazione mirava a ridurre al minimo i costi di produzione, si è cercato di ottenere un MRR inferiore all'interno dell'intervallo consentito. Questo perché con l'aumento di MRR aumentava anche l'usura dell'utensile con un conseguente incremento del costo dell'utensile. Pertanto, anche in questo caso MRR non avrebbe dovuto superare certi valori.

Il costo di produzione ha manifestato un comportamento simile al SEC, diminuendo con l'aumento della velocità di taglio fino a un valore superato il quale, aumentava nuovamente. Il costo di produzione è invece sempre diminuito all'aumentare della velocità di avanzamento e della profondità di taglio.

Si può concludere che quando il criterio di ottimizzazione si basava sulla riduzione del consumo energetico e la massimizzazione dell'efficienza energetica, la velocità di taglio è

risultata essere molto più elevata di quella del criterio di ottimizzazione per minimizzare i costi di produzione. Quando invece il criterio di ottimizzazione si basava sulla massimizzazione dell'efficienza energetica e sulla minimizzazione dei costi di produzione, il valore della velocità di taglio è risultata un trade-off tra quella determinata nei mono-obiettivo. Infine, la velocità di avanzamento e la profondità di taglio sono risultate essere maggiori di quelle consigliate dal produttore.

Nel 2016 Li et al. [14] hanno presentato un metodo di ottimizzazione dei parametri multi-obiettivo per l'efficienza energetica nel processo di fresatura CNC, analizzando l'influenza parametrica sul consumo specifico di energia (SEC) e sul tempo di produzione (T). I parametri di taglio analizzati sono stati la velocità del mandrino, l'avanzamento, la profondità di taglio e larghezza di taglio.

Gli esperimenti sono stati effettuati fissando due dei quattro parametri e osservando le variazioni di SEC e T al variare degli altri due parametri. Dalle prove effettuate, è stato concluso che la profondità e la larghezza di taglio erano i parametri più influenti per il SEC, mentre l'impatto della velocità del mandrino e della velocità di avanzamento era minimo. Per quanto riguarda il tempo di produzione, la velocità del mandrino è risultato il parametro più influente, seguito dalla velocità di avanzamento; la profondità e la larghezza di taglio hanno invece avuto un impatto quasi trascurabile.

Nel 2020 Huang et al. [76] hanno proposto un'ottimizzazione dei parametri di taglio per la fresatura applicando tre algoritmi finalizzati a ridurre il consumo energetico, mantenere la stabilità della macchina utensile e migliorare l'efficienza del processo. Il sistema è risultato in grado di stimare con precisione il consumo di energia anche in condizioni di usura di differenti utensili.

Era noto che diverse combinazioni di parametri di taglio e stato di usura dell'utensile avrebbero causato una diversa potenza di taglio e vibrazioni di taglio. Pertanto, gli esperimenti sono stati condotti per correlare la potenza di taglio e le vibrazioni di taglio ai parametri di taglio in diversi stati di usura dell'utensile. Sono stati discussi quattro parametri di taglio: velocità di taglio, velocità di avanzamento, profondità di taglio e usura dell'utensile.

Sono stati adottati cinque livelli per ogni parametro di taglio. L'usura dell'utensile, che si riferisce principalmente all'usura sul fianco dell'utensile è stata suddivisa in tre fasi: usura iniziale, usura costante e usura finale. È stato osservato che l'aumento dell'usura dell'utensile

ha portato all'aumento dell'area di contatto tra utensile e pezzo; pertanto, l'usura dell'utensile era correlata positivamente con la potenza di taglio.

La velocità di taglio è risultata avere il maggiore impatto sulla potenza di taglio, seguita da profondità di taglio, usura dell'utensile e velocità di avanzamento. Una riduzione adeguata della velocità di taglio avrebbe ridotto quindi la potenza di taglio.

Il fattore più importante che influenzava la vibrazione di taglio è risultata la velocità di taglio, seguita dalla velocità di avanzamento. Usura dell'utensile e profondità di taglio hanno avuto invece scarso effetto sulle vibrazioni di taglio.

Si è stabilito infine che per mantenere una certa stabilità della macchina utensile e ridurre le vibrazioni generate durante il processo di taglio, la velocità di taglio non poteva raggiungere valori troppo elevati.

Nel 2020 Han et al. [33] hanno studiato il trade-off tra il tasso di asportazione di materiale (MRR) e la potenza consumata (P) nel processo di fresatura, selezionando come variabili di ottimizzazione a velocità del mandrino, la velocità di avanzamento, la profondità di taglio e la larghezza di taglio.

Hanno mostrato che quando P era ottimizzato separatamente, i parametri di taglio ottimali erano più piccoli e MRR diminuiva; quando invece MRR era ottimizzato separatamente, ogni parametro di taglio assumeva un valore maggiore, portando così a un P maggiore. Quando è stata adottata l'ottimizzazione sia di MRR che di P, i parametri di taglio hanno assunto un valore intermedio rispetto alle ottimizzazioni separate.

Han et al. hanno quindi stabilito che non esistono dei parametri di taglio ottimali assoluti: questi dipenderanno infatti dagli obiettivi strategici aziendali, se si vuole prediligere la produttività (ottimizzando principalmente MRR) o optare per l'efficienza energetica (ottimizzando principalmente P).

3.2 Tornitura

Nel 2011 Mativenga e Rajemi [101] hanno proposto una procedura di ottimizzazione dei parametri di taglio partendo dal modello da loro precedentemente formulato. Lo scopo della loro ricerca era incentrato sull'ottimizzazione dell'impronta energetica di un prodotto lavorato. È stata utilizzata una funzione obiettivo per calcolare la durata ottimale dell'utensile per il minimo impatto energetico, in modo tale che utilizzando un'equazione di durata utensile

appropriata, potessero essere selezionate le condizioni di taglio ottimali corrispondenti. L'ottimizzazione è stata eseguita all'interno di una finestra di processo per selezionare una combinazione fattibile di profondità di taglio, velocità di avanzamento e velocità che soddisfino il criterio di energia minima e i vincoli di processo.

Durante la tornitura dell'acciaio al carbonio medio EN8 0,4%, la durata ottimale dell'utensile per il minimo impatto energetico è stata utilizzata per vincolare altre variabili di taglio e selezionare condizioni di taglio ottimali. Nell'ottimizzazione non è stato considerato solo il vincolo di potenza del mandrino della macchina, ma anche la potenza assorbita dall'usura radiale della mola e l'aumento della potenza a vuoto del mandrino a regimi più elevati.

Nel valutare la velocità di taglio ottimale, questa è risultata massima a profondità di taglio inferiori e minima a profondità di taglio più elevate. Velocità minima e massima sono risultate entrambe al di fuori dell'intervallo di valori consigliati dal fornitore dell'utensile.

La selezione delle condizioni di taglio in base al criterio della minima impronta energetica ha portato a una riduzione del 64% dell'impronta energetica di un prodotto lavorato rispetto all'utilizzo dei dati di taglio consigliati dai fornitori di utensili, e un miglioramento del 44% rispetto alle variabili di taglio.

Hanno infine concluso che questo criterio può essere utilizzato per ridurre significativamente il costo, l'energia e l'impronta di carbonio dei prodotti lavorati.

Nel 2012 Guo et al. [156] hanno proposto un'ottimizzazione del consumo energetico tenendo in considerazione la qualità della superficie. In questa ricerca è stato presentato un approccio che incorpora sia il consumo di energia che la rugosità superficiale per ottimizzare i parametri di taglio nella tornitura di finitura. Sulla base del modello energetico e del modello di rugosità superficiale, derivati per una determinata macchina utensile, i parametri di taglio sono stati ottimizzati per ottenere una finitura superficiale con il consumo minimo di energia.

Partendo dalla rugosità superficiale predefinita, sono stati selezionati vari parametri (velocità di taglio, velocità di avanzamento, profondità di taglio) conformi ai requisiti, utilizzando il modello di rugosità. Al di sotto di certe combinazioni di valori non si è potuto quindi operare se si volevano mantenere i minimi requisiti di rugosità superficiale e di consumo energetico.

Si è notata una diminuzione generale dell'energia consumata nel processo con l'aumento della velocità di avanzamento e della profondità di taglio. Fissando invece questi due parametri in un intervallo convenuto, l'energia specifica di processo è diminuita notevolmente impostando alti valori della velocità di taglio (ben oltre i valori consigliati dal produttore dell'utensile).

Nello stesso anno, Hanafi et al. [56] hanno determinato i parametri di lavorazione ottimali per la tornitura del PEEK (polietere-etero-chetone) rinforzato con il 30% di fibre di carbonio. Il materiale è stato tornito utilizzando utensili rivestiti in nitruro di titanio (TiN) in condizioni asciutte.

I tre parametri di taglio selezionati per la presente indagine sono stati velocità di taglio (v), velocità di avanzamento (f) e profondità di taglio (d). Sono state monitorate contemporaneamente due prestazioni target, la qualità superficiale dei pezzi lavorati e il consumo di potenza durante la lavorazione. Gli intervalli dei parametri di lavorazione sono stati selezionati in modo tale che non fosse necessario alcun refrigerante poiché la temperatura raggiunta durante il taglio è stata mantenuta sufficientemente bassa. Dal caso studio è emerso che l'utensile da taglio rivestito in TiN offre un enorme vantaggio dal punto di vista della sostenibilità, consentendo di produrre parti con un'eccellente finitura superficiale, ottenendo un basso costo di produzione e un ridotto impatto ambientale.

L'impostazione ottimale dei parametri di taglio che consentiva di ottenere la minimizzazione simultanea della rugosità superficiale e della potenza di taglio è stata determinata utilizzando la teoria relazionale grigia e il metodo Taguchi. È stato identificato che la velocità di taglio di 100 m/min, la velocità di avanzamento di 0,05 mm/giro e la profondità di taglio di 0,25 mm erano la combinazione ottimale dei parametri di taglio. Ulteriori analisi hanno determinato che il parametro più influente è la profondità di taglio, seguito dalla velocità di taglio e dalla velocità di avanzamento.

Sulla base del modello formulato, nel 2014 Velchev et al. [131] hanno approfondito l'influenza della velocità avanzamento e della profondità di taglio sul consumo energetico durante la tornitura dell'acciaio.

Al fine di ottenere un minor consumo di energia in determinate condizioni di lavorazione, è stato necessario selezionare un certo tipo di qualità di inserto e i valori massimi possibili di avanzamento e profondità di taglio. Hanno notato che la velocità di taglio per l'energia minima v_{cE} è maggiore della velocità di taglio per la velocità di produzione massima v_{cQ} . Era inoltre noto che quest'ultima è maggiore della velocità di taglio per il costo minimo di produzione v_{cc} , ovvero $v_{cE} > v_{cQ} > v_{cc}$. Ciò significava che se la lavorazione fosse stata eseguita con v_{cE} , si avrebbe avuto una certa diminuzione della velocità di produzione con un conseguente aumento dei costi di produzione.

È stato infine appurato che l'aumento della velocità di avanzamento provoca una diminuzione di v_{cE} e della durata dell'utensile, e che l'aumento della profondità di taglio, v_{cE} provoca un aumento meno che proporzionale e una diminuzione della durata dell'utensile.

Nel 2014 Camposeco-Negrete [10] ha presentato uno studio sperimentale relativo all'ottimizzazione dei parametri di taglio nella tornitura dell'acciaio AISI 1045. Il consumo di energia e la rugosità superficiale (SR) sono stati ridotti al minimo, mentre il tasso di rimozione del materiale (MRR) del processo è stato massimizzato.

Per quanto riguarda la diminuzione dell'energia specifica consumata, i fattori più significativi sono risultati la velocità di avanzamento e la profondità di taglio; per ridurre al minimo la rugosità superficiale, il fattore più significativo è risultato la velocità di avanzamento. La velocità di taglio è risultato invece il parametro che più ha influenzato la durata dell'utensile.

Il valore dell'energia consumata dalla macchina utensile durante la tornitura è stato ridotto al minimo quando la velocità di avanzamento e la profondità di taglio erano ai valori massimi, e la velocità di taglio era al valore minimo. Quando la velocità di avanzamento era al suo valore più alto, il tempo e l'energia necessari per lavorare il pezzo diminuivano. Inoltre, quando il valore della profondità di taglio era maggiore, veniva rimosso più materiale dal pezzo da lavorare per ogni passata di taglio, e il tempo ciclo veniva ridotto.

Per il tasso di asportazione del materiale, maggiori erano i valori dei parametri di taglio maggiore era il valore di questa variabile di risposta. Il valore più alto della profondità di taglio, della velocità di avanzamento e della velocità di taglio massimizzava la quantità di materiale rimosso. Aumentando il valore del tasso di asportazione di materiale diminuiva parallelamente il consumo energetico: massimizzando quindi MRR si minimizzava indirettamente anche il consumo energetico.

Analizzando la rugosità superficiale, questa risultava significativa in quanto rappresentativa della qualità del pezzo. Un pezzo scartato per problemi di qualità implicava un processo di rilavorazione: pertanto, sarebbe stata consumata più energia. Era necessario un basso valore di rugosità superficiale per ottenere condizioni ottimali del processo di lavorazione. Facendo riferimento a questa variabile di risposta, la velocità di avanzamento al suo livello minimo ha minimizzato il valore di SR. I valori della profondità di taglio e della velocità di taglio hanno avuto invece poca influenza.

Rispetto all'ottimizzazione tradizionale, i parametri di tornitura ottimali così determinati hanno ridotto il consumo energetico del 15% e la rugosità superficiale fino al 360%. Di conseguenza,

sono state raggiunte allo stesso tempo sia una maggiore sostenibilità che una maggiore qualità del processo di lavorazione.

Nello stesso anno, Kant e Sangwan [37] hanno presentato un modello predittivo multi-obiettivo per la minimizzazione del consumo energetico e della rugosità superficiale durante la tornitura dell'acciaio AISI 1045. I risultati del modello proposto forniscono un miglioramento di oltre il 6% della riduzione del consumo energetico e di circa il 3% della rugosità superficiale.

È stato osservato che il principale parametro di lavorazione che influenzava il consumo di energia e la rugosità superficiale era la velocità di avanzamento, seguito dalla profondità di taglio e dalla velocità di taglio.

Per ottenere la migliore finitura superficiale con il minimo consumo energetico, i valori ottimi sono stati velocità di avanzamento e profondità di taglio elevati e velocità di taglio medio-alta.

Sono state poi effettuate varie prove sperimentali:

- fissando l'avanzamento e variando la velocità di taglio e la profondità di taglio, a valori inferiori di velocità di taglio e profondità di taglio la funzione multi-obiettivo era massima e decresceva con l'aumento della profondità di taglio, anche a valori di velocità di taglio inferiori.
- fissando la profondità di taglio e variando le velocità di taglio e avanzamento, a valori più piccoli di avanzamento la funzione multi-obiettivo risultava massimizzata. Aumentando la velocità di taglio e riducendo l'avanzamento la funzione multi-obiettivo risultava comunque massima, mentre a valori di avanzamento più alti diminuiva.
- diminuendo la profondità di taglio e l'avanzamento la funzione multi-obiettivo risultava massimizzata, mentre risultava minima a valori maggiori di profondità di taglio e avanzamento.

Nel 2015 Yi et al. [108] hanno analizzato un processo di tornitura cilindrica CNC prendendo in considerazione la velocità di taglio e la velocità di avanzamento per il tempo minimo di lavorazione e le emissioni minime di anidride carbonica. Il modello di ottimizzazione da loro proposto era una soluzione intermedia tra due tipi di ottimizzazione:

- 1) ottimizzazione orientata alla riduzione delle emissioni di CO₂, che si è tradotta nell'impostazione della velocità di taglio e della velocità di avanzamento più elevate possibili. Mentre i due parametri aumentavano entro i loro limiti, le emissioni totali di anidride carbonica considerate diminuivano. Tuttavia, maggiore era la velocità, più rapida era l'usura dell'utensile. La diminuzione della durata dell'utensile aumentava il

tempo di cambio utensile; questo aumento è risultato però più significativo della diminuzione del tempo di taglio, portando così all'aumento del tempo totale di lavorazione.

- 2) ottimizzazione orientata all'efficienza, che comporta l'impostazione della velocità di taglio e della velocità di avanzamento inferiori rispetto al primo caso, diminuendo così il tempo di processo.

L'ottimizzazione proposta da Yi et al. è risultata un compromesso tra efficienza produttiva e benignità ambientale, tra le lavorazioni rapide e la necessità di ridurre al minimo il numero di cambi utensile utilizzando utensili da taglio a velocità di taglio conservatrici.

Nel 2016 Gupta et al. [91] hanno studiato l'effetto dei tipi di fluido da taglio in funzione di tre parametri di lavorazione (velocità di taglio, velocità di avanzamento, angolo di avvicinamento) e il loro effetto sulle risposte (forza di taglio, temperatura di taglio, usura dell'utensile, rugosità superficiale) durante la tornitura della lega di titanio in condizioni NFMQL (Nano-Fluid Minimum Quantity Lubrification). Gli esperimenti sono stati condotti sulla base della metodologia della superficie di risposta ed è stata generata una funzione obiettivo utilizzando i parametri di output.

Analizzando le forze di taglio, si è manifestata una relazione direttamente proporzionale tra queste e velocità di taglio e di avanzamento. Si è inoltre osservato che l'angolo di avvicinamento ha un effetto minore.

Per quanto riguarda l'usura dell'utensile, è stato osservato che i valori di questa aumentavano considerevolmente a causa dell'aumento della velocità di taglio insieme alla velocità di avanzamento, mentre diminuivano notevolmente con l'aumento dell'angolo di avvicinamento. Esaminando la temperatura di taglio, questa è notevolmente aumentata con l'aumento della velocità di taglio, mentre ha manifestato un leggero aumento con l'aumento della velocità di avanzamento.

Analizzando la rugosità superficiale, il suo valore era principalmente influenzato dalla velocità di avanzamento, seguita dalla velocità di taglio e dall'angolo di avvicinamento. Il valore della rugosità superficiale è leggermente aumentato all'aumentare della velocità di taglio, ma è aumentato bruscamente con l'aumentare della velocità di avanzamento. Tuttavia, il valore della rugosità superficiale è diminuito con l'aumento dell'angolo di avvicinamento poiché l'aumento dell'angolo di avvicinamento ha ridotto la lunghezza di contatto del truciolo dell'utensile, che favorisce la bassa vibrazione alla macchina utensile (quindi la finitura superficiale aumenta).

Dai risultati ANOVA, è stato riscontrato che l'effetto della velocità di taglio e della velocità di avanzamento era statisticamente significativo. L'effetto dell'angolo di approccio risultava essere invece statisticamente non significativo.

In conclusione, le temperature di taglio, l'usura degli utensili e la rugosità superficiale sono aumentate all'aumentare della velocità di taglio e di avanzamento, mentre gli effetti dell'angolo di avvicinamento sono risultati minori.

Nel 2017 Shoba et al. [12] hanno effettuato uno studio sperimentale per la tornitura di compositi ibridi rinforzati con diversi materiali. Sono state analizzate le forze di taglio, la rugosità superficiale, il consumo energetico e il tasso di asportazione di materiale. È stata analizzata l'influenza della velocità di taglio, dell'avanzamento, della profondità di taglio e del rinforzo sull'usura dell'utensile e sul tagliante di riporto.

Analizzando la rugosità superficiale, si è riscontrato che è aumentata con l'aumento della percentuale del rinforzo. Con l'aumento della velocità di taglio la rugosità superficiale diminuiva, mentre quest'ultima aumentava con l'aumento dell'avanzamento e della profondità di taglio.

Il tasso di asportazione di materiale aumentava con la velocità di taglio, l'avanzamento, la profondità di taglio e la percentuale del rinforzo. Anche il consumo di potenza aumentava con la velocità di taglio, l'avanzamento e la profondità di taglio, ma diminuiva con la percentuale del rinforzo.

Per quanto riguarda l'analisi dell'usura dell'utensile, si è riscontrata un'usura marcata con velocità di taglio, avanzamento e profondità di taglio più elevate.

Nel 2017 Wojcicki et al. [58] hanno selezionato combinazioni ottimali di parametri di taglio (velocità di taglio, profondità di taglio e velocità del mandrino) in grado di minimizzare il consumo di energia. L'obiettivo è stato quello di caratterizzare un sottosistema delle moderne macchine utensili, spesso utilizzate sia nei torni che nelle fresatrici, composto da un mandrino a trasmissione diretta con un'unità di raffreddamento dedicata. Sono state individuate relazioni analitiche, producendo mappe di efficienza in funzione dei vari parametri di processo.

È stata analizzata una gamma di possibili tassi di asportazione di materiale e diametri di taglio, che ha consentito di esplorare le prestazioni energetiche in varie condizioni di produzione. Il diametro variabile ha avuto lo scopo di rappresentare il diverso dimensionamento del pezzo, mentre la variazione del tasso di asportazione di materiale è stata utilizzata per esplorare la

possibilità di ridurre le prestazioni complessive in termini di rimozione di materiale finalizzata al risparmio energetico.

Sono state distinte tre regioni di diametro (d) del pezzo: piccolo (fino a 40 mm), medio (tra 40 e 120 mm) e grande (più di 120 mm).

I parametri di taglio ottimali sono significativamente variati al variare di d , ad eccezione della velocità di avanzamento che, quando massimizzata, ha sempre portato miglioramenti dell'efficienza. Per la profondità di taglio e la velocità di taglio, le indicazioni sono stati l'aumento della prima per le gamme di diametro piccolo e l'aumento della seconda per i diametri grandi. Per i pezzi di fascia media è stata invece suggerita una combinazione ottimale di entrambi i parametri.

Analizzando MRR, la scelta non è stata evidente ed è dipesa anche dalle condizioni di lavoro della macchina. Il consumo complessivo dipendeva fortemente dalla potenza di base sia del refrigeratore che delle restanti componenti periferiche della macchina. Il potenziale risparmio energetico attraverso la riduzione di MRR è stato possibile solo per i pezzi di piccolo diametro. Di conseguenza, per macchine con un consumo energetico significativo potrebbe essere meglio massimizzare sempre MRR.

L'analisi ha infine dimostrato che l'efficienza del sottosistema mandrino può variare significativamente con le condizioni operative: tra lavorazioni pesanti a bassa velocità e lavorazioni leggere ad alta velocità la differenza assoluta di efficienza può raggiungere tra il 50 e il 60%.

Nel 2018 Zhou et al. [39] hanno studiato l'ottimizzazione dei parametri di taglio per ottenere una tornitura a basse emissioni di CO₂. Per ottenere la relazione tra le emissioni di CO₂ e i parametri di taglio, nella modellazione del processo di lavorazione sono stati considerati gli indici di taglio, il tempo di taglio e il costo dell'operazione di taglio. Si è evidenziato un trade-off tra il tempo di taglio e le emissioni di anidride carbonica, così come il costo di lavorazione: non è stato quindi possibile raggiungere i tre valori ottimali allo stesso tempo. Il miglioramento di un obiettivo del modello di ottimizzazione multi-obiettivo portava alla perdita di un altro.

Per ridurre le emissioni di CO₂ prodotte nel processo di lavorazione, è stato proposto un processo di ottimizzazione dei parametri di taglio, ottenendo le relazioni numeriche tra i parametri di taglio e gli indici di taglio contenenti tempo di taglio, emissioni di anidride carbonica e costo. Nel processo sono stati forniti anche il modello e l'algoritmo corrispondenti. Il modello e l'algoritmo di ottimizzazione dei parametri di taglio sono stati studiati in base al modello del processo di lavorazione, ottenendo infine i parametri di taglio ottimali per la

lavorazione specifica. Nel processo di lavorazione sono state ottimizzate la velocità di taglio, la velocità di avanzamento e la profondità di taglio ottenendone il valore ottimale.

Con una simulazione in MATLAB, i risultati hanno indicato che il metodo proposto può essere utilizzato per ottenere efficacemente la soluzione ottimale. Tuttavia, si è evidenziata un'elevata complessità temporale per il calcolo dello stato ottimale.

Nel 2018 Xie et al. [94] hanno presentato un approccio di ottimizzazione per ottenere risparmio energetico e la minima rugosità superficiale durante un processo di tornitura, considerando gli effetti dell'usura degli utensili e delle combinazioni di parametri di taglio a una determinata velocità di rimozione del materiale. I parametri di taglio selezionati sono stati la velocità del mandrino, la velocità di avanzamento e la profondità di taglio.

Analizzando l'effetto dei parametri di taglio, è emerso che l'aumento della velocità del mandrino ha migliorato la qualità superficiale e ha aumentato l'energia specifica di taglio (SCE). Questa non è però risultata particolarmente influenzata dalla velocità di avanzamento. L'efficienza energetica è risultata dipendente soprattutto dalla velocità del mandrino; la velocità di avanzamento ha avuto effetti minori.

Qualità superficiale e SCE risultavano notevolmente peggiorati con il progredire dell'usura dell'utensile; tuttavia, sotto un certo tasso di usura dell'utensile, SCE aumentava al diminuire della rugosità media. Pertanto, per ottenere una buona qualità superficiale era necessaria una maggiore energia di taglio, evidenziando un trade-off tra questi due obiettivi. Per quanto riguarda infine l'efficienza energetica, questa diminuiva con la progressione dell'usura dell'utensile.

Nel 2019 Tian et al. [11] hanno analizzato l'ottimizzazione dei parametri di taglio di un'operazione di tornitura a secco considerando le condizioni di usura dell'utensile, valutando l'ambiente di produzione sotto un aspetto pratico e realistico. Sono state analizzate le relazioni quantitative tra parametri di taglio, usura degli utensili e gli indici di produzione (emissioni di CO₂, costi e tempi). Quindi, è stato stabilito un modello di ottimizzazione dei parametri di taglio multi-obiettivo basato sugli indici di produzione di cui sopra per determinare i parametri di taglio e gli strumenti ottimali.

Le variabili di ottimizzazione considerate sono state la velocità di taglio, la velocità di avanzamento, la profondità di taglio e le condizioni di usura degli utensili da taglio. I risultati hanno mostrato che:

- i parametri di taglio ottimali cambiavano con le condizioni di usura dell'utensile.

- per lo stesso tipo di utensili da taglio con diverse condizioni di usura, i valori ottimali di emissioni di anidride carbonica, costi e tempi aumentavano insieme all'aumento delle condizioni di usura dell'utensile;
- per diversi utensili da taglio disponibili con diverse condizioni di usura degli utensili, è risultato necessario applicare un metodo di ottimizzazione multi-obiettivo per stabilire le emissioni di CO₂, i costi e i tempi di produzione ottimali.

Sono state studiate diverse condizioni di usura per gli stessi utensili da taglio per stabilire la relazione tra emissioni di anidride carbonica, costi e tempi rispetto alle condizioni di usura dell'utensile. I parametri di taglio ottimali cambiavano in base alle condizioni di usura dell'utensile, con conseguenti differenze in questi tre obiettivi. Quindi, risultava necessaria un'ottimizzazione multi-obiettivo per raggiungere un equilibrio tra gli obiettivi con diverse condizioni di usura.

Quando le condizioni di usura dell'utensile erano fissate, la selezione di una profondità di taglio e una velocità di avanzamento maggiori sono risultate significative per ridurre le emissioni di CO₂. Quando le condizioni di usura dell'utensile cambiavano, risultava necessaria la selezione di elevate profondità di taglio, velocità di avanzamento e velocità di taglio. Quando invece i parametri di taglio erano invariati, le emissioni di anidride carbonica variavano molto rapidamente con le condizioni di usura dell'utensile.

