

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA  
DIPARTIMENTO DI SCIENZE E METODI DELL'INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA GESTIONALE

**Analisi dei processi produttivi tramite  
Process Mining: inquadramento  
teorico e studio di un caso nel settore  
metalmeccanico**

Relatore:  
Prof. Franco Francia

Laureando:  
Caggiano Matteo

A. A. 2025/2026



## INDICE

|                                                                                                                                                                                        |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>SOMMARIO .....</b>                                                                                                                                                                  | <b>5</b>      |
| <b>INTRODUZIONE .....</b>                                                                                                                                                              | <b>7</b>      |
| <br><b>CAPITOLO 1 – IL PROCESS MINING .....</b>                                                                                                                                        | <br><b>9</b>  |
| <b>1.1 Il Business Process Management (BPM) .....</b>                                                                                                                                  | <b>10</b>     |
| 1.1.1 Il Process Mining .....                                                                                                                                                          | 11            |
| 1.1.2 Il ciclo di vita del Process Mining .....                                                                                                                                        | 12            |
| 1.1.3 Principali strumenti/tool .....                                                                                                                                                  | 17            |
| 1.1.4 Capacità e Tecniche Analitiche del Process Mining .....                                                                                                                          | 17            |
| 1.1.5 Process Mining come approccio strategico al processo decisionale .....                                                                                                           | 19            |
| <b>1.2 Apromore .....</b>                                                                                                                                                              | <b>20</b>     |
| 1.2.1 Metodologia e Architettura Funzionale .....                                                                                                                                      | 20            |
| 1.2.2 Vantaggi Strategici e Operativi .....                                                                                                                                            | 21            |
| <br><b>CAPITOLO 2 - CASE STUDY .....</b>                                                                                                                                               | <br><b>23</b> |
| <b>2.1 Lettura e preparazione dei dati .....</b>                                                                                                                                       | <b>23</b>     |
| 2.1.1 Analisi della configurazione iniziale del log di eventi .....                                                                                                                    | 23            |
| 2.1.2 CSV Importer .....                                                                                                                                                               | 28            |
| <b>2.2 Process Discovery: Ricostruire il modello di processo reale (as-is) a partire dall'event log, evidenziando le varianti di flusso e le deviazioni dal processo standard.....</b> | <b>30</b>     |
| <b>2.3 Performance Analysis: Identificare i colli di bottiglia, le attività critiche e i tempi di attraversamento, con particolare attenzione ai tempi di attesa tra le fasi. ....</b> | <b>33</b>     |
| 2.3.1 Analisi dei Tempi di Attraversamento (Lead Time) .....                                                                                                                           | 33            |
| 2.3.2 Colli di Bottiglia e Tempi di Attesa (Focus sulle transizioni) .....                                                                                                             | 35            |
| 2.3.3 Attività Critiche e Tempi di Lavorazione (Focus sui Nodi) .....                                                                                                                  | 36            |
| 2.3.4 Complessità del Flusso (Analisi Morfologica del Modello) .....                                                                                                                   | 36            |
| <b>2.4 Quality Analysis: Analizzare i pattern di difettosità, gli scarti e le rilavorazioni per identificare le cause radice dei problemi di qualità. ....</b>                         | <b>37</b>     |
| <b>2.5 Resource Analysis: Valutare l'utilizzo delle risorse (macchine e operatori), individuare squilibri di carico e correlazioni tra operatore e qualità. ....</b>                   | <b>41</b>     |
| 2.5.1 Disomogeneità del Carico di Lavoro e Distribuzione Paretiana (Activity Perspective) .....                                                                                        | 42            |
| 2.5.2 Correlazione tra Risorsa e Decadimento Qualitativo (Root Cause Analysis) .....                                                                                                   | 42            |
| 2.5.3 Il paradosso del Controllo Qualità: Analisi delle Frequenze Assolute (Resource Perspective) .....                                                                                | 44            |

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.4 Impatto Temporale Specifico per Risorsa e Criticità Nascoste .....                                                                                                              | 45 |
| 2.5.5 Conclusioni e Prospettive di Intervento (Actionable Insights).....                                                                                                              | 45 |
| 2.6 Setup Optimization: Analizzare i tempi di setup per macchina e identificare opportunità di riduzione mediante tecniche SMED e schedulazione intelligente. ....                    | 46 |
| 2.6.1 Evidenze Empiriche: L'Analisi delle Performance e il "Setup Occulto" .....                                                                                                      | 46 |
| 2.6.2 Riduzione dei Tempi di Attrezzaggio tramite Metodologia SMED .....                                                                                                              | 47 |
| 2.6.3 Schedulazione Intelligente e Group Technology .....                                                                                                                             | 48 |
| 2.6.4 Sinergia Strategica tra Process Mining e Lean Management .....                                                                                                                  | 48 |
| 2.7 Predictive Quality: Sviluppare modelli predittivi basati su AI/ML per anticipare i difetti di produzione prima che vengano rilevati dai controlli qualità.....                    | 49 |
| 2.7.1 Definizione dell'Obiettivo (Target Variable) .....                                                                                                                              | 49 |
| 2.7.2 Creazione del Set di Dati di Addestramento (Training Data).....                                                                                                                 | 49 |
| 2.7.3 Feature Engineering (Estrazione delle Variabili).....                                                                                                                           | 50 |
| 2.7.4 Scelta e Addestramento dell'Algoritmo.....                                                                                                                                      | 51 |
| 2.7.5 Integrazione Operativa e Funzionamento in Tempo Reale.....                                                                                                                      | 52 |
| 2.7.6 Risultati dell'Addestramento e Analisi della Feature Importance .....                                                                                                           | 53 |
| 2.7.7 Simulazione Operativa: Validazione Empirica del Modello sui Log di Produzione .....                                                                                             | 54 |
| 2.2.8 Conclusioni della Simulazione: Analisi di Scenario e Paradigma Predittivo .....                                                                                                 | 57 |
| 2.8 Process Variant Analysis: Analizzare la variabilità del processo produttivo in funzione del tipo di componente, identificando le varianti efficienti e quelle problematiche. .... | 59 |
| 2.8.1 Classificazione dei Componenti mediante Group Technology.....                                                                                                                   | 59 |
| 2.8.2 Analisi Comparata dei Flussi Produttivi per Famiglia Tecnologica .....                                                                                                          | 61 |
| CONCLUSIONI.....                                                                                                                                                                      | 72 |
| Sviluppi futuri .....                                                                                                                                                                 | 73 |
| BIBLIOGRAFIA.....                                                                                                                                                                     | 75 |
| SITOGRAFIA .....                                                                                                                                                                      | 75 |

