



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

**APPROCCIO CON COLORED PETRI NET (CPN) NELLA SUPPLY CHAIN:
STATO DELL'ARTE E SVILUPPO DI UN FRAMEWORK**

**A COLORED PETRI NET (CPN) APPROACH TO THE SUPPLY CHAIN:
STATE
OF THE ART AND DEVELOPMENT OF A FRAMEWORK**

Relatore:

Prof. Bevilacqua Maurizio

Tesi di Laurea di:

Pincini Nicholas

Correlatore:

Prof.ssa Lucantoni Laura

A.A. 2025/2026

INDICE

INTRODUZIONE	5
Obiettivo e domanda di ricerca	6
Metodologia.....	6
Struttura della tesi.....	6
CAPITOLO 1 La Supply Chain e la sua evoluzione	8
1.1 Premessa.....	8
1.2 Dalla logistica d'impresa al Supply Chain Management	8
1.3 Anatomia della supply chain	10
1.4 Prestazioni, trade-off ed effetto bullwhip	11
1.5 Globalizzazione, efficienza e vulnerabilità	12
1.6 La Supply Chain 4.0 e i suoi limiti	14
1.7 Sintesi e transizione al capitolo successivo	16
CAPITOLO 2 La Supply Chain 5.0: sostenibilità, resilienza e umanocentrismo.....	17
2.1 Premessa.....	17
2.2 Il paradigma 5.0 e il problema del trasferimento	17
2.3 La sostenibilità	18
2.4 La resilienza	19
2.5 L'umanocentrismo.....	20
2.5.1 Il costrutto e i suoi tre significati	20
2.5.2 Carico e affaticamento	21
2.5.3 Il fattore umano nei modelli: da parametro a vincolo.....	22
2.6 Le tensioni tra le dimensioni e l'insufficienza dei pesi.....	24
2.7 La digitalizzazione come fattore abilitante ambivalente.....	25
2.8 Requisiti di formalizzazione e transizione al capitolo successivo	26
CAPITOLO 3 Modellazione e simulazione con Coloured Petri Net.....	28
3.1 Premessa.....	28
3.2 Le Reti di Petri.....	28
3.3 Le Coloured Petri Net	29
3.4 L'estensione temporizzata.....	31
3.5 Verifica del formalismo rispetto ai sei requisiti	31
3.6 Le Coloured Petri Net nella modellazione delle supply chain	33
3.7 Il fattore umano nei modelli a rete e il gap di ricerca	34
3.8 Sintesi e transizione al capitolo successivo	36
CAPITOLO 4 Framework integrato per la Supply Chain 5.0 basato su TCPN	37
4.1 Premessa e criteri di progettazione.....	37

4.2 Architettura generale: i quattro layer	38
4.3 Layer 1 e 2 — Acquisizione, validazione e tokenizzazione	39
4.3.1 Le sorgenti e la sincronizzazione	39
4.3.2 La rilevazione biometrica e il suo perimetro	39
4.3.3 Validazione e definizione del token	41
4.4 Layer 3 — Il motore TCPN	41
4.4.1 La funzione di normalizzazione	41
4.4.2 Le tre componenti e le loro soglie	43
4.4.3 La guard function: il carico umano come vincolo abilitante	44
4.4.4 Durate variabili	45
4.4.5 L'esito della simulazione	45
4.5 Layer 4 — Decisione e funzione obiettivo vincolata	46
4.6 Il monitoraggio laterale dei KPI	47
4.7 Verifica dei sei requisiti	47
4.8 Sintesi e transizione al capitolo successivo	48
CAPITOLO 5 Verifica sperimentale del meccanismo di guardia	49
5.1 Premessa e obiettivi della sperimentazione	49
5.2 L'ambiente CPN IDE e il modello implementato	49
5.3 Dati di ingresso e configurazione degli scenari	50
5.4 Scenario LOT_A1: funzionamento in condizioni regolari	52
5.5 Scenario LOT_A2: attivazione del vincolo sul carico umano	54
5.6 Confronto tra i due scenari	56
5.7 Campagna di simulazione Monte Carlo	57
5.7.1 Impostazione	57
5.7.2 Risultati	58
5.8 Verifica delle proprietà del modello	60
5.9 Sintesi	61
CAPITOLO 6 Discussione, limiti e sviluppi futuri	63
6.1 Premessa	63
6.2 Risposta alla domanda di ricerca	63
6.3 Posizionamento rispetto alla letteratura e contributo originale	64
6.4 Limiti del lavoro	65
6.5 Sviluppi futuri	66
6.6 Conclusioni	67
APPENDICE A Codice del modello di riferimento	68
A.1 Il modello di riferimento: tcpn_riferimento.py	68

A.2 La campagna Monte Carlo: mc_repliche.py	71
BIBLIOGRAFIA	73

INTRODUZIONE

Negli ultimi due decenni le catene di fornitura (supply chain, SC) hanno conosciuto una trasformazione che ne ha moltiplicato la complessità operativa e l'esposizione al rischio. La pandemia da COVID-19 ha reso evidente, su scala globale, la fragilità di reti logistiche molto efficienti ma prive di margini: le interruzioni conseguenti hanno colpito insieme la finanza, i tempi di consegna, la domanda e la capacità produttiva delle imprese (Villar et al., 2023). Nello stesso periodo è cresciuta la pressione ambientale e sociale sulle organizzazioni. La sostenibilità non è più un vincolo esterno da rispettare a valle dei processi, ma un criterio da integrare nella progettazione stessa della catena, insieme alla necessità di renderla più resistente agli shock e più attenta al benessere delle persone che vi lavorano (Machado & Rodriguez, 2025).

In questo scenario si inserisce il concetto di Supply Chain 5.0, derivato dal paradigma dell'Industria 5.0. Esso affianca all'efficienza tecnologica dell'automazione tre dimensioni che l'Industria 4.0 non aveva pienamente affrontato: la sostenibilità ambientale e sociale, la resilienza intesa come capacità di assorbire le perturbazioni e recuperare da esse, e l'umanocentrismo, ovvero il ritorno dell'operatore al centro del sistema produttivo non come vincolo da eliminare ma come risorsa da tutelare (Villar et al., 2023). Allo stesso tempo, la digitalizzazione delle catene attraverso IoT, blockchain e sistemi di raccolta dati in tempo reale si configura come un'arma a doppio taglio: da un lato abilita tracciabilità, trasparenza e ottimizzazione (Esmaeilian et al., 2020), dall'altro introduce essa stessa nuova complessità informativa, che rischia di restare non governata in assenza di adeguati strumenti di modellazione e simulazione (Sarkis et al., 2020).

È a questo problema che risponde l'approccio delle Reti di Petri Colorate (Coloured Petri Net, CPN) e della loro estensione temporizzata (Timed Coloured Petri Net, TCPN): un linguaggio di modellazione formale già impiegato per rappresentare le catene di fornitura come sistemi dinamici a eventi discreti, capace di descrivere risorse, flussi di prodotto e vincoli temporali in un'unica struttura eseguibile e verificabile (Mazzuto et al., 2012). Le applicazioni delle CPN alla supply chain si sono concentrate soprattutto sulla dimensione operativa — tempi, colli di bottiglia, costi, gestione delle scorte (Mazzuto et al., 2012; Drakaki & Tzionas, 2022) — e solo di recente hanno incluso la sostenibilità ambientale (Kaiyandra et al., 2024). Il fattore umano, quando compare nei modelli a rete, vi entra come grandezza che influenza la prestazione (Kontogiannis, 2005; Mazzuto et al., 2018), e non come condizione che delimita i comportamenti ammessi della rete.

Obiettivo e domanda di ricerca

L'obiettivo di questo lavoro è colmare, almeno in parte, tale vuoto, proponendo un framework che integri sostenibilità, resilienza e umanocentrismo all'interno di un modello TCPN eseguibile. La domanda di ricerca può essere formulata così: è possibile formalizzare le tre dimensioni della Supply Chain 5.0 in un modello TCPN eseguibile, e quale ruolo può assumere in tale modello il fattore umano, non come semplice parametro di costo ma come vincolo prioritario della rete?

Metodologia

Il lavoro è articolato in tre fasi. Nella prima è stata condotta una rassegna della letteratura, non sistematica ma mirata, sull'evoluzione del Supply Chain Management, sulla Supply Chain 5.0 e sulle applicazioni delle Coloured Petri Net alla modellazione delle catene di fornitura, allo scopo di individuare con precisione il gap che il lavoro intende affrontare.

Nella seconda fase, a partire da quel gap, è stato sviluppato un framework su quattro livelli (layer), fondato su cinque costrutti: un token colorato tridimensionale che codifica insieme le componenti di efficienza, umanocentrismo e resilienza; una funzione di normalizzazione; una guard function che subordina l'abilitazione delle transizioni produttive al rispetto di una soglia sul carico umano; durate di transizione variabili in funzione di tale carico; una funzione obiettivo vincolata a un peso minimo della componente umana.

Nella terza fase il framework è stato sottoposto a verifica sperimentale su due livelli. In ambiente CPN IDE è stato implementato il meccanismo di abilitazione che costituisce il nucleo del contributo — il bivio tra la transizione produttiva e il ramo adattivo, governato dalla guardia sul carico umano — e ne è stato verificato il comportamento su due scenari di riferimento, in condizioni operative regolari e critiche. Le componenti quantitative, cioè la modulazione delle durate e una campagna di simulazione Monte Carlo condotta per tre regimi di carico su trenta repliche di duemila lotti ciascuna, sono state invece eseguite su un modello di riferimento in Python che implementa le stesse formule, riportato in Appendice A. Il passaggio dalla formalizzazione all'esecuzione non è un corollario dimostrativo, ma la verifica sostanziale della tesi: solo un modello eseguibile permette di accertare che i vincoli introdotti producano davvero il comportamento atteso, anziché limitarsi a dichiararlo.

Struttura della tesi

Il lavoro è organizzato in sei capitoli, secondo una logica che procede dal contesto generale al contributo specifico. Il primo capitolo ripercorre l'evoluzione della supply chain, dalla logistica d'impresa al Supply Chain Management, fino alle spinte che hanno condotto dalla SC 4.0 alla SC 5.0. Il secondo approfondisce le tre dimensioni della SC 5.0 e il ruolo ambivalente della digitalizzazione,

e ne ricava un insieme di requisiti di formalizzazione. Il terzo introduce il formalismo delle Coloured e Timed Coloured Petri Net, ne verifica l'adeguatezza rispetto a tali requisiti e ne ripercorre le applicazioni alla supply chain, delineando il gap di ricerca. Il quarto presenta il framework proposto, articolato nei suoi quattro layer e nei suoi costrutti formali. Il quinto documenta la verifica sperimentale: l'implementazione in CPN IDE del meccanismo di guardia, messo alla prova su uno scenario regolare e su uno critico dal punto di vista del fattore umano, e la campagna di simulazione condotta sul modello di riferimento, che misura la sensibilità del sistema alle condizioni di carico. Il sesto discute il posizionamento del lavoro rispetto alla letteratura, il contributo originale, i limiti e le possibili direzioni di sviluppo futuro.

CAPITOLO 1

La Supply Chain e la sua evoluzione

1.1 Premessa

Prima di discutere che cosa significhi rendere una catena di fornitura sostenibile, resiliente e centrata sull'essere umano, occorre chiarire che cosa una catena di fornitura sia e con quali criteri, storicamente, ne sia stata giudicata la bontà. Questo capitolo assolve tale funzione preliminare, ma non è un esercizio compilativo: la tesi centrale del lavoro acquista significato solo se si comprende quali obiettivi i modelli di supply chain abbiano tradizionalmente perseguito e, soprattutto, quali abbiano sistematicamente lasciato fuori.

La ricostruzione parte dalla logistica come funzione di supporto e ne segue la trasformazione in area di ottimizzazione economica, fino alla nascita del Supply Chain Management. Segue un'anatomia della catena — attori, flussi, livelli decisionali — che introduce il vocabolario riutilizzato nei capitoli successivi. La seconda metà affronta le prestazioni e i trade-off, mostra come la globalizzazione abbia trasformato il conflitto tra efficienza e capacità di risposta in vulnerabilità sistemica, e ricostruisce infine la stagione della Supply Chain 4.0 e le ragioni della sua insufficienza.

1.2 Dalla logistica d'impresa al Supply Chain Management

Il termine logistica ha origine militare: designava l'insieme delle attività di approvvigionamento, trasporto e alloggiamento necessarie a mantenere operativo un esercito in movimento (Christopher, 2016). Il trasferimento del concetto alla sfera industriale avviene nel secondo dopoguerra, in un contesto di domanda in espansione e mercati poco saturi, dove il fattore limitante era la capacità produttiva.

In quella fase la logistica d'impresa occupa una posizione marginale. L'attenzione del management è concentrata su produzione e vendite, mentre movimentazione, stoccaggio e distribuzione sono percepiti come costi da contenere, non come leve strategiche (Christopher, 2016). La conseguenza è una forte frammentazione funzionale: ogni funzione ha obiettivi e indicatori propri, spesso incoerenti tra loro. L'ufficio acquisti è premiato per il prezzo unitario e tende ad acquistare in lotti ampi; la produzione è premiata per la saturazione degli impianti e tende a produrre in serie lunghe; la distribuzione è premiata per il livello di servizio e tende ad accumulare scorte a valle. Ciascuna ottimizza il proprio risultato locale, e la somma di queste ottimizzazioni produce un risultato complessivo mediocre.

Il primo superamento di questa frammentazione è la nozione di costo logistico totale, che emerge nella letteratura statunitense di distribuzione fisica dalla fine degli anni Cinquanta (Christopher, 2016). L'intuizione è che le voci di costo logistico non sono indipendenti, ma legate da relazioni di scambio: ridurre i costi di trasporto aumenta il capitale immobilizzato in scorte in transito, ridurre le scorte aumenta la frequenza dei riordini, centralizzare i magazzini riduce le scorte di sicurezza ma allunga le distanze di consegna. Minimizzare le singole voci non minimizza quindi la loro somma, e l'unità di analisi rilevante diventa il sistema logistico nel suo insieme.

La definizione oggi più diffusa, elaborata dal Council of Supply Chain Management Professionals, descrive la gestione logistica come la parte del supply chain management che pianifica e controlla il flusso efficiente, diretto e inverso, di beni, servizi e informazioni tra il punto di origine e il punto di consumo (Council of Supply Chain Management Professionals [CSCMP], 2013). Due elementi torneranno più avanti: l'inclusione del flusso informativo accanto a quello fisico, e la menzione del flusso inverso, che anticipa i temi dell'economia circolare trattati nel Capitolo 2. Il perimetro resta però interno all'impresa: fornitore e cliente restano controparti contrattuali, non nodi di un sistema condiviso.

Il superamento di questo confine definisce il passaggio successivo. L'espressione supply chain management compare nei primi anni Ottanta, in ambito consulenziale (Oliver & Webber, 1982), con un argomento strategico prima che tecnico: le decisioni sulla struttura della catena determinano la posizione competitiva dell'impresa e vanno assunte dal vertice aziendale. Un antecedente importante sono gli studi di dinamica industriale di Forrester (1958, 1961), che avevano già mostrato per via di simulazione come un sistema di più stadi in serie possa amplificare le fluttuazioni della domanda finale a causa dei ritardi informativi e decisionali interni. Il rilievo è duplice: la causa dell'instabilità è individuata nella struttura del sistema e non nel comportamento dei singoli attori, e il tempo, sotto forma di ritardi, è identificato come variabile che determina il comportamento e non come semplice attributo descrittivo. Entrambe le acquisizioni sono presupposti diretti della scelta metodologica di questa tesi, che adotta un formalismo nel quale struttura e tempo sono elementi costitutivi del modello (Mazzuto et al., 2012).

La stabilizzazione concettuale richiede circa vent'anni. Mentzer et al. (2001) distinguono la supply chain, che esiste indipendentemente dalle scelte gestionali, dal supply chain management, che è invece la scelta deliberata di coordinarne i flussi, e ne individuano tre gradi di ampiezza: la catena diretta, che comprende l'impresa e i suoi interlocutori immediati; la catena estesa, che include i fornitori dei fornitori e i clienti dei clienti; la catena ultima, che abbraccia tutte le organizzazioni coinvolte dalla fonte al cliente finale. La distinzione è rilevante perché rende esplicito che ogni

modello di supply chain implica una scelta di confine, e che tale scelta è un'assunzione dichiarabile e non un dato oggettivo.

Questa tesi adotta la posizione prevalente sul rapporto tra i due termini: la logistica è un sottoinsieme del supply chain management (Christopher, 2016; Mentzer et al., 2001), che comprende anche il coordinamento tra imprese, la progettazione della rete e l'allineamento degli incentivi tra attori giuridicamente distinti. È questa pluralità di attori autonomi, con obiettivi non necessariamente allineati, a rendere il supply chain management un problema di coordinamento e non di semplice ottimizzazione, e a giustificare l'interesse per strumenti capaci di rappresentare concorrenza, sincronizzazione e contesa di risorse.

1.3 Anatomia della supply chain

Ai fini della modellazione sviluppata nei capitoli successivi è utile fissare gli elementi costitutivi di una catena di fornitura.

Una supply chain è popolata da entità organizzative ordinate secondo la loro posizione rispetto al flusso dei materiali. A monte si collocano i fornitori, articolati per livelli successivi fino alle fonti di materie prime; l'impresa focale — il nodo rispetto al quale la catena viene descritta — svolge le attività di trasformazione; a valle si trovano distributori, dettaglianti e cliente finale. A questi si affiancano attori di servizio che non acquisiscono la proprietà del bene ma ne abilitano il flusso: trasportatori, operatori doganali, intermediari finanziari, enti di certificazione.

Questa rappresentazione descrive gli attori come organizzazioni, non come persone. L'operatore che movimentava il materiale, il conducente che effettua il trasporto, l'addetto al controllo qualità non compaiono se non implicitamente, come componenti della capacità produttiva dei nodi. Tale invisibilità non è un difetto di questa particolare descrizione, ma una caratteristica strutturale del modo in cui la disciplina ha rappresentato il proprio oggetto, ed è il presupposto del gap che questo lavoro affronta (Villar et al., 2023).

Attraverso la rete circolano tre tipi di flusso (Christopher, 2016). Il flusso fisico dei materiali procede prevalentemente da monte a valle, e ad esso si affianca un flusso inverso, di crescente rilevanza, costituito da resi, imballaggi riutilizzabili e prodotti a fine vita. Il flusso informativo è bidirezionale: ordini e previsioni risalgono da valle a monte, conferme e informazioni di tracciabilità scendono da monte a valle, e la qualità di questo flusso determina in misura sostanziale la stabilità dell'intero sistema (Lee et al., 1997). Il flusso finanziario procede da valle a monte sotto forma di pagamenti.

Le decisioni di supply chain vengono ordinate su tre livelli in base all'orizzonte temporale e alla reversibilità. Il livello strategico, con orizzonte pluriennale, comprende la configurazione della rete:

localizzazione degli impianti, dimensionamento delle capacità, selezione dei fornitori critici. Il livello tattico, da trimestrale ad annuale, comprende la pianificazione aggregata, le politiche di scorta e i contratti quadro. Il livello operativo, da giornaliero a settimanale, comprende la schedulazione della produzione e l'assegnazione dei turni.

Questa gerarchia ha una conseguenza diretta sull'impostazione della tesi. Il fattore umano compare quasi esclusivamente al livello operativo, e vi compare come risorsa da allocare: turni da coprire, ore disponibili, costo del lavoro da minimizzare. Il carico di lavoro e l'affaticamento non entrano tra i parametri delle decisioni tattiche e strategiche, dove pure la configurazione della rete ne determina strutturalmente i valori (Villar et al., 2023). Il framework proposto nel Capitolo 4 interviene esattamente su questo punto, elevando una grandezza relativa al carico umano al rango di condizione di abilitazione delle transizioni: non un parametro da ottimizzare a valle, ma una condizione la cui violazione impedisce al sistema di procedere.

1.4 Prestazioni, trade-off ed effetto bullwhip

La valutazione di una supply chain si articola su un insieme consolidato di dimensioni: il costo totale del servire; il livello di servizio, misurato in disponibilità, puntualità e completezza delle consegne; il tempo, sia di attraversamento sia di risposta a variazioni della domanda; la qualità; la flessibilità, cioè la capacità di variare volumi e mix senza degradare le altre prestazioni. Il modello di riferimento SCOR (Supply Chain Operations Reference), sviluppato dall'associazione professionale APICS, oggi ASCM, e qui considerato nella versione 12.0 (APICS, 2017), organizza queste dimensioni in una gerarchia di indicatori riferita ai processi di pianificazione, approvvigionamento, produzione, consegna, gestione dei resi e abilitazione.

L'osservazione rilevante riguarda ciò che tale insieme non contiene. Le dimensioni elencate sono tutte riferite alle prestazioni del sistema verso il cliente e gli azionisti. Non compaiono indicatori riferiti all'impatto ambientale, né indicatori riferiti alle condizioni delle persone che il sistema impiega. Le estensioni in tal senso sono state introdotte successivamente e restano, nella maggior parte delle implementazioni, sistemi di misurazione paralleli, oggetto di rendicontazione periodica ma privi di collegamento con i meccanismi che governano l'operatività quotidiana (Wong et al., 2020; Sarkis et al., 2020). Questa separazione tra ciò che viene rendicontato e ciò che vincola le decisioni è, in forma sintetica, il problema che il presente lavoro affronta.

Tra i fenomeni caratteristici delle catene multi-stadio, l'effetto bullwhip occupa una posizione centrale. Consiste nell'amplificazione progressiva della variabilità degli ordini man mano che ci si sposta da valle verso monte: una fluttuazione modesta della domanda al dettaglio si traduce in oscillazioni sempre più ampie ai livelli superiori, con alternanze di sovrascorta e rottura di stock

(Forrester, 1958; Lee et al., 1997). Lee et al. (1997) ne individuano quattro cause strutturali: l'elaborazione del segnale di domanda, per cui ogni stadio aggiorna le previsioni sugli ordini ricevuti a valle anziché sulla domanda finale; la raccolta degli ordini in lotti, che sostituisce un flusso continuo con una successione di impulsi; la fluttuazione dei prezzi, che induce acquisti anticipati; il razionamento in condizioni di scarsità, che spinge i clienti a gonfiare gli ordini.

Il fenomeno dimostra che una catena può esibire comportamenti collettivi patologici pur essendo composta da attori che agiscono in modo razionale rispetto alle informazioni di cui dispongono. Il problema risiede nella struttura delle interazioni, non nella qualità delle decisioni individuali. Ne discende che l'analisi delle catene richiede strumenti capaci di rappresentare esplicitamente dipendenze, ritardi e sincronizzazioni — esattamente la capacità che caratterizza il formalismo delle reti di Petri (Mazzuto et al., 2012).

Un secondo trade-off riguarda l'allineamento tra prodotto e catena. Si distinguono i prodotti funzionali, a domanda stabile e margini contenuti, che richiedono catene orientate all'efficienza, dai prodotti innovativi, a domanda volatile e ciclo di vita breve, che richiedono catene orientate alla reattività. Su questa base si sviluppano i paradigmi lean e agile: il primo persegue l'eliminazione di ogni impiego di risorse che non generi valore per il cliente, il secondo accetta un grado di ridondanza altrimenti considerato spreco (Christopher, 2016). I due paradigmi possono essere combinati mediante un punto di disaccoppiamento, a monte del quale si opera in logica lean su previsione e a valle in logica agile su ordine.

Occorre però esplicitare il presupposto comune a tutte queste impostazioni. Ciò che viene ottimizzato è sempre il rapporto tra costo e livello di servizio, e ciò che viene classificato come spreco è definito rispetto al valore percepito dal cliente. Una ridondanza di capacità che consenta all'operatore un ritmo di lavoro sostenibile, o un margine temporale che riduca la pressione sui tempi di esecuzione, non trovano collocazione in questo schema se non come costi da eliminare, perché nessuna delle due contribuisce direttamente al valore riconosciuto dal cliente. Il paradigma lean è stato criticato proprio su questo punto: l'eliminazione dei margini produce sistemi ad alta produttività ma privi di capacità di assorbimento, sia rispetto alle perturbazioni tecniche sia rispetto alla variabilità umana (Christopher & Peck, 2004).