Nel 2021 Pangestu et al. [107] hanno analizzato un'operazione di tornitura multi-passata, sviluppando un modello di ottimizzazione multi-obiettivo per determinare i parametri di taglio ottimali (velocità di rotazione del mandrino, velocità di avanzamento, profondità di taglio), considerando diversi aspetti: produzione sostenibile in termini di consumo energetico, emissioni di CO₂, costi di produzione ed efficienza di lavorazione in termini di tempo di produzione. I parametri di taglio ottimali avrebbero dovuto soddisfare diversi vincoli: durata dell'utensile, forza di taglio, potenza, temperatura dell'interfaccia truciolo-utensile, regione di taglio stabile, rugosità superficiale.

Non sono stati rilevati trade-off tra consumo di energia e tempi di produzione e tra costo di produzione ed emissioni di CO₂. Per il costo di produzione e le emissioni di anidride carbonica, non si è manifestato alcun trade-off in quanto entrambi gli obiettivi avevano due componenti comuni in termini di energia elettrica e tempo totale. In ogni caso, ogni volta che una funzione obiettivo aumentava, aumentava anche l'altra funzione obiettivo e viceversa.

Le diverse impostazioni della velocità di avanzamento e della velocità di rotazione del mandrino hanno avuto effetti significativi sul consumo di energia, sui tempi di produzione,

sull'emissione di anidride carbonica e sui costi di produzione. Ogni funzione dell'obiettivo diminuiva all'aumentare della velocità di avanzamento e di rotazione del mandrino. Un'elevata velocità di rotazione del mandrino ha fatto diminuire la forza di taglio, portando a una riduzione del consumo energetico e delle emissioni di anidride carbonica. In contrasto con la velocità di avanzamento, si sono evidenziati due fattori in conflitto. Un aumento della velocità di avanzamento faceva aumentare anche la forza di taglio, riducendo però il tempo di produzione poiché si riduceva il tempo necessario per rimuovere il materiale. Tuttavia, un'elevata velocità di avanzamento si traduceva ancora in un basso consumo di energia e ridotte emissioni di CO₂. Al diminuire del tempo di produzione, diminuivano anche i costi di produzione generati durante il processo di tornitura. Inoltre, una grande quantità di consumo di energia aumentava i costi di produzione. Pertanto, il consumo di energia e i costi di produzione sono stati mantenuti al minimo per ottenere una produzione sostenibile.

La profondità di taglio ha avuto poca influenza sul consumo di energia, sui tempi di produzione, sulle emissioni di anidride carbonica e sui costi di produzione; la profondità del taglio non è quindi risultata sensibile alle funzioni obiettivo.

Sulla base dell'analisi di cui sopra, è emerso che l'impostazione dei parametri di taglio ha impatti complessi su consumo energetico, emissioni di CO₂, tempi di produzione e costi di produzione.

3.3 Rettifica

Rispetto ai processi di fresatura e tornitura analizzati nelle sezioni precedenti, la letteratura relativa al processo di rettifica risulta più modesta. A titolo esemplificativo viene presentata l'analisi di due articoli.

Nel 2013 Winter et al. [86] hanno presentato un approccio per identificare i parametri di processo che porta a soluzioni Pareto ottimali per promuovere l'efficienza delle operazioni di rettifica. Per l'ottimizzazione dei parametri di taglio sono stati considerati i seguenti indicatori tecnologici: la forza tangenziale specifica, la forza normale specifica, la potenza di taglio specifica, l'energia specifica di rettifica e l'usura radiale della mola, considerando il tempo di taglio come una misura aggiuntiva per l'obiettivo economico. Sono stati considerati tre obiettivi: prestazioni tecnologiche, economiche e ambientali.

Nel caso studio è emerso che l'aumento della profondità di taglio e della velocità del pezzo si sono tradotte in un impatto opposto sugli indicatori tecnologici rispetto agli indicatori ambientali ed economici. Tutti gli indicatori tecnologici hanno mostrato un aumento, mentre tutti gli altri indicatori hanno mostrato una diminuzione. L'aumento della profondità di taglio e della velocità del pezzo ha portato a un aumento dello spessore del truciolo, per cui sono aumentate le forze, la potenza, l'usura dell'utensile e la rugosità superficiale. Al contrario, il tempo di taglio e le relative grandezze sono diminuite. All'aumentare della velocità di taglio, è aumentata la maggior parte degli indicatori tecnologici (eccetto la potenza di taglio e l'energia specifica di rettifica) e sono diminuiti gli indicatori economici e ambientali. La diminuzione della velocità di taglio ha portato a una riduzione dello spessore del truciolo, per cui le forze, l'usura e la rugosità sono diminuite ma la potenza di taglio specifica e l'energia specifica di rettifica sono aumentate. Il comportamento della velocità di ravvivatura è simile alla velocità di taglio. Mentre la forza tangenziale specifica, la forza normale specifica, la potenza di taglio specifica e l'energia specifica di rettifica hanno avuto tendenza decrescente, all'aumentare di velocità di ravvivatura sono aumentate l'usura radiale della mola e la rugosità superficiale. Di conseguenza, sono aumentate leggermente anche le misure degli obiettivi ambientali ed economici. La velocità di ravvivatura influenzava la topografia della mola; di conseguenza, la topografia è diventata più ruvida all'aumentare della velocità di ravvivatura, per cui è aumentata anche la rugosità superficiale ottenuta sul pezzo. Analogamente agli altri, anche il diametro del pezzo ha mostrato un impatto opposto.

Nel 2020, Sanjeevi et al. [112] hanno studiato l'ottenimento della migliore rugosità superficiale utilizzando la metodologia RSM (Response Surface Methodology) nel processo di rettifica superficiale dell'acciaio Aisi4140. I parametri di taglio analizzati sono stati la velocità, la profondità di taglio e la velocità di avanzamento.

Impostando vari intervalli di valori dei precedenti parametri, è emerso che la velocità (di almeno 1200 rpm) e la profondità di taglio sono i parametri che maggiormente influenzano la finitura superficiale.

Conclusioni

Le macchine utensili sono sistemi complessi e dinamici; per questo le ottimizzazioni proposte in questo Capitolo sono specifiche sul singolo caso in quanto il problema di ottimizzazione è derivante dall'interazione tra macchina utensile, sistema di lubrorefrigerazione, utensile, geometria e materiale del grezzo di fabbricazione, apparecchiature ausiliarie, tipo di componente da ottenere. Esistono numerose possibilità per un uso più efficiente dell'energia. È possibile, ad esempio, ottenere risparmi energetici significativi attraverso la corretta selezione dei componenti della macchina utensile, o considerare il potenziale risparmio per una progettazione più efficiente dei processi di lavorazione in considerazione dell'efficienza dei motori dei mandrini.

Gli esperimenti possono essere migliorati con un'analisi della rugosità superficiale per aggiungere un obiettivo di qualità. Inoltre, può essere affrontata anche un'analisi sulla durata dell'utensile; tutto ciò permetterebbe di avere un'idea completa dei parametri più importanti nella lavorazione. Nuove tecnologie possono essere studiate, come l'utilizzo di motori mandrino auto frenanti su macchine CNC. Il campo del consumo energetico sulla lavorazione CNC dovrebbe essere studiato con approcci sempre all'avanguardia per ottenere una nuova e più sostenibile generazione di processi di lavorazione.

Dall'analisi svolta, la velocità di taglio è risultato il fattore più importante che influenza la potenza di taglio e le vibrazioni di taglio. In generale, i parametri di taglio cambiano in base al materiale, all'utensile, al modello di macchina, alle condizioni di taglio: cambiando uno solo di questi fattori, i parametri ottimali cambiano di conseguenza. Risulta quindi estremamente complesso definire uno standard dei parametri di taglio che risulti valido per tutti i processi di lavorazione.

Le analisi effettuate suggeriscono che ogni fattore abilitante (utensile, fluido da taglio, macchina utensile) ha un'influenza diversa per quanto riguarda l'impatto ambientale, economico e tecnologico. Pertanto, l'intero sistema dovrebbe essere considerato per quanto riguarda il grezzo di fabbricazione e i fattori abilitanti in combinazione con i parametri di processo.

Per qualsiasi macchina utensile, il suo design pone alcune limitazioni fisiche: l'utilizzo della macchina oltre tali limitazioni causerà malfunzionamenti oltre che scarsa produttività. I limiti sono rappresentati dai vincoli meccanici della macchina, come ad esempio che la velocità di taglio rientri nell'intervallo di velocità minima e massima, o che la velocità di avanzamento sia scelta all'interno del suo intervallo minimo e massimo.

Al fine di garantire una buona qualità della superficie e prevenire la rottura dei taglienti, è imperativo che la forza di taglio non aumenti oltre un certo limite consentito e che la potenza in uscita durante le operazioni di lavorazione non superi la potenza in uscita massima della macchina.

Nella produzione pratica, viene impostata un'ampia varietà di vincoli per soddisfare le specifiche esigenze di lavorazione. Ad esempio, con una certa profondità di taglio, la velocità di avanzamento è ulteriormente limitata in relazione al materiale e alle dimensioni degli utensili da taglio. Un aumento eccessivo della velocità di avanzamento moltiplicherà drasticamente la resistenza alla forza di taglio, riducendo la durata dell'utensile. Tuttavia, la riduzione dei tempi di processo può portare a un aumento dei tempi morti (soprattutto in caso di utilizzo non ottimale della macchina) e quindi un effetto di rimbalzo sul consumo totale di energia.

I range di parametri determinati dagli studi analizzati possono quindi fornire da supporto decisionale per i manager aziendali, ma non essere dei riferimenti per tutti i tipi di lavorazione.

Si invita il lettore a fare riferimento all'Appendice 1 e all'Appendice 2 per un riassunto in forma tabellare dei modelli analizzati nel corso del Capitolo.

Capitolo 4

Strategie di miglioramento della sostenibilità

Nel corso degli ultimi 30 anni sono stati formulati modelli per la previsione energetica al fine di evitare sprechi di elettricità, riducendo in questo modo anche i costi ad essa connessi. Gli studi non si sono però fermati alla sola previsione energetica: hanno infatti allargato i propri confini arrivando a considerare strategie di benchmarking energetico, analisi sui fluidi da taglio e nanofluidi, lavorazioni alternative, scheduling, analisi sul materiale da lavorare e di quello di cui è composto l'utensile.

L'interazione utensile-pezzo e le tecniche innovative di refrigerazione e lubrificazione hanno migliorato la produttività e la qualità dei prodotti lavorati. Tuttavia, per ottenere un'alta produttività si ricorre a una lavorazione ad elevato tasso di asportazione di materiale, che comporta una temperatura più elevata nella zona di lavorazione. Questa temperatura più elevata non è però vantaggiosa per la qualità del pezzo, causando inoltre una maggiore usura degli utensili. Soprattutto per quanto riguarda la lavorazione di leghe particolarmente resistenti (acciaio, acciaio temprato, leghe di Titanio, leghe di Nichel), la temperatura presente in prossimità del punto di contatto materiale-utensile aumenta notevolmente. Per far fronte a questo inconveniente, sono stati sviluppati metodi innovativi di lubrorefrigerazione per abbassare la temperatura durante la lavorazione.

Nell'industria manifatturiera, i fluidi convenzionali utilizzati per il processo di lavorazione non sono ecologici e risultano costosi, contribuendo a circa il 15% del costo totale del processo di lavorazione.

L'aumento dei volumi di produzione degli ultimi anni, e la crescita parallela della domanda di CLF (Cooling Lubricating Fluids), ha indotto un sempre più crescente numero di effetti ambientali negativi e una minaccia significativa per la salute degli operatori di macchina. Sono quindi necessari nuovi metodi per evitare o ridurre significativamente l'utilizzo dei CLF.

In questo capitolo saranno presentate lavorazioni ecologiche che propongono una maggiore sostenibilità, ambientale ma non solo, rispetto a quelle tradizionali. In particolare, saranno

analizzati metodi che sfruttano i fluidi da taglio in maniera innovativa, per raggiungere una maggiore sostenibilità del processo.

4.1 Fluidi da taglio

I fluidi da taglio sono stati introdotti nelle lavorazioni ad asportazione di materiale sia per diminuire l'attrito tra l'utensile e il pezzo (fluidi lubrificanti) che per ridurre la temperatura della zona di contatto (fluidi refrigeranti), favorendo così la lavorazione dal punto di vista energetico, della produttività, dell'usura dell'utensile e della qualità della superficie del pezzo lavorato. I fluidi che presentano entrambe le proprietà precedentemente esposte sono chiamati fluidi lubrorefrigeranti (CLF) [132].

L'utilizzo appropriato dei fluidi da taglio non deve solo migliorare le prestazioni della lavorazione, ma anche risultare come non tossico, non dannoso per la salute degli operatori, non a rischio di incendio, non fumoso e di facile smaltimento.

L'impiego dei fluidi da taglio non è però adeguatamente disciplinato: non esistono standard specifici per tutelare sia la salute dei lavoratori che prevenire potenziali danni ambientali derivanti da un uso sconsiderato di questi. Pertanto, le ricerche si sono concentrate per trovare soluzioni che riducano al minimo l'uso di fluidi da taglio (ad esempio lubrificazione a quantità minima, MQL) o che risultino più sostenibili di quelle attuali (oli vegetali).

I CLF sono costituiti da un fluido di base (ad esempio, olio minerale), acqua e additivi [132]. Gli additivi servono per aumentare le prestazioni: sono sostanze attive polari (ad esempio esteri sintetici o acidi grassi), additivi per pressioni estreme (ad esempio composti solforati o paraffina clorurata), additivi antiusura (ad esempio composti di fosforo) e altri additivi anticorrosivi e antiossidanti.

Generalmente, i fluidi da taglio vengono diluiti con acqua, in modo tale che circa il 95% del fluido da taglio, in volume, sia costituito da acqua. I fluidi da taglio biodegradabili come ad esempio l'olio di soia, l'olio di colza, l'olio di girasole, l'olio di cocco, l'olio di sesamo e l'olio di ricino sono utilizzati come lubrificanti ecologici alternativi ai fluidi da taglio a base minerale. Il graduale passaggio dagli oli minerali agli oli vegetali, ad alto contenuto oleico, come lubrificanti è stimolato dalle crescenti preoccupazioni ambientali ed economiche.

Il primo fluido da lavorazione in assoluto ad essere utilizzato è stata l'acqua, che ha portato a un miglioramento delle prestazioni, della formazione del truciolo e dell'usura dell'utensile.

Fondamentalmente l'acqua è stata utilizzata per facilitare le suddette caratteristiche attraverso enormi flussi che colpiscono le varie zone di taglio, con conseguente aumento della velocità di taglio del 30-40% rispetto alla lavorazione a secco. In seguito, è stato dimostrato che l'acqua, sebbene abbia un'eccellente capacità di raffreddamento, presenta tuttavia importanti inconvenienti di corrosione e di scarsa azione di lubrificazione, oltre che problemi di riciclo e scarsità della risorsa stessa.

I fluidi da taglio attualmente utilizzati sono classificati in oli da taglio, oli solubili, fluidi sintetici e fluidi semisintetici. I fluidi da taglio a base minerale hanno un prezzo abbastanza contenuto, ma l'applicazione è limitata a causa della scarsità della risorsa e della bassa biodegradabilità; inoltre, l'accessibilità alle riserve dipende fortemente da fattori politici. Occorre quindi una valida alternativa, rappresentata dagli oli a base vegetale e dagli oli con nanoparticelle, che mostrano in alcune applicazioni addirittura proprietà lubrificanti superiori rispetto all'olio convenzionale.

4.1.1 Lubrorefrigerazione convenzionale

Questa tecnica è normalmente utilizzata per gestire il problema dell'elevata temperatura di taglio, delle forze di taglio, dell'usura degli utensili e per garantire la qualità del prodotto [6]. In questa tecnica il fluido da taglio è fornito con una portata nell'ordine di 8-10 L/min. Presenta un'eccellente capacità di raffreddamento e lubrificazione, ma influenza negativamente l'equilibrio ecologico ed economico nell'attuale era dell'Industria 4.0. Perciò, molte nazioni hanno ormai vietato l'utilizzo di fluidi da taglio minerali per questa metodologia. Inoltre, i costi relativi al riciclo, all'attrezzatura per il filtraggio e allo smaltimento dei rifiuti hanno dissuaso l'adozione di questa strategia di raffreddamento.

Per di più per alcune lavorazioni, come quelle ad alta velocità, risulta controproducente quando si utilizzano fluidi da taglio a getto continuo in quanto questi non possono raggiungere efficacemente l'area più calda all'estremità dell'utensile da taglio; non è quindi possibile mantenere una temperatura uniforme sull'utensile da taglio, il che denota i limiti di questa tecnica di raffreddamento e lubrificazione.

4.1.2 Taglio a secco

Il processo di lavorazione senza l'utilizzo di fluido da taglio è definito come taglio a secco; solo gli utensili da taglio ad alte prestazioni consentono questo tipo di lavorazione. Questo metodo viene utilizzato per evitare l'uso di fluidi nocivi alla salute umana e allo stesso tempo per non provocare inquinamento di aria e acqua, riducendo inoltre i costi associati al fluido da taglio [42].

La lavorazione a secco è diventata l'opzione più sostenibile per la sua natura ecologica e per i rischi minimi per la salute; risulta però incapace di provvedere al raffreddamento e alle lavorazioni ottimali dei materiali più duri a velocità di taglio elevate. Può eliminare efficacemente i rischi per la salute come dermatiti, infezioni della pelle, malattie respiratorie e cancro, associati all'esposizione prolungata ai fluidi da taglio, e allo stesso tempo migliorare le prestazioni complessive delle operazioni di taglio.

Finora la lavorazione a secco è stata implementata con successo solo per alcuni materiali e operazioni di lavorazione (come fresatura e tornitura) a causa di alcune problematiche sorte dalla rimozione dei fluidi da taglio. La maggior parte delle lavorazioni a secco non forniscono accuratezza geometrica, proprietà superficiali, durata utensile, rimozione trucioli e velocità di produzione soddisfacenti. Questo tipo di lavorazione richiede quindi l'implementazione di approcci radicalmente nuovi.

La maggior parte dei problemi associati alla lavorazione a secco sono dovuti all'eccessivo aumento della temperatura nell'interfaccia utensile-pezzo e sul tagliente, fino a 1200°C. Infatti, l'energia richiesta per lavorare il materiale del pezzo e spostarlo sulla faccia del rastrello dell'utensile viene in gran parte convertita in calore. Parte di questo calore viene rimosso insieme al truciolo, ma una parte contribuisce al riscaldamento dell'utensile e del pezzo in lavorazione. A causa dell'alta temperatura così raggiunta, l'utensile perde la sua durezza: un tagliente dell'utensile relativamente morbido si deforma, diventa smussato e rischia di rompersi. Le alte temperature riscontrate nella lavorazione a secco influiscono anche sul pezzo: quando il pezzo si riscalda, perde la sua precisione dimensionale e l'integrità superficiale.

Anche il materiale di cui è composto il pezzo gioca un ruolo importante nel decidere se è possibile applicare o meno la lavorazione a secco. Mentre alcuni materiali di facile lavorabilità sono scelte naturali per il taglio a secco, alcuni materiali possono porre seri problemi se lavorati a secco. Inoltre, anche i processi di lavorazione devono essere valutati per la loro idoneità a questo tipo di lavorazione.

Di seguito sono presentati i principali problemi che limitano l'attuazione pratica della lavorazione a secco:

- 1) durata dell'utensile: senza i fluidi da taglio, aumenta la possibilità di compromettere la durata dell'utensile. Si è osservato che la temperatura vicino al bordo dell'utensile è molto più alta nella lavorazione a secco rispetto alla lavorazione assistita da fluidi da taglio. Le alte temperature sulla faccia dell'utensile causano l'ammorbidimento del tagliente dell'utensile poiché i materiali dell'utensile perdono rapidamente la loro durezza a temperature elevate. Quando la geometria del tagliente cambia, le forze di taglio aumentano e provocano un'ulteriore deformazione del tagliente. Ciò porta a crepe o scheggiature del tagliente, con conseguente rischio di rottura dell'utensile.

Un altro meccanismo attraverso il quale può avvenire l'usura accelerata dell'utensile è il processo di diffusione, in cui gli atomi del materiale dell'utensile si diffondono fisicamente dall'utensile e vengono portati via insieme ai trucioli. Il meccanismo di diffusione è la causa principale della craterizzazione accelerata, che porta a guasti prematuri dell'utensile. Anche l'interazione chimica tra utensile e truciolo è accelerata con l'aumento della temperatura, il che aggrava ulteriormente la craterizzazione dell'utensile. Nelle situazioni di taglio in cui l'abrasione è il meccanismo predominante di usura dell'utensile, si osserva ancora che l'usura dovuta all'abrasione si aggrava a temperature più elevate, in quanto l'utensile perde la sua durezza.

- 2) precisione geometrica della lavorazione: la precisione geometrica del componente lavorato è spesso difficile da raggiungere a causa del calore che viene assorbito e trattenuto dal materiale del pezzo da lavorare. Il calore trattenuto provoca riscaldamento e deformazioni termiche nelle parti lavorate. Quando il componente si raffredda dopo la lavorazione, può sviluppare errori geometrici e di forma. La temperatura ambientale può anche variare di ora in ora durante il giorno, rendendo difficile qualsiasi tentativo di compensazione dell'errore da parte della macchina.

Durante la lavorazione, la zona vicino all'area di taglio può riscaldarsi ed espandersi, mentre il resto del pezzo può trovarsi a una temperatura molto diversa causando gravi deformazioni localizzate e perdita di forma geometrica e precisione.

- 3) integrità della superficie del pezzo: un altro grosso problema con la lavorazione a secco è che il processo spesso porta a un significativo deterioramento delle proprietà superficiali delle parti lavorate. L'eccessivo calore accumulato durante la lavorazione a secco aumenta la temperatura dello strato superficiale a un livello tale per cui si verifica la trasformazione di fase e l'alterazione della microstruttura. La lavorazione a secco può

anche comportare lo sviluppo di sollecitazioni residue negli strati superiori del componente lavorato, che tendono ad avere un impatto negativo sulla resistenza alla fatica e alla corrosione del componente lavorato.

- 4) lavorabilità dei materiali: i metalli più comunemente usati nelle applicazioni ingegneristiche includono acciai a basso e medio tenore di carbonio, acciaio inossidabile austenitico, ghisa, leghe di nichel e titanio, leghe di magnesio, leghe di rame, leghe di alluminio e compositi. Alcuni di questi metalli e leghe (come acciaio inossidabile austenitico, leghe di nichel e titanio, ecc.) presentano notevoli difficoltà nella lavorazione senza l'ausilio dei fluidi da taglio. Il problema sorge principalmente a causa dell'eccessiva generazione di calore e delle alte temperature dell'interfaccia durante la lavorazione a secco, che portano a guasti prematuri dell'utensile.

Nel taglio a secco, le leghe ferrose a basso tenore di carbonio tendono a aderire al tagliente dell'utensile e alla superficie del rastrello, causando la formazione di taglienti di riporto, danni alla superficie del pezzo, vibrazioni, forze di taglio elevate, danni all'utensile, aumento dell'attrito e un ulteriore aumento della temperatura. Ad esempio, l'acciaio inossidabile austenitico risulta difficile da tagliare a causa della sua elevata resistenza e tenacità alla frattura. Inoltre, l'acciaio inossidabile viene incrudito durante la lavorazione e forma trucioli segmentati o dentellati. L'elevata generazione di calore unita alla bassa conduttività termica determina una scarsa dissipazione del calore generato nella lavorazione a secco. L'elevata temperatura dell'utensile provoca quindi un guasto prematuro dell'utensile.

Le leghe di nichel e le leghe di titanio risultano anch'esse difficili da lavorare, presentando una notevole resistenza allo scorrimento e alla corrosione, incrudimento e mantengono la loro resistenza a temperature elevate. L'elevata resistenza a caldo insieme alla bassa conduttività termica sono la causa principale delle temperature molto elevate sul tagliente dell'utensile durante la lavorazione, che portano all'ammorbidimento termico e alla successiva deformazione del tagliente e al guasto dell'utensile.

Inoltre, i trucioli come quelli di magnesio possono facilmente infiammarsi, ponendo un serio rischio per la sicurezza sull'ambiente di lavoro.

- 5) processi di lavorazione: le operazioni di lavorazione come la foratura, l'alesatura, la fresatura, la scanalatura e la troncatura rappresentano una sfida difficile per la lavorazione a secco. Il problema chiave è l'efficace rimozione del truciolo, che diventa difficile nelle suddette lavorazioni meccaniche. La lavorazione a secco porta a un

aumento della temperatura di taglio, che rende i trucioli più morbidi e duttili. Questi trucioli aderiscono al pezzo e alle superfici dell'utensile causando scheggiature dell'utensile, aggrovigliamento dei trucioli e danni alla superficie del pezzo.

- 6) produttività: l'alta temperatura è associata ad un'elevata velocità di taglio; quindi, la riduzione della velocità di taglio può ridurre la temperatura, compromettendo però la produttività.

I ricercatori hanno provato diversi approcci per superare alcuni dei problemi sopra menzionati associati alla lavorazione a secco. Poiché la lavorazione a secco, tuttavia, non ha dato risultati soddisfacenti in termini di precisione geometrica dei componenti, proprietà superficiali, vita utensile, rimozione truciolo e velocità di produzione, vengono proposti i seguenti accorgimenti:

- 1) materiali per gli utensili: il requisito principale di un utensile adatto per la lavorazione a secco è la capacità di mantenere la durezza ad alta temperatura e di resistere a sollecitazioni elevate. I materiali per utensili più ampiamente utilizzati per questo tipo di lavorazione sono i carburi di tungsteno, titanio e tantalio; cermet a base di carbonitruro di titanio; ceramica; nitruro di boro cubico; diamante.

Gli utensili da taglio in carburo mostrano un'elevata durezza a caldo e una ragionevole resistenza alla trazione, che consente la riduzione delle forze di taglio e del consumo energetico.

Gli utensili in ceramica possono resistere a temperature più elevate e mantenere l'affilatura del tagliente per una durata maggiore; sono ideali per le temperature elevate raggiunte nella lavorazione a secco ad alta velocità.

Il nitruro di boro cubico (CBN) è uno dei materiali per utensili da taglio più duri disponibili, dopo il diamante. Il CBN è relativamente più duro dei carburi cementati, dei cermet e delle ceramiche. Un'altra straordinaria proprietà del CBN è la sua inerzia chimica anche alle alte temperature, che unita a una durezza a caldo molto elevata, lo rende altamente resistente all'usura. Pertanto, gli utensili in CBN sono spesso impiegati nella lavorazione ad alta velocità di ghisa e acciai temprati, che sono molto duri.

Il diamante è invece il materiale più duro conosciuto ed è un interessante materiale candidato per gli utensili per applicazioni impegnative di lavorazione a secco. Gli utensili diamantati possiedono un'elevata conduttività termica e un'altissima resistenza all'usura abrasiva. Tuttavia, gli utensili diamantati non sono adatti per taglio ad alta temperatura di materiali ferrosi a causa della nota affinità del carbonio per la diffusione nell'acciaio.

2) rivestimenti per utensili: i rivestimenti hanno un impatto multidimensionale sulla lavorazione a secco. Aiutano a ridurre l'attrito nell'interfaccia utensile-pezzo compensando gli effetti lubrificanti degli oli da taglio. I rivestimenti sono realizzati con materiali duri come nitruro di titanio, carbonitruro di titanio, nitruro di cromo, CBN e diamante, che riducono ulteriormente la progressione dell'usura dell'utensile che si verifica tramite abrasione, mentre alcuni materiali di rivestimento sono formulati principalmente per inibire l'usura per craterizzazione. I rivestimenti a bassa conduttività termica fungono da barriere termiche, riducendo i carichi termici sul materiale dell'utensile. I progressi nella tecnologia dei rivestimenti degli utensili da taglio hanno notevolmente migliorato le capacità del processo di taglio a secco. I rivestimenti vengono generalmente applicati agli utensili da taglio mediante metodi di deposizione chimica da vapore (CVD) o fisica da fase vapore (PVD).