# SOMMARIO

L'attuale panorama industriale necessita di metodologie avanzate per la gestione e l'ottimizzazione dei processi produttivi, caratterizzati da una crescente complessità e variabilità. Questa tesi si pone l'obiettivo di esplorare e applicare il Process Mining, una disciplina che unisce la data science alla gestione aziendale, permettendo di ricostruire e analizzare i flussi operativi reali a partire dalle tracce digitali (event log) estratte dai sistemi informativi.

L'elaborato si articola in due macro-sezioni. La prima parte fornisce un inquadramento teorico sulla tecnica del Process Mining, spiegandone il funzionamento. La seconda parte presenta un case study condotto sui dati estratti dal sistema gestionale (ERP) di un'azienda operante nel settore metalmeccanico. L'elaborazione del dataset è stata supportata dall'impiego del software Apromore, attraverso la quale è stato possibile mappare i modelli di processo "as-is" e condurre un'indagine multidimensionale strutturata su sette macro-obiettivi.

Nello specifico, l'analisi ha affrontato i seguenti ambiti:

1. **Process Discovery:** ricostruzione del flusso reale, che ha evidenziato un'altissima variabilità (oltre 220 varianti su 225 commesse) causata dall'elevata personalizzazione dei componenti e dall'assenza di standardizzazione lineare.
2. **Performance Analysis:** quantificazione dei tempi di attraversamento (Lead Time) e identificazione dei colli di bottiglia critici, con particolare attenzione all'accumulo di Work-in-Progress (WIP) e ai tempi di attesa tra le fasi.
3. **Quality Analysis:** valutazione dei pattern di difettosità per isolare il "costo occulto" della non-qualità, dimostrando come i loop di rilavorazione (rework) arrivino a triplicare i tempi di consegna standard.
4. **Resource Analysis:** indagine sugli squilibri di carico (Workload Imbalance) tra macchine e operatori, identificando correlazioni dirette tra l'impiego di specifici centri di lavoro (es. macchine di rettifica, stazioni di ispezione) e i ritardi sistemici.
5. **Setup Optimization:** analisi dei tempi occulti di cambio formato, proponendo l'integrazione di tecniche Lean (metodologia SMED) e logiche di schedulazione intelligente per mitigare l'impatto dei fermi macchina.

6. **Predictive Quality:** sviluppo di un framework basato su algoritmi di intelligenza artificiale (Machine Learning) volto ad anticipare l'insorgenza dei difetti in ottica proattiva, riducendo gli scarti a fine linea.
7. **Process Variant Analysis:** scomposizione della variabilità del processo in funzione delle caratteristiche del componente, al fine di isolare le pratiche efficienti da quelle problematiche.

I risultati ottenuti dimostrano come l'applicazione sistematica del Process Mining consenta di superare i limiti dell'osservazione tradizionale e statica, mettendo in evidenza le inefficienze nascoste. Il lavoro fornisce al management metriche oggettive e *data-driven* per supportare decisioni strategiche di ottimizzazione, confermando il Process Mining come strumento fondamentale per il miglioramento continuo e l'eccellenza nel settore di appartenenza.

# INTRODUZIONE

Nell'attuale scenario industriale, caratterizzato da mercati sempre più dinamici e da una competizione globale serrata, la capacità di un'azienda di gestire, controllare e ottimizzare i propri processi produttivi rappresenta un fattore critico di sopravvivenza e successo. Le organizzazioni manifatturiere moderne si affidano quotidianamente a complessi sistemi informativi (come ERP, MES e SCADA) per governare la produzione; tuttavia, tra i modelli di processo ideali, definiti a tavolino in fase di progettazione, e la reale operatività sussiste molto spesso un divario profondo. La quotidianità aziendale è infatti costellata di inefficienze nascoste, colli di bottiglia, tempi di attesa occulti e deviazioni impreviste. Per decenni, le metodologie tradizionali di analisi dei processi si sono basate su interviste, workshop e campionamenti manuali: approcci che oggi si rivelano lenti, intrinsecamente soggettivi e inadeguati a catturare la reale complessità delle fabbriche moderne.

In questo contesto, la presente tesi si propone di esplorare e applicare il *Process Mining*, una disciplina innovativa e in rapida espansione che si pone all'esatto incrocio tra la *Data Science* e il *Business Process Management* (BPM). Attraverso l'estrazione e l'elaborazione delle tracce digitali (*event log*) generate ininterrottamente dai sistemi informativi aziendali, il Process Mining permette di ricostruire in modo totalmente oggettivo, matematico e visivo i flussi di lavoro reali, agendo come una vera e propria "radiografia" dell'organizzazione.

L'obiettivo centrale di questo elaborato è dimostrare l'impatto strategico e operativo di tale approccio *data-driven*, applicandolo a un caso di studio reale relativo a un'azienda operante nel settore metalmeccanico. La ricerca mira non solo a diagnosticare le inefficienze dello stato di fatto (*As-Is*), ma a fornire un framework metodologico completo e scalabile per il miglioramento continuo, culminando nell'integrazione di tecniche predittive avanzate.

Il lavoro è strutturato in due capitoli principali. Il **Primo Capitolo** fornisce l'inquadramento teorico essenziale. Partendo dai fondamenti della gestione dei processi aziendali, il testo traccia l'evoluzione verso le moderne tecniche di Process Mining, illustrandone il ciclo di vita, le capacità diagnostiche e il valore strategico per il management. Viene inoltre presentata Apromore, la piattaforma *enterprise* di Process Intelligence scelta per l'elaborazione dei dati all'interno della ricerca.