1.5 Globalizzazione, efficienza e vulnerabilità

Tra gli anni Novanta e i primi anni Duemila, la combinazione di liberalizzazione commerciale, riduzione dei costi di trasporto, manodopera a basso costo in nuove aree geografiche e maturazione delle tecnologie di comunicazione riconfigura profondamente le catene (Christopher, 2016). Le imprese occidentali delocalizzano, esternalizzano porzioni crescenti della catena del valore,

concentrano gli approvvigionamenti su pochi fornitori, estendono le logiche just-in-time e riducono le scorte.

Ciascuna di queste scelte è razionale rispetto ai criteri di prestazione consolidati. Il loro effetto congiunto, però, è una trasformazione strutturale: le catene diventano più lunghe in distanza e numero di stadi, più sottili in scorte e capacità di riserva, più rigide in percorsi alternativi e più opache oltre il primo livello di fornitura (Christopher & Peck, 2004). Il sistema risultante è efficiente in condizioni nominali e strutturalmente incapace di assorbire perturbazioni.

La sequenza di eventi disruptive dei primi due decenni del secolo ha reso questa fragilità manifesta: il terremoto giapponese e le inondazioni thailandesi del 2011, che hanno interrotto forniture di componenti per le quali non esistevano fonti alternative qualificate, e l'ostruzione del canale di Suez nel 2021, che ha mostrato la vulnerabilità legata alla concentrazione dei flussi marittimi su poche direttrici critiche.

La pandemia da COVID-19 ha costituito il caso di maggiore portata e presenta caratteristiche che la distinguono dai precedenti (Ivanov & Dolgui, 2020). Ha colpito simultaneamente offerta e domanda, ha operato su scala globale anziché regionale, ha avuto durata protratta anziché puntuale, e soprattutto ha colpito la disponibilità della forza lavoro come fattore produttivo primario, rendendo evidente ciò che le rappresentazioni consolidate lasciavano implicito: la capacità produttiva di un nodo dipende dalla presenza e dalle condizioni delle persone che vi operano. Villar et al. (2023) documentano come le interruzioni conseguenti abbiano colpito insieme le dimensioni finanziaria, temporale, di domanda e di prestazione produttiva.

La letteratura ha elaborato in risposta la nozione di ripple effect, ovvero la propagazione di una perturbazione localizzata attraverso la struttura della rete, con effetti che si manifestano a distanza dal punto di origine e con ritardo rispetto all'evento. Tale propagazione dipende dalla topologia della rete, dai percorsi alternativi disponibili e dalla velocità con cui l'informazione raggiunge gli attori a valle (Dolgui et al., 2018). Parallelamente si consolidano gli studi sulla resilienza, che Christopher & Peck (2004) definiscono come la capacità del sistema di tornare al proprio stato originario, o a uno stato nuovo e più desiderabile, dopo essere stato perturbato, individuandone le leve nella ridondanza deliberata, nella flessibilità delle risorse, nella visibilità e nella collaborazione tra attori.

Il punto che interessa sottolineare, e che sarà ripreso nel Capitolo 2, è che resilienza ed efficienza si collocano in tensione strutturale: le leve della resilienza — capacità in eccesso, scorte di sicurezza, fornitori multipli, percorsi ridondanti — sono precisamente ciò che la ricerca dell'efficienza ha sistematicamente eliminato (Christopher & Peck, 2004). Non si tratta quindi di una lacuna colmabile

affinando gli strumenti esistenti, ma di un conflitto tra obiettivi che va reso esplicito e gestito come tale. L'approccio adottato in questa tesi consiste nel formalizzare tale conflitto dentro il modello, anziché lasciarlo alla negoziazione implicita tra funzioni aziendali.

1.6 La Supply Chain 4.0 e i suoi limiti

L'espressione Industria 4.0 nasce in Germania nell'ambito di un programma di politica industriale reso pubblico nel 2011 e sistematizzato da Kagermann et al. (2013). Il suo nucleo concettuale sono i sistemi cyber-fisici (Monostori et al., 2016): sistemi in cui componenti fisiche e computazionali sono integrate in modo che ciascuna influenzi il comportamento dell'altra, e in cui gli oggetti fisici dispongono di una rappresentazione digitale aggiornata in tempo reale. La trasposizione alla catena di fornitura genera il concetto di Supply Chain 4.0.

Il paradigma si fonda su un insieme di tecnologie abilitanti: l'Internet of Things, che strumentala gli oggetti fisici mediante sensori generando flussi continui di dati; i big data analytics e l'apprendimento automatico, che elaborano tali flussi a fini previsionali e diagnostici; le architetture cloud, che forniscono l'infrastruttura di elaborazione e condivisione tra attori distinti; il digital twin, replica digitale sincronizzata di un asset o di un processo, utilizzabile per simulare scenari; la blockchain, registro distribuito immutabile rilevante per la tracciabilità e la certificazione di attributi non ispezionabili a valle (Esmaeilian et al., 2020); l'automazione avanzata e la robotica collaborativa, che intervengono sull'esecuzione fisica delle attività.

Va tuttavia registrata la distanza tra promesse e realizzazioni documentate. L'adozione effettiva è concentrata nelle imprese di maggiori dimensioni e resta limitata presso le piccole e medie imprese, che costituiscono la componente maggioritaria del tessuto produttivo italiano. L'aumento dei dati disponibili non si traduce automaticamente in decisioni migliori, perché la capacità di interpretazione e di azione è un vincolo distinto dalla disponibilità informativa (Sarkis et al., 2020). Per la blockchain resta inoltre aperto il problema della corrispondenza tra dato registrato e realtà fisica: l'immutabilità del registro garantisce che il dato non venga alterato dopo l'inserimento, non che fosse veritiero al momento dell'inserimento (Esmaeilian et al., 2020).

L'insufficienza del paradigma 4.0 rispetto alle esigenze emerse negli anni Venti può essere articolata lungo tre linee critiche.

La prima riguarda la finalità. L'Industria 4.0 nasce come programma di competitività industriale, orientato all'incremento di produttività e alla difesa della posizione delle economie manifatturiere avanzate. La sostenibilità ambientale vi compare come effetto collaterale positivo — l'ottimizzazione riduce gli sprechi e quindi i consumi — e non come obiettivo autonomo dotato di vincoli propri; la

sostenibilità sociale è sostanzialmente assente (Breque et al., 2021). In presenza di conflitto tra efficienza e sostenibilità, quindi, l'architettura del paradigma non offre alcun criterio di risoluzione, e la prevalenza dell'efficienza risulta predeterminata.

La seconda riguarda il ruolo dell'operatore, che nel paradigma 4.0 è ambivalente e in ultima analisi residuale. Le attività ripetitive vengono automatizzate; quelle non automatizzabili restano affidate all'operatore, che opera in un contesto dove ritmo, sequenza e tempi di esecuzione sono determinati da sistemi di programmazione automatica. La retorica dell'operatore aumentato dalla tecnologia coesiste con una realtà in cui la variabilità umana è trattata come fonte di errore da ridurre e la presenza umana come costo residuo. Le conseguenze documentate — intensificazione del ritmo, riduzione dell'autonomia decisionale, esposizione a monitoraggio continuo — costituiscono un ambito di preoccupazione crescente (Breque et al., 2021; Villar et al., 2023).

La terza riguarda la complessità generata: la digitalizzazione non si limita a governare quella esistente, ne produce di nuova (Sarkis et al., 2020). Il volume di dati eccede la capacità di interpretazione delle organizzazioni; l'interdipendenza tra sistemi informativi introduce vulnerabilità di sicurezza prima inesistenti; l'infrastruttura digitale ha un proprio impatto ambientale in consumo energetico, materiali critici e rifiuti elettronici, raramente contabilizzato nelle valutazioni delle soluzioni proposte.

La pandemia ha operato su queste tre linee come acceleratore (Ivanov & Dolgui, 2020): ha reso evidente che l'efficienza priva di margini è una vulnerabilità, che la disponibilità della forza lavoro è un fattore produttivo primario, e che la visibilità informativa, in assenza di alternative attivabili, produce consapevolezza dell'interruzione ma non capacità di evitarla.

È in questo contesto che la Commissione Europea introduce il concetto di Industria 5.0 (Breque et al., 2021), articolato su tre pilastri: umanocentrismo, ossia porre i bisogni e gli interessi delle persone al centro del processo produttivo anziché adattare le persone alle esigenze del processo; sostenibilità, intesa come operare entro i limiti ecologici del pianeta; resilienza, ossia la capacità di mantenere la funzione produttiva in presenza di perturbazioni. Il documento ha natura di indirizzo strategico e non fornisce strumenti operativi per tradurre i tre pilastri in decisioni progettuali: è la lacuna che questa tesi si propone di affrontare in un ambito specifico. Il documento chiarisce anche un punto spesso frainteso: l'Industria 5.0 non è una successione cronologica rispetto alla 4.0, né una nuova rivoluzione tecnologica, bensì un riorientamento dei valori che presuppone le tecnologie 4.0 e le subordina a finalità differenti.

La trasposizione alla catena di fornitura conduce al concetto di Supply Chain 5.0, che Villar et al. (2023) articolano proponendo la riprogettazione delle catene come sistemi insieme resilienti, sostenibili e centrati sull'essere umano; Machado & Rodriguez (2025) sviluppano parallelamente un modello di maturità per la Logistica 5.0. Questi contributi, riferimenti principali per il Capitolo 2, condividono una caratteristica che è opportuno rilevare fin d'ora: operano sul piano concettuale e prescrittivo, indicando che cosa una supply chain 5.0 debba realizzare, senza fornire strumenti formali che permettano di verificare se un dato sistema soddisfi i requisiti dichiarati.

1.7 Sintesi e transizione al capitolo successivo

Il percorso ricostruito può essere riassunto in una traiettoria unitaria. La logistica nasce come funzione ausiliaria e diventa area di ottimizzazione economica riconoscendo l'interdipendenza tra le proprie componenti di costo (Christopher, 2016). Il supply chain management estende l'orizzonte di ottimizzazione oltre i confini dell'impresa, introducendo il problema del coordinamento tra attori autonomi. La globalizzazione porta questo processo alla sua massima estensione, generando catene efficienti in condizioni nominali e fragili in condizioni perturbate (Christopher & Peck, 2004). La digitalizzazione promette di governare la complessità così generata, ma opera entro il medesimo insieme di obiettivi che l'ha prodotta e ne produce di nuova (Sarkis et al., 2020).

Il tratto costante di questa traiettoria è la funzione obiettivo. Dalla nozione di costo logistico totale fino agli indicatori dei sistemi digitali più avanzati, ciò che viene ottimizzato è sempre il rapporto tra costo e livello di servizio al cliente. Le altre dimensioni — ambientale, sociale, umana — vengono progressivamente riconosciute come rilevanti, ma restano fuori dal meccanismo che governa le decisioni: sono oggetto di misurazione, di rendicontazione e di dichiarazione di intenti, non di vincolo. La Supply Chain 5.0 propone di modificare questa architettura (Villar et al., 2023); la sua elaborazione attuale, però, resta sul piano dei principi.

Il capitolo successivo approfondisce le tre dimensioni del paradigma, esaminandone i fondamenti concettuali, le modalità di misurazione, le tensioni reciproche e il ruolo ambivalente della digitalizzazione. L'obiettivo è arrivare a una caratterizzazione sufficientemente precisa da poter essere sottoposta, nel Capitolo 3, al vaglio degli strumenti di modellazione formale, e successivamente tradotta nei costrutti del framework proposto.

CAPITOLO 2

La Supply Chain 5.0: sostenibilità, resilienza e umanocentrismo

2.1 Premessa

Il capitolo precedente si è chiuso su una constatazione: le dimensioni ambientale, sociale e umana sono state progressivamente riconosciute come rilevanti, ma restano fuori dal meccanismo che governa le decisioni. Vengono misurate e rendicontate, non poste come vincolo. La Supply Chain 5.0 nasce come proposta di modificare questa impostazione.

Questo capitolo esamina le tre dimensioni con una finalità precisa: individuare che cosa, di ciascuna, possa essere rappresentato in un modello formale ed eseguibile. La trattazione è quindi selettiva, e le parti delle rispettive letterature che non rispondono a questo criterio vengono richiamate solo quanto basta. Il capitolo si chiude ricavando dall'analisi un insieme di requisiti di formalizzazione, che nel Capitolo 3 serviranno da criterio per valutare gli strumenti di modellazione disponibili.

2.2 Il paradigma 5.0 e il problema del trasferimento

Si è visto al paragrafo 1.6 che l'Industria 5.0 non è una successione cronologica rispetto alla 4.0, ma un riorientamento dei valori che presuppone le tecnologie 4.0 e le mette al servizio di finalità diverse (Breque et al., 2021). Se il paradigma non introduce tecnologie nuove ma cambia i criteri con cui quelle esistenti vengono impiegate, la sua adozione non si verifica contando le tecnologie installate: un'impresa può disporre dell'intero corredo tecnologico della Supply Chain 4.0 e continuare a usarlo per ottimizzare soltanto il rapporto tra costo e livello di servizio. Verificare l'adozione del paradigma 5.0 significa quindi verificare il modello decisionale, non l'infrastruttura tecnologica: è la ragione per cui questo lavoro affronta il tema attraverso la modellazione formale anziché attraverso l'analisi di casi aziendali.

La trasposizione alla catena di fornitura eredita la caratteristica già individuata al paragrafo 1.2: la presenza di più attori autonomi, con obiettivi non necessariamente allineati. Ne nasce un problema che nella singola impresa non si presenta, e che si può chiamare problema del trasferimento: ciascuno dei tre pilastri può essere soddisfatto localmente spostando l'onere su un altro nodo della rete. Un'impresa focale può migliorare la propria intensità emissiva esternalizzando le fasi a maggiore impatto, o aumentare la propria resilienza scaricando sui fornitori la variabilità della domanda. In entrambi i casi l'indicatore locale migliora mentre la prestazione della catena resta invariata o peggiora. Poiché ogni modello delimita il proprio oggetto, e tale delimitazione è un'assunzione e non un dato, la valutazione di una qualunque delle tre dimensioni ha significato solo se accompagnata dalla dichiarazione esplicita del perimetro.

I contributi principali sul paradigma — Villar et al. (2023) e Machado & Rodriguez (2025) — operano soprattutto sul piano prescrittivo. Il limite non riguarda il loro contenuto ma la loro forma: un modello di maturità misura l'adozione di pratiche dichiarate, non il raggiungimento di risultati; una direttrice di riprogettazione indica una direzione, non una condizione di ammissibilità. In nessun caso si arriva a uno strumento che permetta di stabilire, dato uno stato del sistema e una sua possibile evoluzione, se quella evoluzione sia compatibile con i pilastri dichiarati. È la stessa distanza rilevata al paragrafo 1.4 tra ciò che viene rendicontato e ciò che vincola le decisioni, e che si ripresenta nel paradigma che avrebbe dovuto superarla.

2.3 La sostenibilità

Il quadro concettuale della sostenibilità d'impresa è quello della cosiddetta triple bottom line (Elkington, 1998), che articola la prestazione su tre assi — economico, ambientale e sociale — sostenendo che un'impresa non possa essere giudicata sul solo primo. Il costrutto ha avuto grande diffusione, ma si è affermato soprattutto come strumento di rendicontazione, come ha riconosciuto lo stesso autore (Elkington, 2018), con il limite già osservato al paragrafo 1.4: le dimensioni vengono misurate e comunicate senza che questo modifichi in misura apprezzabile le decisioni che generano gli impatti misurati. Il punto interessa direttamente questo lavoro, perché colloca il limite nella separazione tra misurazione e decisione, e non in una carenza di misurazione.

Sul piano delle misure, la componente ambientale è la più standardizzata. La contabilità delle emissioni segue la classificazione del GHG Protocol, che distingue le emissioni dirette (Scope 1), quelle indirette legate all'energia acquistata (Scope 2) e le altre emissioni indirette generate lungo la catena del valore, a monte e a valle (Scope 3) (World Resources Institute [WRI] & World Business Council for Sustainable Development [WBCSD], 2004, 2011). Nella maggior parte dei settori manifatturieri sono le emissioni Scope 3 a rappresentare la quota maggiore, ed è anche la categoria che l'impresa misura con più difficoltà e controlla di meno, perché prodotta da aziende sulle quali può agire solo per via contrattuale (Sarkis et al., 2020). A questi temi si collega l'economia circolare, il cui punto comune è la sostituzione del modello lineare con soluzioni in cui i materiali restano in circolo attraverso riutilizzo, ricondizionamento e riciclo. Il tema non è nuovo rispetto al Capitolo 1, dove il flusso inverso compare sia nella definizione di gestione logistica sia nell'anatomia dei flussi. La circolarità chiede però di trattarlo come flusso produttivo a pieno titolo, che occupa capacità e richiede tempo: per la modellazione, il modello deve poter rappresentare le due direzioni allo stesso modo.

La componente sociale è molto meno standardizzata, e va distinta dall'umanocentrismo, perché i due costrutti si sovrappongono in parte. La distinzione adottata in questo lavoro è la seguente: la

sostenibilità sociale riguarda i risultati, cioè le condizioni riscontrabili presso gli attori della catena, valutate a posteriori; l'umanocentrismo riguarda la progettazione, cioè il modo in cui i bisogni delle persone entrano nella determinazione del comportamento del sistema. Il lavoro si concentra sul secondo, perché un risultato può essere misurato senza che nulla nel sistema impedisca di produrne uno diverso, mentre un criterio di progettazione, se correttamente formalizzato, opera prima che il risultato si produca.

Tutto converge su un punto già enunciato al paragrafo 1.4: la difficoltà principale non è la carenza di indicatori, ma il fatto che essi non partecipano al processo che genera i fenomeni che misurano. Sono calcolati su cicli annuali mentre le decisioni che ne determinano il valore sono prese su cicli giornalieri; e anche se fossero disponibili in tempo reale, resterebbero grandezze osservate. Osservare una grandezza e subordinarle un'azione sono due operazioni distinte, e la prima non implica la seconda. È questo a spiegare perché l'evidenza sulla relazione tra digitalizzazione e prestazioni ambientali sia meno univoca di quanto la retorica del settore lasci supporre (Wong et al., 2020; Sarkis et al., 2020): ciò che manca non è il sensore, ma il collegamento tra la lettura del sensore e l'insieme delle azioni ammesse.

2.4 La resilienza

La resilienza è stata introdotta al paragrafo 1.5 nella formulazione di Christopher & Peck (2004). Il concetto comprende non solo la reazione a un evento avvenuto, ma anche la preparazione che lo precede e il ripristino che lo segue (Ponomarov & Holcomb, 2009), e sul piano operativo viene scomposto in capacità distinte di assorbimento, adattamento e ripristino (Hosseini et al., 2016). Queste capacità non vanno massimizzate, ma proporzionate alle vulnerabilità effettive del sistema (Pettit et al., 2010): capacità eccedenti sono un costo non remunerato, capacità insufficienti sono un'esposizione.

Il punto più rilevante riguarda però che cosa sia esattamente la resilienza, e ha conseguenze dirette sulla scelta degli strumenti di modellazione. La resilienza non è una caratteristica dello stato attuale del sistema, ma del suo comportamento in condizioni che non sono quelle correnti. Dire che una catena è resiliente significa dire che, se si verificasse una determinata perturbazione, essa manterrebbe la propria funzione entro limiti accettabili e la ripristinerebbe in tempi accettabili. È un'affermazione su ciò che il sistema farebbe, non su ciò che il sistema è.

Ne discendono tre conseguenze. La prima è che gli indicatori comunemente usati — numero di fornitori qualificati, giorni di copertura delle scorte, concentrazione geografica degli approvvigionamenti — non sono misure della resilienza, ma descrizioni della struttura che si suppone la produca. Sono calcolabili sulla configurazione nominale, e per questo comodi, ma il legame con la

proprietà che vogliono rappresentare resta un'ipotesi: due catene con identici valori possono comportarsi in modo molto diverso sotto perturbazione, per effetto delle dipendenze e dei ritardi che una descrizione statica non cattura.

La seconda è che una valutazione non ipotetica richiede di generare traiettorie: occorre poter sottoporre il sistema a una perturbazione e osservarne l'evoluzione, e poiché farlo sul sistema reale è quasi sempre impraticabile, occorre poterlo fare su una sua rappresentazione. La resilienza è quindi valutabile solo su un modello eseguibile, e non su una descrizione, per quanto dettagliata. Non a caso la letteratura sulla quantificazione della resilienza si è orientata soprattutto verso approcci di simulazione e di analisi di rete (Hosseini et al., 2019).

La terza riguarda il tempo. Le capacità in cui la resilienza si articola sono definite in termini temporali: rapidità di rilevazione, durata della degradazione, tempo di ripristino. Una rappresentazione in cui il tempo non compaia come variabile esplicita non può esprimere queste grandezze. L'osservazione riporta a quanto richiamato al paragrafo 1.2: il tempo, sotto forma di ritardi, determina il comportamento delle catene multi-stadio e non ne è un semplice attributo descrittivo.

Il concetto di *viability*, proposto da Ivanov & Dolgui (2020) per le reti di fornitura intrecciate, sposta infine l'attenzione dalla capacità di recuperare uno stato precedente a quella di mantenere la fornitura di beni essenziali attraverso riconfigurazioni successive. Lo spostamento indebolisce l'idea di uno stato nominale privilegiato verso cui il sistema debba tendere e rafforza quella di un insieme di stati ammissibili entro cui il sistema debba restare: formulazione che si presta con naturalezza a essere tradotta in vincoli.

2.5 L'umanocentrismo

2.5.1 Il costrutto e i suoi tre significati

Il pilastro umanocentrico è definito dalla Commissione Europea come l'inversione del rapporto tra persona e processo: porre i bisogni delle persone al centro del processo produttivo anziché adattare le persone alle esigenze del processo (Breque et al., 2021). La formulazione è volutamente forte, e la sua radicalità va presa sul serio: non chiede di attribuire maggiore importanza al fattore umano, ma di invertire la direzione dell'adattamento.

Il costrutto non nasce dal nulla: la letteratura sull'Operator 4.0 aveva già classificato le forme di interazione tra operatore e tecnologia secondo le funzioni umane che questa integra o amplifica — assistenza fisica, ampliamento percettivo, supporto cognitivo, collaborazione con sistemi robotici (Romero et al., 2016). Su questa genealogia va però mantenuta l'osservazione critica del paragrafo 1.6. Un esoscheletro che permetta di sollevare carichi maggiori più a lungo estende la capacità

dell'operatore, ma se tale estensione viene subito assorbita da un aumento del ritmo richiesto, il beneficio netto per la persona è nullo o negativo. La differenza non è tecnologica ma decisionale: dipende da chi determina il ritmo.

L'espressione centrato sull'essere umano viene usata in almeno tre significati distinti, che conviene separare perché comportano requisiti di formalizzazione diversi. Il primo è tecnologico ed ergonomico: il sistema è centrato sull'essere umano se le sue componenti tecniche sono progettate in funzione delle caratteristiche fisiche e cognitive dell'operatore. È il significato più consolidato e misurabile, ma anche il più circoscritto, perché opera sulla singola postazione e non sull'architettura del sistema. Il secondo è organizzativo: il sistema è centrato sull'essere umano se l'organizzazione del lavoro preserva l'autonomia decisionale e lo sviluppo delle competenze. Il riferimento consolidato è il modello domanda-controllo di Karasek (1979): conta non solo quanto il compito richiede, ma quanto controllo la persona esercita su di esso, perché richieste elevate producono impegno se accompagnate da un controllo elevato e tensione se il controllo è ridotto. Il terzo è di principio: il sistema è centrato sull'essere umano se tratta le persone come fine e non come mezzo, cioè se il loro benessere figura tra gli scopi del sistema e non tra le condizioni della sua efficienza. È il significato presupposto da Breque et al. (2021), il meno traducibile in misure ma decisivo per l'argomentazione che segue, perché non stabilisce quanto conti il fattore umano, ma di quale natura sia la sua rilevanza.