Il primo tipo di rivestimento è quello multistrato, costituito da più strati di materiale. Strati multipli e sottili aiutano nella distribuzione delle sollecitazioni in modo da evitare la frattura dello strato di rivestimento. La tecnologia di rivestimento oggi è ben sviluppata e possono essere forniti strati sottili come pochi nanometri. Poiché lo spessore del singolo strato è ridotto a livelli nanometrici, è possibile fornire virtualmente centinaia di rivestimenti in qualsiasi combinazione di materiali duri, tenaci, termicamente isolanti o conduttivi e lubrificanti solidi entro uno spessore complessivo di 2 e 5 mm. Aumentare ulteriormente lo spessore del rivestimento potrebbe influenzare l'affilatura del tagliente, sono quindi preferiti più strati di rivestimenti ma molto sottili. Il nano rivestimento degli strumenti ha suscitato il massimo interesse nei ricercatori poiché i rivestimenti multistrato combinano durezza, tenacità e proprietà lubrificanti di molti materiali diversi.

Ci sono poi i rivestimenti autolubrificanti. Molti materiali presentano proprietà autolubrificanti, come il solfuro di molibdeno e il carburo di tungsteno. L'applicazione di questi materiali nei rivestimenti può ridurre la temperatura e diminuire l'attrito.

L'ultima analisi riguarda i rivestimenti in nitruro di boro cubico e i rivestimenti diamantati. Il CBN, ampiamente utilizzato per la lavorazione di ghisa e acciai, è stato sviluppato anche sotto forma di rivestimento. Il rivestimento in CBN si forma su substrati in carburo cementato mediante un processo di deposizione fisica da vapore. Questi rivestimenti sono esenti dalle limitazioni tradizionali degli inserti in CBN. Gli inserti rivestiti con CBN godono del benefit di angoli di spoglia positivi, della flessibilità delle forme e taglienti affilati senza smussi o raggi di levigatura del tagliente. Per quanto

riguarda invece il rivestimento diamantato, essendo il materiale più duro, dovrebbe essere il rivestimento più adatto per la lavorazione a secco di materiali diversi come leghe di metalli non ferrosi, compositi e materiali plastici rinforzati.

- 3) modifiche alla geometria dell'utensile: la geometria del tagliente dell'utensile gioca un ruolo fondamentale nel successo della lavorazione a secco. Per ottenere una maggiore durata dell'utensile, le sollecitazioni in quest'ultimo dovrebbero essere mantenute basse. Ciò può essere ottenuto fornendo un elevato angolo di spoglia, mantenendo il tagliente molto affilato. Nella lavorazione a secco, normalmente la temperatura dell'utensile è elevata, il che aiuta ad aumentare la tenacità; è quindi improbabile che la scheggiatura dell'utensile sia la causa principale del guasto dell'utensile. Pertanto, è possibile utilizzare angoli di spoglia elevati, angoli di cuneo piccoli e taglienti affilati.
- 4) lavorazione assistita o lavorazione ibrida: oltre ai processi di lavorazione convenzionali, un concetto relativamente recente di lavorazione assistita ha suscitato grande interesse tra i ricercatori. Nella lavorazione assistita, le prestazioni del processo di lavorazione convenzionale sono ulteriormente migliorate da alcuni sistemi esterni.

Il primo è la lavorazione assistita da vibrazioni. Nella lavorazione assistita da vibrazione o modulazione, l'azione di taglio è aiutata fornendo vibrazioni ultrasoniche ad alta frequenza sulla punta dell'utensile o sul pezzo in lavorazione. Questo aiuta a rompere il contatto tra l'utensile e la parte lavorata e l'adesione del truciolo all'utensile. Di conseguenza si producono trucioli più sottili o discontinui, si riducono le forze di taglio, la superficie di finitura e la durata dell'utensile sono migliorate. Questa tecnologia è stata inizialmente utilizzata per la lavorazione di materiali duri e fragili, ma ora si è evoluta ulteriormente per coprire altre applicazioni di lavorazione.

L'altra lavorazione è quella assistita da laser e plasma. La lavorazione di materiali come acciai temprati e ceramiche può essere eseguita efficacemente con l'ausilio di una fonte esterna di calore, che riscalda e rende il materiale morbido appena si avvicina al tagliente. Ciò si ottiene con l'ausilio di un raggio laser o plasma puntato verso il materiale che sta per essere tagliato. Il raggio laser eleva la temperatura localizzata nella zona di taglio, rendendo il materiale circostante morbido e duttile, migliorando la lavorabilità.

Nella Tabella 4.1 viene presentata un'analisi della lavorazione a secco.

Effetto	Prestazioni	Energia	Costi	Ambiente
Positivo	truciolo pulito nessun uso di fluidi da taglio (meno apparecchiature macchina)	nessun consumo energetico da parte dei sistemi lubrorefrigeranti	nessun costo per i fluidi da taglio nessun costo per i sistemi lubrorefrigeranti	truciolo più facilmente riciclabile nessun uso dei liquidi lubrorefrigeranti
Negativo	necessario un utensile ad alte prestazioni alte temperature elevata usura dell'utensile scarsa finitura superficiale	alto consumo energetico dovuto all'elevato attrito	aumento dei costi per la lavorazione dei materiali più duri	ambiente di lavoro con elevate temperature emissione di microparticelle

Tabella 4.1 Effetti della lavorazione a secco (adattata da [34])

4.1.3 MQL

La lubrificazione a quantità minimale MQL (Minimum Quantity Lubrication) nasce per superare i limiti delle lavorazioni a secco e convenzionali in modo da mantenere l'equilibrio ecologico ed economico e raggiungere una maggiore sostenibilità del processo.

Nel processo di lavorazione MQL, il fluido vettore è l'aria. Quest'ultima ha però un potere di raffreddamento inferiore rispetto ad altre emulsioni, dando quindi scarsi risultati. Per compensare questo fatto, all'aria viene miscelata una piccola quantità di oli puri, riducendo così l'attrito e mantenendo la temperatura di taglio entro l'intervallo desiderato.

Fin dalla loro introduzione, l'implementazione dei sistemi MQL in molti processi di lavorazione ha avuto successo utilizzando diversi tipi di fluido da taglio [93]. In generale, questi ultimi sono applicati sotto forma di olio puro o emulsione oleosa in acqua con gradi di concentrazione variabili per raffreddare e lubrificare la zona di lavorazione. Alcuni requisiti importanti per un fluido da taglio per la lavorazione MQL sono la biodegradabilità, l'alta stabilità chimica e l'elevato effetto lubrificante in modo da poter soddisfare le esigenze di una lavorazione sostenibile e a basso consumo di olio. Gli oli vegetali e gli esteri sintetici sono i più utilizzati per la loro eccellente biodegradabilità. Alcuni dei vantaggi della lavorazione con olio vegetale, rispetto alla lavorazione con fluidi da metallo classici, sono maggiori prestazioni

quando sotto pressione, aumento dei tassi di rimozione del metallo, meno perdite da evaporazione e nebulizzazione. Allo stesso modo, si osserva che gli esteri sintetici presentano proprietà simili agli oli a base vegetale a causa della loro elevata temperatura di ebollizione, alto punto di infiammabilità e bassa viscosità. Sia l'olio vegetale che l'estere sintetico sono i sostituti migliori agli altri tipi di fluido da taglio, come ad esempio l'olio minerale, e grazie alla loro atossicità e biodegradabilità rendono la lavorazione MQL un'opzione più rispettosa dell'ambiente e della salute.

4.1.3.1 Sistemi di alimentazione MQL

Un sistema MQL comprende solitamente cinque parti principali: compressore d'aria, serbatoio per il fluido da taglio, tubi, sistema di controllo del flusso e ugello di spruzzatura [96]. Generalmente, per erogare il fluido si utilizza una tecnica di nebulizzazione e spruzzatura di una miscela di olio e aria pressurizzata a un flusso inferiore a 1000 mL/h (con un consumo di olio inferiore a 50 mL/h), spruzzando la miscela direttamente sulla zona di taglio. Rispetto alla tecnica convenzionale, questi sistemi utilizzano un volume di fluido da taglio circa 10.000 volte inferiore.

In termini di sistema di erogazione, un sistema MQL può essere classificato nell'applicazione esterna e nell'applicazione interna. L'applicazione esterna funziona erogando una miscela di olio e aria in pressione o compressa da una camera attraverso un ugello esterno. È il sistema tipicamente utilizzato per processi di lavorazione come tornitura e fresatura.

Esistono due metodi per l'applicazione MQL esterna, attraverso:

- un ugello eiettore: questo metodo fornisce separatamente olio e aria compressa a un eiettore, e solo allora avviene la miscelazione.
- un ugello convenzionale: questo metodo miscela olio e aria compressa in un atomizzatore esterno, fornendo quindi l'aerosol all'ugello.

Di seguito sono mostrati i vantaggi e gli svantaggi del sistema di alimentazione esterno [122].

Vantaggi:

- adattamento semplice;
- bassi costi;
- minimo lavoro richiesto per ammodernare le macchine utensili convenzionali;
- caratteristiche di risposta rapida;

- non sono necessari particolari unità ausiliarie.

Svantaggi:

- possibilità di regolazione limitate per gli ugelli a causa delle diverse lunghezze e dei diversi diametri degli utensili;
- possibili effetti di uniformità del getto durante la lavorazione.

Al contrario, l'applicazione interna funziona fornendo il fluido da taglio attraverso il mandrino. Si applica meglio per processi di lavorazione come foratura, alesatura, maschiatura. Allo stesso modo, questa applicazione ha due possibili metodi per fornire il fluido da taglio, attraverso:

- monocanale: questo metodo miscela olio e aria compressa prima di fornire la miscela attraverso l'utensile da taglio.
- doppio canale: questo metodo fornisce separatamente olio e aria in pressione attraverso diversi canali e li miscela solo prima del portautensile da taglio.

Di seguito sono mostrati i vantaggi e gli svantaggi del sistema di alimentazione interno [122].

Vantaggi:

- lubrificazione ottimale nel punto di taglio (per ogni utensile, anche per punti inaccessibili);
- dispersioni minime;
- quantità di lubrificante ottimizzata per ogni utensile.

Svantaggi:

- sono richieste particolari unità ausiliarie;
- costi elevati;
- è richiesta l'idoneità della macchina.

4.1.3 .2 Prestazioni delle lavorazioni MQL

Questa sottosezione esamina brevemente le prestazioni della lavorazione MQL analizzando tre grandezze fisiche: la rugosità superficiale, la forza di taglio e l'usura dell'utensile.

In termini di qualità della superficie, la tornitura delle leghe [114] risulta migliore rispetto all'ambiente secco, e la rettifica delle ceramiche risulta migliore rispetto ad altri tipi di lavorazione. Si può quindi concludere che la lavorazione MQL può aumentare le prestazioni producendo una qualità superficiale ancora più elevata rispetto all'olio sintetico. Inoltre, la

superficie finitura è strettamente correlata alla temperatura di taglio ed è stato riscontrato che MQL riduce con successo la temperatura di taglio fino al 50%, migliorando così la superficie finitura.

L'utilizzo del sistema MQL su acciai duri genera anche una rugosità e una qualità della superficie superiori rispetto alla tecnica convenzionale.

Allo stesso modo, il sistema MQL ha effetti positivi anche in termini di forza di taglio, riducendone tutte le componenti per basse velocità di taglio [122].

Tra i problemi nella lavorazione di materiali difficili da lavorare c'è la rapida usura degli utensili. In generale, emergono tre tipi di usura dell'utensile: sul fianco, ad intaglio situata alla profondità della linea di taglio e sulla superficie di scorrimento del truciolo. L'usura dell'utensile si verifica perchè l'elevata temperatura generata durante il processo di lavorazione provoca un ammorbidimento termico; quindi, quando vengono sottoposte elevate sollecitazioni di compressione sulla punta dell'utensile da taglio, ciò porta ulteriormente alla sua deformazione plastica. La lavorazione MQL si è dimostrata quindi vantaggiosa nella riduzione dell'usura degli utensili.

Oltre alla rugosità superficiale, alla forza di taglio e all'usura dell'utensile, anche i trucioli prodotti durante i processi di lavorazione sono risultati migliori nella lubrorefrigerazione MQL rispetto ad altri ambienti, generando un truciolo più fine e più asciutto. Questo rende il processo di riciclo del truciolo molto più semplice poichè non risulta necessario asciugare preventivamente i trucioli.

Il sistema MQL ha inoltre dimostrato di fornire una migliore penetrabilità del fluido da taglio nella zona di taglio rispetto ad altre tecniche di raffreddamento/lubrificazione, che si traduce in una rugosità superficiale e una forza di taglio inferiori con scarti minimi.

Infine, la durata dell'utensile può essere prolungata fino a circa l'88,4% in condizioni MQL rispetto allo stato asciutto, mantenendo un'elevata finitura superficiale. Ciò significa che il sistema MQL può essere implementato dove il processo di lavorazione a secco è problematico da realizzare.

4.1.3.3 MQL con oli vegetali

Un ulteriore miglioramento nella sostenibilità dei processi ad asportazione di materiale può essere compiuto applicando alla tecnica MQL gli oli di origine vegetale.

L'olio vegetale come base MQL ha buoni effetti lubrificanti, bassa volatilità, bassa tossicità, alto tasso di biodegradazione e alto tasso di riciclo. L'olio vegetale può ridurre il consumo energetico dei processi, la diffusione ambientale e i costi di produzione oltre che essere altamente riciclabile, che sono attualmente i criteri di selezione per gli oli base per la lavorazione dei metalli rispettando l'ambiente.

I sette oli vegetali più applicati nelle lavorazioni ad asportazione di materiale sono soia, arachidi, mais, colza, palma, ricino e girasole. Nella considerazione globale dei parametri di valutazione delle proprietà di lubrificazione, l'olio di ricino ha la migliore proprietà di lubrificazione, seguito dall'olio di palma. Inoltre, l'olio di arachidi, girasole, soia e colza manifestano anche eccellenti proprietà lubrificanti. Tuttavia, le proprietà lubrificanti dell'olio di mais non sono ideali. La ragione di questa tendenza sono i vari fattori di influenza delle proprietà di lubrificazione, come i diversi ingredienti dell'olio vegetale, la struttura molecolare, la viscosità, la densità e il punto di infiammabilità.

Uno studio effettuato da Li et al. [159] confronta l'olio di paraffina con i sette oli vegetali nella lavorazione MQL. Le conclusioni sono le seguenti:

- Rispetto alla lubrificazione convenzionale, l'olio vegetale raggiunge un coefficiente di attrito inferiore e manifesta buone proprietà di lubrificazione. Inoltre, l'olio di ricino e di palma hanno un coefficiente di attrito inferiore e un'energia specifica di macinazione in condizioni di lavoro MQL.

Analizzando in modo completo i componenti, la struttura molecolare e la viscosità degli oli vegetali, i sette oli vegetali possono essere classificati in termini di proprietà lubrificanti come segue: olio di mais < olio di colza < olio di soia < olio di girasole < olio di arachidi < olio di palma < olio di ricino.

- La qualità della superficie è migliore nella lavorazione con oli vegetali. In particolare, l'olio di ricino consente di ottenere la migliore morfologia superficiale e un valore minimo di rugosità. La lavorazione MQL con olio vegetale produce un attrito inferiore e un'energia di lavorazione specifica minore rispetto ad altre condizioni di lubrificazione. Di conseguenza, i pezzi lavorati presenteranno una migliore rugosità superficiale.
- Sulla base dei risultati sperimentali, l'olio vegetale come base MQL ha proprietà lubrificanti migliori rispetto all'olio minerale e alla lubrificazione a flusso continuo. Questo risultato è dovuto agli acidi oleici presenti negli oli vegetali, che hanno un'elevata energia di legame, un basso coefficiente di attrito e quindi migliori proprietà lubrificanti.

Ancora oggi, gli oli minerali e sintetici dominano il mercato dei fluidi da taglio per metalli. Tuttavia, le preoccupazioni ambientali per l'utilizzo di questi fluidi e le ultime leggi di tutela ambientale hanno rivolto l'attenzione verso fluidi da taglio biocompatibili. Le emissioni di anidride carbonica, protossido di azoto e metano sono inferiori quando sono usati gli oli vegetali al posto degli oli minerali.

Gli oli vegetali (oli naturali) sono fluidi da taglio biocompatibili che possiedono tutte le qualità concorrenti per sostituire i fluidi da taglio minerali, con la certezza di fornire una produzione più pulita e sostenibile. Gli oli vegetali hanno registrato inoltre proprietà di biodegradabilità superiori rispetto agli oli minerali, fino al 100%. L'esempio migliore è l'olio di colza, attraverso il quale è possibile una biodegradazione completa.

Gli oli di ricino si sono rivelati i migliori fluidi da taglio per la tornitura di acciaio inossidabile temprato. Per quanto riguarda la durata dell'utensile, gli oli di ricino prolungano notevolmente la durata degli utensili. Questi oli hanno anche un buon coefficiente di attrito. Tuttavia, gli oli di ricino evaporano rapidamente se applicati in MQL durante le operazioni ad alta velocità. Le proprietà fisico-chimiche degli oli possono essere migliorate attraverso l'inclusione di nanoparticelle.

Gli oli di girasole e di palma assistono le lavorazioni con la minima forza di spinta; gli oli di girasole e soia sono invece noti per garantire una finitura superficiale superiore.

In genere gli oli vegetali possiedono un punto di infiammabilità elevato, segno positivo verso applicazioni di lavorazione anche superiori agli oli minerali. Questa qualità apre una finestra anche per le applicazioni di lavorazione di materiali duri. Una lubrificazione stabile è possibile grazie all'elevato indice di viscosità degli oli vegetali. Questa stabilità contrasta in parte l'incremento della temperatura durante la lavorazione.

Gli oli vegetali stanno però incontrando problemi a causa della scarsa efficacia in termini di costi. Questo ostacolo economico potrà essere risolto quando gli oli vegetali saranno impiegati su larga scala come fluidi da taglio nelle industrie manifatturiere.

Anche le nanotecnologie possono contribuire nel campo degli oli vegetali per una produzione più sostenibile. Gli impatti dei nuovi oli vegetali sulle proprietà tribologiche e sui parametri di processo devono essere ulteriormente esplorati per l'applicazione di massa.

Nella Tabella 4.2 viene presentata un'analisi della lavorazione con bio-oli:

Effetto	Prestazioni	Energia	Costi	Ambiente
Positivo	aumento durata utensile buona finitura superficiale	riduzione energia specifica di taglio riduzione delle temperature	produttività migliorata	riduzione utilizzo materiali fossili riciclo oli
Negativo	separazione olio dal truciolo	consumi per la produzione dei bio-oli sistemi per distribuire i bio-oli	riciclo oli i bio-oli costano più degli oli convenzionali costi degli additivi	separazione olio dal truciolo problemi di inalazione

Tabella 4.2 Analisi della lavorazione con bio-oli (adattata da [34])

Per un'analisi dettagliata degli oli vegetali, il lettore può fare riferimento all'Appendice 3.

4.1.3.4 Limiti e future direzioni

La lavorazione MQL è una soluzione promettente in quanto capace di generare una migliore qualità superficiale, riducendo la forza di taglio e allungare la durata dell'utensile da taglio. Tuttavia, ci sono ancora limitazioni alle capacità di questo metodo, e la presente sottosezione riassumerà le sfide che derivano dalla lavorazione MQL osservate da diversi ricercatori:

- 1) raffreddamento: il sistema MQL non consente un raffreddamento significativo ma solo elevata lubrificazione; quindi, il processo di lavorazione non si stabilizza termicamente. Questo perché le goccioline generate non assorbono completamente il calore e lo portano via per convezione dell'aria. Il calore accumulato potrebbe causare la rottura prematura dell'utensile, l'evaporazione delle goccioline e la distorsione delle parti lavorate.
- 2) materiali difficili da lavorare: le conoscenze sulla tecnica MQL di materiali difficili da lavorare (leghe di titanio, leghe a base di nichel, rivestimenti spruzzati termicamente) sono limitate. Non si conosce quindi la reale efficacia della tecnica MQL per la lavorazione di questi materiali.
- 3) truciolo: può verificarsi intasamento da truciolo soprattutto in processi come foratura profonda, tornitura e fresatura perché i trucioli non possono essere lavati via dalla zona

di taglio. I trucioli ostruenti trasportano con loro una grande quantità di calore, potrebbero quindi rovinare il pezzo lavorato e danneggiare l'utensile da taglio.

- 4) parametri ottimali: bisogna approfondire gli studi sulle condizioni operative ottimali della tecnica MQL come pressione, portata, rapporto di umidità aria-olio, design dell'ugello, distanza di sicurezza, angolo dell'ugello, numero di ugelli insieme a parametri di lavorazione (come pezzo e materiale dell'utensile da taglio per diversi processi di lavorazione) per garantire un funzionamento efficiente.
- 5) lavorazioni ad elevato tasso di asportazione di materiale: l'elevata velocità di taglio limita le capacità della lavorazione MQL perché può causare un aumento della forza di taglio oltre che difficoltà per il fluido da taglio a raggiungere l'area dell'utensile.
- 6) processo: la tecnica MQL nella fresatura e nella foratura ha effetti di raffreddamento poco efficaci poiché i fluidi da taglio non sono in grado di penetrare nell'area dell'utensile di lavoro con un sistema MQL esterno.
- 7) HP-MQSL (High Pressure Minimum Quantity Solid Lubricant): è stata proposta una nuova tecnica di lubrificazione solida ad alta pressione, che migliorerebbe sia i parametri di lavorazione che la rottura del truciolo.
- 8) simulazione numerica: si evidenzia la mancanza di un modello numerico per il sistema MQL per analizzare la penetrazione del flusso e il comportamento della goccia, in quanto vi sono affermazioni contraddittorie su una dimensione ottimale della goccia per fornire olio in una piccola area e superare le problematiche, tra cui deposito, penetrazione, adesione al pezzo, flusso costante e spruzzo uniforme.
- 9) costi: i costi per passare alla lavorazione MQL risultano elevati a causa dei costi di acquisto dell'impianto, implementazione e manutenzione.
- 10) salute: la nebbia generata durante la lavorazione MQL risulta dannosa per la salute dei lavoratori. Inoltre, le nanoparticelle possono essere facilmente assorbite nel corpo umano attraverso il contatto con la pelle; quindi, il loro uso può essere molto pericoloso. Possono causare danni agli organi, avvelenamento, problemi respiratori e persino il cancro.

Come osservato nei punti precedenti, si può concludere che quattro grandi limitazioni della lavorazione MQL ricadono in quattro aree principali: scarse capacità di raffreddamento, limitazioni della lavorazione di materiale da lavorare, asportazione di truciolo inefficiente e mancanza di studi sull'ottimizzazione dei parametri di lavorazione. Pertanto, bisognerà ovviare a queste limitazioni mediante studi che vertano sulla riduzione nella generazione di calore,

sull'ampliamento delle opzioni di materiale lavorabile, sull'eliminazione dei trucioli e sull'individuazione dei parametri di lavorazione MQL ottimali.

Nella Tabella 4.3 e nella Tabella 4.4 vengono rappresentate rispettivamente un'analisi lavorazioni MQL e un confronto tra lubrificazione a getto continuo, MQL e lavorazione a secco.

Effetto	Prestazioni	Energia	Costi	Ambiente
Positivo	riduzione liquido lubrificante aumento durata utensile buona finitura superficiale	ottimizzazione del consumo energetico del sistema lubrificante non sono richiesti sistemi con pompe	riduzione dei costi dei fluidi	riduzione emissioni di CO ₂ riduzione dei consumi di acqua, fluidi ed elettricità
Negativo	rimozione truciolo non ottimale rottura del truciolo guasti sistema MQL	il sistema MQL consuma comunque energia	aumento dei costi per la manutenzione del sistema MQL	rischio inalazione particelle nebulizzate

Tabella 4.3 Analisi della lavorazione MQL (adattata da [34])

Parametro	Getto continuo	MQL	Secco
Fluido impiegato	elevato	poco	-
Pressione	pompe per alta pressione	richiesta poca pressione	-
Ricircolo fluido	si	no	-
Truciolo	bagnato	quasi secco	secco
Rischio corrosione	alto	basso	-
Problemi ambientali	acqua, suolo, aria	aria	pochi
Smaltimento rifiuti	problemi durante lo smaltimento del lubrificante e dei trucioli	no	-
Acqua impiegata	elevata	minima	-
Lavorazione	buona	buona	limitata
Qualità prodotto	buona	buona	limitata
Durata utensile	buona	buona	limitata
Tecnologia	vecchia	recente	abbastanza recente
Potenza richiesta	elevata	media	elevata
Costi	alti	medi	alti

Tabella 4.4 Confronto tra diverse lavorazioni (adattata da [41])

4.1.4 Nanofluidi

I nanofluidi sono stati introdotti nelle lavorazioni ad asportazione di materiale verso la metà del 1990, con obiettivi di aspetto non solo ambientale (per ridurre l'utilizzo dei fluidi da taglio), ma anche economico, di miglioramento delle prestazioni e della salute. Si è inoltre scoperto che l'uso simultaneo di diverse nanoparticelle in un fluido ospite come l'acqua o altri fluidi convenzionali possa migliorare il processo e la qualità del prodotto [5].

I nanofluidi sono fluidi contenenti particelle di dimensioni nanometriche (10^{-9} m) chiamate appunto nanoparticelle. Le nanoparticelle utilizzate nei nanofluidi sono in genere costituite da metalli, ossidi, carburi o nano tubi di carbonio.

Un nanofluido si ottiene dalla dispersione di nano fibre o nanoparticelle metalliche e/o non metalliche (additivi nanometrici) in un liquido (fluido di base) [106].

I nanofluidi sono principalmente adottati come lubrificanti grazie alle loro marcate caratteristiche tribologiche. Di seguito vengono presentati i quattro meccanismi di riduzione

dell'attrito e dell'usura tramite l'aggiunta di nanoparticelle nei liquidi da taglio convenzionali [90]:

- le nanoparticelle sferiche agiscono in modo simile ai rulli tra due superfici e convertono l'attrito radente in una miscela di rotolamento e scorrimento;
- le nanoparticelle hanno la tendenza ad interagire con le coppie di attrito per formare uno strato protettivo superficiale;
- le nanoparticelle si depositano sulla superficie di contatto e sviluppano un tribofilm fisico, che rimedia alla perdita di massa;
- intensità delle sollecitazioni di compressione dovute alla forte diminuzione della pressione di interazione con le nanoparticelle che sopportano le forze di compressione.

I nanofluidi creano le condizioni idonee per il taglio di metalli e leghe migliorando l'efficienza di raffreddamento e riducendo significativamente le forze di taglio, la rugosità superficiale e l'usura degli utensili. Presentano proprietà fisiche e chimiche, che migliorano la lavorazione, come maggiore conduttività termica, migliore lubricità, bagnabilità, bassa viscosità, stabilità chimica e basso attrito. Inoltre, le proprietà dei nanofluidi variano a seconda di eventuali additivi, della temperatura, della conduttività termica delle nanoparticelle e del pH del fluido di base.

I lavori dei ricercatori hanno dimostrato che le proprietà termofisiche come la conduttività termica e la viscosità, e quindi la stabilità dei nanofluidi, influenzano notevolmente l'inclusione di nanoparticelle nei fluidi di base. È stato osservato che più a lungo le nanoparticelle galleggiano nel fluido di base, maggiori sono le proprietà termodinamiche del nanofluido.

L'aggiunta di nanoparticelle solide riduce il coefficiente di attrito nell'interfaccia utensile-pezzo, sviluppando inoltre un meccanismo che impedisce l'usura causata dall'attrito, aumentando la durata di diversi strumenti di lavorazione.

Dato il loro vasto campo di impiego, i nanofluidi possono anche essere utilizzati per migliorare l'efficienza dei processi assistiti da MQL, durante i quali possono venire aggiunte nanoparticelle nel fluido di base. In molti studi pubblicati, la tecnica MQL assistita da nanofluidi ha mostrato risultati migliori rispetto al MQL convenzionale.