Il **Secondo Capitolo** costituisce il cuore empirico e ingegneristico della tesi: l'analisi del Case Study. Partendo dall'estrazione e dalla preparazione dei dati di produzione aziendali, l'indagine si sviluppa attraverso molteplici dimensioni analitiche di complessità crescente. Inizialmente si analizzerà la topologia del flusso fisico (*Process Discovery*) per mapparne la reale variabilità, per poi quantificare le inefficienze temporali, le code (*Performance Analysis*) e l'impatto distruttivo degli scarti e delle rilavorazioni sul sistema (*Quality Analysis*). L'indagine si spingerà poi verso la dimensione organizzativa, valutando l'uso delle risorse, le logiche di *Group Technology* e l'ottimizzazione dei tempi di attrezzaggio delle macchine (*Setup Optimization*) tramite l'integrazione dei principi del *Lean Management*.

A coronamento del percorso diagnostico, l'elaborato varcherà la soglia dell'analisi avanzata sviluppando un framework di *Predictive Quality*. Attraverso l'addestramento di un modello di Machine Learning basato sui dati storici, si dimostrerà come sia possibile anticipare le derive qualitative prima che si traducano in difetti irreversibili a fine linea.

Attraverso questo percorso, la tesi ambisce a dimostrare che la sinergia tra Process Mining, logiche snelle e Intelligenza Artificiale non rappresenta soltanto un sofisticato esercizio analitico, ma una reale leva strategica. Un approccio capace di guidare la transizione delle aziende manifatturiere da una gestione puramente reattiva delle emergenze a una *governance* proattiva e prescrittiva, in pieno allineamento con i paradigmi tecnologici e culturali dell'Industria 4.0.

# CAPITOLO 1 – IL PROCESS MINING

Per comprendere appieno le potenzialità delle moderne tecniche di analisi dei dati aziendali, è essenziale partire da una definizione solida di cosa sia un processo di business. Un processo aziendale si configura come una catena di eventi, attività e decisioni che coinvolgono un determinato numero di attori e di oggetti. L'intera sequenza viene sempre innescata da un bisogno specifico e ha come obiettivo finale quello di condurre a un risultato che generi valore per un cliente. Guardando all'interno dell'architettura di un'organizzazione, i processi aziendali operano in modo trasversale. Mentre un'azienda è tipicamente strutturata in compartimenti o funzioni verticali (come la Funzione A, B o C), i processi di business attraversano orizzontalmente queste funzioni per trasformare gli "Asset e Partner" (che comprendono le risorse finanziarie, le risorse umane, la tecnologia e i materiali in ingresso) in un output finale destinato ai clienti.

La realtà operativa delle aziende è costellata di processi complessi. Un esempio classico è il processo "Order-to-Cash" (dall'ordine all'incasso), che si snoda attraverso numerose fasi: la ricezione dell'ordine di acquisto, il suo controllo e conferma, l'imballaggio dei prodotti, il caricamento sul mezzo di trasporto, l'emissione della ricevuta di consegna, lo scarico, l'emissione della fattura e infine l'abbinamento del pagamento in entrata. Un altro processo fondamentale è il "Procure-to-Pay" (dall'approvvigionamento al pagamento), che parte dall'emissione di un ordine, passa per la conferma, la programmazione della consegna, l'arrivo della merce, il controllo della fattura, fino alla programmazione e all'esecuzione del pagamento. Ulteriori esempi rilevanti includono i flussi "Application-to-Approval" e "Issue-to-Resolution".

Il concetto di valore generato da un processo è strettamente legato al suo esito. Prendendo in esame un processo "Issue-to-Resolution", si può immaginare il caso di un cliente che segnala un guasto alla propria lavatrice. Questo flusso coinvolgerà diversi attori: il cliente stesso, il call centre, il centro di smistamento dei servizi, il tecnico, il magazzino ricambi e l'azienda assicuratrice. Gli esiti di questo percorso possono ridurre il valore per il cliente (esiti negativi), ad esempio se il guasto non viene riparato in tempi rapidi o se il cliente si

ritrova a pagare più di quanto si aspettasse. Al contrario, gli esiti che aggiungono valore (esiti positivi) si verificano quando il guasto viene risolto immediatamente con un intervento minimo, o quando la riparazione risulta interamente coperta dalla garanzia.

## **1.1 Il Business Process Management (BPM)**

La gestione strutturata di queste dinamiche prende il nome di Business Process Management (BPM), definito come l'insieme di principi, metodi e strumenti volti a progettare, analizzare, eseguire e monitorare i processi aziendali, con lo scopo ultimo di migliorarne le prestazioni. Secondo il Framework di Rummler, la gestione delle performance non avviene nel vuoto, ma all'interno di un ambiente di business influenzato dall'economia, dalle normative (regulatory) e dalla cultura, tenendo sempre in considerazione la pressione dei concorrenti. All'interno dell'organizzazione, oltre alle funzioni e ai processi operativi, esiste un livello decisionale dedicato al "Performance Planning" e al "Performance Management", che si interfaccia direttamente con gli stakeholder.