Il framework proposto nel Capitolo 4 lavora sui costrutti misurabili dei primi due significati, ma la sua architettura è determinata dal terzo. È perché il benessere dell'operatore viene assunto come fine, e non come parametro dell'efficienza, che esso viene formalizzato attraverso un vincolo e non attraverso un termine della funzione obiettivo.

2.5.2 Carico e affaticamento

Perché il fattore umano entri in un modello formale servono grandezze osservabili che ne rappresentino lo stato. Il carico fisico è il costrutto più consolidato, rappresentato tramite grandezze biomeccaniche, di dispendio energetico e indici di fabbisogno di recupero. Il carico cognitivo è rappresentato dal costrutto di carico mentale, per il quale esistono questionari standardizzati, come il NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988) e il SWAT (Reid & Nygren, 1988), che scompongono il carico percepito in più componenti e ne ricavano un indice sintetico. Il carico organizzativo, o psicosociale, è rappresentato da costrutti relativi al rapporto tra le richieste del compito e le risorse di cui la persona dispone (Karasek, 1979).

Due proprietà di queste grandezze sono rilevanti per la modellazione. La prima è che l'affaticamento è cumulativo: non dipende dall'intensità istantanea dell'attività, ma da quella accumulata nel tempo e ridotta dai periodi di recupero. Il carico è quindi una variabile di stato che evolve, non un attributo

costante della risorsa, e la sua evoluzione dipende dalla storia delle operazioni eseguite. La seconda è che anche il recupero è un processo temporale, la cui efficacia dipende dalla durata e dalla collocazione delle pause. Entrambe richiedono che la rappresentazione formale disponga di una nozione esplicita di tempo e ammetta variabili di stato associate alle risorse, e non soltanto agli oggetti in lavorazione.

Va infine dichiarato un limite. Aggregare grandezze eterogenee in un unico indice comporta una perdita di informazione e incorpora una scelta sui pesi relativi. Il framework proposto adotta questa aggregazione per ragioni di trattabilità, tramite una funzione di normalizzazione presentata nel Capitolo 4. Lo stesso vale per la soglia oltre la quale il carico è ritenuto inammissibile, che non è deducibile dai dati: questi possono dire quali effetti si producano a un certo livello di carico, non quale livello di effetti sia accettabile. La soglia è una decisione, e va riconosciuta come tale. Entrambi i punti sono ripresi tra i limiti nel Capitolo 6.

2.5.3 Il fattore umano nei modelli: da parametro a vincolo

Si arriva qui al passaggio centrale del capitolo. La questione non è se il fattore umano sia presente nei modelli quantitativi di produzione e logistica — lo è, e da tempo — ma in quale forma vi sia presente.

Le rassegne sull'argomento permettono di individuare tre modalità ricorrenti (Grosse et al., 2017; Sgarbossa et al., 2020; Neumann et al., 2021). Nella prima, l'essere umano compare come vincolo di capacità: la risorsa umana è disponibile per un certo numero di ore, in certi turni, con certe qualifiche, e il modello alloca il lavoro entro tale disponibilità. Nella seconda compare come voce di costo: il lavoro ha un prezzo unitario, e il modello ne minimizza l'impiego a parità di risultato. Nella terza, più raffinata, compare come parametro di prestazione: l'apprendimento modifica i tempi di esecuzione, l'affaticamento li allunga e aumenta i tassi di errore, e il modello incorpora queste relazioni per ottenere previsioni più accurate del comportamento del sistema.

Le tre modalità differiscono per sofisticazione, ma condividono un carattere: in tutte, l'essere umano entra nel modello nella misura in cui influenza il risultato del sistema. Conviene esaminare da vicino la terza, che si presenta come la più attenta alla persona. Modellare l'affaticamento come fattore che allunga i tempi di lavorazione significa riconoscere che l'operatore affaticato produce di meno, e la ragione per cui vale la pena rappresentarlo è che, senza tale rappresentazione, la stima della capacità produttiva risulterebbe distorta. L'affaticamento entra quindi nel modello come grandezza che spiega la prestazione, non come condizione della persona. Se si dimostrasse che l'affaticamento non ha alcun effetto sui tempi né sugli errori, entro quell'impianto non ci sarebbe più motivo di rappresentarlo. Neumann et al. (2021) hanno documentato il corrispettivo organizzativo di questa impostazione,

osservando come i fattori umani tendano a essere considerati a valle della progettazione tecnica, con funzione correttiva rispetto a scelte già compiute, anziché tra i criteri che la orientano.

Esiste però una quarta modalità, in cui il carico umano non è un parametro che influenza il comportamento del sistema, ma una condizione che delimita le soluzioni o i comportamenti ammessi. Non è una novità assoluta: nei modelli di ottimizzazione i limiti ergonomici sono già usati come vincoli rigidi, per esempio nel bilanciamento delle linee di assemblaggio con vincoli sul rischio ergonomico delle stazioni (Otto & Scholl, 2011) e nella rotazione delle mansioni con limiti di esposizione (Otto & Battaia, 2017). In questi modelli, però, il vincolo opera sulla soluzione di un problema di pianificazione, calcolata a priori, e non sull'evoluzione del sistema mentre questo è in esecuzione. La quarta modalità assume qui una forma diversa: il carico entra in una condizione di ammissibilità valutata a ogni evento, per cui, se supera la soglia, l'operazione non è eseguibile in quel momento. La differenza rispetto alle prime tre modalità è di natura, prima che di grandezza. Nelle prime tre il carico entra in una relazione funzionale: se il carico è elevato, allora la durata aumenta, il costo cresce, la probabilità di errore sale. Nella quarta entra in una condizione: se il carico supera la soglia, l'operazione non avviene. Nel primo caso il sistema procede, con prestazioni degradate; nel secondo il sistema non procede. Il contributo che questa tesi propone non consiste quindi nell'idea di trattare un limite ergonomico come vincolo, ma nel portarla dentro un modello eseguibile della supply chain, dove il vincolo agisce sull'abilitazione degli eventi anziché sulla scelta di un piano.

Questa formulazione traduce in termini operativi il terzo significato dell'umanocentrismo individuato al paragrafo 2.5.1. Un vincolo non esprime un'importanza elevata: esprime una condizione di legittimità del funzionamento. Non afferma che superare la soglia sia costoso, ma che uno stato in cui la soglia è superata e l'attività prosegue non è uno stato del sistema modellato. In questo senso il carico umano diventa, secondo l'espressione adottata in questo lavoro, un vincolo abilitante: non un ostacolo alla produzione, ma la condizione alla quale la produzione è ammessa.

Sono necessarie due precisazioni. La prima è che questa impostazione ha un costo, e non lo nasconde: subordinare l'esecuzione a una condizione sul carico riduce, in certe configurazioni, la produttività ottenibile. Tale riduzione non è un effetto indesiderato da minimizzare, ma la manifestazione stessa del vincolo; un vincolo che non riducesse mai lo spazio delle soluzioni non sarebbe un vincolo. Quantificare questo costo, e verificare che resti entro limiti compatibili con la funzionalità del sistema, è uno degli obiettivi della sperimentazione condotta nel Capitolo 5. La seconda è che una soglia mal calibrata può portare il sistema a bloccarsi, e la verifica che il modello proposto non presenti questo problema fa parte dell'analisi sviluppata nei Capitoli 4 e 5.

Resta da stabilire se questa quarta modalità sia già stata praticata nella letteratura che applica i formalismi a rete alla modellazione delle catene di fornitura, e in particolare se il fattore umano vi compaia come parametro o come vincolo. È la questione affrontata nel Capitolo 3, su cui si fonda la formulazione del gap di ricerca.

2.6 Le tensioni tra le dimensioni e l'insufficienza dei pesi

La letteratura sul paradigma 5.0 presenta spesso i tre pilastri come reciprocamente favorevoli. Le tensioni però esistono, e conviene guardarle da vicino: un modello i cui obiettivi non entrano mai in conflitto non ha bisogno di stabilire priorità, e quindi non dice nulla su come vadano composti.

Efficienza e resilienza sono in conflitto per le ragioni viste al paragrafo 1.5: le leve della resilienza sono precisamente ciò che la ricerca dell'efficienza ha eliminato. Efficienza e sostenibilità lo sono solo in parte: dove l'impatto ambientale deriva dal consumo di risorse, ridurlo riduce anche i costi, ma la convergenza cessa quando il miglioramento ambientale richiede investimenti senza ritorno economico, o quando l'opzione più economica ha un'impronta maggiore. Sostenibilità e resilienza sono in conflitto più spesso di quanto si creda, e questo contraddice un'assunzione diffusa: fornitori ridondanti significano impianti duplicati, scorte di sicurezza significano materiali immobilizzati che rischiano di diventare obsoleti, percorsi di trasporto multipli significano mezzi meno saturi. Umanocentrismo ed efficienza, infine, sono in conflitto per costruzione, come si è visto al paragrafo 1.4: se lo spreco viene definito rispetto al valore percepito dal cliente, un margine di capacità che permetta all'operatore un ritmo sostenibile è spreco, perché il cliente non paga per averlo.

Resta la tensione tra umanocentrismo e resilienza, che è la meno studiata e, per questo lavoro, la più importante. Reagire a una perturbazione significa quasi sempre chiedere di più alle persone. Un ritardo si recupera con ore aggiuntive e turni straordinari. Una configurazione degradata si gestisce improvvisando, con informazioni incomplete. Passare a un fornitore alternativo obbliga a imparare in fretta procedure non consolidate. Buona parte della resilienza che le catene mostrano nei fatti si ottiene così, attraverso l'elasticità di chi ci lavora: una risorsa che non compare in nessun bilancio e il cui esaurimento non produce segnali immediati. La pandemia lo ha reso evidente (Ivanov & Dolgui, 2020; Villar et al., 2023). Ne segue che l'interdipendenza tra i pilastri non è armonica: la resilienza si può ottenere a spese dell'umanocentrismo, e un modello che integri entrambi deve rendere esplicito questo scambio invece di lasciarlo implicito. È anche la ragione per cui il Capitolo 5 costruisce uno scenario critico, in cui la risposta alla perturbazione tenderebbe a scaricarsi proprio sulla componente umana.

Quando più obiettivi entrano in conflitto, la ricerca operativa li compone di solito in una somma pesata (Keeney & Raiffa, 1976; Marler & Arora, 2010): ogni obiettivo entra nella funzione con un

coefficiente che ne esprime l'importanza, e si cerca la soluzione che ottimizza il totale. È l'impostazione più diffusa nei modelli di supply chain sostenibile, dove costo, impatto ambientale e talvolta un indicatore sociale finiscono in un unico criterio. Questa impostazione ha un effetto preciso: rende tutto scambiabile. Un peggioramento su un obiettivo può sempre essere compensato da un miglioramento abbastanza grande su un altro. È ragionevole per grandezze effettivamente scambiabili, ma è proprio ciò che il terzo significato dell'umanocentrismo, individuato al paragrafo 2.5.1, nega.

Si consideri che cosa accade se il carico umano entra nella funzione obiettivo con un peso, anche molto alto. Il modello non è tenuto a rispettare la soglia: è tenuto a pagarne il superamento. Se sforare permette di risparmiare abbastanza su costo o tempo, il modello sforerà, e avrà fatto esattamente ciò per cui è stato costruito. Aumentare il peso non cambia il meccanismo, sposta soltanto il punto oltre il quale conviene. Un peso stabilisce un prezzo, e un prezzo per definizione si può pagare. Nemmeno dare priorità alla componente umana risolve il problema: un ordinamento per priorità stabilisce quale obiettivo guardare per primo nel confrontare le alternative, ma non toglie nessuna alternativa dal tavolo.

Un vincolo agisce su un piano diverso. Non ordina le alternative: ne elimina una parte. Divide gli stati del sistema in ammessi e non ammessi, e rende i secondi irraggiungibili, qualunque valore avrebbero sugli altri criteri. La differenza tra un peso e un vincolo non è di grado ma di natura, ed è la differenza tra rendere una cosa costosa e renderla impossibile. Se il pilastro umanocentrico deve avere il significato che gli attribuiscono Breque et al. (2021), serve la seconda: deve poter escludere configurazioni, non solo renderle meno convenienti.

Questo non significa rinunciare alla funzione obiettivo, ma darle un ruolo diverso. Il vincolo stabilisce che cosa è ammesso, la funzione obiettivo ordina ciò che è ammesso. Dentro l'insieme delle configurazioni che rispettano la soglia, cercare la soluzione migliore per costo, tempo e impatto ambientale conserva pieno significato: il vincolo non toglie l'ottimizzazione, toglie la possibilità di condurla anche su stati non ammessi. Il framework del Capitolo 4 usa entrambi i meccanismi, affiancando alla condizione di abilitazione una funzione obiettivo in cui la componente umana mantiene un peso minimo garantito.

2.7 La digitalizzazione come fattore abilitante ambivalente

Il contributo principale della digitalizzazione è rendere osservabile ciò che prima non lo era, ed è condizione necessaria di quanto argomentato sopra: non è possibile subordinare un'azione a una condizione su una grandezza che non si è in grado di rilevare. Un vincolo sul carico umano presuppone una stima del carico, e una contabilità degli impatti lungo la catena presuppone dati

relativi a nodi esterni all'organizzazione che li utilizza. Assume qui rilievo la tecnologia di registro distribuito, che rende verificabili in modo indipendente attributi altrimenti autodichiarati dai fornitori (Esmaeilian et al., 2020): poiché le tre dimensioni sono proprietà della catena e non del singolo nodo, la loro valutazione richiede informazioni fornite da soggetti che possono avere interesse a rappresentarle favorevolmente.

La digitalizzazione genera però costi propri: ambientali, perché l'infrastruttura comporta consumo energetico, materiali critici e rifiuti elettronici raramente contabilizzati nelle valutazioni delle soluzioni digitali (Sarkis et al., 2020); sistemici, perché l'interdipendenza tra sistemi informativi introduce vulnerabilità che si aggiungono a quelle fisiche anziché sostituirle; organizzativi, perché l'adozione richiede un accordo tra attori con interessi divergenti. Va inoltre ricordato, come già al paragrafo 1.6, che l'immutabilità del registro garantisce che il dato non venga alterato dopo l'inserimento, non che fosse veritiero al momento dell'inserimento (Esmaeilian et al., 2020): un livello di validazione fondato su questa tecnologia va inteso come garanzia di integrità e provenienza, non di veridicità.

Resta una tensione che tocca direttamente le premesse di questo lavoro. Le tecnologie che rendono osservabile il carico dell'operatore — dispositivi indossabili, rilevazione dei tempi di ciclo, tracciamento delle postazioni — sono le stesse che lo rendono sorvegliabile, e la destinazione d'uso non è stabilita dalla tecnologia ma dalle regole che ne governano l'accesso. La tensione assume una forma paradossale: poiché l'esposizione a monitoraggio continuo è essa stessa un fattore di sollecitazione psicosociale, una rilevazione del carico progettata senza attenzione a questo aspetto rischia di aumentare la grandezza che intende contenere. Ne discendono alcune condizioni di legittimità — rilevazione su base aggregata dove il vincolo non richieda dettaglio individuale, finalità d'uso circoscritta e garantita da regole di accesso, soglie trasparenti e definite con la partecipazione di chi vi è soggetto — che non sono formalizzate nel modello sviluppato in questa tesi e la cui assenza è registrata tra i limiti nel Capitolo 6.

2.8 Requisiti di formalizzazione e transizione al capitolo successivo

L'analisi condotta permette di ricavare sei requisiti che un linguaggio di modellazione deve soddisfare per rappresentare le tre dimensioni nel senso qui precisato. Il fatto che siano ricavati dall'analisi, e non assunti in partenza, permette di presentare la scelta del formalismo come esito di un'argomentazione e non come premessa.

Il primo è l'**esplicitazione della struttura**. Il comportamento delle catene dipende dalla configurazione delle dipendenze, delle sincronizzazioni e delle contese di risorsa, e non è deducibile

dal comportamento dei nodi presi isolatamente, come mostrano l'effetto bullwhip (Lee et al., 1997) e il ripple effect (paragrafo 1.5).

Il secondo è la **rappresentazione esplicita del tempo**, che interviene come variabile causale sotto tre profili: come ritardo all'origine dell'amplificazione della domanda (paragrafo 1.2); come dimensione costitutiva delle capacità di resilienza, definite in termini di rapidità di rilevazione e durata del ripristino (paragrafo 2.4); come dimensione lungo la quale l'affaticamento si accumula e il recupero avviene (paragrafo 2.5.2).

Il terzo è l'**eseguibilità**. Sia la resilienza sia l'effetto di un vincolo sul carico umano non sono deducibili da una descrizione, ma vanno osservati su traiettorie generate a partire da uno stato iniziale.

Il quarto è la **multidimensionalità dello stato**. Le tre dimensioni sono attributi eterogenei che devono essere trasportati insieme alle entità fisiche che attraversano il sistema: un lotto in lavorazione porta con sé un'informazione di costo e di tempo, ma anche un'impronta accumulata e una storia di carico generato. Il linguaggio deve quindi ammettere entità dotate di attributi strutturati.

Il quinto è la **capacità di esprimere condizioni di ammissibilità**, ricavato al paragrafo 2.6, ed è quello che distingue più nettamente tra le famiglie di strumenti disponibili: il linguaggio deve permettere che il mancato soddisfacimento di una condizione sullo stato renda l'operazione non eseguibile, e non semplicemente onerosa.

Il sesto è la **verificabilità formale**. Poiché introdurre condizioni di ammissibilità modifica l'insieme dei comportamenti raggiungibili, occorre poter accertare per via dimostrativa che il modello conservi proprietà elementari di correttezza, come l'assenza di blocchi e la raggiungibilità degli stati previsti.

Il capitolo successivo assume questo criterio e lo applica. Introduce il formalismo delle Reti di Petri, ne presenta le estensioni colorata e temporizzata e ne esamina l'adeguatezza rispetto ai sei requisiti; ripercorre quindi la letteratura che ha applicato tali strumenti alle catene di fornitura. L'obiettivo è stabilire non soltanto se il formalismo disponga delle capacità richieste — questione che, come si vedrà, riceve risposta affermativa — ma se e in quale misura tali capacità siano state impiegate per formalizzare il fattore umano nella quarta modalità individuata in questo capitolo. È in questa distanza, tra capacità disponibili e capacità utilizzate, che verrà collocato il gap di ricerca cui il framework proposto intende rispondere.

CAPITOLO 3

Modellazione e simulazione con Coloured Petri Net

3.1 Premessa

Il capitolo precedente si è chiuso con sei requisiti che un linguaggio di modellazione deve soddisfare per rappresentare le tre dimensioni della Supply Chain 5.0: esplicitazione della struttura, rappresentazione esplicita del tempo, eseguibilità, multidimensionalità dello stato, capacità di esprimere condizioni di ammissibilità, verificabilità formale.

Questo capitolo li usa come criterio. Presenta prima il formalismo delle Reti di Petri e le due estensioni rilevanti per il lavoro, quella colorata e quella temporizzata; ne verifica poi l'adeguatezza rispetto ai sei requisiti, confrontandolo con le altre famiglie di strumenti disponibili. Nella seconda metà ripercorre la letteratura che ha applicato questi strumenti alle catene di fornitura e si chiede in quale forma vi compaia il fattore umano. È da questa domanda che nasce il gap di ricerca cui il framework proposto risponde.

3.2 Le Reti di Petri

Le Reti di Petri sono state introdotte da Carl Adam Petri nella sua tesi di dottorato del 1962, con l'obiettivo di descrivere sistemi composti da più parti che operano in parallelo e comunicano tra loro (Petri, 1962).

Una rete di Petri è un grafo orientato con due tipi di nodo. I **posti**, disegnati come cerchi, rappresentano condizioni o stati parziali del sistema: un magazzino, una coda in attesa di lavorazione, la disponibilità di una risorsa. Le **transizioni**, disegnate come rettangoli, rappresentano eventi che modificano tali condizioni: l'inizio di una lavorazione, una spedizione, un controllo qualità. Gli **archi** collegano un posto a una transizione o una transizione a un posto, mai due nodi dello stesso tipo. La rete è quindi bipartita, e questa non è una convenzione grafica: separa in modo netto ciò che il sistema è, rappresentato dai posti, da ciò che il sistema fa, rappresentato dalle transizioni.

Nei posti risiedono i **token**. La loro distribuzione sui posti si chiama **marcatura** e rappresenta lo stato del sistema in un dato istante; la marcatura iniziale, indicata con M_0 , descrive la configurazione di partenza.

Il comportamento della rete è governato da una sola regola, la **regola di scatto**. Una transizione è abilitata quando ciascuno dei posti che la precedono contiene almeno tanti token quanti ne richiede l'arco corrispondente. Una transizione abilitata può scattare: consuma i token dai posti di ingresso e

ne deposita nei posti di uscita, portando la rete a una nuova marcatura. Lo scatto è atomico, cioè avviene per intero o non avviene.

Da questa unica regola derivano le situazioni tipiche dei sistemi distribuiti. Una transizione con più posti di ingresso realizza una **sincronizzazione**: scatta solo quando tutte le condizioni di ingresso sono soddisfatte, ed è il modo naturale di rappresentare un assemblaggio che richiede più componenti, o una spedizione che attende sia la merce sia il documento di trasporto. Una transizione con più posti di uscita realizza il **parallelismo**: da un evento nascono più attività che procedono indipendentemente. Due transizioni che condividono lo stesso posto di ingresso sono in **conflitto**: entrambe potrebbero scattare, ma lo scatto di una disabilita l'altra, ed è così che si rappresenta una scelta o la **contesa di una risorsa** tra più lavorazioni.

Il fatto che sincronizzazione, parallelismo e contesa siano costrutti primitivi del formalismo, e non aggiunte successive, è la ragione principale del suo interesse per le catene di fornitura, dove i tre fenomeni sono presenti contemporaneamente e dove, come si è visto al paragrafo 1.4, è proprio la struttura delle interazioni a generare i comportamenti collettivi problematici.

Il secondo motivo di interesse è che la rete ha una semantica formale, e su di essa si possono dimostrare proprietà anziché limitarsi a osservarle. Le principali sono la **raggiungibilità**, cioè l'insieme delle marcature ottenibili a partire da M_0 ; la **limitatezza**, che garantisce che nessun posto accumuli token senza limite; la **vivezza**, che garantisce che ogni transizione possa tornare a scattare; e l'**assenza di blocchi**, cioè l'assenza di marcature raggiungibili in cui nessuna transizione è abilitata. Queste proprietà si accertano esplorando lo spazio degli stati, cioè il grafo delle marcature raggiungibili (Murata, 1989; Jensen & Kristensen, 2009).

Le reti di Petri elementari hanno però un limite che le rende impraticabili per sistemi reali: i token sono indistinguibili. Un token in un posto segnala che una condizione è vera, ma non porta con sé alcuna informazione. Per rappresentare due tipi di prodotto occorre duplicare posti e transizioni, per rappresentarne dieci decuplicarli, e il modello cresce fino a diventare illeggibile. È il problema che l'estensione Coloured risolve.

3.3 Le Coloured Petri Net

Le Coloured Petri Net (CPN) sono state sviluppate da Kurt Jensen a partire dai primi anni Ottanta (Jensen & Kristensen, 2009). Si adotta nel testo la grafia britannica Coloured, impiegata da Jensen nella formulazione originale e prevalente in letteratura; il titolo della tesi riporta la variante americana Colored. L'idea è semplice: ai token viene attribuito un valore, chiamato per convenzione colore. Due

token nello stesso posto possono così essere distinti, e il modello che prima richiedeva dieci copie della stessa struttura ne richiede una sola, percorsa da token diversi.