La lubrificazione a nanofluidi basata su MQL ha chiaramente dimostrato un'ulteriore diminuzione del consumo di fluido da taglio, nonché l'energia di taglio o la potenza di taglio migliorando la qualità della superficie, questa tecnica è stata stabilita come una produzione ecologica rispettosa dell'ambiente [120] [124].

Negli ultimi anni si è notata una tendenza generale a prediligere nanofluidi con olio di origine vegetale, data la comparabilità delle prestazioni rispetto agli oli minerali. Inoltre, la tossicità dei nanofluidi dipende dalle loro proprietà fisiche, come il materiale di base, le dimensioni, la distribuzione, la forma, la specifica area di superficie, lo stato di agglomerazione e la morfologia superficiale.

Non esistendo ancora regole sistematiche che regolino le caratteristiche tossicologiche di tutti i nanofluidi disponibili, ecco il perché della propensione all'impiego di oli di origine vegetale. Recentemente sono state effettuate ricerche sui nanofluidi ibridi, ottenuti disperdendo nanoparticelle di due o più oli. Le nanoparticelle, disperse sia in miscela che in forma composta, manifestano un effetto sinergico che migliora le prestazioni della lavorazione. Tuttavia, la selezione della coppia di nanoparticelle (tipo, forma e dimensione) deve essere progettata correttamente per ottenere i risultati desiderati e per migliori prestazioni di trasferimento del calore.

4.2 Raffreddamento criogenico

Il raffreddamento criogenico è un metodo innovativo per raffreddare la superficie di contatto pezzo-utensile, ridurre l'usura dell'utensile e modificare le caratteristiche del materiale, migliorando di conseguenza le prestazioni di lavorazione e la qualità del prodotto lavorato. Come refrigeranti, vengono utilizzati gas non combustibili e non corrosivi (allo stato liquido o solido) come Ossigeno, Elio, Azoto, Idrogeno, Anidride Carbonica. Le temperature cosiddette criogeniche iniziano al di sotto dei 150°C.

Materiali altamente abrasivi, superleghe e nuove macchine utensili hanno adottato il raffreddamento criogenico come metodo più sicuro e più rispettoso dell'ambiente.

È stato inoltre proposto un nuovo sistema di raffreddamento ibrido che consiste nell'abbinare CO₂ criogenica e MQL [54]. Il nuovo sistema fornisce un'alternativa ambientale ed economica più efficiente. I risultati indicano che CO₂ con sistema MQL risulta più efficace nel migliorare la lavorazione di certi tipi di leghe (come Inconel718) rispetto alle convenzionali tecniche di lavorazione.

I refrigeranti criogenici migliorano le caratteristiche di lavorabilità del materiale, l'usura dell'utensile e la rugosità superficiale. I due gas comunemente utilizzati per il raffreddamento rapido nelle lavorazioni meccaniche, LN₂ e CO₂, differiscono notevolmente rispetto ai

meccanismi tradizionali di refrigerazione. Pertanto, devono essere considerati requisiti diversi per quanto riguarda l'applicazione del refrigerante attraverso il mandrino della macchina utensile e l'utensile da taglio nella zona di taglio.

L'anidride carbonica viene stoccata allo stato liquido in serbatoi a media pressione (circa 57 bar) a temperatura ambiente. Per il raffreddamento del processo, essa viene fornita tramite tubi resistenti alla pressione dell'utensile da taglio. Gli elementi della macchina e le linee di alimentazione non sono influenzati termicamente finché il fluido è ancora sotto pressione. Quando la CO₂ si espande all'uscita dei canali di raffreddamento dell'utensile, la pressione si abbassa e si verifica una trasformazione di fase da anidride carbonica liquida a una miscela di CO₂ gassosa e solida. Grazie a questa trasformazione di fase è possibile raggiungere un effetto di raffreddamento con temperature fino a -78,5°C. Poiché la CO₂ solida sublima a temperatura ambiente, il raffreddamento criogenico con CO₂ è privo di residui.

Quando si applica invece LN₂, è necessario considerare caratteristiche di raffreddamento completamente diverse. L'azoto deve essere immagazzinato in serbatoi coibentati poiché a pressione ambiente esso si converte dalla fase solida alla fase liquida. Per questi motivi LN₂ è più adatto al raffreddamento a temperature molto basse. Tuttavia, questo comportamento causa problemi specifici per la sua applicazione come refrigerante efficace. Innanzitutto, tutte le linee di alimentazione e gli elementi della macchina, nonché i canali di raffreddamento dell'utensile, devono essere isolati per evitare pericoli e perdita della capacità di raffreddamento; in secondo luogo, quando viene a contatto con superfici che hanno una temperatura molto più elevata, l'azoto vaporizza. Ciò provoca la formazione di una pellicola gassosa isolante sulla superficie, che riduce l'effetto di raffreddamento.

Rispetto alla CO₂, l'utilizzo di LN₂ comporta un tempo di avviamento molto più lungo fino al raffreddamento del sistema. L'applicazione di CO₂ consente l'inizio del processo di taglio dopo circa 60 secondi, trascorsi i quali è possibile raggiungere una temperatura minima di circa -50°C. Poiché il grande volume di azoto vaporizzato deve uscire dai canali di raffreddamento dell'utensile da taglio, il tempo che trascorre prima che il sistema sia pronto per l'avvio è molto più lungo rispetto a quando si utilizza la CO₂. Anche dopo aver raggiunto una temperatura di uscita di circa -170°C, il processo di raffreddamento non è stabile a causa dell'azoto gassoso che si genera nel sistema di alimentazione.

Il refrigerante criogenico a base di LN₂ ha ridotto la temperatura di taglio di circa il 9-34% rispetto al taglio classico e del 3-17% rispetto al refrigerante CO₂. La CO₂ criogenica riduce invece più efficacemente le forze di taglio rispetto alla lavorazione con LN₂.

L'applicazione del raffreddamento criogenico nelle operazioni di lavorazione potrebbe essere una valida alternativa in quanto consentirebbe notevoli progressi nella durata dell'utensile e nella precisione dimensionale della finitura superficiale attraverso la riduzione dell'usura dell'utensile e il controllo della temperatura di lavorazione nella zona di taglio.

È risaputo che il 78% dell'atmosfera è costituito da gas azoto, più leggero dell'aria e innocuo. L'utilizzo dell'azoto è quindi un metodo sostenibile perchè evapora nell'aria senza produrre alcun inquinamento. Il cuscinio di gas fluido si forma tra l'utensile e il pezzo, comportandosi come un lubrificante. Inoltre, la tecnica criogenica produce trucioli privi di olio che possono essere facilmente riciclati. La pressione applicata e la portata sono fattori molto importanti durante l'utilizzo dell'azoto perchè il raffreddamento eccessivo del pezzo causa altri problemi come un'elevata fragilità e una maggiore potenza è necessaria per il taglio. L'efficienza di questa tecnica risulta inversamente proporzionale alla velocità di taglio; infatti, a causa dell'elevata velocità la penetrazione del criogeno diventa molto più difficile. Per risolvere questo problema, i ricercatori hanno suggerito delle scanalature sugli utensili da taglio. Inoltre, un getto ben controllato di azoto liquido può essere utilizzato per prolungare la durata dell'utensile.

Durante il processo di lavorazione vengono solitamente applicati l'azoto liquido e il ghiaccio secco per la loro disponibilità sul mercato e per l'utilizzo relativamente sicuro [55]. Il mezzo di raffreddamento fornito alla zona di taglio durante il raffreddamento criogenico evapora immediatamente e ritorna nell'atmosfera senza alcun inquinamento. L'applicazione di LN₂ come refrigerante durante tali processi, come tornitura o fresatura influisce favorevolmente sulla formazione della struttura della superficie lavorata dalla riduzione dei difetti di lavorazione e delle sollecitazioni residue, dovute a controllo efficace della temperatura di taglio.

Questo tipo di lavorazione comporta un'efficienza energetica più alta rispetto alle lavorazioni tradizionali, riducendo sensibilmente l'usura dell'utensile. L'eliminazione dei fluidi lubrorefrigeranti convenzionali implica la contestuale riduzione dei costi relativi alla gestione dei rifiuti e ai costi degli strumenti, riducendo il costo totale di produzione fino al 20%. Pertanto, nonostante il costo e lo sforzo iniziali relativi all'attrezzaggio per dotarsi di un impianto di raffreddamento criogenico risultino alti, questi possono essere recuperati velocemente tramite un immediato incremento della produttività, riducendo i costi di smaltimento fluidi, aumentando la durata dell'utensile e la qualità del prodotto lavorato.

Il metodo è stato in alcuni casi ritenuto inefficiente perché con il raffreddamento del pezzo aumentano anche la resistenza e la durezza del materiale, diminuendo le prestazioni di lavorazione attraverso forze di taglio più elevate. Sulla base di ciò, il processo di lavorazione criogenico può essere efficiente nel caso in cui il fluido criogenico raggiunga il punto di massima temperatura dell'utensile da taglio e lo raffreddi. Per soddisfare questa regola, è necessario determinare quale lubrorefrigerante, dove e in quale quantità deve essere fornita al processo di lavorazione.

A basse temperature, le proprietà di molti materiali metallici come la resistenza allo snervamento e alla trazione, la durezza, l'usura e la resistenza alla fatica sono migliorate rispetto alle proprietà a temperatura ambiente. In generale, i materiali con un reticolo cubico a facce centrate mantengono la loro duttilità a temperature criogeniche, mentre i materiali cubici a corpo centrato diventano fragili. Inoltre, le proprietà dei componenti come la stabilità dimensionale aumentano, mentre le sollecitazioni residue diminuiscono.

La maggior parte dei miglioramenti delle proprietà si osserva negli acciai.

Per controllare la temperatura di taglio, i fluidi da taglio convenzionali vengono solitamente applicati nella zona di scorrimento del truciolo, nella zona di deformazione primaria del truciolo o lungo l'interfaccia utensile-truciolo. Il fluido criogenico, allo stato liquido o gassoso, può anche essere immesso direttamente sull'inserito dell'utensile all'esterno dell'interfaccia truciolo/utensile, o sulla sua parte posteriore attraverso il portautensile. Ciò fornisce la possibilità di raffreddare il materiale del pezzo o l'utensile separatamente.

In generale, il raffreddamento criogenico nelle operazioni di lavorazione viene effettuato sia utilizzando un getto esterno che erogando il refrigerante attraverso il mandrino e l'utensile di taglio delle macchine utensili. La maggior parte della ricerca accademica nelle operazioni di fresatura criogenica si concentra sull'uso di getti esterni poiché questi possono essere facilmente adattati alle macchine utensili esistenti. Tuttavia, l'applicazione industriale del raffreddamento criogenico nelle operazioni di fresatura si basa sull'erogazione del criogeno attraverso il mandrino della macchina utensile poiché ciò consente un'erogazione più precisa sui taglienti e sulla zona di taglio.

Ci sono state inoltre anche alcune applicazioni di successo del raffreddamento criogenico su utensili in ceramica: un utensile in ceramica raffreddato criogenicamente sembra possa superare tutti gli altri metodi con avanzamenti crescenti in esperimenti progettati per testare la tenacità alla frattura dell'utensile. Contrariamente alla precedente ricerca sulla lavorazione e agli insegnamenti sui refrigeranti fluidi, un getto criogenico sulla superficie del rastrello non

ha indotto fratture, scheggiature o scissione dei materiali degli utensili in ceramica a base di ossido. Questo aumento della tenacità alla frattura è stato spiegato come dovuto a una combinazione dei seguenti tre fattori: indurimento criogenico dell'intero materiale dell'utensile, riduzione delle sollecitazioni dovute all'espansione termica all'interno dell'intero utensile e riduzione dei gradienti termici sulle superfici dell'utensile.

Anche se gli utensili in metallo duro sono i più popolari, diversi produttori di utensili da taglio stanno iniziando a condurre ricerche sullo sviluppo di inserti da taglio specifici (geometria e qualità), specificamente per il raffreddamento criogenico. Alcuni di loro supportano già l'industria con speciali utensili da taglio per il raffreddamento criogenico, tra cui frese a candela, frese per spianatura, frese ad alto avanzamento, frese per filettare, punte e utensili per tornitura.

Il congelamento del pezzo può essere realizzato in un bagno criogenico chiuso, in una criocamera, tramite allagamento criogenico generale o fornendo un mezzo criogenico sul pezzo. Inoltre, questo effetto può essere migliorato fornendo il refrigerante criogenico al tagliante e alla faccia del rastrello, al fine di migliorare le prestazioni di rottura del truciolo. Oltre a una migliore rottura del truciolo, le prestazioni di lavorazione con utensili in metallo duro sono migliorate, l'usura degli utensili è ridotta e la qualità della superficie è migliorata. Inoltre, va notato che il raffreddamento del pezzo può portare ad un aumento delle forze di taglio e cambiamenti microstrutturali indesiderati.

Nella Tabella 4.5 e nella Tabella 4.6 vengono rispettivamente rappresentate l'analisi lavorazioni criogeniche e il confronto tra CO₂ e LN₂.

Effetto	Prestazioni	Energia	Costi	Ambiente
Positivo	bassa rugosità superficiale aumento durata utensile miglioramento rottura truciolo	alta produttività con meno energia	alta produttività con meno energia	nessun utilizzo di fluidi non serve pulizia macchina riduzione emissioni CO ₂
Negativo	indurimento locale del truciolo alterazione dell'interfaccia pezzo-utensile sbalzo termico	rimozione del materiale indurito	alto investimento iniziale per il sistema criogenico	la produzione dell'azoto ha alti costi e richiede energia rischi per la salute

Tabella 4.5 Analisi del raffreddamento criogenico (adattata da [34])

	CO₂	LN₂
Temperatura minima	-78.5 °C	-196 °C
Effetto refrigerante	abbassa la temperatura espandendosi dall'utensile	raffreddamento dal serbatoio di stoccaggio, tubi di alimentazione e utensile da taglio
Isolamento	non è necessario isolare il sistema	è necessario isolare il sistema
Utensili richiesti	standard, con poche modifiche	progettati appositamente e isolati

Tabella 4.6 Confronto tra CO₂ e LN₂ (adattata da [132])

4.2.1 Aspetti economici

Il raffreddamento criogenico è stato limitato dal costo e dall'affidabilità del processo. L'azoto è poco costoso, ma raffreddamento criogenico presenta materiali e fluidi di consumo che si aggiungono ai costi di lavorazione.

La produttività del raffreddamento criogenico risulta maggiore rispetto a quella della lavorazione convenzionale, tendendo ad aumentare all'aumentare della velocità di taglio. Infatti, la produttività della lavorazione convenzionale diminuisce drasticamente a velocità di taglio più elevate, a causa della rapida usura degli utensili. Il principale vantaggio del raffreddamento criogenico si ottiene riducendo il tempo di cambio utensile e consentendo la produzione a velocità di taglio più elevate, riducendo così il tempo di taglio effettivo. Inoltre, la maggiore durata dell'utensile nel raffreddamento criogenico riduce il consumo degli inserti da taglio [30].

Dal punto di vista dei costi del liquido di raffreddamento, il prezzo del liquido di raffreddamento varia da un fornitore all'altro, da uno stato all'altro, nonché in base alla quantità. La tendenza dei prezzi al giorno d'oggi vede un aumento dei prezzi dei fluidi di raffreddamento convenzionali e una diminuzione dei prezzi dei fluidi criogenici. Tuttavia, se in tale ricerca il raffreddamento criogenico è nota come più efficiente, oggi la situazione dovrebbe essere migliorata, a causa dell'andamento crescente dei prezzi del petrolio. C'è, inoltre, un'ulteriore considerazione da fare: con velocità di taglio più elevate, il tempo di lavorazione è più breve e il tempo di utilizzo del refrigerante è minore. Pertanto, il refrigerante criogenico porta a una valida alternativa.

È possibile concludere che l'utilizzo di lavorazioni criogeniche a basso consumo con un basso flusso di fluido criogenico, diretto al punto di taglio locale, porta il processo a livelli in cui l'azoto costa meno del fluido da taglio convenzionale, riduce l'usura dell'utensile e allunga la vita dell'utensile. Inoltre, tale approccio può ridurre la forza di attrito, migliorare la rottura del truciolo, eliminare il tagliente di riporto, migliorare la qualità della superficie lavorata. I benefici si ottengono anche con miglioramenti dell'impatto ambientale e con la riduzione dei problemi di salute dei dipendenti che potrebbero essere molto significativi. Questi vantaggi possono essere il principale incentivo per l'industria a selezionare il raffreddamento criogenico.

4.2.2 Effetti lubrorefrigeranti

Il refrigerante criogenico maggiormente utilizzato è l'azoto, un gas sicuro, non combustibile e non corrosivo con una presenza del 79% nell'aria. Incolore, inodore e insapore, l'azoto viene spesso utilizzato come gas "inerte" a causa della sua natura non reattiva con molti materiali. L'azoto liquido utilizzato nei sistemi di raffreddamento criogenico evapora rapidamente senza lasciare residui che contaminano il pezzo, i trucioli, la macchina utensile o che minaccino la salute dell'operatore. Si eliminano quindi i costi di smaltimento, il che rappresenta un miglioramento significativo rispetto ai fluidi di raffreddamento convenzionali come lubrorefrigeranti.

L'efficacia del raffreddamento criogenico nella lavorazione di materiali diversi potrebbe essere valutata tramite l'efficienza del raffreddamento e l'efficacia della lubrificazione [30]. Sebbene l'approccio al raffreddamento non sia così diverso per materiali diversi, il ruolo più importante è l'influenza del fluido criogenico sul coefficiente di attrito nel contatto pezzo-utensile.

Nel processo di taglio dei metalli, subito dopo la sua formazione il truciolo scorre lungo la superficie di spoglia dell'utensile da taglio. A causa della natura del meccanismo di scorrimento, vi è la presenza di un effetto di attrito che consuma inoltre una quantità significativa di energia. Pertanto, maggiore è l'attrito, maggiore è la forza di taglio richiesta a causa della maggiore difficoltà di scorrimento del truciolo lungo la faccia di spoglia dell'utensile di taglio. Di conseguenza, il truciolo diventa più spesso e l'angolo di taglio si abbassa. Con la diminuzione dell'attrito grazie a una lubrificazione efficace, il truciolo diventa più sottile con una forza di taglio e un consumo di energia inferiori, garantendo una maggiore durata dell'utensile da taglio. Alcune proprietà dei materiali come trazione e durezza sono fortemente legate al comportamento dell'attrito, ma la maggior parte delle proprietà dipende dalla temperatura. Pertanto, le ricerche si sono concentrate sui meccanismi di lubrificazione che permettano di ridurre l'attrito.

4.3 Altri tipi di lavorazione

4.3.1 Lavorazione ibrida

È emersa di recente una strategia di lubrorefrigerazione avanzata che sfrutta i vantaggi sia del raffreddamento criogenico (controllo del calore) che della lavorazione MQL (riduzione dell'attrito) [54]. Durante la lavorazione ibrida, il raffreddamento criogenico e la tecnica MQL vengono applicati contemporaneamente, da diverse posizioni e in una gamma relativamente ampia di parametri di processo. Riducendo l'attrito grazie al raffreddamento criogenico, questa lavorazione offre ulteriori riduzioni delle forze di taglio, una finitura superficiale migliorata (grazie a una significativa riduzione del danno termico), nonché una maggiore durata dell'utensile.

La lavorazione ibrida non presenta solamente i vantaggi, ma anche gli svantaggi delle lavorazioni MQL e criogeniche. Poiché l'efficacia di qualsiasi strategia di raffreddamento o lubrificazione dipende fortemente dall'applicazione specifica (ovvero il materiale del pezzo, il processo di lavorazione, il materiale dell'utensile, la modalità di applicazione, ecc.), la lavorazione ibrida non può essere applicata nella stessa maniera in tutti i processi produttivi. Questa nuova strategia è particolarmente rilevante nelle applicazioni che richiedono un'integrità superficiale ottimale, come i componenti aerospaziali e biomedici.

Il raffreddamento ibrido criogenico è stato sviluppato sulla base sia del gas LN₂ che del gas CO₂. L'utilizzo della CO₂ comporta diversi vantaggi tecnici, soprattutto la capacità di fornire i mezzi di raffreddamento a temperatura ambiente e ad alta pressione. Quando la CO₂ viene ulteriormente riscaldata può raggiungere uno stato supercritico, cioè una fase intermedia tra gas e liquido. La CO₂ supercritica ha un'elevata solubilità e risulta lubrificante come gli oli, delineandosi adatta per realizzare sia il raffreddamento che la lubrificazione in un sistema di erogazione a canale singolo.

4.3.2 Lavorazione a caldo

La lavorazione a caldo è una tecnica in cui la temperatura del pezzo in lavorazione viene elevata a diverse centinaia di gradi Celsius rispetto alla temperatura ambiente, provocando una riduzione della resistenza al taglio del materiale. Rientra nell'ambito delle lavorazioni assistite. I ricercatori hanno osservato che a una temperatura ottimale la durata dell'utensile aumenta a un valore più alto e successivamente si riduce nella lavorazione a caldo dell'acciaio e di molte

sue leghe [41]. Molti ricercatori hanno inoltre dimostrato che la lavorazione a caldo è un metodo molto utile per la lavorazione di materiali difficili da tagliare. per ridurre l'usura degli utensili e la potenza consumata, aumentando la finitura superficiale. L'effetto della temperatura sul pezzo in lavorazione risulta essere il parametro più significativo per aumentare la durata dell'utensile. L'aumento della temperatura della zona di taglio riduce la generazione di calore durante la lavorazione, riducendo così la forza di taglio e aumentando la durata dell'utensile. Questo tipo di lavorazione permette di utilizzare utensili da taglio poco costosi per lavorare materiali difficili da tagliare.

4.3.3 Raffreddamento ad alta pressione

Il raffreddamento ad alta pressione (*High Pressure Cooling*, HPC) è una tecnologia moderna che consente una migliore penetrazione del mezzo di raffreddamento tra l'utensile da taglio e il pezzo in lavorazione. I principali vantaggi legati all'applicazione di questa tecnica sono: migliore controllo del truciolo, maggiore durata dell'utensile e minore temperatura di taglio. Una migliore formazione di truciolo a livello di rottura e di grandezza permette di conseguenza di ottenere una maggiore qualità superficiale. Inoltre, quando il liquido di raffreddamento è fornito solo sulla faccia del fianco dell'utensile, la durata dell'utensile diminuisce con la crescita della portata.

Inoltre, è importante poter determinare la durata del refrigerante utilizzato durante il raffreddamento ad alta pressione oltre che l'ottenimento, ad esempio, dell'effetto appropriato di rottura del truciolo è correlato con l'ottimizzazione multi-criteriale del processo, principalmente in termini di refrigerante, configurazione degli ugelli e parametri di taglio (in particolare avanzamento e profondità di taglio). Dovrebbe essere quindi studiata anche la costruzione appropriata degli elementi del sistema HPC, in cui la sezione e la forma dei canali di alimentazione del refrigerante hanno un effetto influente sulla qualità e sull'efficienza della fornitura.

Nella Tabella 4.7 viene fornita un'analisi della lavorazione HPC:

Effetto	Prestazioni	Energia	Costi	Ambiente
Positivo	buona finitura superficiale riduzione della forza di taglio	-	costi ridotti dal riciclo dei fluidi	utilizzo bio-fluidi
Negativo	durata utensile può essere compromessa per le macchine manuali ci sono perdite di liquido	aumento consumo energetico per i sistemi HPC aumento consumi per il riciclo dei fluidi aumento consumi per i sistemi di pompaggio	investimento iniziale per il sistema HPC richiesta di fluidi elevato da inserire nel sistema costi di riciclo	inalazione fluidi nebulizzati minore pulizia ambiente di lavoro bisogna pulire il truciolo sporcato dai fluidi

Tabella 4.7 Analisi della lavorazione HPC (adattata da [34])

4.3.4 HPJAM

La lavorazione assistita da getto ad alta pressione (*High Pressure Jet Assisted Machining*, HPJAM) presenta un metodo innovativo di lubrificazione e/o raffreddamento della zona di taglio durante la lavorazione [29]. Più specificamente, si riferisce alla fornitura di CLF a base di olio o acqua in portate relativamente piccole rispetto ai CLF a getto continuo, a una pressione estremamente elevata, fino a 300 MPa. I CLF sottoposti a tale pressione possono penetrare più vicino alla zona di contatto pezzo-utensile, che raggiunge la temperatura più alta durante il processo di lavorazione, raffreddandola. Oltre a questo effetto di raffreddamento, HPJAM è in grado di controllare le condizioni di attrito tra utensile da taglio e truciolo, offrendo un ulteriore controllo della rottura del truciolo, inducendo un effetto idraulico tra la faccia di spoglia dell'utensile da taglio e il lato posteriore del truciolo, portando a migliori prestazioni di lavorazione. Alcuni dei potenziali vantaggi di HPJAM sono i seguenti:

- Lavorazione più sostenibile grazie a portate inferiori di CLF rispetto alla lavorazione convenzionale, fornendo contemporaneamente migliori meccanismi di raffreddamento e lubrificazione.
- Diminuzione della lunghezza del contatto utensile da taglio-truciolo, con conseguente riduzione delle forze di taglio e maggiore durata dell'utensile.
- Miglioramento della rottura del truciolo.
- Miglioramento dei parametri di lavorazione, con conseguente aumento della produttività del processo soprattutto attraverso un maggiore tasso di asportazione del materiale.

Oltre a un ingente investimento di capitale iniziale per attrezzature aggiuntive, il principale svantaggio di questo metodo di lavorazione risiede nell'utilizzo di CLF a base di olio minerale, che non presenta le caratteristiche chimico-fisiche ottimali per questo tipo di lavorazione.

Conclusioni

La strada per una produzione sostenibile attraverso una lavorazione più ecologica inizia dai passaggi che devono essere presi in considerazione per implementare metodi di lavorazione più ecologici al fine di rendere queste tecnologie coerenti, rispettose dell'ambiente ed efficienti. Dal punto di vista ambientale, il taglio a secco risulta il metodo migliore in quanto elimina i fluidi da taglio e aumenta la sicurezza per gli operatori di macchina; risulta applicabile soprattutto per i processi di tornitura e di fresatura. Tuttavia, presenta limitazioni nei processi di lavorazione in cui è presente una grande quantità di calore generato, come ad esempio quelli che riguardano materiali difficili da tagliare. Alcune lavorazioni continuano quindi a necessitare dell'apporto dei fluidi da taglio.

Per eliminare gli impatti correlati all'effetto negativo dei fluidi lubrorefrigeranti sugli operatori di macchina, questi fluidi dovrebbero essere sostituiti con fluidi biodegradabili, come gli oli vegetali. I fluidi alternativi sono meno tossici e migliorano l'efficienza della lavorazione. Gli oli vegetali, biodegradabili, hanno un coefficiente di attrito inferiore rispetto a quello raggiunto dagli oli minerali, a causa del contenuto di acidi grassi. Di conseguenza, l'utilizzo di questi fluidi durante la lavorazione influisce sulla riduzione della rugosità superficiale e sulla forza di taglio in misura maggiore rispetto all'applicazione degli oli minerali e semisintetici. Inoltre,

l'applicazione di fluidi biodegradabili nelle lavorazioni MQL può contribuire e un ulteriore miglioramento dell'efficienza della lavorazione.

I metodi di raffreddamento basati sulle tecniche MQL rappresentano una buona alternativa al taglio a lubrificazione convenzionale, con vantaggi ecologici ed economici. La maggior parte degli studi ha rivelato che questi metodi hanno trovato applicazione in tutti i processi di lavorazione, così come nella vasta gamma di materiale (soprattutto alluminio, nichel e leghe di titanio).