Quando si valuta la performance di un processo, i clienti tendono a basare le proprie scelte su tre dimensioni fondamentali: il tempo (si preferisce un servizio più veloce), il costo (si preferisce un servizio più economico) e la qualità (si preferisce un servizio migliore). Per illustrare come queste dimensioni possano essere ottimizzate, si può prendere ad esempio il processo di servizio in un ristorante. Nello stato di fatto (as-is), il processo è lineare: il cliente arriva, viene salutato e fatto accomodare, riceve il menù, effettua l'ordine, riceve il pasto, chiede il conto, riceve la fattura e infine paga. Il BPM offre svariate strategie per migliorare questo flusso: si può esternalizzare una parte del lavoro al cliente stesso (come nei ristoranti a buffet), oppure standardizzare l'offerta proponendo menù fissi giornalieri (Daily Specials) per velocizzare la cucina. Altre opzioni includono l'investire in esperienze uniche per aumentare il valore percepito (come un ristorante panoramico sottomarino), o il ri-sequenziare le fasi del processo. È persino possibile eliminare del tutto la fase di cottura (servendo ad esempio sushi) o eliminare la figura del cameriere per la presa degli ordini, automatizzando il processo tramite palmari digitali (come i dispositivi Dell/ITEC) che permettono di inserire direttamente il numero del tavolo, i

coperti e i piatti scelti. A livello di modellazione formale, un miglioramento si traduce spesso nel parallelizzare le attività: invece di confermare un ordine, emettere la fattura e poi spedire la merce in modo strettamente sequenziale, un modello ottimizzato (rappresentato tramite gateway paralleli) permette di emettere la fattura e spedire la merce contemporaneamente subito dopo la conferma dell'ordine.

### **1.1.1 Il Process Mining**

Nel contesto del miglioramento continuo, il Process Mining emerge come una disciplina basata sull'analisi e sul miglioramento dei processi aziendali utilizzando i dati relativi alle reali esecuzioni operative. Le organizzazioni odierne si affidano a sistemi informativi complessi (Enterprise systems) per supportare il loro business. Tra questi spiccano i sistemi ERP, utilizzati per supportare i processi di produzione, di consegna o di gestione delle buste paga, e i sistemi CRM, impiegati per le attività di marketing, vendite o servizio clienti.

Durante il loro normale funzionamento, questi sistemi registrano una mole enorme di dati sui processi che supportano (come i già citati order-to-cash o purchase-to-pay). Il Process Mining è quindi una famiglia di tecniche analitiche che sfrutta proprio questi dati registrati per scoprire e analizzare i processi, identificando eventuali problemi di conformità o di prestazione, rintracciandone le cause profonde e scovando nuove opportunità di ottimizzazione.

L'importanza del Process Mining in azienda risiede nella sua capacità di fornire una verità oggettiva e basata sui fatti (data-driven). Tradizionalmente, la mappatura dei processi avveniva tramite interviste ai dipendenti, workshop e analisi manuali, metodi intrinsecamente soggettivi, lenti e inclini a errori umani (spesso i dipendenti descrivono il processo come "dovrebbe essere" e non come "è realmente"). Il process mining, al contrario, agisce come una "macchina della risonanza magnetica" per l'azienda: rende visibile l'invisibile, portando alla luce le inefficienze nascoste, i colli di bottiglia e i costi occulti legati alle deviazioni. Questo livello di trasparenza è fondamentale per ridurre i costi operativi, migliorare la *customer experience* e garantire la conformità normativa (compliance), riducendo drasticamente i rischi aziendali.

### 1.1.2 Il ciclo di vita del Process Mining

Il Process Mining è una disciplina analitica avanzata che funge da ponte tra la scienza dei dati (Data Science) e la gestione dei processi aziendali (Business Process Management). Sebbene esistano svariati framework metodologici e piattaforme software che implementano queste logiche con sfumature differenti, un'iniziativa di process mining realmente matura, scalabile e d'impatto si articola universalmente su **cinque fasi fondamentali e interconnesse**.

Di seguito l'analisi dettagliata di ciascuno step:

#### **Definizione (Define)**

La fase di **definizione** rappresenta il fondamento preliminare e imprescindibile per l'intero progetto di process mining. Ancor prima di procedere con l'interrogazione dei sistemi informatici e l'estrazione dei log, risulta infatti imperativo acquisire una comprensione profonda del contesto di business in cui si opera.

Il punto di partenza di questo stadio iniziale è costituito dall'**analisi degli obiettivi e dei problemi**, un passaggio che si concretizza nell'identificazione delle criticità già note all'interno dell'organizzazione – quali, a titolo esemplificativo, ritardi logistici, costi operativi elevati o problematiche legate alla *compliance* aziendale – e nella chiara determinazione dei traguardi che si intende raggiungere. Contestualmente, è essenziale procedere alla **mappatura degli stakeholder**, che prevede l'individuazione e il coinvolgimento attivo dei *process owner* e di tutte quelle figure chiave che, detenendo una conoscenza empirica e approfondita del processo in esame, rappresentano non solo gli attori principali per la comprensione delle dinamiche aziendali, ma anche i diretti beneficiari dei futuri risultati analitici.

Un ulteriore passaggio cruciale all'interno di questa fase è la valutazione della cosiddetta **data readiness**. Occorre, in altri termini, verificare fattivamente quali sistemi informativi (come ERP, CRM o architetture *custom*) supportino l'esecuzione del processo e accertarsi che i dati da essi generati risultino accessibili, quantitativamente sufficienti e dotati di un livello di qualità adeguato alle successive elaborazioni. Infine, a coronamento dell'attività di definizione, si procede con l'elaborazione dei **Key Performance Indicators (KPI)**. Stabilire a priori questi indicatori chiave assume un'importanza strategica fondamentale:

essi consentono non soltanto di orientare con precisione la ricerca delle tracce digitali all'interno dei database, ma forniscono anche il metro di giudizio oggettivo e indispensabile per misurare, al termine del ciclo di vita del progetto, l'effettivo successo e il ritorno dell'iniziativa intrapresa.

### **Misurazione (Measure)**

Il secondo step del ciclo di vita del process mining è rappresentato dalla fase di misurazione, una tappa il cui obiettivo primario è tradurre le operazioni aziendali in dati concretamente analizzabili. Tale processo avviene attraverso l'estrazione di conoscenza direttamente dalle tracce digitali registrate dai sistemi informativi, comunemente definite *Event Logs* (log degli eventi).

