



POLITECNICO DI TORINO

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA GESTIONALE E
DELLA PRODUZIONE**

Corso di laurea magistrale in ingegneria gestionale

LA GESTIONE DEL CONSUMO ENERGETICO VERSO UNA SCHEDULAZIONE SOSTENIBILE

Relatrice: Arianna Alfieri

Co-relatori: Erica Pastore, Claudio Castiglione

Studentessa: Chiara Albero

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Extended Abstract

La gestione del consumo energetico verso una schedulazione sostenibile

Chiara Albero

INTRODUZIONE

Nel contesto industriale odierno, la sostenibilità e il consumo energetico sono temi di fondamentale importanza, influenzando in modo significativo le politiche aziendali e le pratiche produttive. Con l'aumento della consapevolezza sui cambiamenti climatici e la necessità di ridurre l'impatto ambientale, le imprese sono sempre più incentivate a implementare strategie che bilancino efficacemente obiettivi economici e responsabilità ecologiche. Questa revisione della letteratura ha l'obiettivo di esplorare le tendenze emergenti e il consenso prevalente riguardo alla sostenibilità e alla gestione del consumo energetico nel settore industriale.

METODOLOGIA

La revisione si basa su una valutazione strutturata della letteratura esistente, utilizzando il database accademico Scopus. Sono stati selezionati 50 articoli pubblicati negli ultimi dieci anni attraverso l'applicazione di criteri di inclusione specifici per garantire la rilevanza e la qualità delle fonti esaminate. Sono stati inclusi studi empirici e analisi teoriche che trattano dell'integrazione della sostenibilità nelle operazioni industriali e della gestione del consumo energetico. La letteratura selezionata è stata classificata secondo l'ambiente macchina studiato;

la tipologia di funzione obiettivo e la scelta delle metriche ottimizzate; i problemi affrontati negli studi, le cause e le soluzioni proposte sulle macchine.

RISULTATI

I risultati della ricerca evidenziano che il Flow Shop è la configurazione più ampiamente studiata, rappresentando il 38% degli articoli, con una significativa presenza della sua variante, l'Hybrid Flow Shop. Inoltre, il makespan emerge come la metrica più frequentemente ottimizzata insieme al consumo energetico, essendo presente nelle funzioni obiettivo dell'85% degli studi selezionati. Tutti gli articoli identificano come causa primaria di un eccessivo consumo energetico un utilizzo non ottimale delle risorse, con macchinari lasciati in funzione anche durante i periodi di inattività. In questo contesto, le strategie più diffuse per ridurre il consumo energetico includono l'ottimizzazione del sequenziamento dei job, l'adozione di pratiche di spegnimento dei macchinari durante le fasi di inattività e la regolazione della loro velocità di funzionamento.

CRITICITA'

La revisione della letteratura evidenzia come la sfida principale sia la complessità computazionale dei problemi affrontati, poiché mirano a minimizzare due obiettivi che, per loro natura, entrano in conflitto: da un lato, ridurre il consumo energetico e, dall'altro, minimizzare il tempo totale di esecuzione delle attività. Tale tensione crea una sfida significativa, poiché qualsiasi azione intrapresa per ridurre il consumo energetico può influire negativamente sul makespan e viceversa. Di conseguenza, il raggiungimento di soluzioni ottimali diventa un obiettivo difficile

da raggiungere. Tuttavia, nonostante questa complessità, molte delle soluzioni proposte dimostrano di avvicinarsi a ottimi locali, evidenziando la praticabilità di approcci quasi ottimali per affrontare queste sfide complesse.

CONCLUSIONE

Questa revisione della letteratura mette in evidenza una chiara tendenza verso l'adozione di pratiche sostenibili e una gestione efficiente del consumo energetico nell'industria. Nonostante le complessità computazionali e le sfide operative, i risultati indicano che le strategie di ottimizzazione esistenti offrono soluzioni praticabili che bilanciano efficacemente il risparmio energetico e le prestazioni produttive.

Parole chiave: Sostenibilità, Consumo Energetico, Industria, Efficienza Energetica.

Indice

1. Introduzione	8
2. Sostenibilità e Industria.....	11
2.1 Il consumo energetico	13
3. Revisione della letteratura	16
3.1 Criterio di selezione degli articoli.....	16
3.2 Classificazione della letteratura	18
3.2.1 L'ambiente macchina	24
3.2.2 La funzione obiettivo	32
3.2.3 Problemi riscontrati e azioni proposte	34
4. Conclusioni	39
Bibliografia e Sitografia	42
Lista delle Figure e delle Tabelle.....	53

1. Introduzione

Nel contesto dell'industria contemporanea, la sostenibilità rappresenta un tema di cruciale rilevanza, richiedendo un'analisi approfondita e un impegno costante per integrare pratiche ambientalmente responsabili all'interno dei processi produttivi. In un'epoca caratterizzata da una crescente sensibilità ambientale e da una consapevolezza sempre più diffusa dei rischi legati ai cambiamenti climatici, l'adozione di strategie mirate alla riduzione dell'impatto ambientale assume un ruolo centrale nella definizione delle politiche industriali e nell'orientamento delle decisioni aziendali.

La pianificazione e la schedulazione delle attività rappresentano uno degli aspetti chiave per garantire l'efficienza operativa. Tuttavia, l'ottimizzazione della produzione non può prescindere dalla considerazione dei principi di sostenibilità. Il bilanciamento tra obiettivi economici, prestazioni operative e impatti ambientali diventa quindi un elemento fondamentale per garantire una gestione efficace delle risorse e per promuovere modelli di sviluppo sostenibile.

La presente tesi si propone di fornire una revisione bibliografica della letteratura esistente nel campo della schedulazione sostenibile nella produzione industriale, con un focus sulla gestione del consumo energetico. Saranno presentate le sfide fondamentali, le opportunità emergenti e le migliori pratiche nel contesto dell'integrazione dei principi di sostenibilità all'interno delle attività produttive.

Nel Capitolo 2 si fornirà una panoramica sui concetti di sostenibilità e consumo energetico, evidenziando le loro interconnessioni e il ruolo cruciale che giocano nel panorama attuale della produzione industriale.

Nel Capitolo 3 sarà presentata la classificazione degli articoli selezionati al fine di delineare le tendenze emergenti e il consenso prevalente nella letteratura specialistica riguardante il consumo energetico nella schedulazione.

Nel Capitolo 4, infine, si arriverà a formulare una conclusione informata sulle direzioni verso cui si inclina la ricerca.

2. Sostenibilità e Industria

Nell'attuale panorama industriale, caratterizzato dall'incremento demografico, dall'esaurimento delle risorse naturali e dall'aumento dei problemi ambientali, l'attenzione alla sostenibilità nella produzione è diventata un requisito fondamentale [1]. Tale necessità ha spinto aziende, governi e organizzazioni internazionali a riconsiderare le proprie pratiche e adottare approcci più sostenibili al fine di mitigare gli impatti ambientali negativi [2].

In questo contesto, l'Unione Europea ha assunto un ruolo di leadership nella promozione della sostenibilità, promuovendo attivamente l'economia circolare, la riduzione degli sprechi, e l'innovazione verde [3].

Nel tentativo di affrontare le sfide legate ai cambiamenti climatici, alla scarsità delle risorse e alla necessità di una crescita economica equa e sostenibile, l'UE ha implementato una serie di politiche e iniziative volte a promuovere la sostenibilità in vari ambiti. Dal rafforzamento delle normative ambientali all'incentivazione di pratiche produttive eco-compatibili, l'UE si è posta l'obiettivo ambizioso di coniugare economia, ambiente e società.

Attraverso l'Accordo di Parigi [4], che ha coinvolto 196 paesi, l'Unione Europea si è impegnata a ridurre le emissioni di CO₂ del 55% entro il 2030, e a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 [5]. In linea con tale impegno, l'UE si adopera per perseguire gli obiettivi stabiliti dall'Agenda 2030 delle Nazioni Unite, un piano d'azione globale che comprende 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (Figura 1).

BIETTIVI PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE



Figura 1: Obiettivi per lo sviluppo sostenibile [6]

L'UE ha quindi posto la sostenibilità al centro delle proprie priorità, impegnandosi attivamente a trasformare i modelli economici e produttivi verso una maggiore sostenibilità ambientale, sociale ed economica.