Il colore non è però una semplice etichetta: è un dato tipizzato. Ogni posto ha associato un **insieme di colori**, che stabilisce quale tipo di token può contenere. Gli insiemi di colori possono essere semplici — interi, stringhe, booleani — oppure strutturati, cioè record con più campi. È quest'ultima possibilità a interessare direttamente il presente lavoro: un token può rappresentare un lotto e portare con sé, in un unico oggetto, il proprio identificativo insieme al costo accumulato, all'impronta ambientale e al carico umano generato.

Agli archi sono associate **espressioni** anziché pesi numerici. L'espressione di un arco entrante indica quali token vengono consumati; quella di un arco uscente indica quali token vengono prodotti e può calcolarli a partire da quelli consumati. È così che un lotto viene trasformato lungo il percorso: la transizione che rappresenta una lavorazione riceve un token e ne restituisce uno con i campi aggiornati.

Il costrutto decisivo per questa tesi è però un altro. A ogni transizione può essere associata una **guard function**: un'espressione booleana che deve risultare vera perché la transizione sia abilitata. La condizione si aggiunge a quella sulla disponibilità dei token e non la sostituisce: una transizione i cui posti di ingresso contengono i token richiesti resta comunque disabilitata se la guardia è falsa.

Vale la pena soffermarsi su che cosa questo significhi. Una guard function non attribuisce un costo a una situazione indesiderata e non la rende meno conveniente: la rende non eseguibile. Se la guardia di una transizione produttiva richiede che il carico umano sia inferiore a una soglia, allora nel modello non esiste alcuna evoluzione in cui quella lavorazione avvenga con carico superiore alla soglia. È esattamente il costrutto richiesto dal quinto requisito, e la distinzione tra peso e vincolo discussa al paragrafo 2.6 trova qui la propria traduzione formale.

Formalmente, una Coloured Petri Net è definita come una ennupla $(P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I)$, dove P è l'insieme dei posti, T quello delle transizioni, A quello degli archi, Σ l'insieme degli insiemi di colori, V l'insieme delle variabili tipizzate, C la funzione che associa a ogni posto il proprio insieme di colori, G la funzione che associa a ogni transizione la propria guardia, E la funzione che associa a ogni arco la propria espressione, e I la funzione di inizializzazione che definisce la marcatura iniziale (Jensen & Kristensen, 2009).

Le CPN dispongono infine di un meccanismo di **gerarchia**: una transizione può essere sostituita da un'intera sottorete descritta in una pagina separata. Un modello di supply chain può così essere organizzato per livelli, con una pagina di sintesi che mostra i nodi della catena e pagine di dettaglio

che ne descrivono i processi interni. È una caratteristica pratica ma non secondaria, perché mantiene il modello leggibile anche quando cresce.

3.4 L'estensione temporizzata

Le CPN descritte finora rappresentano l'ordine degli eventi ma non la loro durata: nella rete si sa che una lavorazione precede una spedizione, non quanto tempo impiega. Per le catene di fornitura questo è insufficiente, perché il paragrafo 2.8 ha stabilito che il tempo interviene come variabile causale sotto tre profili — i ritardi che generano l'effetto bullwhip, le durate che definiscono la resilienza, l'accumulo dell'affaticamento e il recupero.

Le **Timed Coloured Petri Net** (TCPN) aggiungono al modello un orologio globale e un marcatempo su ciascun token. Il marcatempo indica l'istante a partire dal quale il token diventa disponibile: un token con marcatempo superiore al tempo corrente esiste nel posto ma non può essere consumato. Le espressioni degli archi possono aggiungere un ritardo al token prodotto, e in questo modo la durata di un'attività viene rappresentata esplicitamente.

La simulazione procede di conseguenza: si eseguono tutti gli scatti possibili al tempo corrente e, quando nessuna transizione è più abilitata, l'orologio avanza al primo istante in cui un token torna disponibile. Il modello genera così una traiettoria, cioè una successione di marcature datate, dalla quale si ricavano le grandezze di prestazione: tempi di attraversamento, tempi di attesa, lunghezza delle code, saturazione delle risorse.

Un aspetto rilevante per questa tesi è che il ritardo non deve essere una costante. Poiché è calcolato da un'espressione, può dipendere dai valori dei token coinvolti, e la durata di una lavorazione può quindi essere resa funzione del carico umano corrente. Questo permette di rappresentare, accanto al vincolo, anche l'effetto dell'affaticamento sulla prestazione, cioè la terza modalità individuata al paragrafo 2.5.3: il framework proposto non la sostituisce, la affianca alla quarta.

3.5 Verifica del formalismo rispetto ai sei requisiti

È ora possibile applicare il criterio ricavato nel capitolo precedente.

Il **primo requisito**, l'esplicitazione della struttura, è soddisfatto per costruzione. Posti, transizioni e archi sono la struttura del sistema, e non una sua descrizione indiretta; sincronizzazione, parallelismo e contesa di risorsa sono costrutti primitivi.

Il **secondo**, la rappresentazione esplicita del tempo, è soddisfatto dall'estensione temporizzata, che introduce durate calcolabili in funzione dello stato e non soltanto costanti.

Il **terzo**, l'eleguibilità, è soddisfatto dalla regola di scatto, che costituisce una semantica operativa: il modello non descrive una configurazione, la fa evolvee, e produce traiettorie osservabili a partire da uno stato iniziale.

Il **quarto**, la multidimensionalità dello stato, è soddisfatto dagli insiemi di colori strutturati, che permettono a un token di trasportare più attributi eterogenei.

Il **quinto**, la capacità di esprimere condizioni di ammissibilità, è soddisfatto dalla guard function nel senso preciso richiesto: la condizione non pesa sull'esito, determina se l'operazione possa avvenire.

Il **sesto**, la verificabilità formale, è soddisfatto dalla semantica formale del linguaggio, che consente di accertare per via dimostrativa proprietà come l'assenza di blocchi e la raggiungibilità degli stati previsti.

Il formalismo soddisfa dunque tutti e sei i requisiti. Perché la scelta risulti motivata, però, occorre verificare che le altre famiglie di strumenti non li soddisfino altrettanto bene. La Tabella 3.1 riassume il confronto; la classificazione è necessariamente grossolana, perché ciascuna famiglia comprende varianti eterogenee, ma è sufficiente a individuare le differenze rilevanti.

Tabella 3.1 — Confronto tra le famiglie di strumenti di modellazione rispetto ai sei requisiti del paragrafo 2.8.

Famiglia di strumenti	Struttura	Tempo	Eleguibilità	Stato	Ammissibilità	Verifica
Programmazione matematica	implicita	parziale	no	sì	sì	parziale
System dynamics	parziale	sì	sì	no	no	no
Simulazione a eventi discreti	sì	sì	sì	sì	sì	no
Reti di Petri colorate e temporizzate	sì	sì	sì	sì	sì	sì

I due concorrenti effettivi meritano un commento.

La **programmazione matematica** dispone di vincoli in senso proprio, e sotto questo profilo soddisfa il quinto requisito meglio di qualunque alternativa. Cade però sul terzo: un modello di ottimizzazione restituisce una soluzione, non una traiettoria. Non è possibile perturbarlo e osservare come il sistema si comporta nel tempo, ed è precisamente ciò che il paragrafo 2.4 ha indicato come necessario per valutare la resilienza. La struttura, inoltre, resta implicita nelle matrici dei vincoli anziché costituire un oggetto del modello.

La **simulazione a eventi discreti** è l'alternativa più vicina, e soddisfa i primi cinque requisiti. Cade sul sesto. Un modello di simulazione si osserva eseguendolo, e da un campione di esecuzioni si ricavano statistiche, non dimostrazioni: si può accertare che in mille repliche non si è verificato alcun blocco, non che il blocco sia impossibile. Poiché il framework proposto introduce condizioni che restringono lo spazio dei comportamenti raggiungibili, questa differenza non è accademica: senza verifica formale non si può escludere che il vincolo sul carico umano conduca il sistema a stallo in configurazioni non esplorate dalla simulazione.

La scelta delle Timed Coloured Petri Net risulta quindi motivata non perché il formalismo sia superiore in assoluto, ma perché è l'unico che soddisfa contemporaneamente il quinto e il sesto requisito, cioè che consente di imporre condizioni di ammissibilità e insieme di dimostrare che il modello che ne risulta resta corretto.

3.6 Le Coloured Petri Net nella modellazione delle supply chain

L'applicazione delle reti di Petri alle catene di fornitura ha una tradizione consolidata, che può essere ordinata secondo l'oggetto dell'indagine.

Un primo filone impiega il formalismo per la **rappresentazione e la verifica dei processi**. La catena viene descritta come sistema a eventi discreti e il modello serve ad accertare la correttezza del coordinamento tra i nodi: assenza di blocchi negli scambi tra fornitore e cliente, terminazione corretta dei processi di evasione dell'ordine, coerenza dei protocolli di comunicazione (Liu et al., 2007; Santana-Robles et al., 2012; Kaiyandra et al., 2024). È il filone più vicino alle origini del formalismo e quello che ne sfrutta maggiormente la verificabilità formale.

Un secondo filone impiega le estensioni temporizzate e stocastiche per la **valutazione delle prestazioni**. Il modello viene simulato per stimare tempi di attraversamento, individuare colli di bottiglia, misurare la saturazione delle risorse e confrontare configurazioni alternative della rete (Bevilacqua et al., 2012; Drakaki & Tzionas, 2022; Khilwani et al., 2011). È in questo filone che si colloca il contributo di Mazzuto et al. (2012), che impiega le Timed Coloured Petri Net per modellare e gestire una catena di fornitura reale, mostrando come il formalismo consenta di rappresentare in un'unica struttura risorse, flussi di prodotto e vincoli temporali.

Un terzo filone, più recente, si occupa di **rischio e interruzioni**. Il modello viene sottoposto a perturbazioni — indisponibilità di un fornitore, guasto di un impianto, interruzione di un collegamento — e si osserva la propagazione dei loro effetti lungo la rete (Tuncel & Alpan, 2010; Khilwani et al., 2011; Zegordi & Davarzani, 2012; Chen et al., 2015). È l'impiego più coerente con quanto argomentato al paragrafo 2.4 sulla necessità di un modello eseguibile per valutare la resilienza.

Un quarto filone impiega il formalismo a supporto della **progettazione e configurazione della rete**, tipicamente in combinazione con tecniche di ottimizzazione, per confrontare alternative di localizzazione, dimensionamento e assegnazione dei flussi (Zhang et al., 2009; Tuncel & Alpan, 2010; Mazzuto et al., 2012).

Al di là delle differenze, questi filoni condividono una caratteristica. Ciò che viene rappresentato è la dimensione operativa della catena: tempi, capacità, costi, disponibilità delle risorse. Le tre dimensioni della Supply Chain 5.0 vi compaiono in modo disomogeneo. La resilienza è quella meglio rappresentata, perché la propagazione delle interruzioni è un fenomeno dinamico e strutturale, cioè esattamente il tipo di oggetto che il formalismo descrive bene. La sostenibilità è entrata più di recente. Kaiyandra et al. (2024) modellano in CPN una supply chain verde completa di rete inversa — punti di raccolta, impianti di riciclo e di disassemblaggio, mercato dei materiali secondari — con un'agenzia ambientale che regola il processo di riciclo, e ne verificano la correttezza con l'analisi dello spazio degli stati: il formalismo rappresenta bene anche la dimensione ambientale, in primo luogo attraverso la struttura dei flussi diretti e inversi. Negli altri lavori esaminati, quando compaiono, le grandezze ambientali sono per lo più attributi misurati lungo la traiettoria — un'emissione accumulata, un consumo energetico — più che condizioni che ne governano l'evoluzione. Si ripresenta, all'interno del modello formale, la stessa separazione tra misura e decisione rilevata al paragrafo 2.3 nella prassi delle imprese.

L'umanocentrismo è la dimensione meno rappresentata, ed è l'oggetto del paragrafo successivo.

3.7 Il fattore umano nei modelli a rete e il gap di ricerca

Il paragrafo 2.5.3 ha individuato tre modalità con cui il fattore umano entra nei modelli quantitativi — vincolo di capacità, voce di costo, parametro di prestazione — e una quarta, non praticata, in cui il carico umano diventa condizione di ammissibilità. La domanda da porre alla letteratura sulle reti di Petri applicate alla supply chain è in quale di queste modalità il fattore umano vi compaia.

Nella maggior parte dei modelli compare nella prima (ad esempio Mazzuto et al., 2012). L'operatore è rappresentato come risorsa: un token in un posto che ne indica la disponibilità, consumato all'inizio di una lavorazione e restituito al termine. La rete garantisce così che due attività non impieghino contemporaneamente la stessa persona, e il vincolo che ne risulta è un vincolo di capacità, identico nella forma a quello che riguarderebbe una macchina. La persona è modellata come una risorsa che può essere occupata o libera, e nulla nel modello distingue le due cose.

In una minoranza di lavori compare nella terza modalità, come parametro che influenza la prestazione. Il formalismo si presta bene a questo impiego, perché le durate delle transizioni sono

calcolate da espressioni e possono quindi dipendere dallo stato dell'operatore. Mazzuto et al. (2018) modellano con TCPN il processo di sviluppo di nuovi prodotti distinguendo, nei colori dei token, attributi operativi, riferiti alle attività, e attributi comportamentali, riferiti alle capacità personali degli operatori, e mostrano che considerare i fattori comportamentali migliora l'analisi delle prestazioni. Kontogiannis (2005), nell'ambito del controllo di processo, si spinge oltre sul versante del carico: integra in CPN reti di compiti e modelli cognitivi dell'operatore, calcola in ogni istante fattori come carico di lavoro, fatica e carico di memoria, e li impiega per rappresentare l'errore umano e valutare procedure e allocazione dei compiti. È un precedente importante, perché mostra che il formalismo può rappresentare il carico come grandezza che evolve nel tempo, con un dettaglio superiore a quello del presente lavoro. In entrambi i casi, tuttavia, il carico entra come fattore che condiziona la prestazione e la probabilità di errore, cioè nella terza modalità.

Nessun lavoro emerso dalla rassegna condotta sulle reti di Petri impiega la quarta modalità: vincoli ergonomici rigidi sono presenti in altri modelli quantitativi (paragrafo 2.5.3), ma non come condizioni di abilitazione delle transizioni in un modello a rete. Il carico umano non risulta mai posto come condizione di abilitazione delle transizioni produttive, cioè come grandezza il cui superamento rende l'operazione non eseguibile anziché più lenta o più costosa.

Questo dato merita di essere interpretato con attenzione, perché la spiegazione più ovvia è quella sbagliata. Non si tratta di un limite del formalismo: la guard function è un costrutto elementare delle Coloured Petri Net, disponibile da quarant'anni e impiegato di routine per altri scopi, come la selezione del percorso di un lotto, il rispetto di una capacità massima di magazzino o la codifica di regole commerciali. Lo strumento c'era. Ciò che è mancato è la formulazione del problema in termini tali da richiederlo.

La ragione di questa mancanza è coerente con quanto ricostruito nei due capitoli precedenti. Finché la funzione obiettivo resta il rapporto tra costo e livello di servizio, come mostrato al paragrafo 1.7, il fattore umano non ha motivo di comparire se non nella misura in cui incide su tale rapporto; e le tre modalità documentate sono precisamente i tre modi in cui può incidere. Rappresentare il carico umano come vincolo richiede di assumere il benessere dell'operatore come fine e non come parametro dell'efficienza, cioè il terzo significato dell'umanocentrismo individuato al paragrafo 2.5.1. È una scelta di natura concettuale, che precede la scelta dello strumento.

Il gap di ricerca può essere quindi formulato in modo preciso. Non consiste nell'assenza di applicazioni delle Coloured Petri Net alle catene di fornitura, che sono numerose e consolidate, né nell'assenza del fattore umano da tali applicazioni, dove esso è presente da tempo. Consiste nel fatto che, nella letteratura consultata, il fattore umano non è stato formalizzato come condizione che

delimita i comportamenti ammissibili di un modello a rete della supply chain, pur essendo disponibile nel formalismo il costrutto che lo consente, e pur essendo l'idea di vincolo ergonomico rigido già praticata in altri modelli quantitativi.

Va precisato che questa affermazione ha la portata che le compete. La rassegna condotta in questo lavoro è narrativa e mirata, non sistematica, e non permette di escludere l'esistenza di contributi non individuati. L'affermazione va quindi intesa come constatazione dell'assenza di tale impostazione nella letteratura consultata e nei riferimenti principali del settore, non come dimostrazione della sua inesistenza.

3.8 Sintesi e transizione al capitolo successivo

Il capitolo ha stabilito due risultati. Il primo è che le Timed Coloured Petri Net soddisfano tutti e sei i requisiti ricavati nel Capitolo 2, e che sono l'unico formalismo tra quelli esaminati a soddisfare contemporaneamente il quinto e il sesto: consentono di imporre condizioni di ammissibilità e di dimostrare che il modello che ne risulta conserva proprietà elementari di correttezza.

Il secondo è che tale possibilità non è stata sfruttata. La letteratura che applica il formalismo alle catene di fornitura rappresenta il fattore umano come capacità, come costo o come parametro di prestazione, ma, nella letteratura consultata, non come condizione di ammissibilità, benché la guard function fornisca il costrutto necessario. È in questa distanza tra capacità disponibili e capacità utilizzate che si colloca il contributo del presente lavoro.

Il capitolo successivo presenta il framework proposto. Ne descrive l'architettura a quattro layer e i costrutti formali che la compongono: il token colorato tridimensionale, la funzione di normalizzazione, la guard function sul carico umano, le durate variabili e la funzione obiettivo a peso minimo garantito. Si chiude verificando che il framework soddisfi i sei requisiti non soltanto in linea di principio, come il formalismo che lo ospita, ma nella sua realizzazione concreta.

CAPITOLO 4

Framework integrato per la Supply Chain 5.0 basato su TCPN

4.1 Premessa e criteri di progettazione

Il capitolo precedente si è chiuso su una constatazione: la guard function è un costrutto elementare delle Coloured Petri Net, disponibile da decenni, ma non è mai stata impiegata per subordinare l'esecuzione di un'operazione produttiva a una condizione sul carico dell'operatore. Lo strumento esisteva; è mancata la formulazione del problema che lo richiedesse.

Questo capitolo presenta il framework che compie quel passo. Prima di descriverlo conviene fissare i tre criteri che ne hanno guidato la progettazione, perché discendono direttamente dall'analisi dei due capitoli precedenti.

Il primo criterio è che **il fattore umano deve essere un vincolo strutturale, non un parametro**. Come argomentato al paragrafo 2.5.3, un parametro entra in una relazione funzionale e lascia il sistema libero di procedere con prestazioni degradate; un vincolo delimita ciò che il sistema può fare. Il framework adotta la seconda forma.

Il secondo criterio è che **vincolo e funzione obiettivo devono restare distinti**. Al paragrafo 2.6 si è mostrato che un peso, per quanto elevato, stabilisce un prezzo e non un divieto. Il framework impiega quindi entrambi i meccanismi, su piani diversi: la guardia determina che cosa sia ammesso, la funzione obiettivo ordina ciò che è ammesso.

Il terzo criterio è che **il modello deve essere eseguibile e verificabile**. Il paragrafo 2.4 ha stabilito che la resilienza si valuta solo generando traiettorie sotto perturbazione, e il paragrafo 2.8 ha aggiunto che l'introduzione di condizioni di ammissibilità modifica lo spazio dei comportamenti raggiungibili, con il rischio di stalli non previsti. Entrambe le cose vanno verificate, non dichiarate.

Occorre infine dichiarare il perimetro, come richiesto dal paragrafo 2.2. Il framework è sviluppato e applicato a una **singola cella produttiva**: una linea di lavorazione CNC di componenti in alluminio, con un operatore al banco di carico e scarico monitorato tramite dispositivi indossabili. Non copre quindi la catena di fornitura estesa, nel senso definito al paragrafo 1.2, e la limitatezza di questa scelta è discussa tra i limiti nel Capitolo 6. La cella è però il luogo in cui il carico umano si genera e si misura, ed è quindi il livello corretto al quale il vincolo deve operare.

4.2 Architettura generale: i quattro layer

Il framework è organizzato in quattro livelli gerarchici, affiancati da un sistema laterale di monitoraggio continuo (Figura 4.1).



Figura 4.1 — Architettura del framework: i quattro layer, il loop di riconfigurazione verso il Layer 1 e il monitoraggio laterale dei KPI. Elaborazione propria.

Il **Layer 1 (Acquisizione dati e convergenza fisica)** raccoglie i dati grezzi dalle sorgenti eterogenee di campo e li rende sincronizzati e confrontabili. Il **Layer 2 (Validazione e tokenizzazione semantica)** ne certifica l'integrità e li trasforma nel token colorato, che è l'entità digitale su cui opera tutto il resto del sistema. Il **Layer 3 (Motore di simulazione TCPN)** è il nucleo analitico: fa evolvere i token nella rete, applica le condizioni di abilitazione e produce le traiettorie. Il **Layer 4 (Decisione strategica e riconfigurazione)** valuta gli esiti mediante una funzione obiettivo vincolata e chiude il ciclo rinviando segnali di configurazione al Layer 1.

La progressione ha una logica precisa: il dato grezzo diventa dato certificato, il dato certificato diventa token strutturato, il token attraversa una rete che ne governa l'evoluzione, e l'esito rientra come parametro di configurazione. È il ciclo ciber-fisico tipico dell'Industria 4.0, ma con un elemento che il paradigma 4.0 non contempla: una condizione di ammissibilità che nessun obiettivo del Layer 4 può aggirare. La rete che realizza i Layer 2 e 3, e il loro collegamento con il Layer 4, è riportata in Figura 4.2.

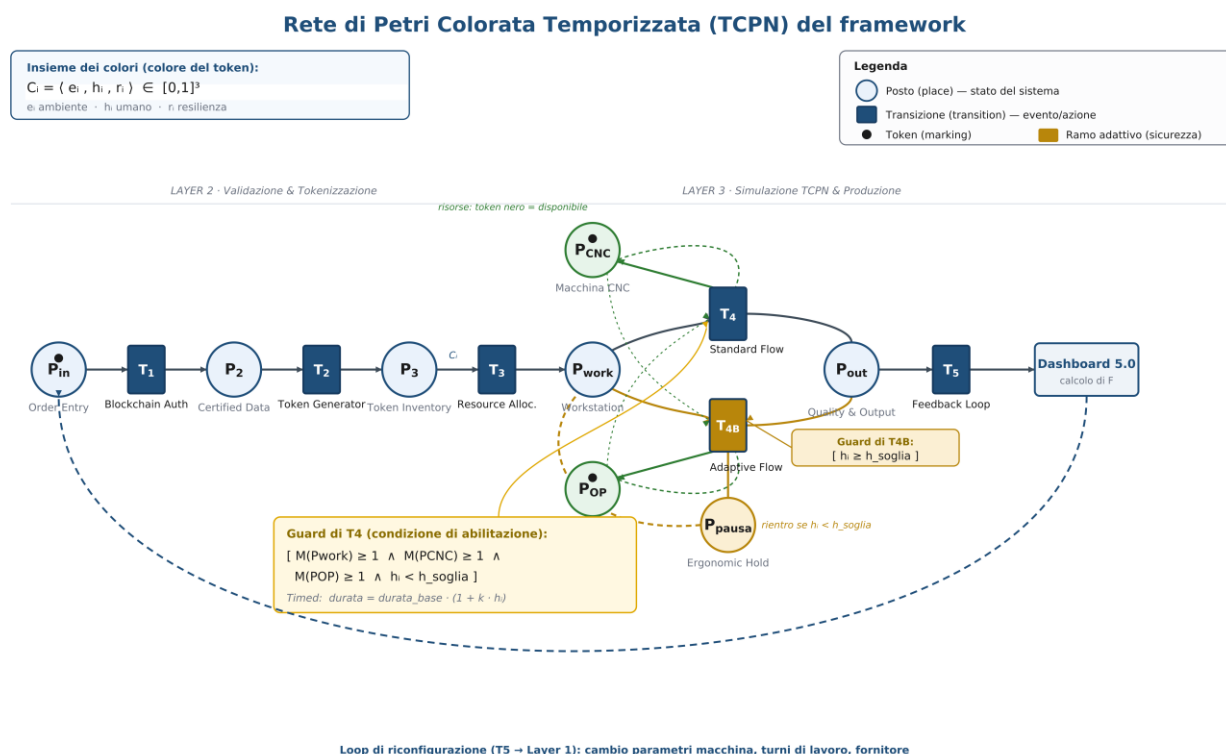


Figura 4.2 — La rete di Petri colorata temporizzata del framework: Layer 2 e 3, condizioni di abilitazione di T4 e T4B, collegamento con la dashboard del Layer 4 e loop di riconfigurazione. Elaborazione propria.