Si stima che la direzione futura dello sviluppo nella lavorazione sostenibile riguarderà l'area delle nanoparticelle, tra cui la dimensione di queste, e la loro applicazione nelle lavorazioni presentate nel corso del Capitolo.

Nella Tabella 4.8 viene proposta un'analisi comparativa delle varie tecniche di lavorazione presentate nel corso del Capitolo (5 eccellente, 1 pessimo):

Parametri	Secco	MQL	Criogenico	HPC	Bio-oli	Nanofluidi
Costo iniziale	5	3	2	1	4	5
Costo totale	3	5	4	3	3	3
Finitura superficiale	1	4	5	5	4	4
Durata utensile	1	4	5	4	4	4
Consumo energetico	4	3	5	2	3	3
Sostenibilità	3	4	5	3	5	3
Pulizia	5	4	5	2	2	3
Consumo fluidi	5	4	3	2	1	3

Tabella 4.8 Analisi comparativa delle varie lavorazioni presentate nel corso del Capitolo

Capitolo 5

Ottimizzazione

In questo capitolo sarà affrontato il miglioramento del processo di lavorazione dal punto di vista dell'ottimizzazione.

L'ottimizzazione comprende un insieme di attività di miglioramento continuo che possono offrire una migliore soluzione regolando uno o più parametri che influiscono sul comportamento degli stessi. Ciò implica la ricerca del trade-off tra i diversi fattori che caratterizzano un problema complesso, con l'obiettivo di raggiungere i risultati desiderati.

Per quanto riguarda le operazioni di lavorazione sostenibili, qualsiasi parametro rilevante per il processo può essere selezionato per il miglioramento dell'efficienza economica, ambientale o sociale; sarà necessario selezionarli adeguatamente e limitare l'ambito della soluzione, poiché il miglioramento di una qualsiasi delle tre dimensioni sostenibili può influire negativamente o positivamente sulle altre due.

5.1 Ottimizzazione delle lavorazioni ad asportazione di materiale

Attualmente viene utilizzata un'ampia varietà di tecniche di ottimizzazione: dai metodi matematici tradizionali (programmazione lineare e non lineare, programmazione dinamica, moltiplicatori lagrangiani, metodo degli elementi finiti) alle nuove tecniche che sono state sviluppate per risolvere i limiti dei metodi precedenti [35]. Queste nuove tecniche sono metodi statistici (ANOVA, regressione statistica, teoria degli insiemi sfocati, metodo Taguchi, metodologia di progettazione della superficie di risposta) e algoritmi non tradizionali; questi ultimi sono costituiti da euristiche e metaeuristiche, ad esempio strategie di ricerca o algoritmi bio-ispirati (reti neurali artificiali, algoritmi di ispirazione naturale, algoritmi evolutivi come algoritmi genetici GA).

In generale, l'ottimizzazione della produzione sostenibile implica la risoluzione di complessi problemi multi-obiettivo e multicriterio; per questo motivo spesso le tecniche tradizionali non raggiungono i requisiti specifici per un miglioramento sostenibile. In altre occasioni, le fasi di

progettazione, modellazione e simulazione non sono disponibili per uno specifico processo di lavorazione. È anche possibile che la procedura di ottimizzazione classica non sia applicabile: questa è una situazione frequente in alcune aree della sostenibilità che hanno una piccola traiettoria di ricerca (ad esempio l'ottimizzazione delle variabili sociali o ambientali). In questo caso le tecniche di ottimizzazione sono proposte ad hoc e molte di esse sono in fase iniziale di sviluppo.

Per quanto riguarda la selezione dell'obiettivo di ottimizzazione, vengono selezionati diversi parametri come la pianificazione e la programmazione del processo, la produttività, la durata dell'utensile, i parametri del processo di lavorazione, l'efficienza ambientale-economica-sociale, i costi, la finitura superficiale (qualità) o la tossicità delle emissioni.

Esiste poi una serie di studi che analizzano diverse tecniche di ottimizzazione applicate alla lavorazione; in essi, la base di conoscenza, le applicazioni e le funzionalità sono descritte dal punto di vista convenzionale (economico) o includendo parametri dalla dimensione ecologica ed equità.

L'interesse dello studio per la fattibilità tecnica e la riduzione dei costi ha provocato uno squilibrio nelle linee di ricerca sulle lavorazioni sostenibili, essendo la dimensione economica la più apprezzata, seguita da quella ecologica e dall'equità.

5.2 Ottimizzazione delle 3E

Nel capitolo introduttivo è stato introdotto il concetto di Triple Bottom Line, ovvero una visione ampliata secondo la quale bisogna considerare l'impatto che un prodotto, un processo o un servizio ha a livello ambientale, sociale ed economico. Si tratta di un approccio che prende in considerazione tutti e tre gli aspetti, coniugandoli in una direzione di sviluppo sostenibile. In questo capitolo, verranno discussi i metodi di ottimizzazione di ciascuna delle dimensioni precedentemente presentate.

5.2.1 Ottimizzazione della dimensione economica

La dimensione economica si riferisce all'insieme delle attività e delle operazioni che orientano in forma proficua gli obiettivi e le strategie aziendali; ciò si realizza attraverso l'efficienza economica, mantenendo la fattibilità tecnica, assicurando la qualità dei risultati, l'impulso alla crescita e la creazione di nuove opportunità di business orientate all'innovazione e al miglioramento continuo [88]. Questa dimensione crea le necessarie relazioni tra i gruppi sociali

e i settori economici incaricati di mettere in relazione tra di loro clienti e consumatori tramite un insieme di prodotti e servizi che soddisfino i bisogni umani; ciò richiede un efficiente processo di gestione della domanda, che viene svolto dall'azienda, a partire dalla creazione del valore aggiunto sotto forma di beni e servizi di qualità.

Per quanto riguarda la dimensione economica applicata nello sviluppo di processi di lavorazione sostenibili, le aree di ricerca e sviluppo comprendono l'insieme dei fattori convenzionali, vale a dire quei parametri che hanno avuto un continuo miglioramento ed evoluzione nei processi di lavorazione: tempi, costi e qualità. In questa sezione vengono analizzati i processi di ottimizzazione e miglioramento della dimensione economica nelle lavorazioni meccaniche tenendo conto dei sei seguenti aspetti:

- 1) Pianificazione e programmazione. È essenziale determinare la migliore sequenza di lavoro, il layout dell'officina, le operazioni di lavorazione e i flussi di lavoro avendo riguardo di integrare tutti questi elementi a livello fabbrica, dove vengono determinate la pianificazione e la programmazione.
- 2) Produttività e performance sostenibili. Questi elementi vengono valutati utilizzando metriche come precisione dimensionale, tempo e disponibilità, durata del processo, costi, durata dell'utensile, prestazioni dell'utensile, qualità del pezzo, controllo delle forze di taglio, rugosità superficiale, usura degli attrezzi, parametri di processo. Vengono inoltre valutate opzioni quali tecniche innovative di raffreddamento e lubrificazione a quantità minime, lavorazione quasi a secco, refrigeranti ad alta pressione, raffreddamento criogenico, raffreddamento ad aria compressa. Oppure ci si focalizza sull'affidabilità dei componenti delle macchine calcolando i tempi e il numero ottimale di intervalli per la manutenzione preventiva.
- 3) Qualità. In generale, la qualità viene considerata come vincolo nell'ottimizzazione di un altro parametro: ad esempio, le modifiche proposte per miglioramenti nella dimensione ambientale o sociale sono ottimizzate in modo che la loro attuazione non riduca la qualità dei risultati.

La metrica che viene selezionata più frequentemente per determinare il compromesso tra i diversi parametri di miglioramento è la rugosità superficiale del prodotto lavorato.

- 4) Redditività: investimenti e costi operativi. Viene sviluppata la ricerca dell'equilibrio tra investimento, fattibilità economica, costi operativi e benefici ambientali nel ciclo di vita della macchina utensile. Vengono implementate strategie per determinare investimenti adeguati; ridurre il rischio finanziario; pianificare i processi per ridurre al minimo costi, tempi e fattori di impatto ambientale; ridurre i costi con strategie di lean production;

investire sulla R&S per migliorare la lavorazione (dalla scelta del materiale più adatto a una certa lavorazione alla scelta delle migliori condizioni di taglio).

- 5) Ambiente di lavorazione, inteso come l'insieme degli elementi che strutturano l'architettura del processo (macchina utensile, attrezzature ausiliarie, input e output). Si punta a ottimizzare i seguenti aspetti: efficienza della macchina, riduzione del carico ambientale mediante l'utilizzo dell'utensile da taglio (aumento del ciclo di vita e riduzione al minimo della velocità di commutazione) e fattori tribologici.
- 6) Prestazioni della lavorazione di materiali specifici. L'ottimizzazione prevede l'analisi e la valutazione del processo quando vengono introdotte nuove tecnologie e strategie sostenibili, e l'impatto di queste sulla qualità dei risultati e sulle prestazioni (input di risorse, consumo di energia, tempo, utilizzo di lubrorefrigerante, rifiuti).

5.2.2 Ottimizzazione della dimensione ambientale

La dimensione ambientale mira ad integrare contesti, ovvero a trovare un equilibrio tra l'ecosistema naturale e gli ecosistemi industriale urbano e rurale. L'industria deve interfacciarsi responsabilmente con il pianeta, mantenendo i bisogni e l'auspicata crescita sociale, culturale ed economica; è necessario condividere le risorse, rispettare i cicli naturali e apportare valore all'ambiente limitando gli impatti su questo [88].

Gestendo gli input e gli output del processo, le soluzioni possono essere orientate a ridurre ed eliminare l'onere ambientale. In particolare, la gestione degli input è possibile con un uso responsabile, un consumo razionale e il riciclo. Per quanto riguarda invece gli output, questi sono controllati da una produzione più pulita, gestione dei rifiuti e prevenzione della contaminazione di acqua, atmosfera e suolo. In questa sezione viene analizzato il processo di ottimizzazione e miglioramento della dimensione ambientale tenendo conto dei tre seguenti aspetti:

- 1) Energia. Come ampiamente analizzato nel Capitolo 2, sono stati formulati molti modelli per prevedere la domanda energetica dei macchinari. In generale, gli studi si sono concentrati sull'efficienza energetica, studiando parallelamente la fattibilità tecnica, l'impatto economico e i possibili benefici ambientali. Un aspetto innovativo per valutare e migliorare il comportamento del processo è il monitoraggio in tempo reale. Ciò è possibile controllando i processi produttivi e studiando la domanda elettrica del processo.

- 2) Fluidi da taglio. Come è stato approfondito nel Capitolo 4, numerosi fluidi (nonchè una combinazione di nuove tecnologie che riducono al minimo il consumo di questi o addirittura li eliminano) sono disponibili per l'implementazione di diversi tipi di processi. Lo sforzo di ricerca è focalizzato, in primo luogo, sullo studio dei fluidi biodegradabili che possono sostituire quelli convenzionali (fluidi da taglio minerali, sintetici e semisintetici). I nuovi fluidi dovrebbero soddisfare determinate caratteristiche (buone proprietà lubrificanti, elevata capacità di raffreddamento, bassa viscosità, chimicamente stabili, non corrosivi, alto punto di infiammabilità, anallergici, meno volatili e a basso costo) per mantenere le prestazioni di lavorazione offerte dai fluidi convenzionali. In secondo luogo, lo sforzo di ricerca è focalizzato sullo sviluppo di nuove tecnologie alternative, come la lavorazione a quantità minimale di fluido lubrificante (MQL).
- 3) Processi di lavorazione innovativi e meno inquinanti, che hanno i seguenti obiettivi: ridurre l'estrazione delle materie prime, ridurre il consumo di energia, gestire adeguatamente e ridurre al minimo i rifiuti prodotti, prevenire e ridurre la contaminazione e proteggere la salute e la sicurezza delle persone.

5.2.3 Ottimizzazione della dimensione sociale

La dimensione sociale si occupa di studiare il benessere umano, includendo attività che promuovono la qualità della vita, la conoscenza condivisa e la responsabilità sociale.

I campi di azione comprendono il rapporto tra dipendente e azienda, compiti di sicurezza, salute del lavoratore e comfort. Comprendono anche studi sulla funzionalità dei risultati, sulla relazione con il cliente e sulle interferenze con gli stakeholder, diminuzione del carico di lavoro fisico e cognitivo, miglioramento della produttività e motivazione del lavoratore [88].

In questa sezione viene analizzato il processo di ottimizzazione e miglioramento della dimensione sociale tenendo conto dei quattro seguenti aspetti:

- 1) Interazione uomo-macchina. Sono presenti molti studi che prevedono miglioramenti a partire dalla valutazione della postazione di lavoro. Questi miglioramenti si basano sull'esperienza dell'ingegnere di produzione, del ricercatore o del tecnico; i metodi utilizzati, nella maggior parte dei casi, seguono una norma di valutazione del rischio professionale.

Per l'ottimizzazione vengono analizzate l'abilità umana (efficienza, precisione ed errori) e la prestazione umana (questo perché con una migliore progettazione del compito o una migliore progettazione della macchina utensile, la produttività aumenta). Nell'ambito dell'ergonomia ambientale, viene studiata l'esposizione del lavoratore ai diversi fattori ambientali (come il rumore, vibrazioni, fluidi da taglio o emissioni, nebbie tossiche e qualità dell'aria). Si valutano anche le conseguenze dell'esecuzione della lavorazione a livello di salute e a livello psicologico.

Inoltre, vengono effettuati diversi studi per progettare le macchine su “dimensione del lavoratore”, proponendo interfacce utente più intuitive facilitando così l'uso della macchina.

- 2) Gestione e gruppi di lavoro. La produttività e l'efficienza non dipendono solamente dai processi o dai fattori individuali legati ai lavoratori, ma anche dall'interazione e dal coordinamento tra i gruppi di lavoro. La creazione di team responsabili e partecipativi è vitale affinché i dipendenti cooperino nell'identificazione e risoluzione dei problemi, nella programmazione della manutenzione, nelle attività di produzione e anche nel miglioramento continuo del processo attraverso l'analisi dei compiti svolti.
- 3) Automazione dei processi e autonomia dei lavoratori. L'interesse a ridurre l'intervento del lavoratore e nell'automazione del processo di lavorazione ha incentivato lo studio dell'ottimizzazione dei processi di lavorazione intelligenti. L'obiettivo è quello di ridurre al minimo l'errore umano nella configurazione dei programmi di fabbricazione assistita da computer (*CAM*) e, in modo indiretto, aumentare la qualità dei risultati e l'autonomia del macchinista. Ciò comporta l'introduzione dell'intelligenza artificiale negli ambienti CNC: attraverso metaeuristiche (come l'algoritmo genetico), è possibile ad esempio determinare i parametri di taglio più appropriati senza dover dipendere dal fattore umano.
- 4) Apprendimento e miglioramento delle competenze. Simulazione, realtà virtuale, e-learning e realtà aumentata sono applicati sempre con maggiore frequenza nei sistemi di formazione dei lavoratori. I simulatori aiutano ad apprendere il compito mediante una formazione più sicura, efficiente ed economica, potendola prolungare nel tempo fino a quando il lavoratore acquisisce le capacità e abilità richieste; contribuiscono inoltre a ridurre gli errori di esecuzione del lavoro garantendo la salute e la sicurezza.

5.3 Approccio gerarchico alla strategia di risparmio energetico

Uno studio di Yoon et al. del 2013 [49] ha proposto un'analisi delle strategie di risparmio energetico per una maggiore sostenibilità dei processi basata su sei livelli gerarchici. Le sei gerarchie sono: valutazione e modellazione, ottimizzazione basata su software, tecnologia di controllo, miglioramento del taglio, ottimizzazione basata su hardware e progettazione per l'ambiente. Sono ordinati rispetto alle difficoltà di implementazione e disposti secondo il livello decisionale. Le strategie dalla valutazione e modellazione alla tecnologia di controllo potrebbero essere applicabili al livello di pianificazione del microprocesso, le strategie dell'ottimizzazione basata su software al miglioramento del taglio potrebbero essere applicabili al livello di pianificazione del macroprocesso e le strategie dal miglioramento del taglio e la progettazione per l'ambiente sono coinvolti a livello di progettazione della macchina [47].

Il primo approccio consiste nel misurare e analizzare il consumo energetico degli impianti. La misurazione quantitativa del consumo energetico è necessaria per l'applicazione delle tecnologie di risparmio energetico e consente l'applicazione più efficace delle tecnologie. A questo livello sono coinvolti il monitoraggio e la modellazione, la caratterizzazione del consumo energetico e la scomposizione di ogni componente, in modo che i manager possano ottenere informazioni utili sul consumo energetico delle macchine utensili. Le tecnologie a questo livello consentono di sapere dove applicare le tecnologie di risparmio energetico e quanta energia è necessario ridurre. Dalla scomposizione degli elementi energetici, è possibile sapere quale componente è il più dominante nel consumo di energia. Poiché la comprensione del consumo energetico è il requisito fondamentale nella ricerca sul risparmio energetico, sono necessari dati accurati e analisi precise.

L'approccio successivo è l'ottimizzazione basata su software, ovvero l'ottimizzazione dei processi a livello di software. In questo livello sono incluse l'ottimizzazione dei parametri di processo, inclusi i percorsi utensile, la riduzione al minimo del tempo di attesa delle macchine utensili e la pianificazione delle operazioni. Utilizzando il modello costruito e i dati ottenuti dal livello precedente, il consumo energetico delle macchine utensili può essere facilmente ridotto, senza apportare significative modifiche hardware al processo.

Il passo successivo è il miglioramento del controllo. Questo livello prevede il controllo dei dispositivi ausiliari e la prognosi del consumo energetico. Poiché le macchine utensili hanno

molti dispositivi periferici per i fluidi lubrificanti, si potrebbe anche ridurre facilmente il consumo di energia a questo livello.

Il quarto approccio è l'applicazione delle tecnologie di taglio. Questo livello coinvolge le tecnologie nella lavorazione assistita. La lubrificazione a quantità minimale (MQL) è uno dei metodi più efficaci, perché le pompe dei fluidi contribuiscono in larga parte al consumo energetico delle macchine utensili.

Il quinto approccio è l'ottimizzazione basata sull'hardware o l'ottimizzazione a livello di hardware. Questo livello include il miglioramento dell'efficienza hardware e la riduzione al minimo delle perdite, oltre che la manutenzione e la sostituzione preventiva dei componenti.

L'ultimo approccio è la progettazione di macchine utensili. A questo livello sono incluse le strategie di progettazione ottimale delle macchine utensili. Un design più innovativo delle macchine utensili potrebbe infatti migliorare l'efficienza energetica delle macchine utensili.

Ciascun approccio può essere applicabile sia da solo, sia combinato con altri, e ha effetti diversi sul consumo di energia. Tuttavia, è molto difficile confrontare direttamente gli effetti, poiché ciascun approccio riguarda non solo diversi elementi energetici, ma anche diversi livelli di consumo energetico.

5.4 Benchmarking energetico

Attualmente, ai sistemi di lavorazione sono stati applicati innumerevoli metodi per la misurazione, il monitoraggio, la modellazione e l'ottimizzazione dell'energia per migliorarne le prestazioni energetiche. Questi metodi sono utili ma non sempre sono efficaci per misurare la domanda di energia e per l'applicazione di vincoli specifici all'uso dell'energia.

La misurazione e il monitoraggio dell'energia sono misure importanti che forniscono supporto ai dati relativi all'energia per i sistemi di lavorazione [146].

Gli ambienti di lavorazione incorporano un'ampia gamma di parti interessate che possono trarre vantaggio da dati relativi all'energia, come per esempio:

- l'alta dirigenza per gli obiettivi di prestazione ambientale dello stabilimento;
- i gestori dell'energia per il monitoraggio dell'implementazione di obiettivi per ridurre il consumo energetico nei processi di lavorazione;
- i designer industriali per la progettazione di prodotti di lavorazione;

- i responsabili di processo per l'applicazione di misura di efficienza ai processi produttivi;
- gli operatori di macchine utensili dall'accesso alle informazioni utili per le decisioni sul processo di lavorazione;
- i fornitori da una migliore comprensione di come poter soddisfare le esigenze del cliente.

Per un impianto di lavorazione, il miglioramento sistematico dei processi per attuare le misure di efficienza energetica richiede la misurazione del consumo energetico dei sistemi e dei processi di lavorazione. Il monitoraggio è un'estensione di questo processo di misurazione, che comporta un'ulteriore registrazione, confronto e visualizzazione di queste misurazioni [148].

Il benchmarking energetico fa parte dell'uso molto più ampio dei benchmark come strumento per valutare la domanda energetica e l'efficienza energetica. Il concetto di benchmarking energetico è stato proposto il secolo scorso e da allora è stato studiato in tutto il mondo, determinando notevoli progressi per la produzione industriale. Attualmente, sono stati applicati con successo a vari settori (come l'industria petrolchimica, l'industria dell'acciaio e del cemento e l'industria mineraria del carbone) un certo numero di metodi per sviluppare il benchmarking energetico.

L'ampia distribuzione e l'elevato consumo di energia a bassa efficienza fanno sì che i sistemi di lavorazione offrano un notevole potenziale di risparmio energetico. Tuttavia, sono disponibili pochi metodi per sviluppare il benchmarking energetico, che ha portato all'inadeguatezza della riduzione del consumo energetico e al miglioramento dell'efficienza energetica per i sistemi di lavorazione.

La caratterizzazione del benchmarking energetico è un passaggio indispensabile per la costruzione del quadro di benchmarking, la modellazione e la determinazione dei metodi per lo sviluppo del benchmarking energetico per i sistemi di lavorazione [147]. Considerando le leggi sul consumo energetico per un processo di lavorazione, il benchmarking energetico dei sistemi di lavorazione ha caratteristiche complesse, multilivello e correlative.

5.4.1 Complessità del benchmarking energetico

I prodotti di lavorazione comprendono una serie di componenti e parti; queste ultime comprendono una pluralità di componenti e, per analogia, l'ultima parte rimanente è costituita solo da un dato numero di componenti. Il consumo energetico del prodotto da lavorare

comprende invece il consumo energetico del componente, della parte, dell'assemblaggio, dello stoccaggio e del trasporto. Il consumo di energia del componente è composto a sua volta dal consumo di energia del processo di lavorazione e dal consumo di energia ausiliaria per il compressore d'aria, le apparecchiature di ventilazione, l'illuminazione e così via [146]. Il consumo energetico della parte comprende il consumo energetico del componente, dell'assemblaggio del componente, dell'assemblaggio completo, dello stoccaggio e del trasporto. Inoltre, i componenti del consumo energetico per l'assemblaggio, lo stoccaggio e il trasporto sono anch'essi complessi e variabili. La Figura 5.1 mostra i componenti del consumo energetico di un prodotto di lavorazione e mostra che il consumo di energia per il prodotto di lavorazione possiede una complessa costruzione energetica e numerosi componenti energetici che rendono difficile lo sviluppo di benchmark energetici per i sistemi di lavorazione.

Non solo i costituenti del prodotto di lavorazione sono estremamente complessi e variabili, ma anche i processi di consumo energetico. Prendendo ad esempio l'unità più in basso (un pezzo) di un prodotto di lavorazione, i processi di lavorazione di questo pezzo coinvolgono più macchine utensili, processi e procedure. Anche se si deve lavorare lo stesso pezzo, le differenze di consumo energetico possono essere notevoli a causa delle diverse macchine utensili e dei piani di lavorazione utilizzati. Inoltre, per una sola macchina utensile esistono processi di consumo energetico complessi. Il processo di lavorazione può essere suddiviso in quattro tipi, inclusi i processi di standby, avvio, inattività e taglio del materiale. Pertanto, il benchmarking energetico per i sistemi di lavorazione risulta complesso.

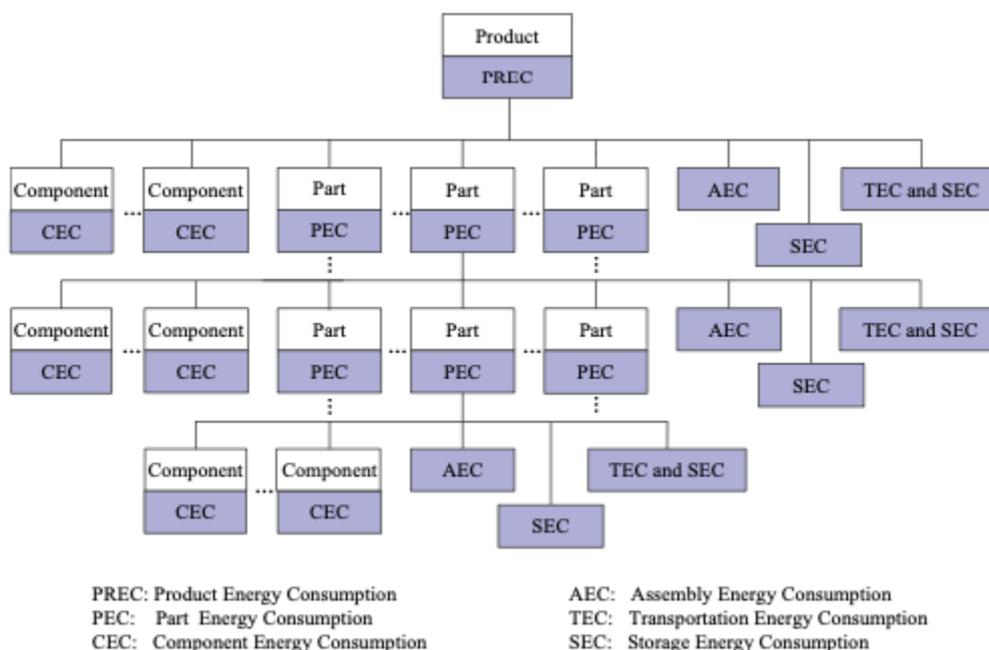


Figura 5.1 Componenti del consumo energetico di un prodotto di lavorazione [146]

Più livelli del benchmark energetico includono più livelli di oggetti e applicazioni. I prodotti di lavorazione, in generale, comprendono un certo numero di componenti e parti. Inoltre, una parte comprende un certo numero di componenti, il che indica che il prodotto di lavorazione, la parte e il componente possono avere rispettivamente un benchmark energetico con diversi livelli di benchmarking. Il benchmarking energetico per un componente o una parte è considerato un sottoinsieme del benchmarking energetico per il prodotto di lavorazione. Inoltre, il benchmark energetico di un componente è il livello più basso di benchmark energetico, noto anche come benchmark energetico di un pezzo, che rappresenta la base per lo sviluppo di un benchmark energetico per una parte o un prodotto di lavorazione. La definizione di un benchmark energetico è l'obiettivo principale per un impianto di lavorazione o un'azienda per iniziare uno studio di benchmarking energetico.

Inoltre, più livelli di applicazione del benchmarking energetico coinvolgono un'ampia gamma di industrie con vaste capacità produttive, con evidenti differenze nelle tecnologie di elaborazione, nelle apparecchiature di produzione e nei sistemi di gestione dell'energia per diverse regioni e aziende. Pertanto, il consumo energetico dei processi di lavorazione per ciascun pezzo o prodotto di lavorazione è ovviamente diverso, anche enormemente tra le diverse regioni e aziende. Per sviluppare un benchmark energetico ragionevole e avanzato per un pezzo, è necessario innanzitutto studiare il benchmarking energetico per l'impianto o l'azienda, per poi estendere il benchmarking al settore o a livello nazionale.

Il benchmarking energetico per i sistemi di lavorazione può rivelare caratteristiche di benchmarking attraverso strutture funzionali e modalità di applicazione per contribuire alla definizione e all'applicazione del benchmarking per la gestione dell'energia e il miglioramento dell'efficienza energetica.

Per costruire un quadro di benchmarking energetico sistematico per i sistemi di lavorazione, vengono proposti tre livelli di benchmarking energetico. Questi sono in particolare il livello di movimento, il livello dell'oggetto e il livello dell'applicazione:

- I benchmark energetici del livello di movimento vengono utilizzati per descrivere le caratteristiche del benchmark energetico in cui il movimento fornisce un feedback efficace per i requisiti di produzione e include il benchmarking dell'energia statica e dinamica.