In tale contesto sociale e ambientale, l'industria ha dovuto necessariamente modificare le proprie pratiche, adottando approcci e tecnologie più sostenibili e rivedendo i propri processi produttivi al fine di minimizzare l'impatto ambientale delle proprie attività. Le aziende si sono impegnate a bilanciare la produzione di beni e servizi con il rispetto per l'ambiente, la responsabilità sociale e l'efficienza economica [7], promuovendo pratiche sostenibili come l'economia circolare, l'eco-design, l'innovazione tecnologica e l'efficienza energetica [8].

2.1 Il consumo energetico

La gestione del consumo energetico riveste un ruolo di grande rilevanza nel processo di trasformazione sostenibile dell'industria, in quanto contribuisce direttamente alla diminuzione delle emissioni di gas serra e all'abbattimento dell'impronta ecologica complessiva.

Le implicazioni della riduzione del consumo energetico vanno oltre i benefici ambientali, estendendosi ai vantaggi economici per le aziende, quali l'aumento della redditività a lungo termine, la resilienza agli shock energetici e alle fluttuazioni dei prezzi, nonché la ridotta dipendenza dalle importazioni di combustibili fossili. Inoltre, l'efficienza energetica può portare a prezzi più accessibili per i cittadini [9].

La ricerca e l'implementazione di tecnologie e processi più efficienti dal punto di vista energetico promuovono l'innovazione nell'industria, contribuendo alla crescita economica e alla creazione di posti di lavoro nel settore delle energie rinnovabili e delle tecnologie verdi.

L'Unione Europea ha posto l'efficienza energetica come una priorità strategica e ha compiuto significativi passi avanti nella legislazione in materia negli ultimi 15 anni [10]. Nel 2023 è stata emanata l'ultima direttiva sull'efficienza energetica, con l'obiettivo di limitare il consumo di energia primaria e finale dell'UE rispettivamente a 993 e 763 Mtep entro il 2030 (Figura 2). Tale direttiva è stata promulgata per revisionare gli obiettivi precedentemente stabiliti nel 2020, i quali

prescrivevano un consumo di energia primaria e finale rispettivamente di 1110 e 852 Mtep entro il 2030 (11,7% di energia consumata in più rispetto alla nuova direttiva).

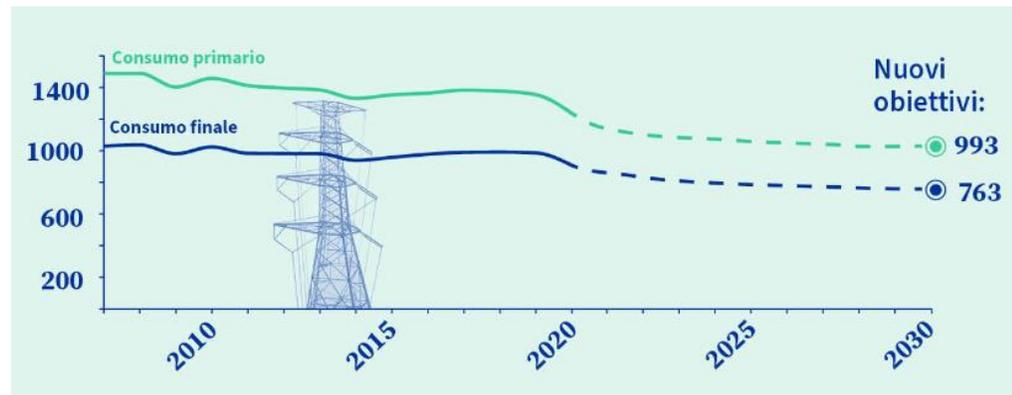


Figura 2: Nuovi obiettivi sul consumo energetico [11]

I settori più inquinanti che si dovranno impegnare maggiormente per ottenere questa transizione energetica sono l'industria manifatturiera, i trasporti e l'edilizia. L'Unione Europea ha implementato diverse misure e programmi per incentivare le industrie ad adottare pratiche più sostenibili. Alcune delle principali iniziative includono normative sull'efficienza energetica, finanziamenti e incentivi, audits energetici, certificazioni, piattaforme di scambio di conoscenze e innovazione tecnologica.

L'UE sta quindi adottando un approccio olistico, che combina normative vincolanti, incentivi finanziari, supporto alla ricerca e condivisione di conoscenze, per incentivare attivamente le industrie a consumare meno energia e adottare pratiche più sostenibili.

3. Revisione della letteratura

Il presente capitolo si propone di esplorare la vasta gamma di studi e ricerche nel campo della sostenibilità applicata alla schedulazione della produzione industriale, con particolare attenzione all'impatto del consumo energetico.

L'obiettivo principale di questa revisione della letteratura è comprendere in che modo i concetti di sostenibilità e di risparmio energetico sono stati integrati e applicati nell'ambito della schedulazione della produzione.

Gli articoli selezionati sono stati classificati secondo l'ambiente macchina, la funzione obiettivo, i problemi analizzati e le azioni proposte sulle macchine. La funzione obiettivo è stata ulteriormente classificata secondo il tipo di funzione (mono o multi-obiettivo) e secondo le metriche minimizzate (di performance e/o di sostenibilità).

3.1 Criterio di selezione degli articoli

La selezione degli articoli è stata effettuata attraverso il database SCOPUS utilizzando le parole chiave "sustainability in scheduling" e "energy consumption in production scheduling". Tale prima ricerca ha portato ad un totale di 700 articoli scritti tra il 2006 e il 2024.

La crescente consapevolezza ambientale ha catalizzato un aumento esponenziale del numero di articoli dedicati al tema, come si evince dalla Figura 3.

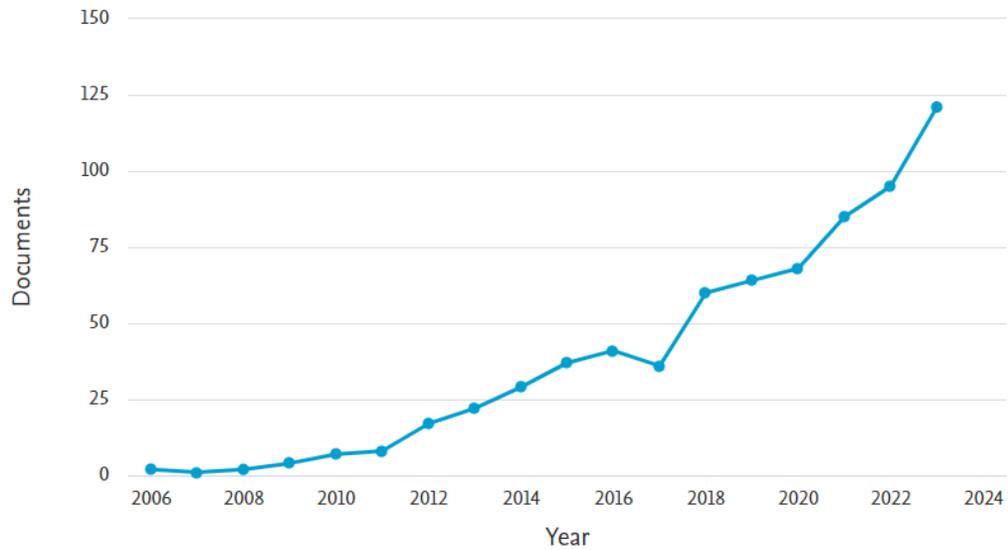


Figura 3: Documenti scritti sulla sostenibilità nella schedulazione

Dalla prima ricerca fatta, sono stati identificati gli articoli più pertinenti e rilevanti per lo sviluppo dell'argomento della tesi tramite diverse scremature:

- 1) *Scrematura 1*: filtrando “Energy Utilization” dall’ambito tematico sono stati selezionati un totale di **221 articoli**.
- 2) *Scrematura 2*: Di questi 221 articoli sono stati esclusi quelli scritti prima del 2014, arrivando ad un totale di **211 articoli**.

La scelta di focalizzare l'attenzione sugli articoli pubblicati dal 2014 al 2024 non è casuale, ma riflette un'importante evoluzione nella produzione scientifica riguardante l'integrazione della sostenibilità nella schedulazione.

- 3) *Scrematura 3*: dei 211 articoli rimasti, sono stati esclusi ulteriori articoli il cui abstract non mostrava una correlazione diretta con il tema del consumo energetico nella schedulazione della produzione. Da questa 3° scrematura sono stati selezionati **74 articoli**.