Nello specifico, l'operazione prende avvio con l'estrazione dei dati dai database aziendali. Tuttavia, affinché gli algoritmi di process mining possano operare ed elaborare i modelli di processo, è un requisito imprescindibile che ogni record estratto contenga almeno tre attributi informativi fondamentali: un identificativo univoco del caso (il cosiddetto *Case ID*, come ad esempio il numero identificativo di un ordine), la descrizione dell'attività specifica svolta in quel frangente (ad esempio, "approvazione ordine") e un *timestamp*, ovvero una marca temporale che certifichi la data e l'ora esatta in cui l'evento si è verificato.

Una volta estratti, i dati allo stato grezzo si presentano molto frequentemente incompleti, affetti da duplicazioni o caratterizzati da formattazioni disomogenee. Si rende pertanto necessaria una rigorosa attività di trasformazione e pulizia, nota come *Data Preparation*. Attraverso l'impiego di processi ETL (*Extract, Transform, Load*), i dati vengono opportunamente "ripuliti", armonizzati e riorganizzati all'interno di una struttura standardizzata, divenendo così pienamente intellegibili per gli algoritmi di analisi. L'accuratezza di questa fase preparatoria risulta determinante: un'ottima strutturazione del dato rappresenta l'unica garanzia per assicurare l'affidabilità delle analisi successive, in stretta conformità con il noto principio informatico del *garbage in, garbage out*, secondo il quale la validità e l'utilità dell'output analitico sono direttamente e inevitabilmente vincolate alla qualità dei dati forniti in input.

## Analisi (Analyze)

Il terzo step del ciclo di vita del process mining è costituito dalla fase di **analisi**, che può essere a tutti gli effetti considerata il vero cuore pulsante dell'intera disciplina. In questo stadio, i dati precedentemente estratti e normalizzati si trasformano finalmente in visualizzazioni interattive e in preziosi *insight* di business. Nello specifico, l'indagine analitica si snoda tipicamente lungo tre direttrici metodologiche principali e complementari.

La prima di queste è la **Process Discovery** (scoperta del processo), attraverso la quale algoritmi dedicati ricostruiscono in modo del tutto automatico una rappresentazione visiva, oggettiva e strettamente *data-driven* delle dinamiche operative aziendali. Il risultato di tale elaborazione è il cosiddetto modello *As-Is*, ovvero una fotografia fedele del processo reale, la quale, assai di frequente, si discosta in maniera profonda dalle procedure puramente teoriche e idealizzate descritte all'interno dei manuali organizzativi.

Una volta delineata la realtà fattuale, si procede con la seconda direttrice, ovvero il **Conformance Checking** (analisi di conformità). In questo frangente, il modello reale ottenuto dalla *discovery* viene sovrapposto e rigorosamente confrontato con il modello ideale o normativo di riferimento (spesso definito come modello *To-Be* o *prescriptive*). Questa comparazione analitica consente di isolare con estrema precisione ogni sorta di deviazione rispetto allo standard, identificando non solo le violazioni delle regole di conformità — di fondamentale importanza ai fini di *audit* interni e del rispetto delle normative legali — ma anche "colli di bottiglia" procedurali ed eccezioni operative non previste in fase di progettazione.

Infine, la terza area di indagine è rappresentata dall'**analisi delle performance**. Quest'ultima mira a esplorare in profondità metriche quantitative essenziali per l'efficienza aziendale, quali la durata delle singole attività (i cosiddetti *lead times*), la frequenza con cui si presentano specifici snodi decisionali e i costi operativi associati alle diverse varianti con cui il processo viene portato a termine. A chiusura di questa articolata fase, gli esiti delle elaborazioni vengono convogliati all'interno di *dashboard* dinamiche fruibili in tempo reale. Tali strumenti di visualizzazione svolgono un duplice ruolo strategico: da un lato democratizzano l'accesso alle informazioni all'interno dell'organizzazione, dall'altro permettono al *management* di verificare costantemente gli

scostamenti tra la realtà operativa fattuale e i Key Performance Indicators (KPI) programmatici stabiliti durante il primo step di definizione.

### **Ottimizzazione (Improvement)**

Il quarto step del ciclo di vita del process mining è dedicato all'**ottimizzazione**. È opportuno sottolineare che l'indagine analitica condotta nella fase precedente, per quanto accurata, non è in grado di generare valore tangibile per l'organizzazione se non viene supportata da concrete azioni correttive; l'obiettivo di questo stadio è, pertanto, quello di tradurre le inefficienze evidenziate in soluzioni pratiche e migliorative.

Il primo ambito di intervento riguarda la **riprogettazione e la standardizzazione** dei processi. Questo passaggio si traduce nell'eliminazione sistematica di tutte quelle attività ridondanti o che non apportano alcun valore aggiunto alla catena operativa. Contestualmente, si procede alla standardizzazione delle prassi frammentate, adottando come punto di riferimento le varianti di processo più virtuose ed efficienti, comunemente definite in letteratura come *happy path*.

Una volta snellito e uniformato il flusso di lavoro, l'attenzione si sposta sull'**automazione integrata**. Attraverso l'identificazione precisa dei task caratterizzati da un'elevata manualità e ripetitività, l'organizzazione ha l'opportunità di porre solide basi per interventi di automazione mirata. L'esempio più emblematico in tal senso è rappresentato dall'introduzione di soluzioni RPA (*Robotic Process Automation*), in grado di sgravare le risorse umane dalle attività a minor valore aggiunto.

In una prospettiva ancora più evoluta, l'ottimizzazione sfocia nell'**integrazione di sistemi di Intelligenza Artificiale e Machine Learning**. I dati storici, ormai normalizzati e ottimizzati, costituiscono il bacino informativo ideale per l'addestramento di modelli predittivi avanzati. Tali sistemi sono in grado di supportare attivamente le decisioni operative, suggerendo in tempo reale all'operatore la "mossa successiva" (o *next best action*) più strategica per la risoluzione di un caso specifico.