Il benchmarking energetico statico è un approccio tradizionale che utilizza un semplice valore numerico per interpretare la relazione tra un prodotto e il suo consumo energetico, simile alla relazione tra la lavorazione di un pezzo e il consumo energetico di quel pezzo. Il consumo energetico non necessario del sistema può essere identificato

confrontando il consumo energetico effettivo con il benchmarking energetico. Il consumo di energia può essere ridotto identificando misure utili utilizzando il benchmarking energetico statico per limitare il consumo eccessivo di energia nel processo di lavorazione. La corrente di benchmarking dell'energia statica è uno degli approcci più utilizzati.

Il benchmarking energetico dinamico è un approccio più avanzato e rappresenta il continuo sviluppo del benchmarking energetico statico: non utilizza solo la funzione del benchmarking energetico statico, ma valuta anche il livello di consumo energetico del processo di lavorazione, determinando i gradi energetici standard attraverso un sistema di valutazione di benchmark, insieme alla progettazione di strategie per rafforzare ulteriormente il monitoraggio e la gestione dell'energia e miglioramenti dell'efficienza energetica.

- I benchmark energetici a livello di oggetto vengono utilizzati per adattare diversi obiettivi di produzione per migliorare la gestione dei consumi energetici relativi a diversi prodotti e comprendono benchmark energetici a obiettivo singolo e multi-obiettivo.

Il benchmarking energetico con obiettivo singolo è un approccio energetico convenzionale che considera solo il consumo energetico del processo produttivo per ottenere il minimo consumo energetico. Realisticamente, oltre al basso consumo energetico per il processo produttivo, l'industria di fabbricazione meccanica e i sistemi di lavorazione mirano anche a ridurre i costi di produzione, aumentare l'efficienza produttiva e migliorare il più possibile le prestazioni ambientali. Ciononostante lo sviluppo del benchmarking energetico dovrebbe tenere conto di una serie di obiettivi di produzione, fattori considerati nel benchmarking energetico multi-obiettivo. La quantificazione di questi obiettivi è però complessa: ad esempio, le prestazioni ambientali coinvolgono fattori ecologici, l'uso integrato delle risorse naturali, salute e sicurezza sul lavoro degli operatori; il tasso di completamento del prodotto è strettamente correlato alle incertezze temporali come il tempo di standby e il tempo di inattività, e queste incertezze sono spesso casuali e difficili da controllare. Pertanto, è importante come considerare questi obiettivi di produzione nel benchmarking energetico multi-obiettivo e quali metodi decisionali utilizzare.

- I benchmark energetici a livello di applicazione considerano i processi di produzione e gli attributi di consumo energetico che possono controllare efficacemente il consumo

energetico per l'intero processo di produzione e comprendono un benchmarking energetico basato sul prodotto e sul processo.

Questo tipo di benchmark comprende approcci energetici basati sui prodotti e sui processi. Il benchmarking energetico convenzionale è associato a un approccio basato sul prodotto, che analizza semplicemente le prestazioni energetiche di un prodotto target. Il benchmarking energetico basato sul prodotto utilizza un semplice valore numerico per interpretare la relazione tra un prodotto e il suo consumo energetico, simile alla relazione corrispondente tra la lavorazione di un pezzo e il valore del consumo energetico per un pezzo lavorato. Tramite il benchmarking energetico basato sul prodotto è possibile identificare il consumo energetico non necessario per l'intero processo di produzione confrontando il consumo energetico effettivo con il benchmark e identificando misure utili per ridurre l'uso non necessario. Ciò indica che i benchmark energetici basati sui prodotti riguardano solo il consumo totale di energia.

Il benchmarking energetico basato sui processi è incentrato sul benchmarking di ciascun processo e sottoprocesso. Comprende uno o più insiemi di alberi di dati energetici per il prodotto piuttosto che un semplice valore energetico e può considerare l'energia, il tempo o le informazioni di processo per ciascun processo e sottoprocesso. Inoltre, il benchmarking energetico basato sui processi non considera solo il consumo energetico totale del pezzo, ma evidenzia anche il consumo energetico di ciascun processo e sottoprocesso per ottenere una gestione dell'energia più efficace e miglioramenti dell'efficienza energetica.

Sebbene i benchmark energetici di movimento, oggetto e livello di applicazione abbiano ovvie differenze, essi sono strettamente correlati.

I metodi per stabilire il benchmarking energetico possono essere suddivisi in metodo di previsione, analisi statistica e metodo Delphi [146]. Il metodo di previsione si concentra sulla costruzione di un modello matematico per valutare in modo completo il consumo di energia; risulta meno complesso quando incentrato su un singolo obiettivo. Il metodo dell'analisi statistica viene invece utilizzato per acquisire un benchmarking energetico analizzando grandi quantità di dati di consumo energetico relativi ai pezzi. Tuttavia, l'acquisizione dei dati sul consumo energetico è piuttosto complessa, soprattutto per i pezzi non lavorati direttamente nell'impianto di lavorazione. Per quanto riguarda il metodo Delphi, il benchmarking energetico viene sviluppato analizzando e valutando i dati di benchmarking e consumo energetico precedenti per altri prodotti o pezzi che hanno caratteristiche simili per ciascun processo

produttivo. Tuttavia, questo metodo richiede una forte capacità professionale ed è difficile trovare prodotti (pezzi) e dati simili che corrispondano all'obiettivo del benchmarking.

Le differenze tra il metodo di previsione, l'analisi statistica e il metodo Delphi sono mostrate nella Tabella 5.1.

Metodo	Applicabilità	Mole dati richiesti	Requisiti modello	Affidabilità
Previsione	alta	alta	alti	buona
Analisi statistica	media	alta	medi	eccellente
Delphi	alta	bassa	bassa	bassa

Tabella 5.1 Differenze tra i metodi per valutare il benchmarking energetico (adattata da [146])

Per poter applicare efficacemente il benchmarking energetico devono essere istituiti database di consumo energetico come parte delle applicazioni industriali, ed essere costantemente aggiornati e analizzati. I database comprendono database di lavorazione, trasporto, ispezione, stoccaggio e imballaggio per poter fornire un uso a lungo termine dopo la loro creazione.

5.5 Utensili da taglio

Altri ricercatori si sono invece focalizzati sull'utensile da taglio, studiandone il materiale e cercando strategie per aumentarne l'utilizzo durante la lavorazione.

5.5.1 Materiale

Viene utilizzata un'ampia varietà di materiali per utensili da taglio per le lavorazioni ad asportazione di materiale in condizioni estreme di stress, temperatura e corrosione. Queste

condizioni impongono una velocità di deformazione molto elevata e questo limita la durata utile degli utensili da taglio, in particolare degli utensili da taglio a punta singola [32].

Il carburo di Tungsteno è il materiale per utensili da taglio più utilizzato, ma sfortunatamente i suoi elementi principali (Tungsteno e Cobalto) sono ad alto rischio in termini di approvvigionamento di materiale e sono elencati tra le materie prime critiche per l'UE. Per questo motivo, le ricerche dell'ultimo decennio si sono focalizzate sullo studio di materiali alternativi.

I materiali per utensili in ceramica sono la base delle lavorazioni HSC (High Speed Machining). Gli utensili in ceramica hanno una durata da tre a dieci volte maggiore rispetto agli utensili in metallo duro sinterizzato e possono lavorare almeno a velocità di taglio diverse volte superiori. Lo sviluppo della "lavorazione dura" e della tecnologia del taglio a secco è associato ai materiali ceramici [47].

HSM nasce dall'esigenza di accorciare i tempi di lavorazione degli elementi, di eliminare le imprecisioni derivanti dall'utilizzo di trattamenti di finitura manuali e di minimizzare i costi di produzione. HSM consente inoltre la lavorazione rapida ed efficiente di materiali duri (acciai inossidabili, leghe di titanio durevoli, acciai per utensili), stampi e lavorazione di elementi di stampi con un'elevata precisione di forma e superficie con bassa rugosità. Tutti questi vantaggi hanno un impatto sulla semplificazione dei lavori di costruzione in fase di progettazione. Inoltre, la lavorazione ad alta velocità garantisce un'elevata efficienza di asportazione, tempi di produzione più brevi, forze di taglio inferiori e deformazione ridotta del pezzo grazie alla notevole dissipazione del calore attraverso i trucioli. I vantaggi citati richiedono un'elevata rigidità e precisione del sistema della macchina utensile, lavorando con alte velocità del mandrino e utensili da taglio speciali (materiali e rivestimenti appropriati dell'utensile). Pertanto, i materiali con cui sono realizzati gli utensili sono uno dei fattori più importanti per la lavorazione ad alta velocità e devono garantire il funzionamento a lungo termine degli utensili. Il problema più grande è l'impatto negativo dell'elevata velocità di taglio sulla durata della lama dell'utensile. Le caratteristiche più importanti dei materiali per le lame da taglio sono l'elevata durezza e la resistenza all'abrasione in modo che l'utensile non richieda frequenti rigenerazioni. La proprietà necessaria del materiale da taglio è un'elevata resistenza ai carichi dinamici e alla frattura fragile. Quest'ultimo proteggerà la lama dalle scheggiature (derivanti, ad esempio, dall'eterogeneità delle proprietà del materiale o dall'insufficiente stabilità del mandrino della macchina). A causa del riscaldamento dell'utensile durante il funzionamento, il materiale dovrebbe mantenere le sue proprietà in un'ampia gamma di temperature. Per questo motivo una caratteristica favorevole del materiale è un elevato coefficiente di conducibilità

termica, poiché in tutti i casi di lavorazione è possibile utilizzare liquidi di raffreddamento. Un'ulteriore caratteristica del materiale dell'utensile è la resistenza chimica, escludendo la possibilità di reazione chimica con il materiale in lavorazione, e quindi la sua distruzione corrosiva. Oltre alle caratteristiche sopra menzionate, i materiali destinati alle lame da taglio dovrebbero essere lavorati in modo efficace, garantendo forma e dimensioni adeguate, soprattutto per le lame degli utensili. Tutti gli utensili da taglio in ceramica hanno un'eccellente resistenza all'usura ad alte velocità di taglio.

I materiali ceramici presentano però alcuni svantaggi, non essendo facilmente lavorabili e malleabili. Pertanto, gli inserti da taglio realizzati con questi materiali hanno solitamente la forma di un cerchio, triangolo, rombo o quadrato.

La fragilità e la scarsa tolleranza ai danni hanno finora limitato la loro applicazione come materiali di ingegneria avanzata. Il problema è che la bassa resistenza agli shock termici di questi materiali implica l'utilizzo di un'enorme quantità di liquido di raffreddamento durante il processo di lavorazione. Le buone proprietà di taglio dipendono dalla resistenza termica del materiale o dall'uso di fluidi di processo lubrorefrigeranti. Le soluzioni innovative per la ceramica degli utensili da taglio porteranno allo sviluppo di ceramiche che presentano una maggiore durezza, tenacità alla frattura, calore e resistenza all'usura rispetto alle soluzioni precedenti. I nuovi materiali avranno un'elevata stabilità termica, un'elevata resistenza alla corrosione e all'usura, un'elevata tenacità alla frattura e saranno ottenuti con l'obiettivo di sostituire completamente i materiali duri attualmente disponibili.

I fluidi da taglio sono ampiamente utilizzati nei processi di lavorazione, in particolare per gli utensili da taglio in ceramica. I ruoli principali del fluido da taglio sono il raffreddamento, la riduzione dell'attrito, la rimozione delle particelle metalliche e la protezione del pezzo, dell'utensile e della macchina utensile dalla corrosione. Una nuova idea è quella di ottenere materiali da taglio ceramici autolubrificanti con l'aggiunta di lubrificanti solidi. Gli agenti di scorrimento solidi dovrebbero essere caratterizzati da un basso coefficiente di attrito e resistenza all'ossidazione a temperature superiori a 800 °C.

Ci sono infine i materiali duri come diamante e nitruro di boro, meno utilizzati rispetto alle ceramiche, progettati per la lavorazione di materiali difficili da tagliare. Il diamante viene utilizzato per i metalli non ferrosi, mentre il nitruro di boro viene utilizzato per gli acciai temprati.

5.5.2 Aumento dell'utilizzo dell'utensile

Durante operazioni quali fresatura e tornitura, gli utensili da taglio sono comunemente usati in modo tale da provocare l'usura del tagliente principale, mentre l'usura del tagliente minore è relativamente piccola o quasi inesistente [32]. La durata dell'utensile potrebbe quindi essere notevolmente aumentata utilizzando lo stesso inserto in un'operazione di lavorazione secondaria. Un cambiamento nella configurazione dell'utensile consentirebbe di utilizzare il tagliente minore precedentemente leggermente usurato come un "nuovo" tagliente principale. Sono già disponibili prodotti commerciali basati su questo principio, ma sono state pubblicate poche ricerche sugli effetti dell'utilizzo di questo metodo sull'utensile da taglio e sulla superficie lavorata.

Un metodo alternativo per aumentare la durata dell'utensile prevede il cosiddetto processo di taglio dell'utensile rotante, che si è dimostrato applicabile sia alle operazioni di tornitura che a quelle di fresatura. È stato dimostrato che un utensile da taglio rotante è in grado di lavorare materiali difficili da lavorare. Sebbene il processo di taglio con utensili rotanti mostri un grande potenziale, è limitato all'uso di inserti rotondi. Ciò porta alla necessità di ulteriori studi di metodi alternativi per migliorare la durata dell'utensile per i processi che richiedono altre forme dell'utensile.

Per quanto riguarda la fresatura, è pratica comune far ruotare la fresa in una sola direzione durante la produzione convenzionale. Ciò fa sì che la maggior parte dell'usura dell'utensile si verifichi sul tagliente principale, mentre il tagliente minore è solo leggermente usurato vicino al raggio di punta. Se la direzione di rotazione della fresa viene invertita dopo l'operazione iniziale, i taglienti maggiore e minore si scambiano di posto e per la lavorazione è possibile utilizzare un tagliente maggiore "nuovo", leggermente usurato. Ciò avviene, naturalmente, a condizione che venga utilizzata una testa di fresatura appropriata per il nuovo senso di rotazione. È quindi teoricamente possibile aumentare significativamente la durata dell'utensile. Le operazioni di tornitura risultano più complesse. Analizzando ad esempio un'operazione di tornitura longitudinale utilizzando un unico utensile da taglio, entrambi i lati del raggio di punta risultano particolarmente usurati. Per ridurre l'usura, l'utensile da taglio viene prima fatto avanzare in una direzione; quando l'utensile da taglio è considerato usurato, la direzione di avanzamento viene invertita.

Conclusioni

È noto che con la tendenza dei cambiamenti ambientali e climatici degli ultimi 30 anni, si sta entrando in una rivoluzione sostenibile che presenterà molti problemi da affrontare.

Tuttavia, è chiaro che le diverse strategie dovrebbero essere combinate in modo sinergico con un nuovo modo di pensare i prodotti finali, attraverso la progettazione ecocompatibile di materiali, strumenti e metodi di produzione per favorire l'integrazione di buone pratiche e abitudini nell'economia circolare.

Dal punto di vista delle tecnologie di produzione, le modalità per migliorare le prestazioni di sostenibilità possono essere riassunte come segue:

- ridurre il consumo energetico dei processi di lavorazione;
- ridurre al minimo gli sprechi, generando meno rifiuti;
- adottare pratiche di riutilizzo e riciclo;
- utilizzare le risorse in modo più efficiente;
- utilizzare materiali riciclabili e riutilizzare componenti di macchine utensili;
- migliorare la gestione dei fluidi per la lavorazione dei metalli, trucioli, oli lubrificanti e oli idraulici (migliori prestazioni ambientali, sanitarie e di sicurezza);
- adottare metodi di valutazione LCA.

Un elemento chiave della sostenibilità è la minimizzazione dell'uso delle risorse naturali. Ciò significa utilizzare risorse non rinnovabili in modo efficiente e sviluppare alternative per sostituirle in futuro, utilizzando risorse rinnovabili in forme che non mettano in pericolo le risorse o causino inquinamento. Le principali risorse di interesse nelle tecnologie di produzione sono i metalli utilizzati nei processi di lavorazione, fluidi/oli lubrificanti, oli idraulici, acqua, energia.

Nella Figura 6.1 viene rappresentato il trend che le aziende mondiali dovrebbero seguire affinché si possano raggiungere gli obiettivi di sostenibilità ambientale nel più breve tempo possibile.

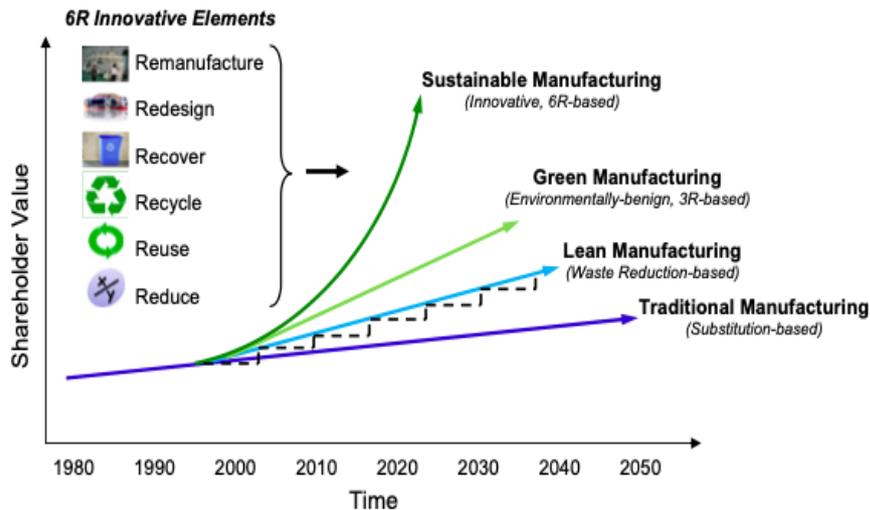


Figura 6.1 Trend dei prossimi anni per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità [31]

Dall'analisi dei modelli energetici presentati nel Capitolo 2, è emerso che attualmente i dati energetici non sono considerati parte integrante della pianificazione e dell'ottimizzazione dei processi. Gli studi sull'ottimizzazione energetica sono condotti principalmente nella pianificazione dei processi e nella programmazione della produzione ad alta efficienza energetica. La maggior parte delle ricerche viene svolta per affrontare un ostacolo specifico nella produzione, che a volte non è applicabile a un altro processo. Ciò è dovuto anche al fatto che all'ottimizzazione esistente sono stati applicati modelli dettagliati limitati. Esiste un divario di integrazione tra i sistemi informativi aziendali e il livello di produzione, che potrebbe essere colmato da un monitoraggio continuo delle informazioni energetiche. È possibile ottenere una notevole riduzione del consumo energetico attraverso un attento monitoraggio e un'analisi dei modelli energetici.

In sintesi, dall'analisi effettuata è emerso che:

- la maggior parte dei modelli energetici sviluppati sono stati validati solo su alcune lavorazioni tipiche come fresatura, tornitura e foratura. Altri tipi di sistemi di produzione, che comportano processi di produzione più energivori, richiedono maggiori sforzi di ricerca.
- Il miglioramento del livello di efficienza energetica di una macchina utensile è un altro argomento in cui sono presenti lacune. Per sviluppare e mettere a punto un sistema di lavorazione per migliorare le operazioni quotidiane, sono necessari sistemi e tecniche di monitoraggio più avanzati per trasmettere il giusto set di dati in modo tempestivo. Il

monitoraggio dei dati in tempo reale è facilitato dall'uso di sensori e analisi dei dati. L'uso di tali tecnologie rappresenta una sfida per le industrie, in particolare le PMI, a causa degli elevati costi di investimento e della complessità. La ricerca futura dovrebbe concentrarsi sullo sviluppo e l'implementazione di sensori a basso costo, utilizzando tecnologie standard per l'acquisizione dei dati e il monitoraggio in tempo reale.

- Mancano approcci convergenti per la modellazione e l'ottimizzazione dei processi di lavorazione sostenibili.
- Non è possibile formulare un modello energetico onnicomprensivo che consideri anche le variabili aleatorie, come i guasti macchina (comprese le unità ausiliarie) o l'usura prematura dell'utensile dovuta a condizioni non prevedibili.
- Si manifestano lacune sul sistema di gestione dell'energia. È necessario sviluppare e attuare metodi di rappresentazione e scambio dei dati standardizzati o comunemente accettati per supportare sistemi efficienti dal punto di vista energetico.

Nello sviluppo futuro, un sistema di lavorazione ad alta efficienza energetica dovrebbe incorporare i seguenti elementi:

- Una modellazione energetica alternativa, basata sull'exergia (definita come la misura dell'incremento entropico di un sistema) o sull'emergia (definita come la quantità di energia consumata nelle trasformazioni dirette e indirette per realizzare un prodotto). Sebbene più complicati, questi due diversi approcci appaiono più completi e puntuali di quello energetico, più diffuso in quanto più semplice da calcolare.

Nel 2006, Gutowski et al. [138] hanno formulato il modello anche dal punto di vista exergetico incorporando la conversione delle materie prime di lavorazione in prodotti e la conversione dei combustibili in calore, rifiuti ed emissioni. Si noti però che, al fine di valutare appieno le prestazioni dei processi di fabbricazione, i confini del sistema per questa valutazione dovrebbero includere non solo il processo di fabbricazione in sé, ma anche la produzione dei materiali (materiali di lavoro e ausiliari non combustibili) necessari per il processo. L'analisi exergetica richiede quindi un vasto set di dati non sempre facilmente reperibili.

Nella maggior parte degli studi sulla modellazione, l'attenzione è quindi posta sui requisiti di energia elettrica del processo di fabbricazione. È più conveniente pensare a un processo di fabbricazione come composto da un insieme di attrezzature necessarie per eseguire le fasi del processo, considerando l'attrezzatura principale utilizzata per il

processo di lavorazione e incorporando eventualmente ad essa le attrezzature ausiliarie che vengono utilizzate, caratterizzandole allo stesso modo di quelle principali.

- Un sistema avanzato di misurazione e monitoraggio dell'energia per fornire misure di efficienza energetica sufficienti.
- Un modo più intelligente per selezionare e integrare diversi sensori e fusione di diversi dati di sensori.
- Analisi completa dei dati relativi al consumo di energia e analisi in tempo reale per supportare l'ottimizzazione, il controllo e la pianificazione dei parametri di taglio.
- Sistema di controllo per macchine utensili CNC per fornire un controllo intelligente, robusto e adattativo in modo efficiente dal punto di vista energetico;
- Un database completo, che comprende macchine utensili, utensili da taglio, materiali e riferimenti energetici, per supportare la stima e l'ottimizzazione accurate dell'energia e consolidare le conoscenze specialistiche delle operazioni efficienti dal punto di vista energetico.

Dalla letteratura esaminata nel Capitolo 2 e nel Capitolo 3, si può concludere che un controllo orientato al processo dello stato operativo e dell'alimentazione del fluido da taglio, nonché l'ottimizzazione dei parametri di processo, sono approcci promettenti per ridurre la domanda di energia delle macchine utensili in funzione. La scelta dei parametri di processo influisce in modo significativo sull'energia richiesta per il processo di taglio. Una raccomandazione generale potrebbe essere quella di aumentare il tasso di asportazione del materiale e, quindi, la produttività, mantenendo la qualità richiesta. Occorre però tenere presente che maggiori velocità di avanzamento e di taglio influiscono sull'usura degli utensili e possono portare a maggiori temperature di lavorazione, che, a loro volta, hanno un impatto negativo sulla domanda energetica complessiva. In generale, si manifestano lacune sugli effetti combinati dei parametri dell'utensile da taglio (materiali dell'utensile, rivestimenti dell'utensile e geometria dell'utensile, compresa la geometria del tagliente e le configurazioni di formazione del truciolo) e gli effetti di questi parametri sulle prestazioni di lavorazione (forze di taglio, usura/durata dell'utensile, rugosità e integrità della superficie, forma/rottura del truciolo).

Nel corso degli ultimi 30 anni sono stati sviluppati molti modelli per supportare una selezione efficiente dal punto di vista energetico dei parametri di processo. Tuttavia, la definizione dei coefficienti specifici di alcuni modelli rimane spesso poco chiara. Inoltre, si può affermare che semplici modelli lineari basati sulla velocità di rimozione del materiale trascurano diversi aspetti specifici del processo. In particolare, non vengono prese in considerazione le

interdipendenze tra i parametri di processo e le caratteristiche di parti e utensili. Al contrario, i modelli più sofisticati riflettono molto meglio le caratteristiche specifiche del processo della domanda di energia. Tuttavia, la parametrizzazione è più impegnativa e la trasferibilità ad altri processi è molto limitata. A causa di questi problemi, i modelli della domanda di energia sono usati raramente nella pianificazione dei processi al giorno d'oggi.

Dall'analisi delle differenti lavorazioni analizzate nel Capitolo 4, si può concludere che la lavorazione a secco, sebbene la più sostenibile, ha ottenuto un successo limitato, potendo essere applicata solo per la lavorazione di alcuni tipi di materiali e in determinati processi di lavorazione. Per quanto riguarda gli utensili da utilizzare, la ricerca si è concentrata su materiali in ceramica e carburo di dimensioni nanometriche, nano rivestimenti multistrato di ceramica, Nitruro di Titanio alluminio, CBN, diamante e molti altri materiali duri, nonché rivestimenti autolubrificanti. I processi di lavorazione assistita o ibrida come la lavorazione assistita da laser, la lavorazione assistita da vibrazioni ultrasoniche e altri processi di lavorazione non tradizionali hanno mostrato risultati promettenti in una riduzione o eliminazione completa dell'uso dei fluidi da taglio. L'elevato costo delle apparecchiature sembra essere attualmente il principale deterrente nella commercializzazione di queste tecniche.

Il taglio a secco risulta limitato alla lavorazione di materiali a bassa resistenza che possiedono una buona lavorabilità in fresatura, tornitura e foratura poco profonda con parametri di taglio moderati. L'ambito della lavorazione a secco è stato ampliato con l'applicazione di materiali e rivestimenti avanzati per utensili, in grado di resistere a temperature di taglio elevate. La lavorazione assistita da laser è un'altra direzione che è stata esplorata dai ricercatori per ridurre l'utilizzo dei fluidi da taglio. Laddove non è stata possibile l'eliminazione completa dei fluidi da taglio, la lavorazione con lubrificazione a quantità minimale è stata applicata con successo in molti processi di taglio dei metalli.

L'alternativa emersa come la più praticabile rispetto alla lavorazione a secco è la lubrificazione a quantità minimale, nonostante presenti alcuni svantaggi come i costi elevati e l'assunzione di operai esperti per l'utilizzo dei dispositivi di erogazione. Il metodo MQL richiede la formazione di goccioline lubrificanti abbastanza piccole da entrare nella zona di taglio, comunque maggiori di 5-10 μm . Altrimenti, le particelle di liquido rimangono nell'aria comportando rischi per la salute dell'operatore di macchina. Per questo motivo si sta cercando una lavorazione MQL assistita da nanofluidi da taglio, che sembra essere vantaggiosa nel fornire una migliore lubrificazione in quanto le nano particelle sono in grado di impedire che l'olio venga rilasciato immediatamente dalla zona di taglio.

Le tecniche più innovative, ma ancora acerbe, di lavorazione MQL sono quelle che prevedono l'utilizzo di fluidi ionici, o una lavorazione ibrida prevedendo il raffreddamento tramite tecniche criogeniche o aria compressa. Altri studi si stanno invece focalizzando sulle componenti dell'impianto MQL (ad esempio diametro e design dell'ugello), o tecniche innovative come il passaggio dall'ugello da singolo a doppio.