- 4) *Scrematura 4*: Da una lettura più approfondita dei 74 articoli, sono stati poi selezionati quelli che mirassero direttamente ad una minimizzazione del consumo energetico in funzione obiettivo, arrivando così a **50 articoli**.

3.2 Classificazione della letteratura

La letteratura esaminata è stata classificata secondo 3 criteri: tipo di ambiente macchina studiato; tipologia di funzione obiettivo e scelta delle metriche ottimizzate; problemi affrontati negli studi, cause e soluzioni proposte sulle macchine.

Un aspetto fondamentale della classificazione riguarda l'analisi della funzione obiettivo, le metriche ottimizzate e la distinzione tra problemi di ottimizzazione mono e multi-obiettivo. Attraverso questa distinzione, emerge chiaramente la varietà di obiettivi e le complessità intrinseche alla schedulazione sostenibile, evidenziando la necessità di approcci flessibili e adattabili che possano affrontare simultaneamente diverse dimensioni di sostenibilità.

Si è scelto di non approfondire i dettagli matematici degli algoritmi impiegati per risolvere i problemi di schedulazione, in modo da focalizzare l'attenzione del lettore sugli aspetti più pratici e operativi dei problemi di schedulazione sostenibile.

La Tabella 1 mostra nelle colonne i primi due criteri di classificazione (ambiente macchina e funzione obiettivo) e sulle righe gli articoli selezionati dal meno recente al più recente (ogni riga corrisponde ad un singolo articolo).

Riferimento Articolo	Ambiente Macchina	Funzione Obiettivo			
		Metriche di performance	Metriche di sostenibilità	Mono Obiettivo	Multi Obiettivo
Shrouf F., et al. (2014) [12]	Macchina singola	-	Consumo Energetico	X	
Kai Li, et al. (2014) [13]	Macchine parallele	Makespan	Consumo Energetico		X
Mansouri S.A., et al. (2016) [14]	Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Zhang L., et al. (2017) [15]	Flexible Job Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Wu X., et al. (2018) [16]	Flexible Job Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Zhou S., et al. (2018) [17]	Macchine parallele	Makespan	Consumo Energetico, Costo dell'energia		X
Lu C., et al. (2018) [18]	Welding Shop	Makespan	Consumo Energetico, inquinamento acustico		X
Lu C., et al. (2019) [19]	Hybrid Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico, inquinamento acustico		X
Liu Z., et al. (2019) [20]	Flexible Job Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Zhang B., et al. (2019) [21]	Hybrid Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Wang J., et al. (2019) [22]	Routing di una macchina singola e di più veicoli	-	Consumo Energetico	X	
Jiang T., et al. (2019) [23]	Job Shop	Costi di produzione	Consumo Energetico		X
Cota L.P., et al. (2019) [24]	Macchine parallele non correlate	Makespan	Consumo Energetico		X
Safarzadeh H., et al. (2019) [25]	Macchine parallele uniformi	Makespan	Consumo Energetico, Costo dell'energia		X
Morillo Torres D., et al. (2019) [26]	Progetto multimodale con risorse limitate	Makespan	Consumo Energetico		X

Han Y., et al. (2020) [27]	Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Feng Y., et al. (2020) [28]	Flexible Workshop	Makespan, Costi di produzione	Consumo Energetico		X
Faraji Amiri M., et al. (2020) [29]	Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Assia S., et al. (2020) [30]	Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Dong J., et al. (2020) [31]	Hybrid Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Kong L., et al. (2020) [32]	Hybrid Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Lu C., et al. (2021) [33]	Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Wu X., et al. (2021) [34]	Hybrid Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Zhou B., et al. (2021) [35]	Linee di assemblaggio a flusso misto	Inventario lato linea	Consumo Energetico		X
Hidri L., et al. (2021) [36]	Macchine parallele	Makespan	Consumo Energetico		X
Zhou B., et al. (2021) [37]	Cellula Manifatturiera Flessibile con	Makespan	Consumo Energetico		X
Li M., et al. (2021) [38]	Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Nanthapodej R., et al. (2021) [39]	Macchine parallele	Makespan	Consumo Energetico		X
Nanthapodej R., et al. (2021) [40]	Macchine parallele	Costi di produzione	Consumo Energetico		X
Zuo Y., et al. (2021) [41]	Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Bouzd M., et al. (2021) [42]	Macchina singola	Massima Tardiness	Consumo Energetico, Costo dell'energia		X
Afsar S., et al. (2022) [43]	Job Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Liu C., et al. (2022) [44]	Flexible Job Shop	Makespan, Costi di produzione	Consumo Energetico		X
Wu X., et al. (2022) [45]	Hybrid Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Niu W., et al. (2022) [46]	Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X

Stewart R., et al. (2023) [47]	Macchine parallele	Makespan	Consumo Energetico		X
Chen J., et al. (2023) [48]	Sistemi eterogenei multi-processore	Makespan	Consumo Energetico		X
Sekkal D. N., et al. (2023) [49]	Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Babor M., et al. (2023) [50]	Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Zhu K., et al. (2023) [51]	Flexible Job Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Li J., et al. (2023) [52]	Flexible Job Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Zhao F., et al. (2023) [53]	Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Li R., et al. (2023) [54]	Flexible Job Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Destouet C., et al. (2023) [55]	Flexible Job Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Kuster T., et al. (2023) [56]	Job Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Sitahong A., et al. (2023) [57]	Job Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Tian Z., et al. (2024) [58]	Macchina Singola	-	Consumo Energetico, Costo dell'energia		X
Zhu N., et al. (2024) [59]	Flexible Job Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Wang J., et al. (2024) [60]	Hybrid Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X
Luo C., et al. (2024) [61]	Flow Shop	Makespan	Consumo Energetico		X

Tabella 1: Criteri di classificazione della letteratura: ambiente macchina e funzione obiettivo

La Tabella 2 mostra nelle colonne l'ultimo criterio di classificazione proposto, mentre sulle righe sono riportati gli articoli selezionati dal meno recente al più recente (ogni riga corrisponde ad un singolo articolo).

Riferimento Articolo	Problema	Causa	Azione proposta
Shrouf F., et al. (2014) [12]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Accensione/Spengimento
Kai Li, et al. (2014) [13]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Mansouri S.A., et al. (2016) [14]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Accensione/Spengimento e Riduzione Velocità
Zhang L., et al. (2017) [15]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Selezione, Sequenziamento e Accensione/Spengimento
Wu X., et al. (2018) [16]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Accensione/Spengimento, Riduzione Velocità
Zhou S., et al. (2018) [17]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Lu C., et al. (2018) [18]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Lu C., et al. (2019) [19]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Accensione/Spengimento, Sequenziamento
Liu Z., et al. (2019) [20]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Accensione/Spengimento
Zhang B., et al. (2019) [21]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Wang J., et al. (2019) [22]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Accensione/Spengimento
Jiang T., et al. (2019) [23]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Cota L.P., et al. (2019) [24]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Safarzadeh H., et al. (2019) [25]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Morillo Torres D., et al. (2019) [26]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Han Y., et al. (2020) [27]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Feng Y., et al. (2020) [28]	Tempo di inattività	Malfunzionamento	Sequenziamento
Faraji Amiri M., et al. (2020) [29]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento e Riduzione Velocità
Assia S., et al. (2020) [30]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Riduzione Velocità
Dong J., et al. (2020) [31]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Kong L., et al. (2020) [32]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Lu C., et al. (2021) [33]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Wu X., et al. (2021) [34]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento

Zhou B., et al. (2021) [35]	Tempo di inattività	Ritardi nella distribuzione	Sequenziamento
Hidri L., et al. (2021) [36]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Accensione/Spengimento
Zhou B., et al. (2021) [37]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Li M., et al. (2021) [38]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Nanthapodej R., et al. (2021) [39]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Nanthapodej R., et al. (2021) [40]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Zuo Y., et al. (2021) [41]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Bouزيد M., et al. (2021) [42]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Accensione/Spengimento in presenza di tariffe elettriche variabili
Afsar S., et al. (2022) [43]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Accensione/Spengimento
Liu C., et al. (2022) [44]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Wu X., et al. (2022) [45]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Niu W., et al. (2022) [46]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Stewart R., et al. (2023) [47]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Chen J., et al. (2023) [48]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Sekkal D. N., et al. (2023) [49]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Velocità e Sequenziamento
Babor M., et al. (2023) [50]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Accensione/Spengimento
Zhu K., et al. (2023) [51]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Li J., et al. (2023) [52]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Zhao F., et al. (2023) [53]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Li R., et al. (2023) [54]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Destouet C., et al. (2023) [55]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Kuster T., et al. (2023) [56]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Sitahong A., et al. (2023) [57]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Tian Z., et al. (2024) [58]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Zhu N., et al. (2024) [59]	Tempo di inattività	Cancellazione ordini	Sequenziamento
Wang J., et al. (2024) [60]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento
Luo C., et al. (2024) [61]	Tempo di inattività	Scheduling inefficiente	Sequenziamento

Tabella 2: Criteri di classificazione della letteratura: problemi e soluzioni proposte

3.2.1 L'ambiente Macchina

Il primo criterio di classificazione scelto per presentare gli articoli selezionati è il tipo di ambiente macchina studiato.