4.3 Layer 1 e 2 — Acquisizione, validazione e tokenizzazione

4.3.1 Le sorgenti e la sincronizzazione

Il Layer 1 integra tre famiglie di sorgenti. Gli **asset fisici** forniscono i dati di processo attraverso PLC, sensori di vibrazione e misure di consumo elettrico. Gli **operatori** sono monitorati tramite dispositivi indossabili che rilevano frequenza cardiaca e postura. I **sistemi informativi** forniscono il resto: database ambientali per i coefficienti di emissione, sistema gestionale aziendale per ordini, distinte base e tempi di attraversamento.

Il gateway IoT non si limita a trasmettere. Esegue elaborazione al bordo: ripulisce il dato dal rumore, lo uniforma di formato e soprattutto lo **sincronizza temporalmente**. È un punto tecnico ma non secondario, perché senza sincronizzazione un picco di carico dell'operatore non sarebbe correlabile alla specifica fase produttiva in corso nello stesso istante, e il token che ne deriva descriverebbe uno stato che non è mai esistito.

4.3.2 La rilevazione biometrica e il suo perimetro

Il paragrafo 2.7 ha individuato una tensione che riguarda direttamente questo livello: le tecnologie che rendono osservabile il carico dell'operatore sono le stesse che lo rendono sorvegliabile, e

l'esposizione a monitoraggio continuo è essa stessa un fattore di sollecitazione. Il framework affronta il problema esplicitamente. Il rischio di fondo è uno squilibrio informativo: raccogliere dati biometrici senza dichiarare per quale uso, e senza che tale uso sia verificabile, fa sì che l'impresa sappia dell'operatore molto più di quanto l'operatore sappia di come quei dati vengono usati.

La risposta del framework opera su tre livelli distinti.

Al Layer 1 vale la **finalità vincolata**: il monitoraggio non misura la produttività individuale, ma rileva carico ergonomico e stress in tempo reale. La finalità è dichiarata e specifica, e quando i valori superano la soglia il sistema rallenta o sospende la transizione produttiva per tutelare l'operatore, non per valutarlo.

Al Layer 2 vale la **tracciabilità**: la registrazione su registro distribuito garantisce che i dati non vengano alterati dopo l'inserimento e rende il trattamento auditabile da terze parti quali il responsabile del servizio di prevenzione e i rappresentanti dei lavoratori. Il registro non garantisce invece, da solo, che i dati non vengano riutilizzati per finalità diverse da quella dichiarata: ne garantisce l'integrità, non il controllo d'uso, che resta affidato a regole di accesso e a vincoli organizzativi (paragrafo 2.7). È quindi una risposta solo parziale allo squilibrio informativo, che richiede di essere completata sul piano normativo.

Al Layer 3 vale il fatto che **l'operatore non è un parametro ottimizzabile**, ma un'entità le cui condizioni agiscono come guardia sulle transizioni. Se i parametri ergonomici non sono conformi la transizione non si abilita, indipendentemente da qualunque altro obiettivo del sistema.

Il quadro normativo pone vincoli precisi a qualunque impiego reale. In Italia, l'art. 4 della L. 300/1970 (Statuto dei lavoratori), come modificato dal D.Lgs. 151/2015, consente l'uso di strumenti da cui derivi anche la possibilità di controllo a distanza dei lavoratori solo per esigenze organizzative e produttive, di sicurezza del lavoro e di tutela del patrimonio aziendale, e previo accordo sindacale o, in mancanza, autorizzazione dell'Ispettorato del lavoro. A livello europeo, il Regolamento (UE) 2016/679 (GDPR) include i dati relativi alla salute, come la frequenza cardiaca, tra le categorie particolari il cui trattamento è in linea di principio vietato (art. 9), salvo eccezioni specifiche, tra cui l'assolvimento di obblighi in materia di diritto del lavoro e la medicina del lavoro; riconosce inoltre all'interessato il diritto alla cancellazione dei propri dati (art. 17) e richiede una valutazione d'impatto per i trattamenti che comportano un monitoraggio sistematico (art. 35).

Il diritto alla cancellazione è in tensione diretta con l'immutabilità del registro distribuito: un dato personale scritto sul registro non può più essere eliminato. La soluzione coerente con il framework è registrare sul registro soltanto l'impronta crittografica (hash) dei pacchetti di dati, conservando i dati

biometrici in un archivio esterno e cancellabile, dal quale l'impronta permette di verificare che non siano stati alterati. Resta fermo che anche l'impronta, se riconducibile a una persona, può costituire un dato personale: la scelta riduce la tensione, non la elimina.

4.3.3 Validazione e definizione del token

Ogni pacchetto dati è sottoposto a hashing e registrato su registro distribuito. L'immutabilità che ne risulta serve a qualcosa di concreto: la direttiva (UE) 2022/2464 sulla rendicontazione societaria di sostenibilità sottopone le informazioni di sostenibilità alla verifica di un soggetto indipendente, e la direttiva (UE) 2024/825 vieta le asserzioni ambientali generiche non comprovate. Un registro alterabile non offrirebbe le garanzie di tracciabilità che queste norme presuppongono. Va però mantenuta l'interpretazione restrittiva stabilita al paragrafo 2.7: il registro garantisce che il dato non sia stato alterato dopo l'inserimento, non che fosse veritiero al momento dell'inserimento (Esmaeilian et al., 2020). Si tratta di una garanzia di integrità e provenienza, non di veridicità.

Il dato certificato viene quindi trasformato nel **token colorato**. Il colore del token i -esimo è la terna

$$C_i = (e_i, h_i, r_i), \text{ con } e_i, h_i, r_i \in [0,1]$$

dove e_i è la componente ambientale, h_i la componente umana e r_i la componente di resilienza. Le tre dimensioni della Supply Chain 5.0 diventano così attributi trasportati dall'entità fisica che attraversa il sistema: è la realizzazione del quarto requisito del paragrafo 2.8.

Va precisato che la componente umana h_i è un attributo del lotto: registra il carico dell'operatore rilevato al momento della tokenizzazione e lo accompagna lungo il percorso. Il carico non è quindi rappresentato come stato cumulativo dell'operatore, che evolverebbe a ogni lavorazione secondo quanto osservato al paragrafo 2.5.2; il punto è ripreso tra i limiti nel Capitolo 6.

Una scelta merita di essere sottolineata. **Costo e tempo non sono componenti del colore**, ma attributi accessori associati al token. Vengono propagati lungo la rete e riportati sulla dashboard, ma non entrano nelle condizioni di abilitazione delle transizioni. La ragione è diretta: se il costo entrasse nelle guardie, tornerebbe a essere disponibile come termine di scambio contro la componente umana, che è esattamente ciò che il paragrafo 2.6 ha escluso.

4.4 Layer 3 — Il motore TCPN

4.4.1 La funzione di normalizzazione

I dati grezzi arrivano in unità di misura eterogenee — kilowatt, battiti al minuto, minuti, punteggi ordinali. Per comporli nel token servono su una scala comune. La funzione di mappatura Φ opera questa conversione:

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq O \\ \frac{x - O}{K - O} & \text{se } O < x < K \\ 1 & \text{se } x \geq K \end{cases}$$

dove O è il limite superiore del valore ottimale e K il valore critico del parametro. La scelta di ancorare la normalizzazione alle soglie O/K, anziché applicare un generico min-max sull'intero campo di misura dello strumento, ha una conseguenza sostanziale: il valore normalizzato non esprime una posizione relativa nel range, ma una **distanza dalla condizione critica**. Un parametro in condizioni ottimali dà zero, un parametro oltre il limite critico dà uno e satura, e tutto ciò che sta in mezzo è interpolato linearmente.

Il valore risultante si legge su una scala qualitativa a tre fasce: **0,00–0,39 condizione ottimale (verde)**, **0,40–0,79 condizione di attenzione (giallo)**, **0,80–1,00 condizione critica (rosso)**.

Quando una componente del token dipende da più parametri, essa è calcolata come **media aritmetica dei soli parametri effettivamente disponibili** per quel lotto, e non come formula a pesi fissi su un insieme sempre completo. La ragione è pratica: l'impronta del materiale ha senso solo se quel lotto impiega quel materiale, e imporre una formula rigida costringerebbe a inventare un valore mancante. Si tratta di un'ipotesi semplificativa, con pesi impliciti pari a 1/n; l'estensione naturale è una media pesata con coefficienti calibrati su dati aziendali o ricavati da consultazione strutturata di esperti, ed è indicata tra gli sviluppi futuri nel Capitolo 6.

La regola ha però un costo: due token la cui componente è calcolata su un numero diverso di parametri non sono pienamente confrontabili, perché la media di due valori normalizzati e quella di tre possono differire anche a parità di condizioni. Nei due scenari del Capitolo 5 il problema non si pone, poiché l'impronta del materiale manca in entrambi e la componente ambientale è calcolata sugli stessi due parametri; in un impiego reale, con lotti eterogenei, occorrerebbe imputare il valore mancante, per esempio con il valore mediano osservato per quel materiale, oppure confrontare tra loro solo token calcolati sullo stesso insieme di parametri. Il punto è ripreso tra i limiti nel Capitolo 6.

Convenzione di arrotondamento. I valori normalizzati sono arrotondati a due decimali prima dell'aggregazione, e la media è a sua volta arrotondata a due decimali. La precisazione non è pedante: aggregare a piena precisione e arrotondare solo alla fine produce, in alcuni casi, valori diversi nella seconda cifra decimale. La convenzione qui adottata è quella impiegata nel modello implementato e nei risultati riportati nel Capitolo 5, e viene dichiarata perché i calcoli siano riproducibili.

4.4.2 Le tre componenti e le loro soglie

La **componente ambientale** e_i è alimentata da due parametri di processo e uno di materiale: la potenza istantanea della macchina CNC ($O = 4,5$ kW; $K = 8,0$ kW), il mix energetico della rete a cui la linea è collegata ($O = 0,30$; $K = 0,60$ kgCO₂/kWh) e l'impronta del materiale impiegato, ricavata da database di analisi del ciclo di vita secondo il quadro metodologico delle norme ISO 14040 e ISO 14044 (International Organization for Standardization [ISO], 2006a, 2006b) ($O = 5$; $K = 12$ kgCO₂/kg). Il calcolo dell'impatto cumulato in kg di CO₂ resta separato: alimenta il reporting ambientale e la dashboard, non la normalizzazione, che opera direttamente sul valore di potenza.

La **componente umana** h_i è alimentata da due dimensioni distinte e complementari del carico. La prima è il carico cardiovascolare, rilevato in continuo. La frequenza cardiaca grezza non viene normalizzata direttamente, ma prima convertita in percentuale di riserva cardiaca mediante la formula di Karvonen (Karvonen et al., 1957):

$$\%HRR = \frac{FC_{oss} - FC_{riposo}}{FC_{max} - FC_{riposo}} \times 100$$

La conversione è metodologicamente necessaria. Una soglia espressa in battiti assoluti — centoventi per tutti — ignorerebbe la forte variabilità individuale della frequenza a riposo e di quella massima, e produrrebbe misure non confrontabili tra operatori diversi. Il %HRR normalizza il carico rispetto alla fisiologia della singola persona. Le soglie sono quindi espresse in %HRR ($O = 30\%$; $K = 65\%$).

La seconda dimensione è il carico posturale e biomeccanico, misurato tramite l'indice REBA, che converte le coordinate rilevate da sensori indossabili o telecamere in un punteggio di rischio ergonomico su scala 1–15 ($O = 3$; $K = 8$).

La **componente di resilienza** r_i è formalizzata a partire da due metriche diffuse in letteratura (Hosseini et al., 2016). Il *Recovery Time* è operazionalizzato tramite il tempo medio di ripristino dopo un fermo, MTTR ($O = 15$; $K = 90$ minuti). L'*Adaptive Capacity* è operazionalizzata tramite la saturazione della linea ($O = 85\%$; $K = 95\%$), sul presupposto che più la linea primaria è satura, minore è il margine residuo per deviare un lotto verso una risorsa alternativa senza fermare la produzione. La componente è la combinazione pesata delle due, con pesi $w_1 = w_2 = 0,5$ come ipotesi di partenza dichiarata.

Sulla **motivazione delle soglie** occorre essere precisi, perché al paragrafo 2.5.2 si è affermato che una soglia è una decisione e non un dato deducibile. Alcune poggiano su fonti solide: le soglie REBA coincidono con i limiti delle bande di rischio dello strumento originale, che classifica il punteggio 1 come rischio trascurabile, 2–3 come rischio basso, 4–7 medio, 8–10 alto e 11–15 molto alto (Hignett

& McAtamney, 2000): la soglia ottimale $O = 3$ coincide con il limite superiore del rischio basso, quella critica $K = 8$ con l'inizio del rischio alto. Il limite ottimale di 30 %HRR si appoggia al criterio, consolidato nella letteratura ergonomica, secondo cui il dispendio energetico medio su un turno di otto ore non dovrebbe superare circa un terzo della capacità aerobica massima (Bonjer, 1962); poiché la percentuale della riserva cardiaca corrisponde alla percentuale della riserva di consumo di ossigeno, e non del consumo massimo (Swain & Leutholtz, 1997), il criterio si traduce approssimativamente in un valore attorno al 30 %HRR. Altre sono più deboli, e conviene dichiararlo: il limite critico di 65 %HRR deriva dalla classificazione generale dell'intensità dell'esercizio fisico, che colloca oltre il 60 %HRR l'attività di intensità vigorosa (Garber et al., 2011), e non da uno standard specifico sul rischio in ambiente industriale. Le soglie dei parametri di processo e di linea sono assunzioni operative derivate dai campi di misura tipici della cella considerata. Il Capitolo 6 riprende il punto tra i limiti.

4.4.3 La guard function: il carico umano come vincolo abilitante

Si arriva qui al costrutto centrale del framework. Una transizione produttiva può scattare solo se sono simultaneamente soddisfatte quattro condizioni:

$$\text{enable}(T4) \Leftrightarrow M(P_{\text{work}}) \geq 1 \wedge M(P_{\text{CNC}}) \geq 1 \wedge M(P_{\text{OP}}) \geq 1 \wedge h_i < h_{\text{threshold}}$$

dove $M(P)$ indica la marcatura del posto P , cioè il numero di token che contiene. Le prime tre condizioni richiedono rispettivamente che il pezzo sia caricato e pronto, che la macchina sia libera e che l'operatore sia disponibile. Sono condizioni ordinarie di disponibilità delle risorse: qualunque modello produttivo le contiene, e se una di esse è falsa la transizione semplicemente attende.

Le quattro condizioni sono riportate nel riquadro di sinistra della Figura 4.2. La quarta è ciò che qualifica il framework. Anche quando pezzo, macchina e operatore sono tutti disponibili, se la componente umana del token ha raggiunto la soglia critica la transizione non scatta. La sicurezza dell'operatore non è una condizione fra le altre: è un vincolo che nessuna delle altre tre può aggirare, e che nessun peso del Layer 4 può compensare.

È la realizzazione formale della quarta modalità individuata al paragrafo 2.5.3. Il carico umano non entra in una relazione funzionale che ne fa dipendere la durata o il costo, ma in una condizione che stabilisce se possa avvenire. Nel modello non esiste alcuna evoluzione in cui una lavorazione avvenga con h_i oltre la soglia; non è uno stato costoso, è uno stato inesistente.

Come valore di riferimento si assume $h_{\text{threshold}} = 0,80$, cioè il limite inferiore della fascia critica della scala qualitativa. Il valore va tarato su dati reali di campo, ma è coerente con il resto del modello: la soglia della guardia coincide con il punto in cui la scala dichiara la condizione critica.

Quando le condizioni di disponibilità sono soddisfatte ma $h_i \geq h_{\text{threshold}}$, la rete non abilita T4 ma instrada il token verso **T4B (Adaptive Flow)**, che prevede due risposte, nessuna delle quali consente di proseguire la lavorazione con quell'operatore oltre soglia. La prima è la sospensione: il token viene instradato verso il posto di attesa P_pausa, dove rimane finché il carico non rientra sotto soglia. La seconda è la riconfigurazione: il lotto viene deviato verso una risorsa alternativa presidiata da un altro operatore, e la lavorazione è ammessa solo se anche per quest'ultimo la guardia risulta soddisfatta. Il rallentamento non figura tra le risposte di T4B: al di sotto della soglia è già realizzato dalla modulazione delle durate descritta al paragrafo 4.4.4, mentre al di sopra della soglia contraddirebbe il vincolo. Il posto P_pausa rende la priorità della sicurezza umana visibile anche graficamente: un token con carico critico non raggiunge l'uscita finché non rientra entro i limiti.

4.4.4 Durate variabili

Nelle reti temporizzate ordinarie la durata di una transizione è una costante. Il framework la rende **funzione crescente del carico dell'operatore**:

$$\text{durata}(T) = \text{durata}_{\text{base}} \cdot (1 + k \cdot h_i), \text{ per } h_i < h_{\text{threshold}}$$

dove $\text{durata}_{\text{base}}$ è il tempo di lavorazione in condizioni ottimali e k è un coefficiente di sensibilità da tarare sul caso aziendale, che stabilisce quanto il sistema rallenta al crescere del carico. Con h_i nullo la durata coincide con quella base; al crescere di h_i aumenta progressivamente; al raggiungimento della soglia si passa al ramo T4B.

Su questa relazione serve una precisazione, perché è un punto in cui il framework rischia di essere frainteso. Come osservato al paragrafo 3.4, rendere la durata funzione del carico è la **terza** modalità del paragrafo 2.5.3, quella che rappresenta il fattore umano come parametro di prestazione, ed è ciò che la letteratura fa già. Il framework non la sostituisce: la affianca alla quarta. Sotto soglia il sistema modula il ritmo in funzione della condizione della persona, sopra soglia si ferma. La differenza rispetto ai modelli esistenti è che qui il rallentamento non registra una minore produttività dell'operatore affaticato, ma è **deciso dal sistema per non aggravare l'affaticamento**. Il ritmo del processo si adatta alla condizione della persona, e non viceversa.

4.4.5 L'esito della simulazione

Nel disegno del framework, il Layer 3 non restituisce un singolo risultato deterministico, ma una distribuzione di probabilità sulle prestazioni, ottenuta mediante simulazione Monte Carlo. Nella verifica sperimentale di questo lavoro la campagna è stata eseguita sul modello di riferimento in Python, che implementa le stesse formule della rete (paragrafo 5.2). La scelta risponde a quanto argomentato al paragrafo 2.4: la resilienza è una proprietà del comportamento del sistema sotto

perturbazione, e valutarla richiede di generare traiettorie, non di leggere indicatori strutturali. La distribuzione consente inoltre di stimare non solo il valore atteso di ciascuno scenario, ma anche la sua variabilità.

4.5 Layer 4 — Decisione e funzione obiettivo vincolata

Le tre componenti del token devono essere composte in un criterio unico per poter ordinare gli scenari. Il framework adotta una funzione additiva pesata, secondo l'approccio *Simple Additive Weighting* diffuso nella valutazione della sostenibilità industriale e concettualmente affine alla teoria dell'utilità multi-attributo:

$$F = \alpha \cdot e_i + \beta \cdot h_i + \gamma \cdot r_i, \text{ con } \alpha + \beta + \gamma = 1$$

Poiché le componenti sono orientate in modo che valori più alti indichino maggiore criticità, **F è una funzione di rischio complessivo e l'obiettivo è minimizzarla**. I pesi sono configurabili dall'impresa in base all'importanza relativa attribuita alle tre dimensioni.

Questa flessibilità, però, non può essere illimitata. Senza vincolo, un'impresa potrebbe ridurre arbitrariamente β per privilegiare la produttività a scapito del benessere dell'operatore. Si introduce quindi

$$\beta \geq \beta_{\min}$$

dove $\beta_{\min}$ è definito a livello di politica aziendale e **non è modificabile dal Layer 4 in fase di simulazione di scenario**. I pesi possono spostare l'enfasi tra sostenibilità e resilienza, ma non possono mai ridurre il peso del fattore umano sotto una soglia imposta a monte. La decisione su $\beta_{\min}$ è di natura organizzativa ed etica, non un parametro libero del modello di ottimizzazione.

A questo punto è possibile vedere come i due meccanismi previsti dal paragrafo 2.6 operino insieme. **La guardia esclude**: partiziona lo spazio degli stati e rende irraggiungibili le configurazioni che violano la soglia sul carico umano, indipendentemente dal valore che assumerebbero rispetto a qualunque criterio. **La funzione obiettivo ordina**: entro l'insieme ammissibile confronta gli scenari e individua quello a rischio minimo. **Il vincolo su β impedisce** che, all'interno di quell'insieme, la dimensione umana venga resa irrilevante. I tre meccanismi non si sovrappongono, perché rispondono a domande diverse: il primo stabilisce che cosa è possibile, il secondo che cosa è preferibile, il terzo che il secondo non possa svuotare il primo.

Ne discende una formulazione corretta del trade-off nelle analisi di scenario. La domanda ammissibile non è se convenga aumentare lo stress dell'operatore per recuperare un ritardo — formulazione in contrasto con i principi dell'Industria 5.0 (Breque et al., 2021) e con i criteri ergonomici della norma

ISO 6385 (ISO, 2016) — ma come allocare il margine disponibile *entro* i limiti di sicurezza: se impiegarlo per recuperare il ritardo o per ridurre le emissioni. In nessuno scenario il sistema è autorizzato a superare $h_{\text{threshold}}$, e il trade-off riguarda esclusivamente l'uso del margine, non la sua violazione.

Il layer si completa con una **dashboard** che aggrega i tre indicatori e il valore di F , riportando sia il valore atteso sia l'intervallo di confidenza prodotto dalla simulazione, e con un **loop di riconfigurazione** che, scelta la strategia a F minimo tra quelle ammissibili, invia segnali di ritorno al Layer 1: modifica dei parametri macchina, variazione dei turni, scelta di un fornitore diverso.

4.6 Il monitoraggio laterale dei KPI

Accanto ai quattro layer opera un sistema di monitoraggio continuo che li attraversa verticalmente. La sua funzione è confrontare gli indicatori programmati, cioè gli obiettivi aziendali, con quelli misurati sul campo, e segnalare le deviazioni tra ciò che il Layer 3 simula e ciò che il Layer 1 rileva.

La collocazione laterale non è una scelta grafica. Un sistema che decide sulla base di un modello ha bisogno di qualcosa, fuori dal modello, che controlli se il modello descrive ancora la realtà. Senza questo controllo, il fatto che i conti tornino dentro il modello verrebbe preso per prova che il modello è giusto. È anche il canale attraverso cui le soglie O/K, dichiarate al paragrafo 4.4.2 come assunzioni da tarare, possono essere riviste sulla base dei dati effettivamente osservati.

4.7 Verifica dei sei requisiti

Il Capitolo 3 ha verificato che il formalismo delle Timed Coloured Petri Net soddisfa i sei requisiti ricavati al paragrafo 2.8. Occorre ora accertare che li soddisfi anche il framework che lo impiega. Avere una capacità e usarla sono due cose diverse: è proprio su questa differenza che si fonda il gap di ricerca.