Infine, affinché il processo di miglioramento possa dirsi completo, è necessaria una **ricalibrazione strategica**. L'ottimizzazione non può limitarsi al mero aspetto operativo, ma deve obbligatoriamente includere una revisione critica degli stessi *Key Performance Indicators* (KPI). In un panorama competitivo caratterizzato da un'estrema dinamicità, infatti, i target aziendali devono evolvere di pari passo con l'incremento delle capacità e

dell'efficienza del processo, garantendo così un allineamento costante tra obiettivi strategici e performance reali.

### **Monitoraggio (Monitoring)**

L'ultima fase del ciclo di vita del process mining è dedicata al monitoraggio, a conferma del fatto che l'ottimizzazione di un processo organizzativo non rappresenta un evento isolato e definitivo, bensì un percorso in costante evoluzione. Questo step conclusivo, infatti, ha la funzione di chiudere il cerchio metodologico per aprirne immediatamente uno nuovo, instaurando a tutti gli effetti un vero e proprio ciclo iterativo.

In primo luogo, questa fase si concentra sul controllo sistematico dei risultati. Attraverso un'osservazione di stampo empirico e quantitativo, si verifica puntualmente se le soluzioni correttive implementate durante la precedente fase di ottimizzazione — che si tratti dell'adozione di nuovi applicativi software, dell'introduzione di procedure inedite o dell'avvio di automazioni mirate — stiano effettivamente generando i benefici attesi. Tale controllo si traduce nella misurazione tangibile dell'impatto di queste iniziative sul miglioramento dei Key Performance Indicators (KPI) prestabiliti.

A tale verifica a posteriori si affianca un'attività di monitoraggio proattivo, condotta in tempo reale. I sistemi di process monitoring vengono opportunamente configurati per agire come sentinelle digitali, capaci di generare alert (allarmi) automatici e tempestivi nel momento in cui l'esecuzione del processo dovesse deviare dalle best practice appena ristabilite, o qualora si registrassero improvvisi cali a livello di performance operative. Questa capacità di intervento immediato riduce drasticamente i tempi di latenza nella risoluzione delle criticità emergenti.

Infine, la continua osservazione delle dinamiche aziendali sfocia nel concetto evolutivo di Digital Twin of an Organization (gemello digitale dell'organizzazione). I nuovi flussi di dati, generati ininterrottamente dall'operatività quotidiana, vengono costantemente reimmessi nel sistema analitico. Tale flusso di ritorno (feedback loop) innesca automaticamente e in modo ciclico le precedenti fasi di discovery e analyze. Attraverso questo meccanismo di retroazione strutturata, il framework di process mining si eleva da mero strumento di indagine una tantum a vero e proprio motore trainante di una strategia organizzativa orientata al miglioramento continuo (continuous improvement) e all'adattamento dinamico ai mutamenti del panorama competitivo.

### 1.1.3 Principali strumenti/tool

Il mercato del process mining è cresciuto esponenzialmente, offrendo soluzioni che variano da framework accademici open-source a complesse piattaforme *enterprise*. I principali strumenti utilizzati includono:

- **Celonis:** Attualmente il leader di mercato nel settore commerciale. Offre un "Execution Management System" (EMS) altamente scalabile, dotato di intelligenza artificiale per suggerire azioni correttive in tempo reale. È ampiamente utilizzato dalle aziende Fortune 500 per l'integrazione diretta con ecosistemi SAP.
- **Apromore:** Una piattaforma enterprise basata sull'intelligenza artificiale, nata dalla ricerca accademica. Si distingue per essere una soluzione *no-code* molto intuitiva, che permette non solo la scoperta e l'analisi dei processi, ma anche la simulazione predittiva (*Digital Twin*) e il monitoraggio continuo, ponendosi come ponte ideale tra data scientist e utenti di business.
- **UiPath Process Mining (ex ProcessGold):** Fortemente focalizzato sull'identificazione delle opportunità di automazione. Integrato nell'ecosistema RPA (Robotic Process Automation) di UiPath, permette alle aziende di scoprire quali fasi del processo conviene automatizzare e di creare direttamente i bot per farlo.
- **ProM:** Lo strumento accademico open-source per eccellenza. Supporta centinaia di algoritmi e plug-in sviluppati da ricercatori di tutto il mondo. Pur avendo un'interfaccia meno adatta agli utenti aziendali (business user), rimane lo standard per la ricerca scientifica e lo sviluppo di nuovi algoritmi di estrazione.
- **Disco (Fluxicon):** Conosciuto per la sua interfaccia estremamente *user-friendly* e per la velocità di elaborazione, è uno dei tool commerciali più utilizzati per l'analisi rapida degli *event log* e per sessioni di consulenza sui processi.

### 1.1.4 Capacità e Tecniche Analitiche del Process Mining

Dal punto di vista architetturale, il process mining unisce i dati storici e i dati in tempo reale (provenienti da sistemi enterprise o dispositivi IoT) e li fa elaborare da algoritmi

specifici per generare una conoscenza di processo direttamente azionabile dal management. Questa conoscenza si declina in diverse capacità analitiche:

- **Automated Process Discovery (Scoperta automatica):** Prende i dati grezzi e genera modelli di processo visivi. Questi possono assumere la forma di mappe di processo (grafi con nodi e frecce) o di modelli in notazione standard BPMN. Sovrapponendo a questi modelli i dati di frequenza, è possibile vedere esattamente quante volte una specifica attività è stata eseguita, e quante volte il flusso ha preso direzioni diverse, ad esempio smistando il lavoro tra riparazioni semplici o riparazioni complesse.
- **Performance Mining (Analisi delle prestazioni):** Arricchisce i modelli visivi precedentemente creati con misurazioni relative alle tempistiche. La mappa del processo può mostrare la durata media tra un'attività e l'altra (ad esempio, evidenziando che mentre alcune fasi sono istantanee, altre, come l'esecuzione di una riparazione complessa, possono richiedere in media oltre 23 minuti). Questa analisi si traduce spesso in dashboard interattive che mostrano l'andamento dei casi nel tempo, grafici a torta per valutare il carico di lavoro distribuito tra le risorse e grafici a barre per individuare le singole attività che consumano il maggior quantitativo di tempo.
- **Conformance Checking (Verifica di conformità):** Consiste nel confrontare il processo teorico o desiderato (il modello "to-be") con il processo reale generato dai dati (il modello "as-is"). Mentre il modello ideale potrebbe prevedere una durata di soli 2 giorni e un flusso lineare senza intoppi, il modello reale potrebbe rivelare che la pratica richiede dai 5 ai 12 giorni a causa di innumerevoli deviazioni, come cicli ripetuti di riparazione o comunicazioni ridondanti verso l'utente. Il sistema genera quindi un report di conformità che evidenzia le discrepanze e permette di indagarne le cause profonde.
- **Variant Analysis (Analisi delle varianti):** Permette di isolare e confrontare percorsi operativi specifici. Confrontando visivamente i casi che hanno seguito un iter di riparazione semplice con quelli che hanno richiesto una riparazione complessa, gli analisti possono comprendere quali dinamiche impattano positivamente o negativamente sui tempi di attraversamento e sulle risorse impiegate.