Come si evince dalla Figura 4, la configurazione più studiata è il Flow Shop, che considerando anche la sua variante Hybrid Flow Shop costituisce il 38% degli articoli. La seconda configurazione più studiata è il Job Shop, che considerando anche la sua variante Flexible Job Shop costituisce il 26% degli articoli.

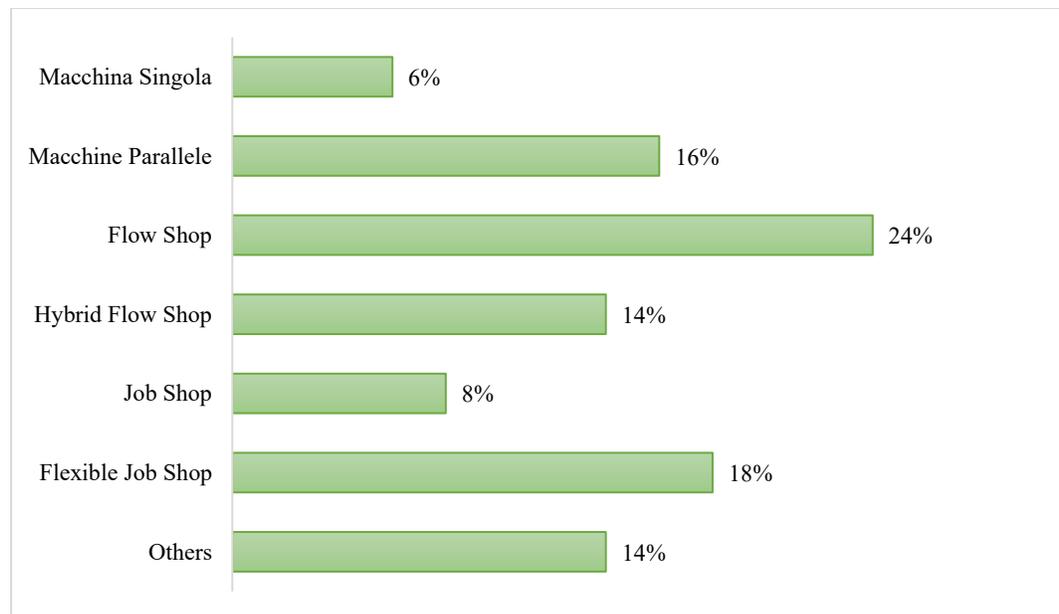


Figura 4: Ambiente macchina

Solo 3 articoli su 50 studiano il caso della macchina singola, come Shrouf F., et al. (2014) [12], che propongono un modello mono-obiettivo per la minimizzazione del consumo energetico. Anche Bouzid M., et al. (2021) [42] e Tian Z., et al. (2024) [58] studiano la configurazione della macchina singola, ma a differenza di [12]

introducono in funzione obiettivo anche il costo legato all'energia, studiando la schedulazione della produzione in periodi di non picco delle tariffe elettriche.

Degli articoli selezionati, sono 8 i paper che hanno concentrato il loro studio su configurazioni a singolo stadio e macchine parallele.

Kai Li, et al. (2014) [13] propongono un modello di ottimizzazione multi-obiettivo per minimizzare il consumo energetico e il makespan. Questo articolo si concentra su due aspetti: la schedulazione delle macchine e l'utilizzo delle attrezzature. Nell'ambito di un'azienda manifatturiera, le macchine sono generalmente acquistate in momenti diversi, con alcune recenti e altre più datate. A causa dell'avanzamento tecnologico, le nuove macchine solitamente consumano meno energia e producono meno inquinanti, anche se sono funzionalmente identiche alle macchine più vecchie. La presenza di entrambi i tipi di macchine è comune, con le vecchie spesso utilizzate come riserva o durante la manutenzione delle nuove. Pertanto, in qualsiasi momento, l'azienda manifatturiera avrà una combinazione di macchine nuove e vecchie. In questo articolo, si studia quindi come sequenziare le macchine al fine di ridurre makespan e consumo energetico in un'azienda che dispone di m macchine parallele funzionalmente identiche, con differenze nel consumo di energia e nell'emissione di inquinanti.

Anche Zhou S., et al. (2018) [17] e Safarzadeh H., et al. (2019) [25] propongono un modello di ottimizzazione multi-obiettivo per minimizzare il consumo energetico e il makespan su una configurazione a singolo stadio e m macchine

parallele, ma a differenza di [13], introducono un'ulteriore metrica in funzione obiettivo: il costo dell'energia.

Ci sono poi 3 articoli (vedi Cota L.P., et al. (2019) [24], Stewart R., et al. (2023) [47] e Nanthapodej R., et al. (2021) [39]) che affrontano la schedulazione efficiente delle macchine parallele tramite la scelta del sequenziamento dei job; diversamente da Hidri L., et al. (2021) [36], che trovano una soluzione alla schedulazione efficiente delle macchine parallele tramite lo spegnimento delle macchine inattive.

Nanthapodej R., et al. (2021) [40] propongono invece un modello di ottimizzazione multi-obiettivo per macchine parallele studiando il sequenziamento delle macchine con lo scopo di minimizzare simultaneamente costi di produzione e consumo energetico attraverso considerazioni sul bilanciamento del carico delle macchine.

Tra i 12 articoli che studiano la configurazione del Flow Shop, solo uno propone un modello multi-obiettivo che offre azioni di accensione/spegnimento della macchina in condizioni di inattività: Babor M., et al. (2023) [50]. I ricercatori esaminano infatti tre linee di produzione di panifici di piccole e medie dimensioni con lo scopo di minimizzare makespan e consumo di energia.

Mansouri S.A., et al. (2016) [14] esplorano invece il trade-off tra la minimizzazione del makespan e il consumo totale di energia in un flusso di produzione sequenziale per due macchine in un Flow Shop, utilizzando la variabilità della velocità delle operazioni; metrica investigata anche da Li M., et al. (2021) [38], Zuo Y., et al. (2021) [41], Niu W., et al. (2022) [46], Faraji Amiri M., et al. (2020) [29] e Assia

S., et al. (2020) [30]. [41] dimostrano tramite un esperimento condotto su 200 job e 8 macchine, che aumentando il makespan solo dello 0,2% si può ridurre il consumo totale di energia del 29,57%.

Ci sono poi 4 articoli (Han Y., et al. (2020) [27], Lu C., et al. (2021) [33], Zhao F., et al. (2023) [53] e Luo C., et al. (2024) [61]) che propongono un modello di ottimizzazione multi-obiettivo che trova una soluzione al problema del consumo energetico tramite il sequenziamento delle macchine e dei job in un Flow Shop. Lo scopo degli articoli è trovare il giusto sequenziamento dei job riducendo al massimo i tempi di inattività e trovando così un connubio tra minimizzazione del makespan e del consumo energetico. Sekkal D. N., et al. (2023) [49] studiano lo stesso problema ma, a differenza di [27, 33, 53, 61] tengono conto dell'effetto apprendimento dei lavoratori con diversi livelli di agilità, macchine che operano a diverse velocità, tempi di setup dipendenti dalla sequenza e tempo di trasporto controllabile. Per trovare una sequenza che minimizzi entrambe le metriche, è stato formulato un modello bi-obiettivo che sfrutta l'effetto apprendimento. I risultati dei vari esperimenti effettuati sul modello mostrano che l'effetto apprendimento non solo riduce il tempo di lavorazione e il consumo di energia, ma assegna priorità ai lavori con tempi di lavorazione elevati da inserire alla fine del gruppo, consentendone la minimizzazione.