Esplicitazione della struttura. La rete rappresenta i nodi come posti e gli eventi come transizioni. La sincronizzazione a tre vie tra P_{work} , P_{CNC} e P_{OP} , richiesta dalla guardia, è una struttura esplicita e non una relazione funzionale aggregata: la contesa delle risorse tra lavorazioni concorrenti è visibile nella topologia.

Rappresentazione esplicita del tempo. Le transizioni hanno durata, e la durata di quelle produttive è funzione dello stato dell'operatore secondo la relazione del paragrafo 4.4.4.

Eseguibilità. Il modello genera traiettorie a partire da una marcatura iniziale, ed è su queste che vengono calcolate le prestazioni; la campagna Monte Carlo è stata condotta sul modello di riferimento in Python, che ne replica le formule (paragrafo 5.2).

Multidimensionalità dello stato. Il colore del token è una terna di attributi eterogenei, affiancata da costo e tempo come attributi accessori. Un lotto trasporta la propria impronta ambientale, il carico umano generato e il proprio profilo di resilienza lungo tutto il percorso.

Capacità di esprimere condizioni di ammissibilità. È il requisito realizzato dalla guardia su h_i , nel senso stretto richiesto: il mancato soddisfacimento non rende l'operazione più onerosa, la rende non eseguibile.

Verificabilità formale. Il modello è scritto in un linguaggio dotato di semantica formale, e le proprietà di correttezza — in particolare l'assenza di stalli introdotti dalla guardia — sono accertabili sullo spazio degli stati. La verifica effettiva è condotta nel Capitolo 5.

Il framework soddisfa dunque tutti e sei i requisiti. Il quinto, che il Capitolo 3 ha individuato come quello su cui la letteratura non aveva ancora operato, è realizzato dal costrutto che dà al lavoro il suo contributo.

4.8 Sintesi e transizione al capitolo successivo

Il framework presentato integra le tre dimensioni della Supply Chain 5.0 in un modello TCPN attraverso cinque costrutti. Il **token colorato tridimensionale** trasporta le tre dimensioni insieme all'entità fisica, tenendo costo e tempo fuori dal colore perché non siano disponibili come termini di scambio. La **funzione di normalizzazione** ancorata alle soglie ottimale e critica porta grandezze eterogenee su una scala comune che misura la distanza dalla criticità. La **guard function** subordina l'abilitazione delle transizioni produttive al rispetto di una soglia sul carico umano. Le **durate variabili** modulano il ritmo del processo in funzione della condizione dell'operatore al di sotto di quella soglia. La **funzione obiettivo con peso minimo garantito** ordina le alternative ammissibili senza poter rendere irrilevante la componente umana.

L'architettura complessiva realizza la distinzione di ruoli argomentata al paragrafo 2.6: il vincolo determina l'insieme ammissibile, l'ottimizzazione opera al suo interno.

Resta da accertare che il modello si comporti come previsto. Il capitolo successivo ne presenta la verifica sperimentale: l'implementazione in CPN IDE del meccanismo di guardia, messo alla prova su due scenari di riferimento — uno in condizioni operative regolari e uno in cui la componente umana raggiunge la soglia critica mentre le altre restano gestibili — e una campagna di simulazione Monte Carlo, condotta sul modello di riferimento, che ne valuta la risposta statistica sotto regimi di carico differenziati. Il secondo scenario è costruito attorno alla tensione individuata al paragrafo 2.6, quella tra umanocentrismo e resilienza: è il caso in cui un sistema che ragionasse sulla media procederebbe, e il framework invece si ferma.

CAPITOLO 5

Verifica sperimentale del meccanismo di guardia

5.1 Premessa e obiettivi della sperimentazione

Il capitolo precedente ha presentato il framework e ne ha verificato la coerenza con i sei requisiti. Resta da accertare che si comporti come previsto, e il paragrafo 2.4 ha stabilito perché questo non possa essere dato per scontato: l'effetto di un vincolo sul comportamento complessivo di un sistema non è deducibile dall'enunciato del vincolo, ma va osservato su traiettorie generate.

La verifica sperimentale risponde a tre domande distinte.

La prima è se **il vincolo operi effettivamente**, cioè se in presenza di un carico umano oltre soglia la transizione produttiva risulti disabilitata anche quando tutte le altre condizioni sono soddisfatte. È la verifica del meccanismo.

La seconda è **quanto costi**. Il paragrafo 4.4.3 ha riconosciuto che un vincolo riduce lo spazio delle soluzioni e che questa riduzione non è un effetto collaterale ma la manifestazione stessa del vincolo. Resta da stabilire se il costo sia compatibile con la funzionalità del sistema, e sotto quali condizioni diventi rilevante.

La terza è se **il modello resti corretto**, cioè se l'introduzione della guardia non produca stalli o comportamenti non previsti.

Il capitolo affronta le tre domande in quest'ordine: due scenari di riferimento per il meccanismo, una campagna di simulazione per il costo, un'analisi delle proprietà per la correttezza.

5.2 L'ambiente CPN IDE e il modello implementato

Il modello è stato realizzato in **CPN IDE, versione 1.24.1031**, ambiente di modellazione e simulazione per Coloured Petri Net che eredita il linguaggio e la semantica di CPN Tools (Jensen & Kristensen, 2009).

Il modello implementato comprende tre posti e due transizioni. Il posto **P_work** rappresenta la postazione di lavorazione e contiene i lotti pronti; i posti **P_out** e **P_pausa** rappresentano rispettivamente l'uscita del processo e l'attesa ergonomica. Le transizioni **T4 (Standard Flow)** e **T4B (Adaptive Flow)** costituiscono il bivio in cui la guardia opera. Tutti e tre i posti hanno insieme di colori C_i , e tutti gli archi portano l'espressione c , cioè il token viene propagato senza trasformazioni: la lavorazione non modifica il colore, che continua a descrivere le condizioni rilevate al momento della tokenizzazione.

Le due guardie sono scritte nella sintassi di CPN ML come

```
T4 : [#h c < h_threshold] T4B : [#h c >= h_threshold]
```

dove `#h c` estrae il campo `h` dal token `c`. Sono complementari ed esaustive: per qualunque valore di `h` esattamente una delle due è vera.

Il modello implementato è una riduzione mirata del framework. La rete completa descritta al paragrafo 4.2 comprende otto posti e sei transizioni, dal blocco di validazione al loop di riconfigurazione. L'implementazione isola il bivio T4/T4B, che è il punto in cui si concentra il contributo del lavoro, e lascia fuori i livelli a monte e a valle. La scelta ha una motivazione precisa: ciò che deve essere verificato non è che una rete di Petri sappia rappresentare una cella produttiva, cosa ampiamente documentata in letteratura come mostrato al paragrafo 3.6, ma che la guard function sul carico umano produca il comportamento atteso. Un modello più esteso avrebbe aggiunto dettaglio senza aggiungere prova.

Da questa riduzione discendono tre differenze rispetto al framework formale, che vanno dichiarate e sono riprese tra i limiti nel Capitolo 6. La guardia implementata contiene la sola condizione su `h`, mentre quella del paragrafo 4.4.3 ne contiene quattro: le condizioni di disponibilità di pezzo, macchina e operatore sono rappresentate dal solo posto di ingresso `P_work` anziché dalla sincronizzazione a tre vie. Il campo `Time` delle transizioni è vuoto, quindi il modello implementato è privo di temporizzazione e la relazione tra durata e carico del paragrafo 4.4.4 non vi è realizzata. Di T4B è implementato il solo ramo di sospensione, non quello di riconfigurazione.

Per questa ragione la parte quantitativa della sperimentazione — la modulazione della durata e la campagna statistica — è stata condotta su un **modello di riferimento eseguibile in Python**, che implementa le stesse formule del paragrafo 4.4 e i cui risultati sui due scenari coincidono con quelli della rete. Il codice, i semi del generatore pseudocasuale e l'ambiente di esecuzione sono riportati in Appendice A. Il modello CPN IDE verifica il meccanismo di abilitazione; il modello di riferimento ne quantifica gli effetti.

5.3 Dati di ingresso e configurazione degli scenari

I due scenari condividono il profilo dell'operatore: frequenza cardiaca a riposo 70 bpm e frequenza massima 190 bpm, corrispondente a un operatore di trent'anni secondo la formula convenzionale $220 - \text{età}$ (Fox et al., 1971), di cui è nota la limitata precisione a livello individuale (Tanaka et al.,

2001). Il profilo è lo stesso in entrambi i casi, così che le differenze osservate dipendano dalle condizioni di lavoro e non dalla fisiologia individuale.

Tabella 5.1 — Parametri grezzi dei due scenari di riferimento.

Parametro	Unità	LOT_A1	LOT_A2
Potenza CNC	kW	5,0	7,0
Mix energetico	kgCO ₂ /kWh	0,32	0,48
Impronta materiale	kgCO ₂ /kg	non disponibile	non disponibile
Frequenza cardiaca osservata	bpm	108	165
Indice REBA	1–15	4	9
MTTR	minuti	25	70
Saturazione linea	%	78	92
Priorità dell'ordine	1–5	2	5

Lo scenario **LOT_A1** rappresenta una lavorazione in condizioni regolari. Lo scenario **LOT_A2** rappresenta un ordine urgente, con priorità massima, eseguito in condizioni di stress dell'operatore: la frequenza cardiaca è elevata e la postura è critica, mentre la macchina lavora a potenza maggiore e la linea è quasi satura. È lo scenario costruito attorno alla tensione individuata al paragrafo 2.6, quella tra umanocentrismo e resilienza: la risposta alla pressione sui tempi tenderebbe a scaricarsi sulla componente umana. Nella marcatura iniziale di questo scenario sono stati inseriti due token identici, cioè due lotti dello stesso ordine urgente, per verificare che la guardia agisca su ciascun token e non soltanto sul primo.

Si noti che in entrambi i casi l'impronta del materiale non è disponibile. La componente ambientale è quindi calcolata come media dei soli due parametri presenti, secondo la regola del paragrafo 4.4.1.

5.4 Scenario LOT_A1: funzionamento in condizioni regolari

Il calcolo procede in tre passi.

La frequenza cardiaca osservata viene convertita in percentuale di riserva cardiaca: $\%HRR = \frac{108-70}{190-70} \times 100 = 31,7\%$. Il valore è appena sopra il limite ottimale di 30%, dunque l'operatore lavora in condizioni di carico cardiovascolare quasi ideali.

I parametri vengono quindi normalizzati con la funzione Φ :

Tabella 5.2 — Normalizzazione dei parametri, scenario LOT_A1.

Parametro	Valore	O	K	Φ
Potenza	5,0 kW	4,5	8,0	0,14
Mix energetico	0,32	0,30	0,60	0,07
%HRR	31,7%	30	65	0,05
REBA	4	3	8	0,20
MTTR	25 min	15	90	0,13
Saturazione	78%	85	95	0,00

La saturazione, essendo inferiore al limite ottimale, satura a zero. Aggregando secondo le regole del paragrafo 4.4.1 si ottiene il token colorato

$$C_1 = (e = 0,11; h = 0,13; r = 0,07)$$

tutte e tre le componenti in fascia verde. Il token è quello visibile nella marcatura iniziale della Figura 5.1, nella notazione $l'\{e=0.11,h=0.13,r=0.07\}$.

Poiché $h = 0,13$ è ampiamente inferiore alla soglia di 0,80, la guardia di T4 risulta soddisfatta e la transizione è abilitata: CPN IDE la segnala come Ready. Contestualmente la guardia di T4B è falsa e la transizione resta disabilitata. Allo scatto il token si sposta in P_{out} e la lavorazione si conclude regolarmente, come mostrato nella Figura 5.2; il console di simulazione registra la transizione scattata e l'assenza di ulteriori transizioni abilitate, coerentemente con il fatto che P_{work} è ora vuoto.

Applicando la relazione del paragrafo 4.4.4 con $k = 0,5$, la durata della lavorazione risulta

$durata = 10,0 \times (1 + 0,5 \times 0,13) = 10,65$ unità di tempo, cioè un incremento del **6,5%** rispetto alla condizione ottimale.

Il sistema riconosce quindi un carico modesto e vi risponde con un rallentamento marginale, senza interrompere il flusso. La funzione obiettivo restituisce $F = 0,4 \times 0,11 + 0,4 \times 0,13 + 0,2 \times 0,07 = 0,11$, valore in fascia verde che indica rischio complessivo basso.

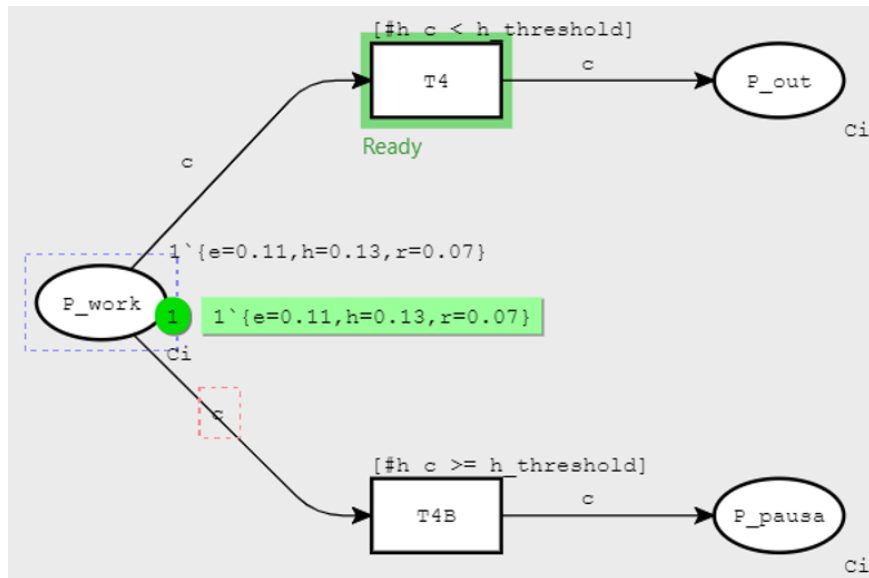


Figura 5.1 — Scenario LOT_A1, marcatura iniziale. Il token 1' {e=0.11, h=0.13, r=0.07} si trova in P_work e T4 è segnalata come abilitata.

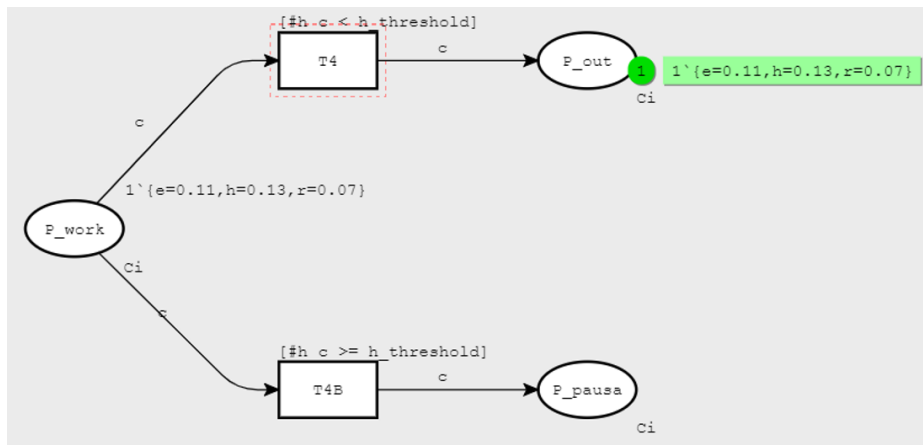


Figura 5.2 — Scenario LOT_A1 dopo lo scatto di T4. Il token ha raggiunto P_out e la lavorazione si è conclusa regolarmente.

5.5 Scenario LOT_A2: attivazione del vincolo sul carico umano

Lo scenario critico segue lo stesso procedimento.

La conversione di Karvonen dà $\%HRR = \frac{165-70}{190-70} \times 100 = 79,2\%$, valore che supera il limite critico di 65% e satura quindi a $\Phi = 1,00$. Anche l'indice REBA, pari a 9, supera il limite critico di 8 e satura a 1,00.

Tabella 5.3 — Normalizzazione dei parametri, scenario LOT_A2.

Parametro	Valore	Φ
Potenza	7,0 kW	0,71
Mix energetico	0,48	0,60
%HRR	79,2%	1,00
REBA	9	1,00
MTTR	70 min	0,73
Saturazione	92%	0,70

Il token risultante è

$$C_2 = (e = 0,66; h = 1,00; r = 0,72)$$

La componente umana ha raggiunto il valore massimo della scala. Entrambi i parametri che la alimentano sono oltre il limite critico, e il carico non è quindi elevato per una sola ragione contingente: lo è sia sul versante cardiovascolare sia su quello posturale.

La reazione della rete è il risultato centrale della sperimentazione. Poiché $h = 1,00 \geq 0,80$, la guardia di T4 è **falsa** e la transizione produttiva **non è abilitata**, nonostante il lotto sia presente in P_work e nonostante la priorità dell'ordine sia massima. CPN IDE segnala come Ready la sola T4B, e allo scatto il token viene instradato verso **P_pausa**, come mostrato nelle Figure 5.3 e 5.4.

Merita attenzione un dettaglio della marcatura. Come anticipato al paragrafo 5.3, nella Figura 5.3 il posto P_work contiene due token identici, e dopo lo scatto di T4B uno si trova in P_pausa mentre l'altro resta in P_work con T4B ancora segnalata come Ready. Il comportamento è corretto e istruttivo: il vincolo non agisce una volta sola sul primo lotto, ma su ciascun token che presenti le stesse condizioni. Finché il carico dell'operatore resta oltre soglia, nessun lotto raggiunge l'uscita.

Va sottolineato che le altre due componenti restano gestibili. Con $e = 0,66$ e $r = 0,72$ il sistema è in condizione di attenzione, non di emergenza, su entrambe le dimensioni. Un modello che aggregasse le tre componenti in un unico indicatore e decidesse sulla media otterrebbe un valore alto ma non estremo, e in presenza di un ordine a priorità massima avrebbe buone ragioni per procedere. Il framework si ferma ugualmente, perché la componente umana non è mediata con le altre: è una condizione separata.

La funzione obiettivo restituisce $F = 0,4 \times 0,66 + 0,4 \times 1,00 + 0,2 \times 0,72 = \mathbf{0,81}$, valore in fascia rossa. Ed è qui che si vede la distinzione di ruoli argomentata al paragrafo 2.6: F segnala che lo scenario è ad alto rischio e permette di confrontarlo con alternative, ma **non è F a fermare il sistema**. Il sistema si è già fermato, per effetto della guardia, prima che la funzione obiettivo venisse valutata. Anche un valore di F più favorevole non avrebbe riabilitato T4.

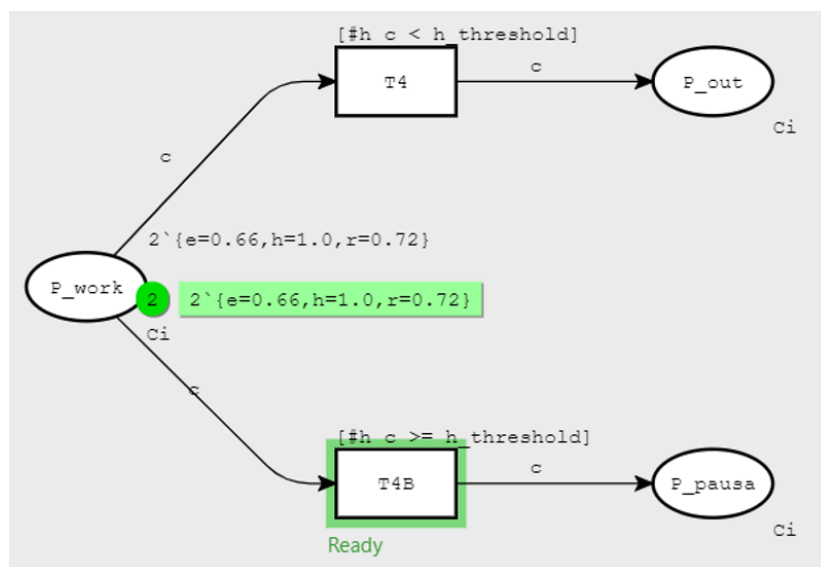


Figura 5.3 — Scenario LOT_A2, marcatura iniziale. I token $\{e=0.66, h=1.0, r=0.72\}$ si trovano in P_work, ma T4 non è abilitata: la sola transizione pronta è T4B.

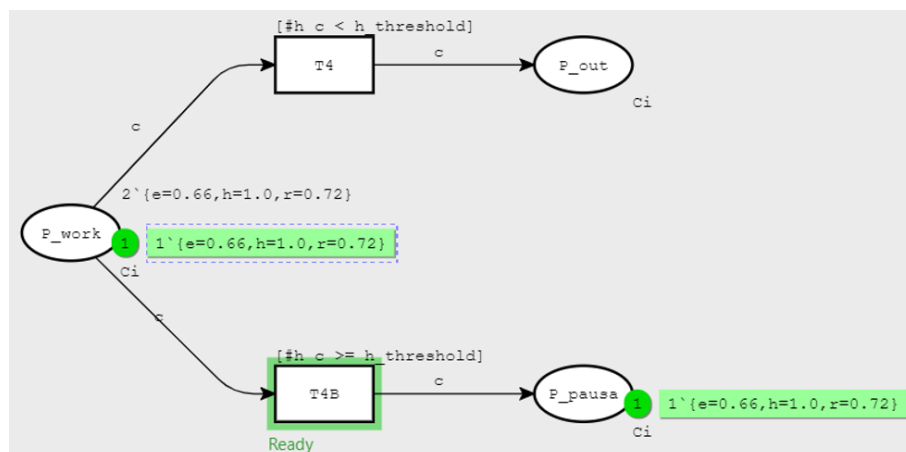


Figura 5.4 — Scenario LOT_A2 dopo lo scatto di T4B. Il token è stato instradato verso P_pausa anziché verso l'uscita. T4B resta abilitata per il token ancora presente in P_work.

5.6 Confronto tra i due scenari

Tabella 5.4 — Confronto tra i due scenari di riferimento.

	LOT_A1	LOT_A2
Componente ambientale e	0,11 (verde)	0,66 (giallo)
Componente umana h	0,13 (verde)	1,00 (rosso)
Componente resilienza r	0,07 (verde)	0,72 (giallo)
Funzione obiettivo F	0,11 (verde)	0,81 (rosso)
Transizione abilitata	T4 (Standard Flow)	T4B (Adaptive Flow)
Destinazione del token	P_out	P_pausa
Durata della lavorazione	10,65 (+6,5%)	non eseguita

Il confronto mostra due regimi di comportamento qualitativamente diversi, e non due punti di una stessa curva. Nel primo il sistema opera e modula: il carico è riconosciuto e produce un rallentamento proporzionato. Nel secondo il sistema non opera: non rallenta ulteriormente, non aumenta il costo, non degrada la prestazione. Si ferma.

È la differenza tra parametro e vincolo, argomentata al paragrafo 2.6 e formalizzata al paragrafo 4.4.3, osservata qui nel comportamento del modello. Nelle prime tre modalità del paragrafo 2.5.3 il carico elevato avrebbe prodotto un LOT_A2 più lento e più costoso di LOT_A1, ma comunque completato. Nella quarta modalità LOT_A2 non viene completato affatto.

5.7 Campagna di simulazione Monte Carlo

I due scenari verificano il meccanismo su casi costruiti. Resta da stabilire come il sistema si comporti su una popolazione di lotti, e in particolare quanto costi il vincolo in termini di produzione. È l'oggetto della campagna di simulazione.

5.7.1 Impostazione

La campagna è stata condotta sul modello di riferimento in trenta repliche indipendenti. In ciascuna replica sono stati generati 2.000 lotti per ciascuno di tre regimi di carico, differenziati per le condizioni dell'operatore. I parametri di processo sono estratti dalle medesime distribuzioni nei tre regimi, così che le differenze osservate siano attribuibili al solo fattore umano.

Tabella 5.5 — Distribuzioni impiegate nella campagna di simulazione.