È necessario comunque eseguire un'indagine sull'interazione dello spray con l'ambiente circostante, sull'inalazione di goccioline, sulla proporzione di oli/fluidi impiegati, sull'ottimizzazione dei parametri MQL come angolo di spruzzo, sulla distanza di sicurezza e sul rapporto di olio e acqua.

Per quanto riguarda l'ottimizzazione discussa nel Capitolo 5, sono emersi metodi per ridurre il consumo energetico delle macchine utensili che fanno affidamento allo scheduling e a problemi di ottimizzazione multiobiettivo, includendo quindi non solo il consumo energetico ma anche ulteriori aspetti come la qualità, la produttività e il tempo ciclo. I metodi di schedulazione considerano i diversi stati della macchina utensile, che hanno diversi tassi di consumo energetico. I metodi di ottimizzazione aggiornano lo stato dei jobs delle macchine in base alla modellazione di ottimizzazione energetica e generano la stima della pianificazione ottimale.

Negli ultimi 15 anni sono stati inoltre sviluppati approcci CAM, in cui il software simula principalmente la rimozione del materiale e le operazioni principali delle lavorazioni, suggerendo il valore più efficiente dei parametri di lavorazione da impostare. La precisione di queste simulazioni dipende dalla mole e dalla precisione dei dati misurati, e non sempre riescono a fornire una previsione affidabile del consumo.

Per quanto concerne il benchmarking energetico, benchè questa Tesi si sia focalizzata sulle lavorazioni ad asportazione di materiale, sarebbe utile operare un confronto tra lavorazioni sottrattive e lavorazioni additive. In una visione più olistica e in un confronto con altre tecnologie abilitanti alla transizione verso l'industria 4.0, non va dimenticato che l'analisi andrebbe effettuata dal punto di vista dell'economia circolare, considerando il sistema di asportazione materiale come un tassello del ciclo di vita del prodotto.

Nel complesso, è evidente che sulla strada verso una lavorazione sostenibile sono stati compiuti sforzi significativi sia da parte delle istituzioni accademiche che da parte delle industrie. La lavorazione a basso consumo energetico è un imperativo per la produzione sostenibile, che merita attenzioni significative da parte di qualsiasi organizzazione che voglia rimanere competitiva nel mercato globale. Modelli energetici consolidati, metodi di ottimizzazione

energetica rapidi ed efficaci e un corretto utilizzo dei dati miglioreranno sicuramente i processi di lavorazione ad asportazione di materiale, rendendoli ancora più efficienti dal punto di vista ambientale, sociale ed energetico.

Appendice

Appendice 1

Tabella dei modelli Black-Box

Legenda:

- E : consumo energetico totale
- E_{cut} : consumo energetico per l'operazione di taglio
- E_{part} : consumo energetico della parte lavorata
- VB : usura lato utensile
- V_{part} : volume della parte lavorata
- D diametro utensile
- P : potenza totale
- P_0 : potenza inattiva
- \underline{P} : potenza di taglio media
- P_{fix} : potenza fissa assorbita dalla macchina
- P_m : potenza assorbita dal mandrino
- P_{idle} : potenza inattiva
- v_a : velocità di avanzamento
- v_c : velocità di taglio
- v_w : velocità del pezzo da lavorare
- d : profondità di taglio
- B : lunghezza contatto utensile
- z : numero di avanzamenti
- r : rendimento macchina utensile
- SEC : energia specifica consumata
- F_t : forza tangenziale
- Z : numero di denti della fresatrice
- k : costante della forza di taglio
- C : spessore medio del truciolo
- μ : coefficiente di attrito tra il pezzo e l'utensile

- η : efficienza di taglio
- H: durezza su scala Brinell
- ϕ : angolo di immersione
- ϕ_{in} angolo di taglio quando un dente della fresatrice penetra nel materiale del pezzo
- t_c : tempo di taglio
- t_w : tempo di attesa del prossimo job
- t_s : tempo di setup
- t_g : tempo di cambio utensile
- T: durata utensile
- C_0 : coefficiente specifico della macchina utensile
- C_1 : coefficiente specifico della macchina utensile
- k_1 : coefficiente in funzione del motore del mandrino
- k_2 : coefficiente costante legato all'utensile
- MRR: tasso di asportazione di materiale

Anno	Autori	Parametri input	Parametri output	Commenti
1990	Cuppini et al.	VB	P_c	a parte l'utensile, non viene considerato nessun altro aspetto
2002	Draganescu et al.	D, v_a , d, B, z, F_t , r	SEC	non considera le unità ausiliarie
2004	Shao et al.	Z, D, k, C, v , H, ϕ , ϕ_{in} , VB	P	non considera le unità ausiliarie, difficoltà nel calcolo degli angoli
2006	Gutowski et al.	P_0 , k, t_c , MRR	E	P_0 non è definito, k non è considerato in funzione dei parametri di processo

2014	He et al.	$P_0, t_w, t_s, t_g, t_c, k, MRR$	E	P_0 non è definito, k non è considerato in funzione dei parametri di processo, vengono però considerati i job
2011	Kara e Li	C_0, C_1, MRR	SEC	C_0 e C_1 difficili da stimare correttamente, non considera le unità ausiliarie
2012	Guo et al.	C_0, C_1, v_c, v_a, d, D	SEC	estende Kara e Li per la tornitura, ma presenta limitazioni simili
2013	Li et al.	C_0, k_1, k_2, v_c, MRR	SEC	considera le operazioni di taglio e non, considera la potenza del mandrino
2014	Guo et al.	$v_w, v_a, d, v_c, C_0, C_1, D$	SEC	estende Kara e Li per la rettifica, ma presenta limitazioni simili
2015	Liu et al.	$C_0, C_1, MRR, \underline{P}$	SEC	estende Li et al. del 2013, modello più preciso in quanto più sensibile alle variazioni dei parametri di taglio durante la fresatura
2016	Zhao et al.	k_0, k_1, k_2, MRR, v_c	SEC	migliorano Li et al. del 2013, tralasciano cambio

				e usura dell'utensile
2016	Zhong et al.	d, k, MRR, v_c	SEC	modello valido per MRR costante e variabile
2017	Zhou et al.	MRR, \underline{P}	SEC	migliorano Kara e Li del 2011 analizzando l'effetto di v_c su SEC
2018	Asrai et al.	v_a, v_c, MRR	P	modello complesso
2019	Shi et al.	$MRR, P_{idle}, \underline{P}, \eta$	SEC	ingloba Gutowski et al. del 2006 e Li et al. del 2013, considera la maggior parte dei parametri di taglio
2014	Velchev et al.	$SEC, MRR, t_c, t_g, P_0, T$	E	considera gli effetti dell'utensile (cambio e durata), non considera le unità ausiliarie
2015	Xie et al.	MRR, P_m	SEC	il modello si adatta a seconda della fase del processo di lavorazione
2015	Jia et al.	v_c, v_a, d	E	considera gli impatti dei parametri di taglio sull'energia di taglio del materiale oltre che il cambiamento dinamico della

				potenza di taglio del materiale
2018	Shi et al.	P_0, VB, \underline{P}	P	considera l'usura dell'utensile durante la lavorazione, non vengono considerate le unità ausiliarie
2019	Wang et al.	E_{part}, V_{part}	SEC	lavorazione del pezzo da una prospettiva olistica, modello che non considera tutte le componenti energetiche del pezzo (come il suo percorso)
2021	Pawanr et al.	v_a, v_c, d	E_{cut}	considera MRR variabile, vengono trascurate le unità ausiliarie

Appendice 2

Tabella dei modelli Bottom-Up

Legenda:

- P_m : potenza della lavorazione
- P_f : potenza per avviare il motore del mandrino
- P_c : potenza di taglio
- P_{pd} : potenza per la rimozione dello strato più esterno del pezzo
- P_{fr} : potenza a livello utensile-truciolo
- P_{ff} : potenza a livello utensile-pezzo

- P_{ch} : potenza per la formazione di nuove superfici
- P_{mn-ce} : potenza per l'asportazione di materiale dall'area del pezzo che oppone meno resistenza
- P_{air} : potenza a vuoto
- P_o : potenza dei moduli macchina
- P_s : potenza in standby
- P_{ca} : perdita di carico aggiuntiva
- P_1 : consumo energetico costante durante il funzionamento della macchina
- P_2 : potenza assorbita dal mandrino e dal servomotore per il taglio
- P_3 : potenza assorbita per posizionare il pezzo e per accelerare/decelerare il mandrino alla velocità desiderata
- P_b : potenza stato base
- P_r : potenza preparazione al taglio
- P_{cool} : potenza pompa refrigerante
- t_s : tempo di setup
- t_c : tempo di taglio
- t : tempo per il cambio utensile
- t_b : tempo stato base
- t_r : tempo preparazione al taglio
- t_{air} : tempo taglio a vuoto
- k : energia specifica di taglio
- v : tasso asportazione materiale
- y_e : tempo di setup
- T : durata utensile
- E_m : energia della lavorazione
- E_{aY} : energia per accelerare il mandrino lungo l'asse y
- E_{sY} : energia del mandrino durante lo stato stazionario sull'asse y
- E_{dY} : energia per decelerare il mandrino lungo l'asse y
- E_{run} : energia del mandrino nello stato stazionario
- E_{cut} : energia di taglio
- E_{const} : energia non legata alla lavorazione
- E_{rts} : energia stato stazionario
- E_{rtt} : energia stato transitorio
- E_{up} : energia unità ausiliarie

- E_{us} : processi macchina non direttamente imputabili al processo di lavorazione
- E_{loss} : energia dissipata a causa delle inefficienze
- $E_{spindle}$: energia del mandrino
- E_{feed} : energia avanzamento degli assi
- E_{tool} : energia cambio utensile
- E_{cool} : energia pompa refrigerante
- E_{lub} : energia sistema lubrificante
- E_{fix} : energia fissa per il mantenimento degli stati operativi della macchina
- E_{axes} : energia per muoversi lungo gli assi
- E_{axes-c} : energia per refrigerare lungo gli assi
- $E_{spindle-c}$: energia dei refrigeratori del mandrino
- E_{chip} : energia per l'asportazione del truciolo
- E_{pallet} : energia serraggio pezzo
- $E_{background}$: energia di fondo
- E_{load} : energia di carico
- E_{th} : energia teorica
- $E_{aux-var}$: energia ausiliaria variabile
- $E_{aux-constr}$: energia ausiliaria costante
- $E_{handling}$: energia per spostare il pezzo
- $E_{indirect}$: energia indiretta allocata per il mantenimento dell'ambiente di lavoro
- E_{basic} : energia per avviare la macchina e prepararla a operare
- E_{stage} : energia nelle fasi di non taglio
- E_{feed} : energia nelle fasi di avanzamento
- E_{setup} : energia per il setup
- $E_{tool-ut}$: energia per usura dell'utensile
- E_{piece} : energia del pezzo lavorato
- E_{nano} : energia nanoparticelle
- E_{clean} : energia per la pulizia
- E_{waste} : energia smaltimento rifiuti
- $E_{operator}$: energia del pezzo lavorato
- T_1 : tempo ciclo durante lo stato di non taglio
- T_2 : tempo ciclo durante stato di taglio
- T_3 : tempo necessario per posizionare il pezzo e per accelerare il mandrino
- T_{tot} : tempo processo

Anno	Autori	Parametri input	Parametri output	Commenti
2007	Xu et al.	P_c, P_f	P_m	l'operazione di asportazione viene semplificata eccessivamente
2008	Astakhov e Xiao	$P_{pd}, P_{fR}, P_{fF}, P_{ch}, P_{mn-cc}$	P_c	considera solo l'operazione di taglio
2010	Rajemi et al.	$P_o, t_s, t_c, t_t, k, v, y_e, T$	E_m	tralascia le operazioni di taglio a vuoto e quelle ausiliarie
2010	Hu et al.	P_s, P_c, P_{ca}	P_m	considera le perdite di carico aggiuntive ma traslascia i consumi energetico dei componenti ausiliari
2010	Avram e Xirouchakis	$E_{aY}, E_{sY}, E_{dY}, E_{run}, E_{cut}$	E_m	non considera i componenti ausiliari
2011	Mori et al.	$P_1, P_2, P_3, T_1, T_2, T_3$	E_m	non valido per tutte le operazioni, trascura le unità ausiliarie
2011	Diaz et al.	P_c, P_{air}, T_{tot}	E_m	non tiene considera la potenza per l'avviamento e la potenza delle unità ausiliarie
2011	Kong et al.	$E_{cut}, E_{const}, E_{rts}, E_{rtt}$	E_m	non considera gli effetti dei cambi

				utensile, del movimento individuale dell'asse di avanzamento e del refrigerante
2011	Neugebauer et al.	$E_{upt}, E_{us}, E_{loss}$	E_m	modello impreciso
2012	He et al.	$E_{spindle}, E_{feed}, E_{tool}, E_{cool}, E_{fix}$	E_m	non è valido per tutte le macchine utensili e non riesce a modellare il consumo di energia relativo al numero di cambi utensile, ai cambi di velocità del mandrino e ai sistemi di monitoraggio
2012	Balogun e Mativenga	$P_b, P_r, P_{cool}, t_b, t_r, t_{air}, k, v$	E_m	non risulta valido per tutte le macchine utensili e trascura l'energia consumata dall'asse della macchina e la sua dipendenza dagli assi e dal piano di interpolazione
2013	Calvanese et al.	$E_{fix}, E_{axes}, E_{axes-c}, E_{spindle}, E_{spindle-c}, E_{chip}, E_{tool}, E_{pallet}$	E_m	non considera l'effetto dell'usura dell'utensile del movimento su più assi
2013	Salonitis e Ball	$E_{cut}, E_{background}, E_{load}$	E_m	non fornisce informazioni

				dettagliate sul consumo energetico di tutte subunità ausiliarie, trascurando le operazioni di taglio a vuoto
2013	Uluer et al.	$E_{yh}, E_{aux-var}, E_{aux-const}, E_{handling}, E_{indirect}$	E_m	non è stato eseguito alcun esperimento di convalida
2013	Yoon et al.	$E_{basic}, E_{stage}, E_{spindle}, E_{cut}$	E_m	non considera il cambio utensile e le unità ausiliarie durante l'asportazione
2014	Liu et al.	$E_{basic}, E_{stage}, E_{cut}$	E_m	non considera il cambio utensile e le unità ausiliarie
2014	Aramcharoen e Mativenga	$E_{basic}, E_{tool}, E_{feed}, E_{cut}, E_{spindle}, E_{cool}$	E_m	non considera tutte le unità ausiliarie
2016	Priarone et al.	$E_{setup}, E_{cut}, E_{tool}, E_{tool-ut}, E_{piece}, E_{cool}$	E_m	non considera tutte le unità ausiliarie
2018	Jia et al.	$E_m, E_{operator}$	E_{tot}	unico modello a considerare anche il contributo dell'operatore macchina, senza però considerarne tutti gli aspetti
2018	Bagager e Yusoff	$E_{basic}, E_{setup}, E_{stage}, E_{cut}, E_{tool}, E_{cool}$	E_m	non considera l'usura dell'utensile e tutte le unità ausiliarie
2020	Khan et al.	$E_{basic}, E_{setup}, E_{stage},$	E_m	modello

		E_{cut} , E_{tool} , E_{lub} , E_{picce} , $E_{tool-ut}$, E_{fix} , E_{cool} , E_{nano} , E_{clean} , E_{waste}		onnicomprensivo ma con alcune componenti difficili da stimare
--	--	---	--	--

Appendice 3

Analisi dei principali oli vegetali

Olio	Densità (g/mL)	Indice di viscosità	Punto di infiammabilità (°C)	Vantaggi
Cocco	0.915	155	20	Presenta prestazioni migliori nel ridurre l'usura utensile, la temperatura di tornitura e rugosità superficiale
Palma	0.910	189	12	ha prestazioni superiori rispetto all'olio minerale nel ridurre l'usura e controlla notevolmente l'emissione di CO e HC
Girasole	0.890	205	-15	penetra in modo più efficace dell'olio solubile e mostra migliore lubrificazione e raffreddamento durante le operazioni di

				rettifica
Soia	0.907	224	-12	ottimo refrigerante
Ricino	0.970	85	-31	risultati migliori rispetto al taglio a secco in termini di lubrificazione, durata dell'utensile, capacità di raffreddamento e rugosità superficiale
Arachide	0.914	144	3	riduce la forza di taglio di circa il 51% e le vibrazioni sugli utensili
Colza	0.918	208	-21	completamente biodegradabile
Burro di karité	0.927	-	3	Migliora la qualità di taglio e riduce le forze di taglio
Crusca di riso	0.920	210	-31	riduce la temperatura della punta dell'utensile, la rugosità superficiale e le forze di taglio
Oliva	0.912	-	-9	fornisce una migliore qualità superficiale
Mostarda	0.917	105-159	-18	ottime caratteristiche termo-ossidative e di scorrimento a freddo

Avocado	0.920	-	-	buone proprietà di raffreddamento e lubrificazione
Neem	0.910	40	7	fornisce risultati migliori in termini di riduzione della forza di taglio, garantisce un ambiente con meno rischi
Karanja	0.912	-	-6	estensione durata utensile
Jojoba	0.849	242	9	rugosità superficiale migliore

Bibliografia

- [1] Vijayaraghavan, D. Dornfeld, 2010. Automated energy monitoring of machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010) 21–24.
- [2] Ampara Aramcharoen, Paul T. Mativenga, 2014. Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy. *Journal of Cleaner Production* 78 (2014) 63-74.
- [3] Amr Salem, Hussien Hegab, Hossam A. Kishawy, 2020. An integrated approach for sustainable machining processes: Assessment, performance analysis, and optimization. *Sustainable Production and Consumption* 25 (2021) 450–470.
- [4] Antonella Rizzo, Saurav Goel Maria Luisa Grilli, Roberto Iglesias, Lucyna Jaworska, Vjaceslavs Lapkovskis, Pavel Novak, Bogdan O. Postolnyi, Daniele Valerin, 2020. The Critical Raw Materials in Cutting Tools for Machining Applications: A Review. *Materials* 2020, 13(6), 1377.
- [5] Aqib Mashood Khan, Muhammad Jamil Mozammel Mia, Ning He, Wei Zhao, Le Gong, 2020. Sustainability-based performance evaluation of hybrid nanofluid assisted machining. *Journal of Cleaner Production* 257 (2020) 120541.
- [6] Aqib Mashood Khan, Ning He, Muhammad Jamil, Syed Muhammad Raza, 2020. Energy characterization and energy-saving strategies in sustainable machining processes: A state-of-the-art review. *Journal of Production Systems and Manufacturing Science*.
- [7] Aqib Mashood Khan, Saqib Anwar, Munish Kumar Gupta, Abdullah Alfaify, Saqib Hasnain, Muhammad Jamil, Mozammel Mia, Danil Yurievich Pimenov ,2020. Energy-Based Novel Quantifiable Sustainability Value Assessment Method for Machining Processes. *Energies* 2020, 13, 6144.
- [8] Berend Denkena, Eberhard Abele, Christian Brecher, Marc-Andre Dittrich, Sami Kara, Masahiko Mori, 2020. Energy efficient machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 69 (2020) 646-667.
- [9] Bing Wang, Zhanqiang Liu, Qinghua Son, Yi Wan, Zhenyu Shi, 2016. Proper selection of cutting parameters and cutting tool angle to lower the specific cutting energy during high speed machining of 7050-T7451 aluminum alloy. *Journal of Cleaner Production* 129 (2016) 292-304.

- [10] Carmita Camposeco-Negrete, 2014. Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminum. *Journal of Cleaner Production* 91 (2015) 109-117.
- [11] Changle Tian, Guanghui Zhou, Junjie Zhang, Chao Zhang, 2019. Optimization of cutting parameters considering tool wear conditions in low-carbon manufacturing environment. *Journal of Cleaner Production* 226 (2019) 706-719.
- [12] Chintada Shoba, Dora Siva Prasad, A. Sucharita, Abishek M., M.S. Koundinya, 2017. Investigations of Surface roughness, Power Consumption, MRR and Tool wear while turning hybrid composites. *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 16565–16574.
- [13] Christoph Herrmann, Sebastian Thiede, André Zein, Steffen Ihlenfeldt, Peter Blau, 2009. Energy Efficiency of Machine Tools: Extending the Perspective. *Proceedings of the 42nd CIRP International Conference on Manufacturing Systems*.
- [14] Congbo Li, Lingling Li, Ying Tang, Yantao Zhu, Li Li, 2019. A comprehensive approach to parameters optimization of energy-aware CNC milling. *J Intell Manuf* (2019) 30:123–138.
- [15] Congbo Li, Xingzheng Chen, Ying Tang, Li Li, 2016. Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost. *Journal of Cleaner Production* 140 (2017) 1805-1818.
- [16] Congbo Li, Ying Tang, Longguo Cui, Pengyu Li, 2015. A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems. *J Intell Manuf* (2015) 26:911–922.
- [17] Conghu Liu, Wei Cai, Ognyan Dinolov, Cuixia Zhang, Weizhen Rao, Shun Jia, Li Li, Felix T.S. Chan, 2018. Emergy based sustainability evaluation of remanufacturing machining systems. *Energy* 150 (2018) 670-680.
- [18] Conghu Liu, Wei Cai, Shun Jia, Mingyu Zhang Huanyin Guo, Luohe Hu, Zhigang Jiang, 2018. Emergy-based evaluation and improvement for sustainable manufacturing systems considering resource efficiency and environment performance. *Energy Conversion and Management* 177 (2018) 176–189.
- [19] D. Cuppini, G. D’Errico, G. Rutelli, 1989. Tool wear monitoring based on cutting power measurement.
- [20] Daeyoung Kong, Seungchoun Choi, Yusuke Yasui, Sushrut Pavanaskar, David Dornfeld, Paul Wright, 2011. Software-based tool path evaluation for environmental sustainability. *Journal of Manufacturing Systems* 30 (2011) 241–247.

- [21] Diaz Nancy, Helu Moneer, Dornfeld David, 2010. Design and Operation Strategies for Green Machine Tool Development. UC Berkeley: Laboratory for Manufacturing and Sustainability.
- [22] Domnita Fratila, Cristian Caizar, 2010. Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3. *Journal of Cleaner Production* 19 (2011) 640-645.
- [23] Eckart Uhlmann, Bernd Peukert, Simon Thom, Lukas Prasol, Paul Fürstmann, Fiona Sammler, Sebastian Richarz, 2017. Solutions for Sustainable Machining. *J. Manuf. Sci. Eng.* 139(5): 051009.
- [24] Emel Kuram, Babur Ozcelik, Mahmut Bayramoglu, Erhan Demirbas, Bilgin Tolga Simsek, 2012. Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments. *Journal of Cleaner Production* 42 (2013) 159-166.
- [25] Emel Kuram, Babur Ozcelik, Mahmut Bayramoglu, Erhan Demirbas, Bilgin Tolga Simsek, 2012. Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments. *Journal of Cleaner Production* 42 (2013) 159-166.
- [26] Enrique García-Martínez, Valentín Miguel, Alberto Martínez-Martínez, María Carmen Manjabacas, Juana Coello, 2019. Sustainable Lubrication Methods for the Machining of Titanium Alloys: An Overview. *Materials*. 12(23):3852.
- [27] F. Draganescu, M. Gheorghe, C.V. Doicin, 2002. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy. *Journal of Materials Processing Technology* 141 (2003) 9–15.
- [28] Fei Liu, Jun Xie, Shuang Liu, 2014. A method for predicting the energy consumption of the main driving system of a machine tool in a machining process. *Journal of Cleaner Production* 105 (2015) 171-177.
- [29] Franci Pusavec, Davorin Kramar, Peter Krajnik, Janez Kopac, 2010. Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies. *Journal of Cleaner Production* 18 (2010) 1211–1221.
- [30] Franci Pušavec, Janez Kopac, 2009. Achieving and implementation of sustainability principles in machining. *Advances in Production Engineering & Management*. 4, 151-160.

- [31] Franci Pusavec, Peter Krajnik, Janez Kopac, 2009. Transitioning to sustainable production – Part I: application on machining technologies. *Journal of Cleaner Production* 18 (2010) 174–184.
- [32] Fredrik Schultheiss, Jinming Zhou, Elias Gröntoft, Jan-Eric Ståhl, 2013. Sustainable machining through increasing the cutting tool utilization. *Journal of Cleaner Production* 59 (2013) 298-307.
- [33] Fujun Han, Li Li, Wei Cai, Congbo Li, Xingguo Deng, John W. Sutherland, 2020. Parameters optimization considering the trade-off between cutting power and MRR based on Linear Decreasing Particle Swarm Algorithm in milling. *Journal of Cleaner Production* 262 (2020) 121388.
- [34] G.M. Krolczyk, R.W. Maruda, J.B. Krolczyk, S. Wojciechowski, M. Mia, P. Nieslony, G. Budzik, 2019. Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production - A review. *Journal of Cleaner Production* 218 (2019) 601-615.
- [35] G.Y. Zhao, Z.Y. Liu, Y. He, H.J. Cao, Y.B. Guo, 2017. Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy. *Energy* 133 (2017) 142-157.
- [36] Gianni Campatelli, Lorenzo Lorenzini, Antonio Scippa, 2013. Optimization of process parameters using a Response Surface Method for minimizing power consumption in the milling of carbon steel. *Journal of Cleaner Production* 66 (2014) 309-316.
- [37] Girish Kant, Kuldip Singh Sangwan, 2014. Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining. *Journal of Cleaner Production* 83 (2014) 151-164.
- [38] Giuseppe Ingarao, Hans Vanhove, Karel Kellens, Joost R. Duflou, 2013. A comprehensive analysis of electric energy consumption of single point incremental forming processes. *Journal of Cleaner Production* 67 (2014) 173-186.
- [39] Guanghui Zhou Qi Lu, Zhongdong Xiao, Ce Zhou, Changle Tian, 2018. Cutting parameter optimization for machining operations considering carbon emissions. *Journal of Cleaner Production* 208 (2019) 937-950.
- [40] Guoyong Zhao, Chunhong Hou, Jianfang Qiao and Xiang Cheng, 2016. Energy consumption characteristics evaluation method in turning. *Advances in Mechanical Engineering* 2016, Vol. 8(11) 1–8.

- [41] Gurpreet Singh, Vivek Aggarwal, Sehijpal Singh, 2020. Critical review on ecological, economical and technological aspects of minimum quantity lubrication towards sustainable machining. *Journal of Cleaner Production* 271 (2020) 122185.
- [42] Gyanendra Singh Goindi, Prabir Sarkar, 2017. Dry machining: A step towards sustainable machining e Challenges and future directions. *Journal of Cleaner Production* 165 (2017) 1557-1571.
- [43] H. Hegab, B. Darras, H A. Kishawy, 2018. Sustainability Assessment of Machining with Nano-Cutting Fluids Sustainability Assessment of Machining with Nano-Cutting Fluids. 46th SME North American Manufacturing Research Conference.
- [44] H. Hegab, H A. Kishawya, B. Darras, 2019. Sustainable Cooling and Lubrication Strategies. 16th Global Conference on Sustainable Manufacturing.
- [45] H. Shao, H.L. Wang, X.M. Zhao, 2004. A cutting power model for tool wear monitoring in milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 (2004) 1503–1509.
- [46] Hae-Sung Yoon, Eshank Singh, Sangkee Min, 2018. Empirical power consumption model for rotational axes in machine tools. *Journal of Cleaner Production* 196 (2018) 370-381.
- [47] Hae-Sung Yoon, Eun-Seob Kim, Min-Soo Kim, Jang-Yeob Lee, Gyu-Bong Lee, Sung-Hoon Ahn, 2015. Towards greener machine tools – A review on energy saving strategies and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48 (2015) 870–891.
- [48] Hae-Sung Yoon, Jang-Yeob Lee, Min-Soo Kim, Sung-Hoon Ahn, 2014. Empirical power-consumption model for material removal in three- axis milling. *Journal of Cleaner Production* 78 (2014) 54-62.
- [49] Hae-Sung Yoon, Jong-Seol Moon, Minh-Quan Pham, Gyu-Bong Lee, Sung-Hoon Ahn, 2013. Control of machining parameters for energy and cost savings in micro-scale drilling of PCBs. *Journal of Cleaner Production* 54 (2013) 41-48.
- [50] Haiming Sun, Conghu Liu, Jianqing Chen, Mengdi Ga, Xuehong Shen, 2019. A Novel Method of Sustainability Evaluation in Machining Processes. *Processes* 2019, 7, 275.
- [51] Hengyu Pan a, Xiaohong Zhang, Jun Wu, Yanzong Zhang, Lili Lin, Gang Yang, Shihuai Deng, Li Li, Xiaoyu Yu, Hui Qi, Hong Peng, 2015. Sustainability evaluation of a steel production system in China based on emergy. *Journal of Cleaner Production* 112 (2016) 1498-1509.