Gli articoli che studiano la configurazione dell'Hybrid Flow Shop sono 6. Lu C., et al. (2019) [19] propongono un modello di ottimizzazione multi-obiettivo che, tramite

il sequenziamento delle macchine e la scelta di spegnere quelle non utilizzate, mira a minimizzare 3 metriche: makespan, consumo energetico e inquinamento acustico.

Dong J., et al. (2020) [31], Kong L., et al. (2020) [32], Wu X., et al. (2021) [34], Wu X., et al. (2022) [45] e Wang J., et al. (2024) [60] studiano il giusto sequenziamento delle macchine e dei job in un Flow Shop ibrido; mentre Zhang B., et al. (2019) [21] aggiungono ai problemi studiati da [31, 32, 34, 45, 60] la variabilità della velocità di elaborazione dei job.

Per quanto riguarda la configurazione del Job Shop, Jiang T., et al. (2019) [23] propongono un modello di ottimizzazione multi-obiettivo per minimizzare il consumo energetico e i costi di produzione in un Job Shop tramite il sequenziamento dei job e delle macchine a velocità variabile. Tale ottimizzazione consentirebbe di ridurre al minimo il tempo di inattività delle macchine, efficientando il processo produttivo. Il concetto di tempi di inattività e di schedulazione efficiente in un Job Shop è presente anche nel modello di Afsar S., et al. (2022) [43] e Sitahong A., et al. (2023) [57]. La stessa configurazione è studiata anche da Kuster T., et al. (2023) [56] che, cercando di trovare un trade off tra makespan e consumo energetico, concludono che accettando un leggero aumento del makespan si può ottenere un significativo guadagno in efficienza energetica.

Gli articoli che studiano la configurazione del Flexible Job Shop sono 9. Zhang L., et al. (2017) [15], Liu Z., et al. (2019) [20] e Wu X., et al. (2018) [16] studiano

come minimizzare congiuntamente consumo energetico e makespan in un Flexible Job Shop attraverso decisioni di selezione delle macchine, sequenziamento dei job e attivazione/spegnimento delle macchine. I risultati sperimentali dimostrano che tali decisioni riducono efficacemente il consumo totale di energia.

Liu C., et al. (2022) [44], Zhu K., et al. (2023) [51], Li J., et al. (2023) [52], Li R., et al. (2023) [54] e Destouet C., et al. (2023) [55] invece propongono un modello di ottimizzazione multi-obiettivo per minimizzare il consumo energetico e il makespan tramite il sequenziamento delle macchine e dei job in un Flexible Job Shop. [44] aggiungono in funzione obiettivo la metrica dei costi di produzione, mentre [55] integrano nello studio la componente umana. È stato dimostrato infatti che il benessere dei lavoratori influisce significativamente sulle prestazioni di scheduling.

Zhu N., et al. (2024) [59] propongono per la prima volta un modello di ottimizzazione multi-obiettivo per un problema di scheduling distribuito di un Job Shop Flessibile con cancellazione degli ordini. L'annullamento degli ordini durante la produzione è una pratica ampiamente diffusa negli ambienti di produzione reale e porta a moltissimi sprechi di risorse. Lo studio propone un'efficiente tecnica di re-scheduling per gestire le operazioni con diversi stati di elaborazione (operazione completata, operazione in corso ed operazione non elaborata) quando arriva la cancellazione dell'ordine. Lo scopo dello studio è quello di fornire ai responsabili della produzione gli strumenti per evitare distribuzioni irragionevoli di materiali e sprechi inutili di risorse di produzione in caso di cancellazione dell'ordine,

permettendo di migliorare la produttività e l'utilizzo delle risorse dei sistemi di produzione.

Ci sono infine 7 articoli che studiano altri tipi di configurazioni; uno di questi, Lu C., et al. (2018) [18], propone un modello di ottimizzazione multi-obiettivo per minimizzare consumo energetico, makespan e inquinamento acustico in una bottega di saldatura dove più saldatori possono eseguire contemporaneamente lo stesso compito. Wang J., et al. (2019) [22] invece propongono un modello mono-obiettivo per un sistema integrato di produzione e distribuzione in un contesto di singola macchina e veicoli multipli. L'articolo studia la schedulazione di cambio della macchina e valuta l'opportunità di spegnere la macchina inattiva, l'orario di inizio per elaborare ciascun pezzo, l'organizzazione delle spedizioni e l'itinerario dei veicoli.

Morillo Torres D., et al. (2019) [26] si concentrano sull'ottenimento di soluzioni sostenibili ed efficienti dal punto di vista energetico per problemi di programmazione delle risorse limitate multi-modalità. I risultati dello studio mostrano la convenienza di assegnare consumi energetici e tempi di processamento diversi alle attività nei problemi di schedulazione delle macchine al fine di ottenere soluzioni energeticamente efficienti.

Feng Y., et al. (2020) [28] propongono un modello di ottimizzazione multi-obiettivo in un Flexible Workshop. Questo articolo propone un metodo integrato per la schedulazione intelligente green considerando uno stato incerto della

macchina. Lo scopo è quello di minimizzare makespan e consumo energetico tramite una gestione repentina degli stati incerti della macchina, come per esempio il suo malfunzionamento. Per fare ciò viene istituito un sistema hardware per il monitoraggio intelligente e la diagnosi dello stato della macchina basato su una rete di sensori wireless, edge computing e intelligenza artificiale.

Zhou B., et al. (2021) [35] invece propone una strategia per affrontare un problema di schedulazione della distribuzione di materiali Just In Time bi-obiettivo considerando il consumo di energia per linee di montaggio a flusso misto. Viene formulato un modello matematico che mira a minimizzare il consumo totale di energia e il totale dell'inventario laterale della linea.

Zhou B., et al. (2021) [37] concentrano il loro studio su un problema di schedulazione di una Flexible Manufacturing Cell con robot per la movimentazione di materiali. In questa configurazione ogni lavoro è caratterizzato da diverse operazioni, macchine di lavorazione e tempi di lavorazione. I robot trasferiscono i lavori alle macchine correlate. L'articolo si focalizza sia sul sequenziamento delle macchine e dei job, sia sui processi di trasporto dei robot proponendo un modello matematico bi-obiettivo mirante a minimizzare contemporaneamente il makespan totale e il consumo energetico totale del sistema.

Chen J., et al. (2023) [48] infine elaborano un modello di ottimizzazione multi-obiettivo volto a minimizzare consumo energetico e makespan nei flussi di lavoro in sistemi embedded multiprocessore eterogenei. Questo studio consente di trovare

un'allocazione ottimale per i processori, e stabilire la frequenza e il tempo di avvio di ogni attività.

3.2.2 La funzione obiettivo

Un'alternativa alla categorizzazione del paragrafo precedente è la classificazione degli articoli secondo la funzione obiettivo. La quasi totalità degli articoli selezionati (96%) affronta problemi di schedulazione multi-obiettivo, integrando in funzione obiettivo metriche di performance e di sostenibilità. Solo 2 articoli su 50 infatti studiano un problema mono-obiettivo (vedi [12] e [22]).

Questa osservazione riflette una consapevolezza sempre più diffusa che la schedulazione delle attività produttive non può più essere affrontata esclusivamente da una prospettiva unidimensionale, poiché la complessità dei sistemi di produzione moderni e la crescente attenzione verso pratiche sostenibili richiedono un approccio capace di bilanciare obiettivi spesso contrastanti.

La schedulazione sostenibile, infatti, combina l'ottimizzazione delle prestazioni con la ricerca di una soluzione efficiente anche dal punto di vista della sostenibilità ambientale.

La caratteristica comune che unisce gli articoli selezionati è la costante ricerca della minimizzazione del consumo energetico in funzione obiettivo. Tuttavia, alcuni articoli si focalizzano anche su altre metriche di sostenibilità: i costi dell'energia e l'inquinamento acustico.