Parametro	Distribuzione	Basso	Medio	Alto
Frequenza cardiaca	normale (media, dev. st.)	105 ; 8	128 ; 10	150 ; 12
Indice REBA	uniforme discreta	2–5	4–7	6–10
Potenza CNC	normale	5,5 ; 1,0	5,5 ; 1,0	5,5 ; 1,0
Mix energetico	normale	0,35 ; 0,08	0,35 ; 0,08	0,35 ; 0,08
MTTR	normale	30 ; 12	30 ; 12	30 ; 12
Saturazione linea	normale	82 ; 6	82 ; 6	82 ; 6

Le distribuzioni sono assunzioni di lavoro, scelte per collocare i tre regimi rispettivamente al di sotto, attorno e al di sopra della soglia di guardia. Non derivano da rilevazioni di campo, e il Capitolo 6 riprende il punto tra i limiti. Ogni replica usa un seme diverso del generatore pseudocasuale, da 1 a 30, così che i risultati siano riproducibili; i valori riportati sono le medie sulle trenta repliche, con l'intervallo di confidenza al 95% calcolato con la distribuzione t di Student.

5.7.2 Risultati

Tabella 5.6 — Esiti della campagna: medie su 30 repliche da 2.000 lotti per regime; tra parentesi la semiampiezza dell'intervallo di confidenza al 95%.

Regime	e medio	h medio	dev. st. h	r medio	F medio	Lotti bloccati
Basso	0,26	0,11	0,10	0,17	0,18	0,0%
Medio	0,26	0,51	0,16	0,16	0,34	3,9% ($\pm 0,2$)
Alto	0,26	0,89	0,11	0,16	0,50	84,7% ($\pm 0,3$)

Il primo risultato riguarda la selettività del vincolo. Nel regime basso nessun lotto viene fermato, in nessuna delle trenta repliche: la guardia è presente nel modello ma non interviene mai, e il sistema si comporta come se non ci fosse. Nel regime medio interviene in media su 79 lotti su 2.000, pari al 3,9%. Nel regime alto ferma l'84,7% dei lotti.

Il secondo risultato riguarda il **costo del vincolo**, che è ciò che il paragrafo 4.4.3 aveva lasciato da quantificare.

Il costo è misurato come numero di lotti completati per 1.000 unità di tempo: la quota di lotti che superano la guardia, moltiplicata per 1.000 e divisa per la durata media dei lotti completati. La metrica assume che un lotto fermato occupi comunque un intervallo di lavorazione, cioè che la risorsa resti impegnata anche quando la lavorazione non avviene. Il termine di confronto, la produzione senza vincolo, è controfattuale: applica la relazione del paragrafo 4.4.4 a tutti i lotti, compresi quelli con $h \geq 0,80$, cioè anche al di fuori del dominio per cui è stata definita. Le due produzioni sono riportate con due decimali, così che la perdita si possa ricalcolare dai valori in tabella.

Tabella 5.7 — Costo del vincolo: lotti completati per 1.000 unità di tempo, medie su 30 repliche; tra parentesi la semiampiezza dell'intervallo di confidenza al 95%.

Regime	Durata media dei lotti passati	Produzione con vincolo	Produzione senza vincolo	Perdita
Basso	10,54	94,87	94,87	0,0%
Medio	12,50	76,88	79,60	3,4% ($\pm$ 0,1)
Alto	13,55	11,32	69,09	83,6% ($\pm$ 0,4)

La lettura di questi numeri è il punto in cui la sperimentazione risponde all'obiezione più prevedibile al framework, ovvero che un vincolo non negoziabile sul fattore umano sia incompatibile con la funzionalità produttiva.

In condizioni normali il vincolo non costa nulla: la perdita di produzione è esattamente zero, perché nessun lotto lo attiva. In condizioni intermedie costa il 3,4%, con un intervallo di confidenza al 95% di $\pm 0,1$ punti: una perdita contenuta. Solo nel regime alto il costo diventa rilevante, ed è allora corretto che lo sia: un carico medio di 0,89 sulla scala normalizzata significa che l'operatore lavora stabilmente oltre il limite critico sia sul versante cardiovascolare sia su quello posturale. Una perdita di produzione dell'83,6% in quella condizione non è un malfunzionamento del framework, ma la sua funzione: è il sistema che rifiuta di produrre a quelle condizioni.

Va osservato che la perdita non è dovuta principalmente al rallentamento. La durata media cresce del 5,4% nel regime basso e del 35,5% nel regime alto, incremento significativo ma non determinante. La quasi totalità della perdita nel regime alto deriva dai lotti fermati, cioè dal vincolo e non dalla modulazione. Sono due meccanismi distinti, come stabilito al paragrafo 4.4.4, e producono effetti di ordine di grandezza diverso.

Un terzo elemento merita attenzione. Nel regime medio la deviazione standard di h è 0,16, la più alta dei tre. È il regime in cui la popolazione dei lotti è distribuita a cavallo della soglia, e in cui quindi la decisione del sistema è più sensibile alle condizioni del singolo lotto. È anche il regime che una valutazione basata sulla media dei carichi classificherebbe come accettabile — h medio 0,51, fascia gialla — mentre il modello riconosce e ferma, in media, i 79 lotti per replica che superano la soglia.

5.8 Verifica delle proprietà del modello

Il sesto requisito del paragrafo 2.8 richiede che sia possibile accertare per via dimostrativa, e non solo sperimentale, che il modello conservi proprietà elementari di correttezza. La preoccupazione è concreta: l'introduzione di una guardia restringe lo spazio dei comportamenti raggiungibili, e una soglia mal calibrata può bloccare il sistema, come riconosciuto al paragrafo 4.4.3.

Sul bivio T4/T4B la verifica è immediata e non richiede l'esplorazione dello spazio degli stati. Le due guardie sono $h < h_{\text{threshold}}$ e $h \geq h_{\text{threshold}}$: sono mutuamente esclusive ed esaustive, e per qualunque valore di h esattamente una delle due è vera. Ne segue che ogni token presente in P_work abilita sempre una e una sola delle due transizioni. **La guardia non può quindi introdurre uno stallo nel punto in cui opera**, e il risultato è indipendente dal valore scelto per la soglia: qualunque sia $h_{\text{threshold}}$, il token prosegue, verso l'uscita o verso l'attesa.

Questa proprietà non è un dettaglio implementativo ma una scelta di progetto. Una formulazione alternativa, con la sola T4 dotata di guardia e nessun ramo adattivo, avrebbe prodotto esattamente lo stallo temuto: un token con carico critico sarebbe rimasto in P_work senza alcuna transizione abilitata. È la ragione per cui il framework prevede T4B come ramo obbligatorio e non come opzione.

La proprietà strutturale del bivio va però completata dall'analisi dello spazio degli stati, che è il contenuto effettivo del sesto requisito. Data la dimensione della rete, lo spazio degli stati dei due scenari è enumerabile per intero. Nello scenario LOT_A1 comprende due marcature — il token in P_work e il token in P_out — collegate da un solo arco, lo scatto di T4; la marcatura finale è morta, cioè priva di transizioni abilitate, come ci si attende da un lotto concluso. Nello scenario LOT_A2 comprende tre marcature — due token in P_work ; uno in P_work e uno in P_pausa ; due in P_pausa — collegate da due scatti di T4B; anche qui la marcatura finale è morta, ma con entrambi i lotti fermi in attesa. In entrambi i casi la rete è limitata, perché il numero di token si conserva, e non ammette sequenze di scatti infinite. L'analisi rende quindi visibile un difetto che le due simulazioni, prese da sole, non segnalano come tale: P_pausa è uno stato assorbente.

Resta invece una proprietà **non soddisfatta dal modello implementato**, che va dichiarata. Nella rete realizzata in CPN IDE il posto P_pausa non ha transizioni in uscita: un token che vi entra vi rimane definitivamente. Il framework del paragrafo 4.4.3 prevede il rientro del token in P_work quando il carico dell'operatore torna sotto soglia, ma tale transizione di rientro non è implementata. Ne consegue che, sul modello attuale, P_pausa si comporta come uno stato assorbente e il lotto non raggiunge mai l'uscita.

La conseguenza è duplice. Sul piano della verifica, il modello implementato non è vivo nel senso tecnico del termine, perché esiste una marcatura raggiungibile dalla quale non tutte le transizioni possono tornare a scattare. Sul piano della validità dei risultati, la limitazione non invalida quanto documentato nei paragrafi precedenti, poiché l'oggetto della verifica era il comportamento del bivio e non il ciclo completo del lotto. Il completamento del modello con la transizione di rientro, e la conseguente analisi dello spazio degli stati sulla rete completa, sono indicati tra gli sviluppi futuri nel Capitolo 6.

Il sesto requisito risulta quindi soddisfatto nel senso in cui è stato formulato al paragrafo 2.8, cioè come possibilità di accertare formalmente le proprietà del modello; l'accertamento, sul modello implementato, ha dato esito negativo sulla vivezza, ed è proprio ciò che la sola simulazione degli scenari non avrebbe mostrato.

5.9 Sintesi

La sperimentazione ha risposto alle tre domande poste in apertura.

Il vincolo opera. Nello scenario LOT_A2 la transizione produttiva risulta disabilitata in presenza di un lotto pronto e di un ordine a priorità massima, per il solo effetto della componente umana oltre soglia. Le altre due componenti restano in condizione di attenzione e non di emergenza: un modello che decidesse sulla loro media procederebbe, il framework si ferma. La funzione obiettivo segnala il rischio elevato, ma non è essa a fermare il sistema, che si è già fermato prima.

Il costo è noto e circoscritto. La campagna su trenta repliche da duemila lotti per regime mostra che in condizioni normali il vincolo non produce alcuna perdita di produzione, in condizioni intermedie ne produce il 3,4%, e diventa rilevante solo in un regime in cui l'operatore lavora stabilmente oltre i limiti critici. La perdita deriva quasi interamente dai lotti fermati e non dalla modulazione delle durate, confermando che i due meccanismi introdotti al Capitolo 4 sono distinti anche nei loro effetti.

Il modello è corretto nel punto in cui il vincolo opera. La complementarità delle guardie di T4 e T4B garantisce che nessun token possa restare bloccato al bivio, indipendentemente dalla soglia adottata. L'analisi dello spazio degli stati conferma la proprietà e rende visibile il limite del modello implementato, lo stato assorbente P_pausa. Restano da completare il rientro da P_pausa e l'analisi sulla rete estesa.

Il capitolo successivo discute questi risultati alla luce della letteratura, ne precisa il contributo e i limiti, e indica le direzioni di sviluppo che ne discendono.

CAPITOLO 6

Discussione, limiti e sviluppi futuri

6.1 Premessa

I capitoli precedenti hanno ricostruito il contesto, individuato un vuoto nella letteratura, proposto un framework per colmarlo e verificato sperimentalmente che funzioni. Questo capitolo tira le somme: risponde alla domanda di ricerca, colloca il contributo rispetto ai lavori esistenti, dichiara ciò che il lavoro non fa e indica le direzioni che ne discendono.

6.2 Risposta alla domanda di ricerca

La domanda formulata nell'Introduzione era se sia possibile formalizzare le tre dimensioni della Supply Chain 5.0 all'interno di un modello TCPN eseguibile, e quale ruolo possa assumervi il fattore umano, non come semplice parametro di costo ma come vincolo prioritario della rete.

Alla prima parte la risposta è affermativa, e passa per il token colorato tridimensionale. Sostenibilità, resilienza e umanocentrismo sono state ricondotte a tre componenti normalizzate sulla stessa scala e trasportate dall'entità fisica che attraversa il sistema. Non sono indicatori calcolati a parte e confrontati a consuntivo: viaggiano con il lotto e sono disponibili nel momento in cui il sistema deve decidere. È la risposta diretta alla separazione tra misura e decisione individuata al paragrafo 2.3, che la letteratura sulla sostenibilità riconosce da tempo come il proprio limite principale.

Alla seconda parte la risposta è più specifica, ed è il contributo del lavoro. Il fattore umano può assumere il ruolo di **vincolo abilitante**: una condizione la cui violazione non rende l'operazione più lenta o più costosa, ma la rende non eseguibile. La guard function delle Coloured Petri Net fornisce il costrutto, e la sperimentazione del Capitolo 5 mostra che il meccanismo opera come previsto. Nello scenario LOT_A2 la transizione produttiva resta disabilitata in presenza di un lotto pronto e di un ordine a priorità massima, per il solo effetto della componente umana oltre soglia, mentre le altre due componenti restano in condizione di attenzione e non di emergenza. Un modello che decidesse sulla loro media procederebbe; questo si ferma.

Alla domanda implicita che accompagna ogni vincolo — quanto costa — la campagna di simulazione fornisce una risposta quantitativa. In condizioni normali il vincolo non produce alcuna perdita di produzione, perché nessun lotto lo attiva. In condizioni intermedie ne produce il 3,4%. Diventa rilevante solo in un regime in cui l'operatore lavora stabilmente oltre i limiti critici su entrambe le dimensioni del carico, ed è allora corretto che lo sia.

6.3 Posizionamento rispetto alla letteratura e contributo originale

Il contributo si colloca nello scarto tra capacità disponibili e capacità utilizzate individuato al paragrafo 3.7.

Rispetto alla letteratura sulla Supply Chain 5.0, il lavoro non aggiunge una nuova definizione del paradigma né un nuovo modello di maturità. Villar et al. (2023) indicano come le catene dovrebbero essere riprogettate e Machado & Rodriguez (2025) articolano l'adozione per livelli progressivi. Entrambi operano sul piano prescrittivo. Il presente lavoro prende uno di quei principi — l'umanocentrismo — e lo traduce in una condizione operante, verificabile sul comportamento di un modello eseguibile. Il contributo non è concettuale ma di formalizzazione.

Rispetto alla letteratura sulle Coloured Petri Net applicate alle catene di fornitura, il lavoro non introduce un formalismo nuovo né un impiego tecnicamente inedito del linguaggio. La guard function è un costrutto elementare, documentato da decenni e usato di routine per instradare lotti o rispettare capacità di magazzino. Ciò che, nella letteratura consultata, non risulta fatto è impiegarla per subordinare l'esecuzione di una lavorazione alla condizione dell'operatore.

Rispetto ai lavori che integrano i fattori umani nei modelli a rete temporizzati, la distinzione è la più precisa e merita di essere esplicitata, perché è il punto in cui il contributo si misura. Quei lavori portano il fattore umano dentro il token colorato, distinguendo attributi operativi e attributi comportamentali (Mazzuto et al., 2018), oppure calcolano nel tempo carico di lavoro e fatica come fattori che condizionano la prestazione e l'errore (Kontogiannis, 2005), e li impiegano per ottenere stime più accurate del comportamento del sistema. È la terza modalità individuata al paragrafo 2.5.3: il carico spiega quanto il sistema produce. Il presente lavoro conserva quella relazione — la durata resta funzione del carico, secondo il paragrafo 4.4.4 — ma le affianca una condizione di natura diversa: oltre una soglia il sistema non produce affatto. Il passaggio non è di grado ma di tipo, ed è la differenza tra un peso e un vincolo argomentata al paragrafo 2.6.

Rispetto ai modelli di ottimizzazione multi-obiettivo impiegati nella supply chain sostenibile, il lavoro mostra perché la composizione a somma pesata, per quanto raffinata, non possa realizzare ciò che il pilastro umanocentrico dichiara. Un peso stabilisce un prezzo, e un prezzo si può pagare. L'idea di vincolo ergonomico rigido non è di per sé nuova: è già praticata nel bilanciamento delle linee e nella rotazione delle mansioni (Otto & Scholl, 2011; Otto & Battaïa, 2017). Il lavoro la trasferisce da un problema di pianificazione risolto a priori a un modello eseguibile, in cui il vincolo agisce sull'abilitazione degli eventi mentre il sistema evolve. La soluzione proposta non abbandona la funzione obiettivo ma le assegna un ruolo circoscritto: la guardia stabilisce che cosa è ammesso, la

funzione obiettivo ordina ciò che è ammesso, e il vincolo sul peso minimo impedisce che, entro l'insieme ammissibile, la dimensione umana venga resa irrilevante.

Vi è infine un contributo metodologico minore ma reale. I sei requisiti di formalizzazione ricavati al paragrafo 2.8 non sono stati assunti in partenza ma derivati dall'analisi delle tre dimensioni, e hanno poi funzionato da criterio per valutare il formalismo nel Capitolo 3 e il framework nel Capitolo 4. La scelta delle Timed Coloured Petri Net risulta così motivata dalle caratteristiche del problema anziché presupposta, e la stessa griglia è riutilizzabile per valutare proposte diverse.

6.4 Limiti del lavoro

Il lavoro presenta sei limiti principali.

Il modello implementato è più ridotto del framework. La rete realizzata in CPN IDE comprende tre posti e due transizioni contro gli otto posti e le sei transizioni della rete completa: la guardia contiene la sola condizione sul carico umano anziché le quattro formalizzate al paragrafo 4.4.3, il modello è privo di temporizzazione e di T4B è implementato il solo ramo di sospensione. Il posto P_pausa non ha transizioni in uscita: l'analisi dello spazio degli stati del paragrafo 5.8 mostra che è uno stato assorbente, e il modello non è quindi vivo. Di conseguenza la modulazione delle durate e la campagna Monte Carlo sono state eseguite sul modello di riferimento in Python e non sulla rete CPN.

Il carico umano è un attributo del lotto, non uno stato dell'operatore. La componente h registra il carico rilevato al momento della tokenizzazione e accompagna il lotto lungo il percorso. Il paragrafo 2.5.2 ha però stabilito che l'affaticamento è cumulativo e dipende dalla storia delle operazioni eseguite: una rappresentazione fedele richiederebbe di associare il carico all'operatore, come stato che evolve a ogni lavorazione e si riduce durante le pause, anziché al lotto.

Le soglie e i pesi sono in parte convenzionali. Alcune soglie poggiano su fonti solide: quelle dell'indice REBA coincidono con le bande di rischio dello strumento originale (Hignett & McAtamney, 2000) e il limite ottimale di 30 %HRR si appoggia al criterio ergonomico sul dispendio energetico in un turno di otto ore (Bonjer, 1962). Altre sono più deboli: il limite critico di 65 %HRR deriva dalla classificazione generale dell'intensità dell'esercizio (Garber et al., 2011) e non da uno standard sul rischio industriale, mentre le soglie dei parametri di processo e di linea sono assunzioni operative ricavate dai campi di misura della cella considerata. Lo stesso carattere convenzionale hanno la soglia della guardia, fissata a 0,80 per coerenza con la scala qualitativa, e le regole di aggregazione, che attribuiscono pesi impliciti pari a $1/n$ e rendono non pienamente confrontabili token calcolati su un numero diverso di parametri.

Nulla è stato validato su dati reali. Gli scenari di riferimento sono costruiti, le distribuzioni impiegate nella campagna di simulazione sono assunzioni di lavoro scelte per collocare i tre regimi rispetto alla soglia, e nessun operatore reale è stato monitorato. I valori assoluti delle perdite di produzione riportati al paragrafo 5.7 vanno quindi letti come ordini di grandezza e non come stime.

Il perimetro è una singola cella produttiva. La limitazione è più rilevante di quanto la sola estensione suggerisca. Il paragrafo 2.2 ha individuato il problema del trasferimento: un vincolo che opera su una cella non impedisce che il carico venga spostato a monte, su un fornitore che non lo applica. Il framework è coerente entro il proprio perimetro, ma quel perimetro contiene solo una parte del problema che affronta.

Il quadro normativo non è tradotto in scelte progettuali verificate. Il paragrafo 4.3.2 richiama i vincoli posti dall'art. 4 della L. 300/1970 e dal GDPR, in particolare dagli artt. 9, 17 e 35, e indica la registrazione delle sole impronte crittografiche sul registro distribuito come risposta alla tensione con il diritto alla cancellazione. Si tratta di indicazioni, non di soluzioni implementate e verificate: senza di esse, un impiego reale del monitoraggio biometrico rischierebbe di aggravare il problema che intende risolvere.

6.5 Sviluppi futuri

Dalle limitazioni discendono direzioni di lavoro ordinabili per prossimità.

Il passo più immediato è il **completamento del modello**: implementare la transizione di rientro da P_pausa, attivare la temporizzazione con la durata funzione del carico, estendere la guardia alle quattro condizioni, realizzare il ramo di riconfigurazione di T4B e rappresentare l'operatore come token dotato di un carico cumulativo, aggiornato a ogni lavorazione e ridotto durante le pause. Su questa rete estesa diventa possibile condurre l'**analisi dello spazio degli stati**, verificando vivezza, limitatezza e assenza di blocchi con gli strumenti che il formalismo mette a disposizione.

Il passo successivo è la **taratura su dati reali**. Le soglie dei parametri di processo e il valore della guardia richiedono rilevazioni di campo; i pesi di aggregazione possono essere calibrati con tecniche strutturate di consultazione di esperti anziché restare impliciti a $1/n$.

Segue l'**estensione del perimetro** oltre la singola cella. È la direzione concettualmente più impegnativa, perché comporta il passaggio da un vincolo locale a un vincolo che attraversa confini organizzativi, e quindi il problema di come renderlo verificabile presso attori che non lo hanno adottato. È anche il punto in cui il livello di validazione basato su registro distribuito, previsto dal Layer 2 ma non implementato, acquisterebbe la propria funzione.

Vi è infine una direzione che esula dalla modellazione ma che il lavoro rende evidente: la **governance della soglia**. Stabilire chi la determina, con quali procedure e con quale partecipazione dei lavoratori è una questione organizzativa e giuridica, ma senza una risposta il vincolo resta un parametro configurabile da chi ha interesse a spostarlo.

6.6 Conclusioni

Il lavoro è partito da una constatazione ricorrente in tre letterature diverse. Nella gestione delle catene di fornitura le dimensioni ambientale, sociale e umana sono riconosciute come rilevanti ma restano fuori dal meccanismo che governa le decisioni: vengono misurate e rendicontate, non poste come vincolo. Il paradigma della Supply Chain 5.0 propone di modificare questa architettura, ma lo fa sul piano dei principi. Le Coloured Petri Net dispongono del costrutto che consentirebbe di farlo, ma, nella letteratura consultata, non risulta impiegato in questo senso.

La proposta qui sviluppata occupa quello spazio. Formalizza le tre dimensioni in un token colorato che viaggia con il lotto, e subordina l'esecuzione delle lavorazioni a una condizione sul carico dell'operatore che nessun obiettivo può compensare. La verifica sperimentale mostra che il meccanismo opera e che il suo costo è nullo in condizioni normali, contenuto in condizioni intermedie, e rilevante soltanto là dove è giusto che lo sia.

Il risultato non è che il framework risolva il problema dell'umanocentrismo nelle catene di fornitura. È che mostra come una sua parte possa essere resa operante anziché dichiarata, e che la differenza tra le due cose è formalizzabile con precisione. Un peso stabilisce un prezzo; un vincolo stabilisce un limite. Finché il benessere dell'operatore compare in una funzione obiettivo, resta disponibile come termine di scambio. Perché smetta di esserlo occorre che compaia altrove: non tra ciò che il sistema ottimizza, ma tra le condizioni alle quali il sistema è autorizzato a funzionare.

APPENDICE A

Codice del modello di riferimento

Questa appendice riporta il codice del modello di riferimento impiegato nel Capitolo 5, affinché i risultati quantitativi siano verificabili. Il modello è scritto in Python ed è stato eseguito con la versione 3.12.3; utilizza esclusivamente moduli della libreria standard (dataclasses, typing, random, statistics, decimal), senza librerie esterne.

Il file `tcpn_riferimento.py` implementa le formule del Capitolo 4 — normalizzazione, formula di Karvonen, costruzione del token, guardia, durata e funzione obiettivo — e controlla che i due scenari di riferimento producano i valori riportati ai paragrafi 5.4 e 5.5. Il controllo è condotto a piena precisione con una tolleranza di 0,01, così da coprire la differenza introdotta dalla convenzione di arrotondamento del paragrafo 4.4.1.