- **What-If Process Mining:** Aggiunge una dimensione simulativa. Il flusso di lavoro prevede la scoperta del modello reale (as-is), la sua successiva modifica per creare uno scenario ipotetico (what-if), l'esecuzione della simulazione, l'analisi degli output generati e la ripetizione del ciclo per testare molteplici scenari alternativi prima di implementarli nel mondo reale.
- **Predictive Process Monitoring (Monitoraggio predittivo):** Si spinge oltre l'analisi storica per valutare i processi in corso d'opera. Interroga i dati in tempo reale per prevedere, ad esempio, se un processo attualmente in esecuzione diventerà "deviante", se si concluderà con un esito negativo, se violerà gli accordi sui livelli di servizio (SLA) nelle 24 ore successive o se richiederà uno sforzo e dei costi considerati anomali.

### 1.1.5 Process Mining come approccio strategico al processo decisionale

Oltre a essere uno strumento puramente tecnico, il Process Mining rappresenta un vero e proprio cambio di paradigma a livello direzionale. Storicamente, molte decisioni esecutive relative alla riorganizzazione aziendale, al taglio dei costi o all'adozione di nuove tecnologie (come ERP o sistemi di automazione) venivano prese basandosi sull'intuizione del management (*gut-feeling*) o su campionamenti parziali dei dati.

L'adozione del Process Mining trasforma il processo decisionale rendendolo sistematico, continuo e ancorato alla totalità dei fatti storici. I livelli dirigenziali (C-Level) possono utilizzare queste piattaforme non solo per un'analisi *una tantum*, ma come strumento di governo aziendale continuo. Questo approccio strategico si manifesta in tre aree chiave:

1. **Prioritizzazione degli investimenti (ROI-driven):** Prima di investire ingenti capitali in progetti di *Robotic Process Automation* (RPA) o nella migrazione di sistemi IT, il management può simulare (tramite le funzionalità *What-If*) l'esatto ritorno economico dell'investimento, automatizzando solo i "colli di bottiglia" che generano il maggior spreco di risorse
2. **Agilità organizzativa e Gestione del Rischio:** In contesti di mercato volatili o soggetti a rigidi controlli normativi (es. finanza, sanità), la capacità di avere un *audit trail* visivo e in tempo reale garantisce che le operazioni rispettino la

conformità (attraverso il *Conformance Checking*). Questo riduce il rischio di sanzioni e migliora la qualità del servizio erogato al cliente finale.

3. **Cultura del miglioramento continuo:** Implementare il process mining significa spostare la cultura aziendale dalla "ricerca del colpevole" per un ritardo, alla "risoluzione strutturale" del problema. Le dashboard oggettive allineano i diversi dipartimenti (es. acquisti, magazzino e finanza) su un'unica "versione della verità", abbattendo i silos aziendali e facilitando decisioni collaborative orientate all'efficienza sistemica.

## 1.2 Apromore

Apromore si configura come una piattaforma *enterprise* avanzata dedicata al *process mining* e alla *process intelligence*, integrando algoritmi di intelligenza artificiale. L'obiettivo primario della soluzione è la trasformazione dei dati grezzi – tipicamente estratti da sistemi informativi aziendali quali ERP (*Enterprise Resource Planning*), CRM (*Customer Relationship Management*) o sistemi di *ticketing* – in modelli visivi di processo. Tali modelli restituiscono un'esatta rappresentazione delle reali dinamiche operative, costituendo il punto di partenza per attività di analisi, ottimizzazione e automazione dei processi di business. Frutto di oltre un decennio di ricerca accademica, il software si distingue sul mercato per l'adozione di un paradigma *no-code*, concepito per garantire un utilizzo intuitivo non solo a figure tecniche (come i *data scientist*), ma anche agli utenti di *business*.

### 1.2.1 Metodologia e Architettura Funzionale

L'architettura funzionale di Apromore supporta l'intero ciclo di vita dell'analisi dei processi attraverso cinque macro-fasi:

- **Connessione ed Estrazione dei Dati (Connect):** Il sistema prevede l'integrazione con i sistemi informativi aziendali (es. ERP, MES) per l'acquisizione dei log degli eventi (*event logs*), ossia le tracce digitali generate dagli utenti e dai sistemi durante l'esecuzione delle attività (ad esempio, la registrazione di un ordine o l'approvazione di una fattura). Come metodologia operativa adottata nel presente lavoro di tesi, l'acquisizione dei dati avverrà tramite l'importazione di un file in

formato .csv, contenente i log degli eventi precedentemente estratti dal gestionale aziendale.