Safarzadeh H., et al. (2019) [25], Bouzid M., et al. (2021) [42] e Tian Z., et al. (2024) [58] mirano anche ad una minimizzazione dei costi dell'energia, considerando la presenza di tariffe elettriche variabili e scegliendo di non produrre nei periodi in cui i costi dell'energia sono maggiori. Anche Zhou S., et al. (2018) [17] studiano la variabilità dei costi dell'energia, schedulando la produzione di macchine a lotti in parallelo in presenza di arrivi dinamici di lavori e di un regime tariffario time-of-use (sistema di tariffazione secondo cui non c'è una tariffa fissa per l'energia consumata, ma le tariffe variano in base all'ora del giorno in cui viene consumata l'energia).

Lu C., et al. (2018) [18] e Lu C., et al. (2019) [19] introducono invece nel loro modello la minimizzazione dell'inquinamento acustico, metrica poco studiata in letteratura, nonostante rappresenti parte del benessere dei lavoratori.

Per quanto riguarda le metriche di performance, come si evince dalla Figura 5, il makespan è la metrica maggiormente ottimizzata nella funzione obiettivo degli articoli selezionati (85%).

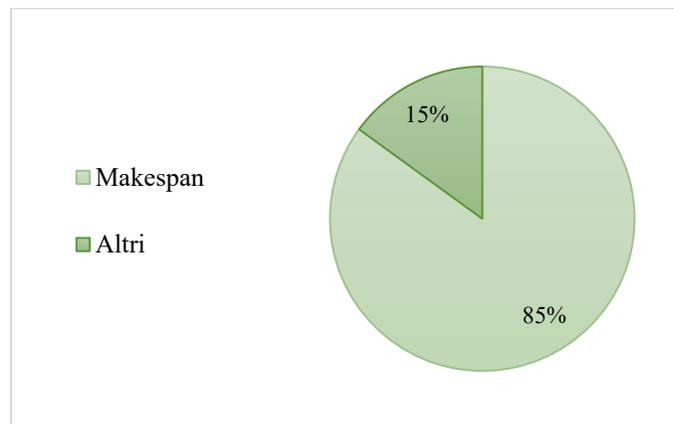


Figura 5: Metriche di performance

Gli articoli appartenenti al restante 15% integrano in funzione obiettivo metriche alternative al makespan; come [23, 28, 40, 44] che studiano come minimizzare i costi di produzione e [42] che propongono un modello multi-obiettivo con lo scopo di minimizzare la massima Tardiness, il costo dell'energia e il consumo energetico su una macchina singola.

3.2.3 Problemi riscontrati e azioni proposte

Gli articoli selezionati possono infine essere classificati secondo il problema riscontrato e le azioni proposte sulle macchine.

Come si evince dalla Figura 6, nel 100% degli articoli selezionati, il problema maggiormente riscontrato nella schedulazione sostenibile della produzione è la condizione di inattività delle macchine. Rispetto a questa percentuale, il 94% degli articoli identifica come causa della condizione di inattività un'inefficienza nella schedulazione dei job; mentre solo 3 articoli, [28, 35, 59], identificano come cause rispettivamente un malfunzionamento della macchina, ritardi di produzione e la cancellazione senza preavviso degli ordini.

La condizione di inattività si verifica quando la macchina è accesa e in funzione, ma è considerata inattiva in termini operativi poiché non svolge attività produttive in quel momento. I tempi di inattività delle macchine nelle fasi produttive possono essere causati da diversi fattori, e la loro presenza è influenzata da vari elementi legati alla natura complessa dei processi manifatturieri. Alcuni dei motivi più comuni per i tempi di inattività delle macchine includono la manutenzione e la

riparazione, il setup delle macchine, la mancanza di materiali e componenti, la cancellazione/modifica degli ordini senza preavviso, problemi di qualità e schedulazione della produzione inefficiente.

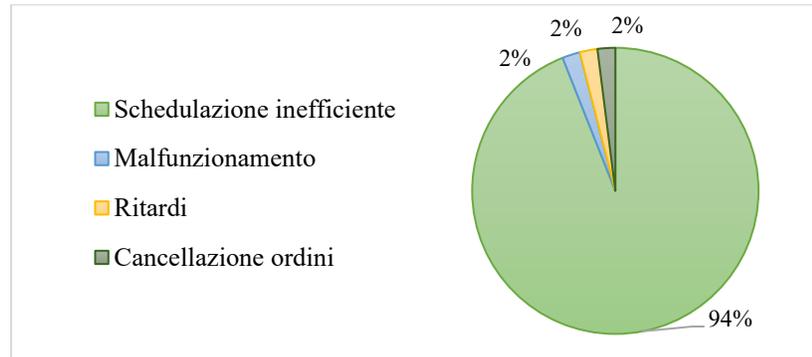


Figura 6: Problemi riscontrati nella schedulazione sostenibile

La soluzione proposta dal 68% degli articoli per far fronte ai tempi di inattività è il sequenziamento delle macchine e dei job, seguito dall'accensione/spegnimento delle macchine (22% degli articoli) e dalla regolazione della velocità delle macchine (10%), come si evince dalla Figura 7.

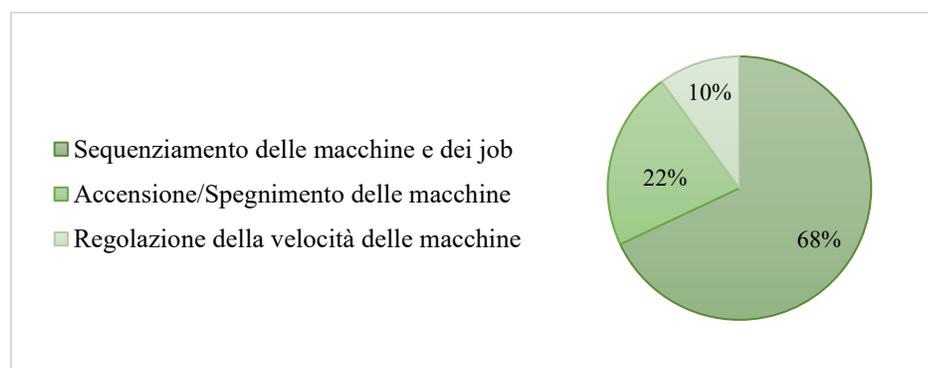


Figura 7: Azioni proposte sulle macchine

La scelta di accendere e spegnere le macchine è studiata in 11 articoli. Tra questi, Mansouri S.A., et al. (2016) [14] sottolineano l'importanza di considerare attivamente carenze energetiche e suggeriscono soluzioni come lo spegnimento selettivo delle macchine durante i periodi di inattività per ridurre il consumo di energia elettrica nell'industria manifatturiera. La ricerca evidenzia inoltre che il tempo di lavorazione è il principale determinante della richiesta di energia nelle macchine utensili.

[12] propongono un modello matematico che permette al responsabile delle operazioni di implementare la schedulazione di produzione durante un turno di produzione, prendendo decisioni a livello di macchina per determinare i tempi di avvio per l'elaborazione dei lavori, il tempo di inattività, il momento in cui la macchina deve essere spenta, il tempo di accensione e il tempo di spegnimento.

Anche Babor M., et al. (2023) [50] studiano soluzioni di accensione/spegnimento di una macchina, ma a differenza di [12] e [14], studiano un caso reale di produzione della panificazione. I panettieri tendono a lasciare accessi i forni anche se non sono in uso, fino a quando il prodotto finale è cotto. Ciò comporta spreco di energia, aumento dei costi di produzione ed emissioni di CO₂. Questo articolo esamina tre linee di produzione di panifici di piccole e medie dimensioni con lo scopo di minimizzare makespan e consumo di energia. Per raggiungere tale scopo, è stato analizzato il tempo di inattività dei forni, principale causa dell'eccessivo consumo energetico, e sono state studiate soluzioni volte all'accensione/spegnimento dei forni lasciati inattivi. Lo studio ha confermato che

perdendo una minima quantità di makespan, si può ottenere una sostanziale riduzione di consumo energetico.

Le considerazioni sull'accensione e lo spegnimento delle macchine sono studiate anche da Liu Z., et al, (2019) [20] e Wu X., et al. (2018) [16]. Questi ultimi propongono un modello per calcolare il consumo energetico di una macchina in diversi stati: stato di accensione/spegnimento, stato di inattività, stato di lavorazione e stato di stand by. Le soluzioni proposte riguardano lo spegnimento delle macchine inattive, la riduzione della velocità delle macchine non bottleneck e la produzione in orari non di punta.