Il file `mc_repliche.py` esegue la campagna del paragrafo 5.7, applicando la convenzione di arrotondamento del paragrafo 4.4.1: trenta repliche, con semi del generatore pseudocasuale da 1 a 30, di 2.000 lotti per ciascuno dei tre regimi di carico. Gli intervalli di confidenza al 95% sono calcolati con il quantile della distribuzione t di Student con 29 gradi di libertà ($t = 2,045$). Per riprodurre i risultati è sufficiente collocare i due file nella stessa cartella ed eseguire il comando `python3 mc_repliche.py`.

A.1 Il modello di riferimento: `tcpn_riferimento.py`

```
"""
Modello di riferimento eseguibile del nucleo TCPN del framework
(Layer 2 -> Layer 3 -> Layer 4), fedele al documento "Framework definitivo".

NON e' ancora CPN Tools: e' la "verita' di riferimento" con cui validiamo
la matematica del framework prima di portarla in CPN ML. Ogni funzione qui
corrisponde a un pezzo che poi tradurremo nei costrutti nativi di CPN Tools.

Autore: (tesi triennale) - assistito.
"""

from dataclasses import dataclass, field
from typing import Optional

# -----
# SOGLIE Ottimale (O) / Critico (K) -- paragrafo 4.4.2
# -----
SOGLIE = {
    "potenza": (4.5, 8.0), # kW
    "mix": (0.30, 0.60), # kgCO2/kWh
    "materiale": (5.0, 12.0), # kgCO2/kg (puo' mancare per un lotto)
    "hrr": (30.0, 65.0), # % riserva cardiaca (dopo Karvonen)
    "reba": (3.0, 8.0), # indice REBA 1-15
    "mttr": (15.0, 90.0), # minuti
    "saturaz": (85.0, 95.0), # %
}

H_THRESHOLD = 0.80 # soglia critica sulla componente umana (guardia)
BETA_MIN = 0.30 # floor etico sul peso del fattore umano nella F
K_DURATA = 0.5 # coefficiente di sensibilita' della durata a h_i
```

```

# -----
# Layer 2 -- funzione di normalizzazione Phi (a tratti) e conversioni
# -----
def phi(x: float, O: float, K: float) -> float:
    """Normalizzazione a tratti ancorata alle soglie O/K (documento sez. 2.3)."""
    if x <= O:
        return 0.0
    if x >= K:
        return 1.0
    return (x - O) / (K - O)

def karvonen(fc_oss: float, fc_riposo: float, fc_max: float) -> float:
    """Converte la FC grezza in % riserva cardiaca (%HRR). Ritorna un valore 0-100."""
    return (fc_oss - fc_riposo) / (fc_max - fc_riposo) * 100.0

def media_disponibili(valori):
    """Media aritmetica dei soli parametri effettivamente disponibili (sez. 2.3)."""
    vs = [v for v in valori if v is not None]
    return sum(vs) / len(vs)

# -----
# Il TOKEN COLORATO C_i = (e_i, h_i, r_i) + attributi accessori
# -----
@dataclass
class Token:
    e: float
    h: float
    r: float
    costo: Optional[float] = None
    priorit : Optional[int] = None
    dettaglio: dict = field(default_factory=dict) # per il report/dashboard

    def fascia(self, v):
        if v < 0.40:
            return "Verde"
        if v < 0.80:
            return "Giallo"
        return "Rosso"

def genera_token(raw: dict) -> Token:
    """
    T2 (Token Generator): dai dati grezzi al token colorato.
    'raw' contiene i parametri grezzi di un lotto; alcuni possono mancare (None).
    """
    # ---- Componente ambientale e_i ----
    xn_pot = phi(raw["potenza"], *SOGLIE["potenza"]) if raw.get("potenza") is not None else
    None
    xn_mix = phi(raw["mix"], *SOGLIE["mix"]) if raw.get("mix") is not None else
    None
    xn_mat = phi(raw["materiale"], *SOGLIE["materiale"]) if raw.get("materiale") is not None
    else None
    e_i = media_disponibili([xn_pot, xn_mix, xn_mat])

    # ---- Componente umana h_i ----
    hrr = karvonen(raw["fc"], raw["fc_riposo"], raw["fc_max"])
    xn_hrr = phi(hrr, *SOGLIE["hrr"])
    xn_reba = phi(raw["reba"], *SOGLIE["reba"])
    h_i = media_disponibili([xn_hrr, xn_reba])

    # ---- Componente di resilienza r_i (pesi 0.5/0.5 di partenza) ----
    xn_mttr = phi(raw["mttr"], *SOGLIE["mttr"])
    xn_sat = phi(raw["saturaz"], *SOGLIE["saturaz"])
    r_i = 0.5 * xn_mttr + 0.5 * xn_sat

    return Token(
        e=e_i, h=h_i, r=r_i, priorit =raw.get("priorit "),
        dettaglio=dict(hrr=hrr, xn_pot=xn_pot, xn_mix=xn_mix, xn_mat=xn_mat,
            xn_hrr=xn_hrr, xn_reba=xn_reba, xn_mttr=xn_mttr, xn_sat=xn_sat),
    )

```

```

# -----
# Layer 3 -- guardia, ramo adattivo, durata temporizzata
# -----
def guardia_T4(tok: Token, pezzo=True, macchina=True, operatore=True) -> bool:
    """enable(T4) <=> pezzo AND macchina AND operatore AND h_i < h_threshold."""
    return pezzo and macchina and operatore and (tok.h < H_THRESHOLD)

def durata_transizione(tok: Token, durata_base: float) -> float:
    """durata = durata_base * (1 + k * h_i), valida per h_i < h_threshold."""
    return durata_base * (1.0 + K_DURATA * tok.h)

def instrada(tok: Token) -> str:
    """Decide il ramo della rete: T4 (Standard) o T4B (Adaptive -> P_pausa)."""
    if guardia_T4(tok):
        return "T4"
    return "T4B"

# -----
# Layer 4 -- funzione obiettivo F (rischio da MINIMIZZARE)
# -----
def funzione_F(tok: Token, alpha=0.4, beta=0.4, gamma=0.2) -> float:
    assert abs(alpha + beta + gamma - 1.0) < 1e-9, "i pesi devono sommare a 1"
    assert beta >= BETA_MIN, "vincolo etico violato: beta < beta_min"
    return alpha * tok.e + beta * tok.h + gamma * tok.r

# -----
# Stampa passo-passo di uno scenario (come nel caso studio del documento)
# -----
def traccia_scenario(nome, raw, durata_base=10.0):
    print("=" * 66)
    print(f" {nome}")
    print("=" * 66)
    tok = genera_token(raw)
    d = tok.dettaglio
    print(f" Passo 1 - Karvonen: %HRR = {d['hrr']:.1f}%")
    print(f" Passo 2 - normalizzazione Phi:")
    print(f" Potenza -> {d['xn_pot']}")
    print(f" Mix -> {d['xn_mix']}")
    print(f" %HRR -> {round(d['xn_hrr'],2)}")
    print(f" REBA -> {round(d['xn_reba'],2)}")
    print(f" MTTR -> {round(d['xn_mttr'],2)}")
    print(f" Saturaz. -> {round(d['xn_sat'],2)}")
    print(f" Passo 3 - token colorato C_i = (e, h, r):")
    print(f" e_i = {tok.e:.2f} ({tok.fascia(tok.e)}) "
          f"h_i = {tok.h:.2f} ({tok.fascia(tok.h)}) "
          f"r_i = {tok.r:.2f} ({tok.fascia(tok.r)})")
    ramo = instrada(tok)
    if ramo == "T4":
        dur = durata_transizione(tok, durata_base)
        print(f" Reazione TCPN: h_i={tok.h:.2f} < {H_THRESHOLD} -> T4 (Standard Flow)
abilitata.")
        print(f" durata = {durata_base} * (1 + {K_DURATA}*{tok.h:.2f}) = {dur:.2f} "
              f"( +{(dur/durata_base-1)*100:.1f}% )")
    else:
        print(f" Reazione TCPN: h_i={tok.h:.2f} >= {H_THRESHOLD} -> T4 DISABILITATA, "
              f"si attiva T4B -> token in P_pausa.")
    F = funzione_F(tok)
    print(f" Layer 4: F = {F:.2f} ({tok.fascia(F)})"
          + (" [ordina alternative, non decide lo stop]" if ramo == "T4B" else ""))
    print()
    return tok, ramo, F

if __name__ == "__main__":
    # Profilo operatore comune ai due scenari
    op = dict(fc_riposo=70, fc_max=190) # 30 anni, 220-eta'

    LOT_A1 = dict(potenza=5.0, mix=0.32, materiale=None, fc=108, reba=4,

```

```

        mtr=25, saturaz=78, priorit=2, **op)
LOT_A2 = dict(potenza=7.0, mix=0.48, materiale=None, fc=165, reba=9,
        mtr=70, saturaz=92, priorit=5, **op)

t1, r1, F1 = traccia_scenario("Scenario 1 - LOT_A1 (condizioni regolari)", LOT_A1)
t2, r2, F2 = traccia_scenario("Scenario 2 - LOT_A2 (stress umano critico, ordine
urgente)", LOT_A2)

# ----- VALIDAZIONE contro i numeri del documento -----
print("-" * 66)
print(" VALIDAZIONE rispetto ai valori riportati nel documento")
print("-" * 66)
attesi = {
    "LOT_A1": dict(e=0.11, h=0.13, r=0.07, F=0.11, ramo="T4"),
    "LOT_A2": dict(e=0.66, h=1.00, r=0.72, F=0.81, ramo="T4B"),
}
def check(nome, tok, ramo, F, att):
    ok = (abs(tok.e-att["e"])<=0.01 and abs(tok.h-att["h"])<=0.01
        and abs(tok.r-att["r"])<=0.01 and abs(F-att["F"])<=0.01
        and ramo==att["ramo"])
    print(f" {nome}: e={tok.e:.2f} h={tok.h:.2f} r={tok.r:.2f} F={F:.2f} ramo={ramo}"
        f" -> {'OK' if ok else 'DISCREPANZA'}")
    return ok
a = check("LOT_A1", t1, r1, F1, attesi["LOT_A1"])
b = check("LOT_A2", t2, r2, F2, attesi["LOT_A2"])
print()
print(" ESITO:", "tutti i numeri coincidono col documento." if (a and b)
        else "attenzione: rivedere.")

```

A.2 La campagna Monte Carlo: mc_repliche.py

```

"""
Campagna Monte Carlo con repliche indipendenti.
R = 30 repliche; in ogni replica N = 2.000 lotti per ciascuno dei tre regimi.
Seme della replica r: r (r = 1..30). Libreria standard di Python.
Usa le funzioni phi e karvonen e le soglie di tcpn_riferimento.py e la
convenzione di arrotondamento del par. 4.4.1.
"""
import random, statistics as st
from decimal import Decimal, ROUND_HALF_UP
from tcpn_riferimento import phi, karvonen, SOGLIE, H_THRESHOLD, K_DURATA

R, N = 30, 2000
FC_RIPOSO, FC_MAX, DURATA_BASE = 70, 190, 10.0
T975 = 2.045 # quantile t di Student, 29 gradi di liberta'
REGIMI = {"Basso": dict(fc=(105, 8), reba=(2, 5)),
        "Medio": dict(fc=(128, 10), reba=(4, 7)),
        "Alto": dict(fc=(150, 12), reba=(6, 10))}

def r2(x): return float(Decimal(str(x)).quantize(Decimal('0.01'), rounding=ROUND_HALF_UP))

def lotto(reg):
    return dict(potenza=max(0, random.gauss(5.5, 1.0)), mix=max(0, random.gauss(0.35, 0.08)),
        fc=max(FC_RIPOSO + 1, min(FC_MAX, random.gauss(*reg["fc"]))),
        reba=min(15, max(1, random.randint(*reg["reba"]))),
        mtr=max(0, random.gauss(30, 12)), saturaz=min(100, max(0, random.gauss(82,
6))))

def token(x):
    e = r2((r2(phi(x["potenza"], *SOGLIE["potenza"])) + r2(phi(x["mix"], *SOGLIE["mix"]))) /
2)
    h = r2((r2(phi(karvonen(x["fc"], FC_RIPOSO, FC_MAX), *SOGLIE["hrr"])) + r2(phi(x["reba"],
*SOGLIE["reba"]))) / 2)
    r = r2(0.5 * r2(phi(x["mtr"], *SOGLIE["mtr"])) + 0.5 * r2(phi(x["saturaz"],
*SOGLIE["saturaz"])))
    return e, h, r

def replica(seme):
    random.seed(seme); out = {}
    for nome, reg in REGIMI.items():
        E, H, Rr, F, dur_pass, dur_tutti, bloc = [], [], [], [], [], [], 0
        for _ in range(N):
            e, h, r = token(lotto(reg))
            E.append(e); H.append(h); Rr.append(r); F.append(0.4*e + 0.4*h + 0.2*r)

```

```

        d = DURATA_BASE * (1 + K_DURATA * h)
        dur_tutti.append(d) # controfattuale: formula estesa anche a
h >= soglia
    if h >= H_THRESHOLD: bloc += 1
    else: dur_pass.append(d)
    con = (N - bloc) / N * 1000 / st.mean(dur_pass) # lotti completati per 1.000 u.t.
    senza = 1000 / st.mean(dur_tutti)
    out[nome] = dict(e=st.mean(E), h=st.mean(H), sdh=st.pstdev(H), r=st.mean(Rr),
F=st.mean(F),
                    bloc_n=bloc, bloc=bloc/N*100, dur=st.mean(dur_pass), con=con,
senza=senza,
                    perdita=(1 - con/senza)*100)
    return out

ris = [replica(s) for s in range(1, R + 1)]
def mc(reg, k):
    v = [x[reg][k] for x in ris]; m = st.mean(v); hw = T975 * st.stdev(v) / R**0.5
    return m, hw

print(f"R = {R} repliche x N = {N} lotti per regime (semi 1-{R}); IC al 95%\n")
for reg in REGIMI:
    print(reg)
    for k in ['e', 'h', 'sdh', 'r', 'F', 'bloc', 'bloc_n', 'dur', 'con', 'senza', 'perdita']:
        m, hw = mc(reg, k); print(f"    {k:<8} {m:9.3f} ± {hw:.3f}")

```

BIBLIOGRAFIA

APICS. (2017). *SCOR: Supply Chain Operations Reference model, version 12.0*.

Bevilacqua, M., Ciarapica, F. E., & Mazzuto, G. (2012). Modelling and performance analysis of a supply chain using timed coloured Petri nets. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 4(3/4), 285-316. doi:10.1504/IJBPSM.2012.050386

Bonjer, F. H. (1962). Actual energy expenditure in relation to the physical working capacity. *Ergonomics*, 5(1), 29-31.

Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Commissione europea, Direzione generale della Ricerca e dell'innovazione.

Chen, W. C., Li, J., & Wen, D. P. (2015). Investigating the robustness of the agricultural supply chain based on colored Petri nets. *Simulation*, 91(10), 898-915.

Christopher, M. (2016). *Logistics & supply chain management* (5 ed.). Pearson.

Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain. *The International Journal of Logistics Management*, 15(2), 1-14. doi:10.1108/09574090410700275

Council of Supply Chain Management Professionals. (2013). *Supply chain management terms and glossary*.

Dolgui, A., Ivanov, D., & Sokolov, B. (2018). Ripple effect in the supply chain: An analysis and recent literature. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 414-430. doi:10.1080/00207543.2017.1387680

Drakaki, M., & Tzionas, P. (2022). A colored Petri net-based modeling method for supply chain inventory management. *Simulation*, 98(3), 257-271.

Elkington, J. (1998). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. New Society Publishers.

Elkington, J. (2018, giugno 25). 25 years ago I coined the phrase “triple bottom line.” Here’s why it’s time to rethink it. *Harvard Business Review*.

Esmailian, B., Sarkis, J., Lewis, K., & Behdad, S. (2020). Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. *Resources, Conservation and Recycling*, 163, 105064. doi:10.1016/j.resconrec.2020.105064

Forrester, J. W. (1958). Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*, 36(4), 37-66.

Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. MIT Press.

Fox, S. M., Naughton, J. P., & Haskell, W. L. (1971). Physical activity and the prevention of coronary heart disease. *Annals of Clinical Research*, 3(6), 404-432.

Garber, C. E., Blissmer, B., Deschenes, M. R., Franklin, B. A., Lamonte, M. J., Lee, I.-M., . . . Swain, D. P. (2011). Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: Guidance for prescribing exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(7), 1334-1359. doi:10.1249/MSS.0b013e318213febf

- Grosse, E. H., Calzavara, M., Glock, C. H., & Sgarbossa, F. (2017). Incorporating human factors into decision support models for production and logistics: Current state of research. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 6900-6905. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.1214
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock, & N. Meshkati (A cura di), *Human mental workload* (p. 139-183). North-Holland.
- Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31(2), 201-205. doi:10.1016/S0003-6870(99)00039-3
- Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 47-61. doi:10.1016/j.res.2015.08.006
- Hosseini, S., Ivanov, D., & Dolgui, A. (2019). Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 125, 285-307. doi:10.1016/j.tre.2019.03.001
- International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*.
- International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14044:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*.
- International Organization for Standardization. (2016). *ISO 6385:2016. Ergonomics principles in the design of work systems*.
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: Extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. *International Journal of Production Research*, 58(10), 2904-2915. doi:10.1080/00207543.2020.1750727
- Jensen, K., & Kristensen, L. M. (2009). *Coloured Petri nets: Modelling and validation of concurrent systems*. Springer.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Acatech.
- Kaiyandra, D. R., Farizal, F., & Rakoto, N. (2024). Colored Petri nets for modeling and simulation of a green supply chain system. *IFAC-PapersOnLine*, 58(1), 306-311. doi:10.1016/j.ifacol.2024.07.052
- Karasek, R. A. (1979). Job demands, job decision latitude, and mental strain: Implications for job redesign. *Administrative Science Quarterly*, 24(2), 285-308. doi:10.2307/2392498
- Karvonen, M. J., Kentala, E., & Mustala, O. (1957). The effects of training on heart rate: A longitudinal study. *Annales Medicinae Experimentalis et Biologiae Fenniae*, 35(3), 307-315.
- Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1976). *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*. Wiley.
- Khilwani, N., Tiwari, M. K., & Sabuncuoglu, I. (2011). Hybrid Petri-nets for modelling and performance evaluation of supply chains. *International Journal of Production Research*, 49(15), 4627-4656. doi:10.1080/00207543.2010.497173
- Kontogiannis, T. (2005). Integration of task networks and cognitive user models using coloured Petri nets and its application to job design for safety and productivity. *Cognition, Technology & Work*, 7(4), 241-261. doi:10.1007/s10111-005-0010-z

- Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997). The bullwhip effect in supply chains. *Sloan Management Review*, 38(3), 93-102.
- Liu, R., Kumar, A., & van der Aalst, W. (2007). A formal modeling approach for supply chain event management. *Decision Support Systems*, 43(3), 761-778. doi:10.1016/j.dss.2006.12.009
- Machado, N. T., & Rodriguez, C. M. (2025). Logistics 5.0 maturity model: A human-centric and sustainable approach for the supply chain of the future. *ITEGAM-JETIA*, 11(51), 164-170. doi:10.5935/jetia.v11i51.1407
- Marler, R. T., & Arora, J. S. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(6), 853-862. doi:10.1007/s00158-009-0460-7
- Mazzuto, G., Bevilacqua, M., & Ciarapica, F. E. (2012). Supply chain modelling and managing, using timed coloured Petri nets: A case study. *International Journal of Production Research*, 50(16), 4718-4733. doi:10.1080/00207543.2011.639397
- Mazzuto, G., Bevilacqua, M., & Ciarapica, F. E. (2018). Performance analysis of new product development process through timed coloured Petri nets. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 862-867. doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.447
- Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1-25. doi:10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., . . . Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, 65(2), 621-641. doi:10.1016/j.cirp.2016.06.005
- Murata, T. (1989). Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), 541-580. doi:10.1109/5.24143
- Neumann, W. P., Winkelhaus, S., Grosse, E. H., & Glock, C. H. (2021). Industry 4.0 and the human factor – A systems framework and analysis methodology for successful development. *International Journal of Production Economics*, 233, 107992. doi:10.1016/j.ijpe.2020.107992
- Oliver, R. K., & Webber, M. D. (1982). Supply-chain management: Logistics catches up with strategy. *Outlook*, 5(1), 42-47.
- Otto, A., & Battaia, O. (2017). Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey. *Computers & Industrial Engineering*, 111, 467-480. doi:10.1016/j.cie.2017.04.011
- Otto, A., & Scholl, A. (2011). Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 212(2), 277-286. doi:10.1016/j.ejor.2011.01.056
- Petri, C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*. Tesi di dottorato, Technische Hochschule Darmstadt. Schriften des Instituts für Instrumentelle Mathematik, Bonn.
- Pettit, T. J., Fiksel, J., & Croxton, K. L. (2010). Ensuring supply chain resilience: Development of a conceptual framework. *Journal of Business Logistics*, 31(1), 1-21. doi:10.1002/j.2158-1592.2010.tb00125.x
- Ponomarev, S. Y., & Holcomb, M. C. (2009). Understanding the concept of supply chain resilience. *The International Journal of Logistics Management*, 20(1), 124-143. doi:10.1108/09574090910954873

- Reid, G. B., & Nygren, T. E. (1988). The subjective workload assessment technique: A scaling procedure for measuring mental workload. In P. A. Hancock, & N. Meshkati (A cura di), *Human mental workload* (p. 185-218). North-Holland.
- Romero, D., Stahre, J., Wuest, T., Noran, O., Bernus, P., Fast-Berglund, Å., & Gorecky, D. (2016). Towards an Operator 4.0 typology: A human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. *Proceedings of the International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE46)*, (p. 1-11). Tianjin.
- Santana-Robles, F., Medina-Marín, J., Montaña-Arango, O., & Seck-Tuoh-Mora, J. C. (2012). Modeling and simulation of textile supply chain through colored Petri nets. *Intelligent Information Management*, 4(5A), 261-268. doi:10.4236/iim.2012.425037
- Sarkis, J., Kouhizadeh, M., & Zhu, Q. S. (2020). Digitalization and the greening of supply chains. *Industrial Management & Data Systems*, 121(1), 65-85. doi:10.1108/IMDS-08-2020-0450
- Sgarbossa, F., Grosse, E. H., Neumann, W. P., Battini, D., & Glock, C. H. (2020). Human factors in production and logistics systems of the future. *Annual Reviews in Control*, 49, 295-305. doi:10.1016/j.arcontrol.2020.04.007
- Swain, D. P., & Leutholtz, B. C. (1997). Heart rate reserve is equivalent to %VO₂ reserve, not to %VO₂max. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 29(3), 410-414.
- Tanaka, H., Monahan, K. D., & Seals, D. R. (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, 37(1), 153-156. doi:10.1016/S0735-1097(00)01054-8
- Tuncel, G., & Alpan, G. (2010). Risk assessment and management for supply chain networks: A case study. *Computers in Industry*, 61(3), 250-259.
- Villar, A., Paladini, S., & Buckley, O. (2023). Towards Supply Chain 5.0: Redesigning supply chains as resilient, sustainable, and human-centric systems in a post-pandemic world. *Operations Research Forum*, 4(3), 60. doi:10.1007/s43069-023-00234-3
- Wong, C. Y., Wong, C. W., & Boon-itt, S. (2020). Effects of green supply chain integration and green innovation on environmental and cost performance. *International Journal of Production Research*, 58(15), 4589-4609. doi:10.1080/00207543.2020.1756510
- World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol: A corporate accounting and reporting standard (revised edition)*.
- World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. (2011). *Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standard*.
- Zegordi, S. H., & Davarzani, H. (2012). Developing a supply chain disruption analysis model: Application of colored Petri-nets. *Expert Systems with Applications*, 39(2), 2102-2111.
- Zhang, L. L., You, X., Jiao, J., & Helo, P. (2009). Supply chain configuration with co-ordinated product, process and logistics decisions: An approach based on Petri nets. *International Journal of Production Research*, 47(23), 6681-6706.