- [52] Honghui Wang, Ray Y. Zhong, Guijie Liu, WeiLei Mu, Xiaojie Tian, Dingxin Leng, 2019. An optimization model for energy-efficient machining for sustainable production. *Journal of Cleaner Production* 232 (2019) 1121-1133.
- [53] Hu Luokea, Tang Renzhonga, Cai Weib, Feng Yixionga, Ma Xiang, 2019. Optimisation of cutting parameters for improving energy efficiency in T machining process. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 59 (2019) 406–416.
- [54] S. Jawahir, J. Schoop, Y. Kaynak, A. K. Balaji, R. Ghosh, T. Lu, 2020. Progress Toward Modeling and Optimization of Sustainable Machining Processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol- 142, Issue 11.
- [55] I.S. Jawahir, H. Attia, D. Biermann, J. Duflou, F. Klocke, D. Meyer, S.T. Newman, F. Pusavec, M. Putz, J. Rech, V. Schulze, D. Umbrello, 2016. Cryogenic manufacturing processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65 (2016) 713–736.
- [56] Issam Hanafi, Abdellatif Khamlichia, Francisco Mata Cabrerab, Emiliano Almansab, Abdallah Jabbour, 2012. Optimization of cutting conditions for sustainable machining of PEEK-CF30 using TiN tools. *Journal of Cleaner Production* 33 (2012) 1-9.
- [57] J. Dahmus, T. Gutowski, 2004. An Environmental Analysis of Machining. 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo.
- [58] Jeremi Wojcicki, Marco Leonesio, Giacomo Bianchi, 2017. Integrated energy analysis of cutting process and spindle subsystem in a turning machine. *Journal of Cleaner Production* 170 (2018) 1459-1472.
- [59] Jian-guang Li, Yong Lu, Hang Zhao, Peng Li, Ying-xue Yao, 2014. Optimization of cutting parameters for energy saving. *Int J Adv Manuf Technol* (2014) 70:117–124.
- [60] Jihong Yan, Lin Li, 2013. Multi-objective optimization of milling parameters and the trade-offs between energy, production rate and cutting quality. *Journal of Cleaner Production* 52 (2013) 462-471.
- [61] Joost R. Duflou, John W. Sutherland, David Dornfeld, Christoph Herrmann, Jack Jeswiet, Sami Kara, Michael Hauschild, Karel Kellens, 2012. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2012) 587–609.

- [62] Joost R. Duflou, Karel Kellens, Renaldi, Yansong Guo, Wim Dewulf, 2012. Critical comparison of methods to determine the energy input for discrete manufacturing processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2012) 63–66.
- [63] Jun Xie, Fei Liu, Hang Qiu, 2016. An integrated model for predicting the specific energy consumption of manufacturing processes. *Int J Adv Manuf Technol* (2016) 85:1339–1346.
- [64] Jun Zheng, Wang Zheng, Ankai Chen, Jinkang Yao, Yicheng Ren, Chen Zhou, Jian Wu, Wei Ling, Bing Bai, Wei Wang, Zhongwei Zhang, 2020. Sustainability of unconventional machining industry considering impact factors and reduction methods of energy consumption: A review and analysis. *Science of the Total Environment* 722 (2020) 137897.
- [65] K. P. Rajurkar, H. Hadidi, J. Pariti, G. C. Reddy, 2017. Review of Sustainability Issues in Non-Traditional Machining Processes. *Procedia Manufacturing Volume 7* 714-720.
- [66] K.N. Shi, D.H. Zhang, N. Liu S.B. Wang, J.X. Ren, S.L. Wang, 2018. A novel energy consumption model for milling process considering tool wear progression. *Journal of Cleaner Production* 184 (2018) 152-159.
- [67] K.N. Shi, J.X. Ren, S.B. Wang, N. Liu, Z.M. Liu, D.H. Zhang, W.F. Lu, 2019. An improved cutting power-based model for evaluating total energy consumption in general end milling process. *Journal of Cleaner Production* 231 (2019) 1330-1341.
- [68] Keyan He, Renzhong Tanga, Mingzhou Jin, 2017. Pareto fronts of machining parameters for trade-off among energy consumption, cutting force and processing time. *International Journal of Production Economics* 185 (2017) 113–127.
- [69] Konstantinos Salonitis, Peter Ball, 2013. Energy efficient manufacturing from machine tools to manufacturing systems. *Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013*.
- [70] Li Li, Xingguo Deng, Junhua Zhao, Fu Zhao, John W. Sutherland, 2017. Multi-objective optimization of tool path considering efficiency, energy-saving and carbon-emission for free-form surface milling. *Journal of Cleaner Production* 172 (2018) 3311-3322.
- [71] Lin Li, Jihong Yan, Zhongwen Xing, 2013. Energy requirements evaluation of milling machines based on thermal equilibrium and empirical modelling. *Journal of Cleaner Production* 52 (2013) 113-121.

- [72] Lingling Li, Congbo Li, Ying Tang, Qian Yi, 2017. Influence factors and operational strategies for energy efficiency improvement of CNC machining. *Journal of Cleaner Production* 161 (2017) 220-238.
- [73] Lingling Li, Congbo Li, Ying Tang, Li Li, 2017. An integrated approach of process planning and cutting parameter optimization for energy-aware CNC machining. *Journal of Cleaner Production* 162 (2017) 458-473.
- [74] Lirong Zhou, Jianfeng Li, Fangyi Li, Qiang Meng, Jing Li, Xingshuo Xu, 2015. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production* 112 (2016) 3721-3734.
- [75] Lirong Zhou, Jianfeng Li, Fangyi Li, Xingshuo Xu, Liming Wang, Geng Wang, Lin Kon, 2017. An improved cutting power model of machine tools in milling process. *Int J Adv Manuf Technol* (2017) 91:2383–2400.
- [76] Longhua Xu Chuanzhen Huang, Chengwu Li Jun Wang, Hanlian Liu, Xiaodan Wang, 2020. A novel intelligent reasoning system to estimate energy consumption and optimize cutting parameters toward sustainable machining. *Journal of Cleaner Production* 261 (2020) 121160.
- [77] Luoke Hu, Chen Peng, Steve Evans, Tao Peng, Ying Liu, Renzhong Tang, Ashutosh Tiwari, 2017. Minimising the machining energy consumption of a machine tool by sequencing the features of a part. *Energy* 121 (2017) 292-305.
- [78] Luoke Hu, Ying Liu, Niels Lohse, Renzhong Tang, Jingxiang, Chen Peng, Steve Evans, 2017. Sequencing the features to minimise the non-cutting energy consumption in machining considering the change of spindle rotation speed. *Energy* 139 (2017) 935-946.
- [79] M. Estela Peralta Alvarez, Mariano Marcos Barcena, Francisco Aguayo Gonzalez, 2016. On the sustainability of machining processes. Proposal for a unified framework through the triple bottom-line from an understanding review. *Journal of Cleaner Production* 142 (2017) 3890-3904.
- [80] M. Hacksteinera, H. Peherstorfera, F. Bleichera, 2018. Energy efficiency of state-of-the-art grinding processes. *Procedia Manufacturing* 21 (2018) 717–724.
- [81] M. Mori, M. Fujishima, Y. Inamasu, Y. Oda, 2011. A study on energy efficiency improvement for machine tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (2011) 145–148.
- [82] M. Ural Uluer, Hakki Ozgur Unver, Kadir Akkuş, S. Engin Kilic, 2013. A Model for Predicting Theoretical Process Energy Consumption of Rotational Parts

- Using STEP AP224 Features. *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, 141-146.
- [83] M.F. Rajemi, P.T. Mativenga, A. Aramcharoen, 2010. Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations. *Journal of Cleaner Production* 18 (2010) 1059–1065.
- [84] Manoj Kurukulasuriya, Janaka Gamage, Janaka Mangala, 2020. Sustainable machining: Assessment of environmental performance of milling. *Procedia Manufacturing* 43 (2020) 455–462.
- [85] Maria Luisa Calvanese, Paolo Albertelli, Andrea Matta, Marco Taisch, 2013. Analysis of Energy Consumption in CNC Machining Centers and Determination of Optimal Cutting Conditions. *Re-engineering Manufacturing for Sustainability* 227-232.
- [86] Marius Winter, Wen Lia, Sami Kara, Christoph Herrmann, 2013. Determining optimal process parameters to increase the eco-efficiency of grinding processes. *Journal of Cleaner Production* 66 (2014) 644-654.
- [87] Mariyeh Moradnazard, Hakki Ozgur Unver, 2016. Energy efficiency of machining operations: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture* 231(11).
- [88] Maria Estela Peralta Alvarez, Mariano Marcos Barcena, Francisco Aguayo Gonzalez, 2016. A Review of Sustainable Machining Engineering: Optimization Process Through Triple Bottom Line. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 138.
- [89] Min Xu, Robert B. Jerard, Barry K. Fussell, 2007. Energy Based Cutting Force Model Calibration for Milling. *Computer-Aided Design & Applications*, Vol. 4 341-35.
- [90] Mohammad Hemmat Esfe, Mehdi Bahiraei, Ashkan Mir, 2020. Application of conventional and hybrid nanofluids in different machining processes: A critical review. *Advances in Colloid and Interface Science* 282 (2020) 102199.
- [91] Munish Kumar Gupta, P.K. Sood, Vishal S. Sharma, 2016. Optimization of machining parameters and cutting fluids during nano-fluid based minimum quantity lubrication turning of titanium alloy by using evolutionary techniques. *Journal of Cleaner Production* 135 (2016) 1276-1288.
- [92] N. Liu, Y.F. Zhang, W.F. Lu, 2015. A hybrid approach to energy consumption modelling based on cutting power: a milling case. *Journal of Cleaner Production* 104 (2015) 264-272.

- [93] N.N. Nor Hamran, J.A. Ghani, R. Ramli, C.H. Che Haron, 2020. A review on recent development of minimum quantity lubrication for sustainable machining. *Journal of Cleaner Production* 268 (2020) 122165.
- [94] Nan Xiea, Junfeng Zhou, Beirong Zheng, 2018. Selection of optimum turning parameters based on cooperative optimization of minimum energy consumption and high surface quality. *Procedia CIRP* 72 (2018) 1469–1474.
- [95] Nancy Diaz, Elena Redelsheime, David Dornfeld, 2011. Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use.
- [96] Nilesh C., GhugeDattatraya PalandeAshish M., MahallePramod Belkhode, 2021. Minimum Quantity Lubrication-Alternative to Flood Cutting and Dry Cutting. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*.
- [97] Nitesh Sihag, Kuldip Singh Sangwan, 2020. A systematic literature review on machine tool energy consumption. *Journal of Cleaner Production* 275 (2020) 123125.
- [98] Oliver Avram, Ian Stroud, Paul Xirouchakis, 2010. A multi-criteria decision method for sustainability assessment of the use phase of machine tool systems. *Int J Adv Manuf Technol* (2011) 53:811–828.
- [99] Oliver Ioan Avram, Paul Xirouchakis, 2010. Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system. *Journal of Cleaner Production* 19 (2011) 699-711.
- [100] Oscar Velásquez Arriaza, Dong-Won Kim, Dong Yoon Lee, Mohd. Azlan Suhaimi, 2015. Trade-off analysis between machining time and energy consumption in impeller NC machining, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 43 (2017) 164–170.
- [101] P.T. Mativenga, M.F. Rajemi, 2011. Calculation of optimum cutting parameters based on minimum energy footprint. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (2011) 149–152.
- [102] Paolo C. Priarone, Matteo Robiglio, Luca Settineri, 2018. On the concurrent optimization of environmental and economic targets for machining. *Journal of Cleaner Production* 190 (2018) 630-644.
- [103] Paolo C. Priarone, Matteo Robiglio, Luca Settineri, Vincenzo Tebaldo, 2016. Modelling of specific energy requirements in machining as a function of tool and lubricoolant usage. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65 (2016) 25–28.

- [104] Paramjit Singh Bilga, Sehijpal Singh, Raman Kumar, 2016. Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method. *Journal of Cleaner Production* 137 (2016) 1406-1417.
- [105] Peiji Liu, Fei Liu, Hang Qiu, 2017. A novel approach for acquiring the real-time energy efficiency of machine tools. *Energy* 121 (2017) 524-532.
- [106] Peter Krajcnik, Amir Rashid, Franci Pusavec, Maja Remskar, Akinori Yui, Nader Nikkam, Muhammet S. Toprak, 2015. Transitioning to sustainable production e part III: developments and possibilities for integration of nanotechnology into material processing technologies *Journal of Cleaner Production* 112 (2016) 1156-1164.
- [107] Phengky Pangestu, Eko Pujiyanto, Cucuk Nur Rosyidi, 2021. Multi-objective cutting parameter optimization model of multi-pass turning in CNC machines for sustainable manufacturing. *Heliyon* 7 (2021) 06043.
- [108] Qian Yi, Congbo Li, Ying Tang, Xingzheng Chen, 2015. Multi-objective parameter optimization of CNC machining for low carbon manufacturing. *Journal of Cleaner Production* 95 (2015) 256-264.
- [109] Qianqian Zhong, Renzhong Tang, Tao Peng, 2016. Decision rules for energy consumption minimization during material removal process in turning. *Journal of Cleaner Production* 140 (2017) 1819-1827.
- [110] Qiulian Wang, Fei Liu, Congbo Li, 2013. An integrated method for assessing the energy efficiency of machining workshop. *Journal of Cleaner Production* 52 (2013) 122-133.
- [111] R. Neugebauer, M. Wabner, H. Rentzsch, S. Ihlenfeldt, 2011. Structure principles of energy efficient machine tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (2011) 136–147.
- [112] R. Sanjeevi, G. Arun Kumar, B. Radha Krishnan, 2021. Optimization of machining parameters in plane surface grinding process by response surface methodology. *Materials Today: Proceedings* 37 (2021) 85–87.
- [113] Rajesh Kumar Bhushan, 2012. Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites. *Journal of Cleaner Production* 39 (2013) 242-254.
- [114] Rakesh Kumar Gunda, Narala Suresh Kumar Reddy, H.A. Kishawy, 2016. A Novel Technique to Achieve Sustainable Machining System. 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use.

- [115] Reza Imani Asrai, Stephen T. Newman, Aydin Nassehi, 2017. A mechanistic model of energy consumption in milling. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 642-659.
- [116] Robin Singh Chandel, Raman Kumar, Jatinder Kapoor, 2021. Sustainability aspects of machining operations: A summary of concepts.
- [117] S. Ekinovica, H. Prcanovicb, E. Begovic, 2015. Investigation of influence of MQL machining parameters on cutting forces during MQL turning of carbon steel St52-3. *Procedia Engineering* 132 (2015) 608 – 614.
- [118] S. Kara, W. Li, 2011. Unit process energy consumption models for material removal processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (2011) 37–40.
- [119] S. Wang, X. Lu, X.X. Li, W.D. Li, 2014. A systematic approach of process planning and scheduling optimization for sustainable machining. *Journal of Cleaner Production* 87 (2015) 914-929.
- [120] Safian Sharif, Ibrahim Ogu Sadiq, Noordin Mohd Yusof, Amrifan Saladin Mohruni, 2017. A Review of Minimum Quantity Lubrication Technique with Nanofluids Application in Metal Cutting Operations. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 7 (2), 587-593.
- [121] Salem Abdullah Bagaber, Ahmad Razlan Yusoff, 2018. Energy and cost integration for multi-objective optimisation in a sustainable turning process. *Measurement* 136 (2019) 795–810.
- [122] Samatham Madhukar, Aitha Shravan, Pakka Vidyanand, G. Sreeram Reddy, 2016. A Critical review on Minimum Quantity Lubrication (MQL) Coolant System for Machining Operations. *International Journal of Current Engineering and Technology*.
- [123] Sankaranarayanan R., Rajesh Jesudoss Hynes N., Senthil Kumar J., G.M. Krolczyk, 2021. A comprehensive review on research developments of vegetable-oil based cutting fluids for sustainable machining challenges. *Journal of Manufacturing Processes* 67 (2021) 286–313.
- [124] Satish Chinchankar, S.S. Kore, Pravin Hujare, 2021. A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining. *Journal of Manufacturing Processes* 68 (2021) 56–70.
- [125] Shailendra Pawanr, Girish Kant Garg, Srikanta Routroy, 2021. Modelling of variable energy consumption for CNC machine tools. 28th CIRP Conference on Life Cycle Engineering.

- [126] Shaohua Hu, Fei Liu, Yan He, Tong Hu, 2012. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools. *Journal of Cleaner Production* 27 (2012) 133-140.
- [127] Shaohua Hu, Fei Liu, Yan He, Bin Peng, 2010. Characteristics of Additional Load Losses of Spindle System of Machine Tools. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 4 (7) 1221-1233.
- [128] Shun Jia, Renzhong Tang, Jingxiang Lv, Qinghe Yuan, Tao Peng, 2017. Energy consumption modeling of machining transient states based on finite state machine. *Int J Adv Manuf Technol* (2017) 88:2305–2320.
- [129] Shun Jia, Renzhong Tang, Jingxiang Lv, Zhongwei Zhang, Qinghe Yuan, 2015. Energy modeling for variable material removal rate machining process: an end face turning case. *Int J Adv Manuf Technol* (2016) 85:2805–2818.
- [130] Shun Jia, Qinghe Yuana, Wei Caic, Meiyuan Lia, Zhaojun Li, 2018. Energy modeling method of machine-operator system for sustainable machining. *Energy Conversion and Management* 172 (2018) 265–276.
- [131] Stefan Velchev, Ivan Kolev, Krasimir Ivanov, Simeon Gechevski, 2014. Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning. *Journal of Cleaner Production* 80 (2014) 139-149.
- [132] T. Rajmohan¹, V.V. Kalyan Chakravarthy, A. Nandakumar, S.D. Satish Kumar, 2020. Eco Friendly Machining Processes for Sustainability - Review. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 954 (2020) 012044.
- [133] Tao Peng, Xun Xu, 2014. Energy-efficient machining systems: A critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 72 1389–1406.
- [134] Thomas Behrendt, André Zein, Sangkee Min, 2012. Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2012) 43–46.
- [135] Timo Schudeleit, Simon Züst, Konrad Wegener, 2015. Methods for evaluation of energy efficiency of machine tools. *Energy* 93 (2015) 1964-1970.
- [136] Timothy G. Gutowski, 2011, *Manufacturing and the Science of Sustainability*. Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering.
- [137] Timothy G. Gutowski, Matthew S. Branham, Jeffrey B. Dahmus, Alissa J. Jones, Alexandre Thiriez, Dusan P. Sekulic, 2009. *Thermodynamic Analysis of*

- Resources Used in Manufacturing Processes. *Environ. Sci. Technol.*, 2009, 43 (5), 1584-1590.
- [138] Timothy Gutowski, Jeffrey Dahmus, Alex Thiriez, 2006. Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. 13 CIRP International Conference of Life Cycle Engineering.
- [139] Venkatasreenivasula Reddy Perla, Rathanraj K J, 2020. Micromachining. *Advanced Manufacturing and Processing Technology*.
- [140] Viktor P. Astakhov, Xinran Xiao, 2008. A Methodology For Practical Cutting Force Evaluation Based On The Energy Spent In The Cutting System. *Machining Science and Technology*, 12:325–347.
- [141] Vincent A. Balogun, Isuamfon F. Edem, Adefemi A. Adekunle, Paul T. Mativenga, 2016. Specific energy based evaluation of machining efficiency. *Journal of Cleaner Production* 116 (2016) 187-197.
- [142] Vincent A. Balogun, Isuamfon F. Edem, Paul T. Mativenga, 2016. E-smart toolpath machining strategy for process planning. *Int J Adv Manuf Technol* (2016) 86:1499–1508.
- [143] Vincent Aizebeoje Balogun, Paul Tarisai Mativenga, 2012. Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes. *Journal of Cleaner Production* 41 (2013) 179-186.
- [144] Vincenzo Tebaldo, Giovanna Gautier di Confienigo, Maria Giulia Faga, 2016. Sustainability in machining: “Eco-friendly” turning of Inconel 718. Surface characterisation and economic analysis. *Journal of Cleaner Production* 140 (2017) 1567-1577.
- [145] Wei Cai, Conghu Liu, Shun Jia, Felix T.S. Chan, Minda Ma, Xin Ma, 2019. An energy-based sustainability evaluation method for outsourcing machining resources. *Journal of Cleaner Production* 245 (2020) 118849.
- [146] Wei Cai, Fei Liu, Jun Xie, Peiji Liu, Junbo Tuo, 2017. A tool for assessing the energy demand and efficiency of machining systems: Energy benchmarking. *Energy* 138 (2017) 332-347.
- [147] Wei Cai, Fei Liu, Jun Xie, XiaoNa Zhou, 2016. An energy management approach for the mechanical manufacturing industry through developing a multi-objective energy benchmark. *Energy Conversion and Management* 132 (2017) 361–371.

- [148] Wei Cai, Fei Liu, Ognyan Dinolov, Jun Xie, Peiji Liu, Junbo Tuo, 2017. Energy benchmarking rules in machining systems. *Energy* 142 (2018) 258-263.
- [149] Wei Cai, Fei Liu, XiaoNa Zhou, Jun Xie, 2016. Fine energy consumption allowance of workpieces in the mechanical manufacturing industry. *Energy* 114 (2016) 623-633.
- [150] X. Wang, Z.J. Da, A.K. Balaji, I.S. Jawahir, 2007. Performance-Based Predictive Models and Optimization Methods for Turning Operations and Applications: Part 3—Optimum Cutting Conditions and Selection of Cutting Tools. *Journal of Manufacturing Processes* Vol. 9/No. 1.
- [151] Xiaona Zhou, Fei Liu, Wei Cai, 2015. An energy-consumption model for establishing energy-consumption allowance of a workpiece in a machining system. *Journal of Cleaner Production* 135 (2016) 1580-1590.
- [152] Xingzheng Chen, Congbo Li, Ying Tang, Li Li b, Yanbin Du, Lingling Li, 2019. Integrated optimization of cutting tool and cutting parameters in face milling for minimizing energy footprint and production time. *Energy* 175 (2019) 1021-1037.
- [153] Xugang Zhang, Lu Xu, Hua Zhang, Zhigang Jiang, Wei Cai, 2020. Energy based intelligent decision-making model for remanufacturing process scheme integrating economic and environmental factors. *Journal of Cleaner Production* 291 (2021) 125247.
- [154] Yan He, Yufeng Li, Tao Wu, John W. Sutherland, 2014. An energy-responsive optimization method for machine tool selection and operation sequence in flexible machining job shops. *Journal of Cleaner Production* 87 (2015) 245-254.
- [155] Yan He, Fei Liu, Tao Wu, F. P Zhong, B. Peng, 2012. Analysis and Estimation of Energy Consumption for Numerical Control Machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2012;226(2):255-266.
- [156] Yansong Guo, Jef Loenders, Joost Duflou, Bert Lauwers, 2012. Optimization of energy consumption and surface quality in finish turning. *Procedia CIRP* 1 (2012) 512-5.
- [157] Yansong Guo, Joost R. Duflou, Bert Lauwers, 2014. Energy-based optimization of the material stock allowance for turning-grinding process sequence. *Int J Adv Manuf Technol* (2014) 75:503-513.

- [158] Yansong Guo, Joost R. Duflou, Jun Qian, Hao Tang, Bert Lauwers, 2015. An operation-mode based simulation approach to enhance the energy conservation of machine tools. *Journal of Cleaner Production* 101 (2015) 348-359.
- [159] Yaogang Wang, Changhe Li, Yanbin Zhang, Min Yang, Benkai Li, Dongzhou Jia, Yali Hou, Cong Mao, 2016. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils. *Journal of Cleaner Production* 127 (2016) 487-499.
- [160] Yousef Shokoohi, Ehsan Khosrojerdi, B.h. Rassolian Shiadhi, 2015. Machining and ecological effects of a new developed cutting fluid in combination with different cooling techniques on turning operation. *Journal of Cleaner Production* 94 (2015) 330-339.
- [161] Yufeng Li, Yan He Yan Wang, Yulin Wang, Ping Yan, Shenlong Lin, 2015. A modeling method for hybrid energy behaviors in flexible machining systems. *Energy* 86 (2015) 164-174.
- [162] Yufeng Li, Yan He, Yulin Wang, Fei Tao, John W. Sutherland, 2020. An optimization method for energy-conscious production in flexible machining job shops with dynamic job arrivals and machine breakdowns. *Journal of Cleaner Production* 254 (2020) 120009.
- [163] Z. M. Bi, Lihui Wang, 2012. Energy Modeling of Machine Tools for Optimization of Machine Setups. *IEEE Transactions On Automation Science And Engineering*, Vol. 9, No. 3.
- [164] Z.M. Bia, Lihui Wang, 2012. Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption: A case study. *Journal of Manufacturing Systems* 31 (2012) 420–428.
- [165] Z.Y. Liu, Y.B. Guo, M.P. Sealy, Z.Q. Liu, 2015. Energy consumption and process sustainability of hard milling with tool wear progression. *Journal of Materials Processing Technology* 229 (2016) 305–312.
- [166] Zhang Cuixia, Liu Conghu, Zhao Xi, 2017. Optimization control method for carbon footprint of machining process. *Int J Adv Manuf Technol* (2017) 92:1601–1607.
- [167] Zhendong Shang, Dong Gao, Zhipeng Jiang, Yong Lu, 2019. Towards less energy intensive heavy-duty machine tools: Power consumption characteristics and energy-saving strategies. *Energy* 178 (2019) 263-276.

- [168] Zhigang Jiang, Fan Zhou, Hua Zhang, Yan Wang, John W. Sutherland, 2015. Optimization of machining parameters considering minimum cutting fluid consumption. *Journal of Cleaner Production* 108 (2015) 183-191.
- [169] Zhongwei Zhang Renzhong Tan, Tao Peng, Liyan Tao, Shun Jia, 2016. A method for minimizing the energy consumption of machining system: integration of process planning and scheduling. *Journal of Cleaner Production* 137 (2016) 1647-1662.

Sitografia

- [1] <http://dma.ing.uniroma1.it/users/veniali/Truciolo.pdf>
- [2] <http://www.energiazero.org/3AME/disegno/Le%20lavorazioni%20per%20asportazione%20di%20truciolo.pdf>
- [3] <http://www00.unibg.it/dati/corsi/238509/15914-Asportazione%20materiale.pdf>
- [4] <https://it.wikipedia.org/wiki/Fresatura>
- [5] https://it.wikipedia.org/wiki/ISO_14000
- [6] https://it.wikipedia.org/wiki/Norme_della_serie_ISO_9000
- [7] https://it.wikipedia.org/wiki/OHSAS_18001
- [8] https://it.wikipedia.org/wiki/Rapporto_Brundtland
- [9] [https://it.wikipedia.org/wiki/Rettifica_\(lavorazioni_meccaniche\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Rettifica_(lavorazioni_meccaniche))
- [10] <https://it.wikipedia.org/wiki/Tornitura>