L'ultima soluzione adottata per rispondere al problema dell'inattività delle macchine è la riduzione della velocità, studiata in 5 articoli: [14, 16, 29, 30, 49]. Tra questi, Faraji Amiri M., et al. (2020) [29] studiano una configurazione con macchine a diverse velocità di lavorazione, dimostrando che la riduzione delle velocità delle macchine aumenta il makespan e diminuisce il consumo di energia. Quindi, le velocità delle macchine influenzano i valori degli obiettivi che sono in conflitto. Per questo motivo è stata formulata una proposta che assegna le velocità alle macchine e definisce la sequenza dei job.

4. Conclusioni

Alla luce dell'analisi condotta su un corpus di 50 articoli focalizzati sul consumo energetico nella schedulazione, è evidente che la maggior parte dei problemi esaminati, che integrano il consumo energetico nella schedulazione sostenibile, presentano una complessità computazionale rilevante. Tale complessità deriva dalla necessità di bilanciare diverse metriche e obiettivi, rendendo il raggiungimento di soluzioni ottimali un obiettivo difficile da conseguire. Tuttavia, i risultati della ricerca suggeriscono che molte soluzioni proposte si avvicinano a ottimi locali, dimostrando la praticabilità di approcci quasi ottimali per affrontare questi problemi complessi.

Tra le configurazioni a livello di macchina considerate negli studi, emerge una netta prevalenza del Flow Shop e delle sue varianti come oggetto di indagine privilegiato; mentre il makespan risulta essere la metrica più ottimizzata congiuntamente al consumo energetico.

La maggior parte degli articoli identifica come causa principale dell'eccessivo consumo energetico una programmazione della produzione inefficiente, nella quale le macchine vengono lasciate accese durante i tempi di inattività. La soluzione maggiormente proposta per risolvere questo problema è un'ottimizzazione del sequenziamento delle macchine e dei job al fine di ridurre al minimo i tempi di inattività delle macchine, minimizzando congiuntamente consumo energetico e makespan.

Come accennato precedentemente, però, non è facile arrivare all'ottimo in questo tipo di problemi complessi. L'ottimizzazione simultanea del consumo energetico e del makespan si rivela un compito arduo, data la natura quasi antitetica di queste due metriche in termini di obiettivi. Concentrandosi esclusivamente sulla riduzione del consumo energetico, si osserva un correlato aumento del makespan, poiché le decisioni volte a minimizzare il consumo energetico tendono a prolungare i tempi di esecuzione delle attività. Allo stesso modo, una focalizzazione esclusiva sulla minimizzazione del makespan comporta spesso un aumento del consumo energetico, in quanto le strategie volte a ridurre i tempi di esecuzione possono richiedere una maggiore energia. Pertanto, gran parte delle soluzioni proposte non raggiunge livelli ottimali, ma si avvicina all'ottimo, poiché è stato dimostrato che anche una piccola compromissione del makespan può portare a miglioramenti significativi nel consumo energetico.

In conclusione, lo scopo di questa revisione è quello di delineare le principali tendenze e sfide nel contesto della schedulazione sostenibile della produzione. Emergono chiaramente l'incremento della sensibilità ambientale e la crescente consapevolezza dell'importanza della sostenibilità, entrambi fattori che stanno orientando le aziende verso pratiche più ecocompatibili nella gestione dei processi produttivi. L'ampia produzione letteraria degli ultimi dieci anni costituisce un'ulteriore testimonianza di questa tendenza.

Bibliografia e Sitografia

- [1] M. Garetti e M. Taisch (2012), “*Sustainable manufacturing: trends and research challenges*”, Taylor & Francis Group
- [2] L. M. Padovani, P. Carrabba (2017), “*La Sostenibilità Ambientale - Un manuale per prendere buone decisioni*”, ENEA
- [3] Unione Europea (2018), “*Verso un’Europa più verde e sostenibile*” [online], Unione Europea, link: https://european-union.europa.eu/priorities-and-actions/actions-topic/environment_it
- [4] Consiglio Europeo (2023), “*Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici*” [online], Consiglio Europeo, link: <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/paris-agreement/>
- [5] Consiglio Europeo (2023), “*Infografica - Accordo di Parigi: la via dell’UE verso la neutralità climatica*” [online], Consiglio Europeo, link: <https://www.consilium.europa.eu/it/infographics/paris-agreement-eu/>
- [6] Camera dei deputati (2023), “*Agenda 2030*” [online], Camera dei deputati, link: https://temi.camera.it/leg19DIL/area/19_1_38/agenda-2030.html
- [7] A. Gerbeti (2018), “*Sostenibilità come parametro per la competitività industriale*”, Università di Roma

[8] D. Lepore e R. Colanero (2022), “*Economia circolare e Industria 4.0: il futuro del Made in Italy*”, Università di Macerata

[9] E. Pizzurno (2016), “*L’efficienza energetica: casi ed esperienze*”, Unione degli Industriali della Provincia di Varese

[10] Parlamento Europeo (2023), “*Efficienza Energetica*” [online], Parlamento Europeo, link: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/69/efficienza-energetica#:~:text=Entro%20il%202030%20gli%20Stati,9%20%25%20dal%201%20C2%BA%20gennaio%202028.>

[11] Consiglio Europeo (2023), “*Infografica -Pacchetto “Pronti per il 55%”: in che modo l’UE diventerà più efficiente sotto il profilo energetico*” [online], Consiglio Europeo, link: <https://www.consilium.europa.eu/it/infographics/fit-for-55-how-the-eu-will-become-more-energy-efficient/>

[12] S.F. Shrouf, J. Ordieres-Meré, A. García-Sánchez, M. Ortega-Mier (2014), “*Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs*”, Elsevier

[13] K. Li, X. Zhang, J. Y.-T. Leung, S.-L. Yang (2014), “*Parallel machine scheduling problems in green manufacturing industry*”, Elsevier

[14] S. A. Mansouria, E. Aktasb, U. Besikcic (2016), “*Green scheduling of a two-machine flow shop: Trade-off between makespan and energy consumption*”,

Elsevier

[15] L. Zhang, Q. Tang, Z. Wu, F. Wang (2017), “*Mathematical modeling and evolutionary generation of rule sets for energy-efficient flexible job shops*”,

Elsevier

[16] X. Wu, Y. Sun (2018), “*A green scheduling algorithm for flexible job shop with energy-saving measures*”, Elsevier

[17] S. Zhou, X. Li, N. Du, Y. Pang, H. Chen (2018), “*A multi-objective differential evolution algorithm for parallel batch processing machine scheduling considering electricity consumption cost*”, Elsevier

[18] C. Lu, L. Gao, X. Li, J. Z., W. Gong (2018), “*A multi-objective approach to welding shop scheduling for makespan, noise pollution and energy consumption*”,

Elsevier

[19] C. Lu, L. Gao, Q. Pan, X. Li, J. Zheng (2019), “*A multi-objective cellular grey wolf optimizer for hybrid flowshop scheduling problem considering noise pollution*”, Elsevier

[20] Z. Liu, S. Guo, L. Wang (2019), “*Integrated green scheduling optimization of flexible job shop and crane transportation considering comprehensive energy consumption*”, Elsevier

- [21] B. Zhanga, Q.-K. Panb, L. Gaoc, X.-Y. Lic, L.-L. Menga, K.-K. Pengd (2019), “*A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition for hybrid flowshop green scheduling problem*”, Elsevier
- [22] J. Wang, S. Yao, J. Sheng, H. Yang (2019), “*Minimizing total carbon emissions in an integrated machine scheduling and vehicle routing problem*”, Elsevier
- [23] T. JIANG, C. ZHANG, Q.-M. SUN (2019), “*Green Job Shop Scheduling Problem With Discrete Whale Optimization Algorithm*”, IEEE
- [24] L. P. Cota, F. G. Guimarães, R. G. Ribeiro, I. R. Meneghini, F. B. de Oliveira, M. J. F. Souza, P. Siarry (2019), “*An adaptive multi-objective algorithm based on decomposition and large neighborhood search for a green machine scheduling problem*”, Elsevier
- [25] H. Safarzadeh, S. T. A. Niaki (2019), “*Bi-objective green scheduling in uniform parallel machine environments*”, Elsevier
- [26] D. Morillo Torres, F. Barber, M. A. Salido (2019), “*A new model and metaheuristic approach for the energy-based resource-constrained scheduling problem*”, SAGE Publishing
- [27] Y. Han, J. Li, H. Sang, Y. Liu, K. Gao, Q. Pan (2020), “*Discrete evolutionary multi-objective optimization for energy-efficient blocking flow shop scheduling with setup time*”, Elsevier

- [28] Y. Feng, Z. Hong, Z. Li, H. Zheng, J. Tan (2020), “*Integrated intelligent green scheduling of sustainable flexible workshop with edge computing considering uncertain machine state*”, Elsevier
- [29] M. Faraji Amiri, Msc, J. Behnamian, Phd (2020), “*Multi-objective green flowshop scheduling problem under uncertainty: Estimation of distribution algorithm*”, Elsevier
- [30] S. Assia, I. E. Abbassi, A. E. Barkany, M. Darcherif, A. E. Biyaali (2020), “*Green Scheduling of Jobs and Flexible Periods of Maintenance in a Two-Machine Flowshop to Minimize Makespan, a Measure of Service Level and Total Energy Consumption*”, Hindawi
- [31] J. Dong, C. Ye (2020), “*Research on Two-Stage Joint Optimization Problem of Green Manufacturing and Maintenance for Semiconductor Wafer*”, Hindawi
- [32] L. KONG, L. WANG , F. LI, G. WANG, Y. FU, J. LIU (2020), “*A New Sustainable Scheduling Method for Hybrid Flow-Shop Subject to the Characteristics of Parallel Machines*”, IEEE
- [33] C. Lu, L. Gao, W. Gong, C. Hu, X. Yan, X. Li (2021), “*Sustainable scheduling of distributed permutation flow-shop with non-identical factory using a knowledge-based multi-objective memetic optimization algorithm*”, Elsevier

- [34] X. Wu, Q. Yuan , L. Wang (2021), “*Multiobjective Differential Evolution Algorithm for Solving Robotic Cell Scheduling Problem With Batch-Processing Machines*”, IEEE
- [35] B. Zhou, Z. He (2021), “*A static semi-kitting strategy system of JIT material distribution scheduling for mixed-flow assembly lines*”, Elsevier
- [36] L. Hidri, A. Alqahtani, A. Gazdar, B. B. Youssef (2021), “*Green Scheduling of Identical Parallel Machines with Release Date, Delivery Time and No-Idle Machine Constraints*”, MDPI
- [37] B. Zhou, Y. Lei (2021), “*Bi-objective grey wolf optimization algorithm combined Levy flight mechanism for the FMC green scheduling problem*”, Elsevier
- [38] M. Li, G.-G. Wang, H. Yu (2021), “*Sorting-Based Discrete Artificial Bee Colony Algorithm for Solving Fuzzy Hybrid Flow Shop Green Scheduling Problem*”, MDPI
- [39] R. Nanthapodej, C.-H. Liu, K. Nitisiri, S. Pattanapairoj (2021), “*Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search to Solve Parallel-Machine Scheduling to Minimize Energy Consumption While Considering Job Priority and Control Makespan*”, MDPI

- [40] R. Nanthapodej, C.-H. Liu, K. Nitisiri, S. Pattanapiroj (2021), “*Hybrid Differential Evolution Algorithm and Adaptive Large Neighborhood Search to Solve Parallel Machine Scheduling to Minimize Energy Consumption in Consideration of Machine-Load Balance Problems*”, MDPI
- [41] Y. Zuo, Z. Fan, T. Zou, P. Wang (2021), “*A Novel Multi-Population Artificial Bee Colony Algorithm for Energy-Efficient Hybrid Flow Shop Scheduling Problem*”, MDPI
- [42] M. Bouzid, O. Masmoudi, A. Yalaoui (2021), “*Exact Methods and Heuristics for Order Acceptance Scheduling Problem under Time-of-Use Costs and Carbon Emissions*”, MDPI
- [43] S. Afsar, J. J. Palacios, J. Puente, C. R. Vela, I. González-Rodríguez (2022), “*Multi-objective enhanced memetic algorithm for green job shop scheduling with uncertain times*”, Elsevier
- [44] C. Liu, Y. Yao, H. Zhu (2022), “*Hybrid Salp Swarm Algorithm for Solving the Green Scheduling Problem in a Double-Flexible Job Shop*”, MDPI
- [45] X. Wu, X. Yan, L. Wang (2022), “*Optimizing job release and scheduling jointly in a reentrant hybrid flow shop*”, Elsevier

- [46] W. Niu, J.-Q. Li (2022), “*A two-stage cooperative evolutionary algorithm for energy-efficient distributed group blocking flow shop with setup carryover in precast systems*”, Elsevier
- [47] R. Stewart, A. Raith, O. Sinnen (2023), “*Optimising makespan and energy consumption in task scheduling for parallel Systems*”, Elsevier
- [48] J. Chen, P. Han, Y. Zhang, T. You, P. Zheng (2023), “*Scheduling energy consumption-constrained workflows in heterogeneous multi-processor embedded systems*”, Elsevier
- [49] D. N. Sekkal, F. Belkaid (2023), “*A multi-objective optimization algorithm for flow shop group scheduling problem with sequence dependent setup time and worker learning*”, Elsevier
- [50] M. Babor, O. Paquet-Durand, R. Kohlus, B. Hitzmann (2023), “*Modeling and optimization of bakery production scheduling to minimize makespan and oven idle time*”, Scientific Reports
- [51] K. Zhu, G. Gong, N. Peng, L. Zhang, D. Huang, Q. Luo, X. Li (2023), “*Dynamic distributed flexible job-shop scheduling problem considering operation inspection*”, Elsevier

- [52] J. Li, H. Li, P. He, L. Xu, K. He, S. Liu (2023), "*Flexible Job Shop Scheduling Optimization for Green Manufacturing Based on Improved Multi-Objective Wolf Pack Algorithm*", MDPI
- [53] F. Zhao, Z. Xu, X. Hu, T. Xu, N. Zhu, Jonrinaldi (2023), "*An improved iterative greedy athm for energy-efficient distributed assembly no-wait flow-shop scheduling problem*", Elsevier
- [54] R. Li, W. Gong, C. Lu , L. Wang (2023), "*A Learning-Based Memetic Algorithm for Energy-Efficient Flexible Job-Shop Scheduling With Type-2 Fuzzy Processing Time*", IEEE
- [55] C. Destouet, H. Tlahig, B. Bettayeb, B. Mazari (2023), "*Flexible job shop scheduling problem under Industry 5.0: A survey on human reintegration, environmental consideration and resilience improvement*", Elsevier
- [56] T. Küster, P. Rayling, R. Wiersig, F. D. P. Pardo (2023), "*Multi-objective optimization of energy-efficient production schedules using genetic algorithms*", Springer
- [57] A. Sitahong, Y. Yuan, M. Li, J. Ma, Z. Ba, Y. Lu (2023), "*Learning dispatching rules via novel genetic programming with feature selection in energy-aware dynamic job-shop scheduling*", Scientific Reports

[58] Z. Tian, L. Zheng (2024), “*Single machine parallel-batch scheduling under time-of-use electricity prices: New formulations and optimisation approaches*”, Elsevier

[59] N. Zhu, G. Gong, D. Lu, D. Huang, N. Peng, H. Qi (2024), “*An effective reformative memetic algorithm for distributed flexible job-shop scheduling problem with order cancellation*”, Elsevier

[60] J. Wang, H. Tang, D. Lei (2024), “*A feedback-based artificial bee colony algorithm for energy-efficient flexible flow shop scheduling problem with batch processing machines*”, Elsevier

[61] C. Luo, W. Gong, F. Ming, C. Lu (2024), “*A Q-learning memetic algorithm for energy-efficient heterogeneous distributed assembly permutation flowshop scheduling considering priorities*”, Elsevier

Lista delle Figure e delle Tabelle

Figura 1: Obiettivi per lo sviluppo sostenibile [6]

Figura 2: Nuovi obiettivi sul consumo energetico [11]

Figura 3: Documenti scritti sulla sostenibilità nella schedulazione

Figura 4: Ambiente macchina

Figura 5: Metriche di performance

Figura 6: Problemi riscontrati nella schedulazione sostenibile

Figura 7: Azioni proposte sulle macchine

Tabella 1: Criteri di classificazione della letteratura: ambiente macchina e
funzione obiettivo

Tabella 3: Criteri di classificazione della letteratura: problemi e soluzioni proposte