- Scoperta Automatica del Processo (Visualize): Il motore di elaborazione analizza i dati estratti per sintetizzare un modello visuale del processo, adottando lo standard BPMN (*Business Process Model and Notation*). Tale rappresentazione esplicita la sequenza logico-temporale delle attività, le risorse coinvolte e le molteplici varianti di esecuzione del processo nello stato di fatto (*As-Is*), evidenziando le deviazioni rispetto al modello teorico di riferimento.
- Analisi e Verifica di Conformità (Analyze): In questa fase, il sistema conduce un'analisi approfondita degli eventi registrati al fine di identificare inefficienze, colli di bottiglia (*bottleneck*), rilavorazioni (*rework*) e attività a scarso valore aggiunto. Inoltre, mediante tecniche di *Conformance Checking*, Apromore confronta il processo reale con il modello normativo o ideale, quantificando e segnalando in modo automatico le deviazioni dai protocolli standard.
- Simulazione e Ottimizzazione (Optimize): Il software permette la generazione di un Gemello Digitale (*Digital Twin*) del processo, fornendo un ambiente di simulazione privo di rischi in cui condurre analisi *What-If*. Ciò consente, ad esempio, di valutare l'impatto dell'introduzione di logiche di *Robotic Process Automation* (RPA) su specifiche attività o di misurare le variazioni dei tempi di ciclo al variare delle risorse allocate, calcolando preventivamente il potenziale Ritorno sull'Investimento (ROI).
- Monitoraggio e Intelligenza Predittiva (Monitor): A seguito degli interventi di ottimizzazione, apposite *dashboard* interattive consentono il monitoraggio delle *performance* in tempo reale. L'integrazione di modelli predittivi basati sull'intelligenza artificiale (come Apromore Copilot) permette di stimare anticipatamente eventuali violazioni degli SLA (*Service Level Agreement*) e di prevedere i tempi di completamento delle istanze in corso.

### **1.2.2 Vantaggi Strategici e Operativi**

L'adozione della piattaforma Apromore comporta molteplici vantaggi per le organizzazioni, tra cui:

- **Accessibilità e Usabilità:** A differenza di soluzioni concorrenti caratterizzate da un'elevata complessità tecnica, Apromore offre un'interfaccia intuitiva basata su logiche *drag-and-drop*. L'assenza di requisiti di programmazione garantisce un rapido *time-to-value* e democratizza l'accesso all'analisi dei dati, estendendolo al management operativo.
- **Identificazione di Iniziative di Automazione:** Il sistema fornisce un supporto analitico fondamentale nella fase di valutazione preliminare all'implementazione di sistemi di automazione (RPA), individuando con precisione i *task* manuali più onerosi in termini di tempo e quantificando il potenziale risparmio derivante dalla loro automazione.
- **Gestione della Conformità (Compliance) e Mitigazione del Rischio:** Il *Compliance Center* integrato automatizza l'esecuzione dei controlli di conformità. Incrociando le regole di *business* e le matrici di rischio con gli *event log* reali, la piattaforma genera un *audit trail* rigoroso, fondamentale per le organizzazioni soggette a stringenti normative di settore.
- **Ottimizzazione delle Performance e Riduzione dei Costi:** Identificando inefficienze e attriti operativi invisibili attraverso analisi tradizionali, l'approccio *data-driven* di Apromore si traduce in miglioramenti tangibili, documentati in letteratura da significative riduzioni dei tempi di attraversamento (*lead time*) e dei costi operativi.
- **Promozione di un Ambiente Collaborativo:** La presenza di un *repository* centralizzato facilita la collaborazione interfunzionale. I team di lavoro possono condividere i modelli di processo, confrontare le metriche tra diverse sedi o unità di business e promuovere la standardizzazione delle *best practice* a livello organizzativo.

## CAPITOLO 2 - CASE STUDY

### 2.1 Lettura e preparazione dei dati

Per prima cosa durante lo sviluppo di questa tesi, è stato esaminato il file “Event\_log\_data.csv” estratto dal gestionale contenente gli Event Log di un’azienda metalmeccanica, che fanno riferimento ai processi di produzione aziendale. Questo caso di studio è stato esaminato attraverso l’utilizzo del software Apromore (Paragrafo 1.2), tramite il quale sono stati analizzati i log eventi estratti dal gestionale aziendale, effettuando delle analisi con un livello crescente di difficoltà e complessità.

#### 2.1.1 Analisi della configurazione iniziale del log di eventi

La fase preliminare dell'analisi richiede un'accurata preparazione dei dati, passaggio fondamentale per rendere le informazioni grezze idonee all'ingestione da parte del software di Process Mining. Nel caso in esame, i log degli eventi sono stati elaborati in formato CSV (*Comma-Separated Values*), uno standard testuale ampiamente diffuso che impiega un carattere separatore per strutturare i record in formato tabellare.

In un contesto industriale moderno, l'estrazione di un *event log* da un'architettura informatica stratificata — che integra sistemi SCADA, controllori PLC e sistemi gestionali MES (*Manufacturing Execution System*) — impone un iter metodologico rigoroso, articolato in quattro fasi principali:

- **1. Identificazione della Sorgente Dati:**
  - **SCADA:** Rappresenta solitamente il livello di interfaccia primario. Gran parte dei sistemi SCADA offre funzionalità native per l'esportazione dei log di macchina in vari formati (CSV, XML o tabelle relazionali).
  - **PLC:** Qualora il dato granulare non sia storicizzato nello SCADA, è necessario interrogare direttamente i controllori logici programmabili. Questa operazione si esegue tramite i software di programmazione del PLC o sfruttando protocolli di comunicazione industriale standardizzati, come OPC UA o Modbus.
  - **MES:** Nei layout dove il livello MES è profondamente integrato con la fabbrica (SCADA/PLC), i dati di produzione possono essere estratti

direttamente dal database del gestionale di fabbrica, che spesso aggrega già le informazioni di campo con quelle relative all'ordine di produzione.

- **2. Selezione del Formato di Interscambio:**

- **CSV:** È il formato di testo più leggero e universalmente compatibile con le piattaforme di Process Mining (come Apromore o Celonis).
- **XML:** Offre una struttura gerarchica più complessa rispetto al CSV, risultando utile qualora sia necessario codificare attributi o metadati aggiuntivi annidati all'interno degli eventi.
- **Database (SQL):** In presenza di un'infrastruttura strutturata, i dati possono essere estratti o interrogati direttamente da un database relazionale (SQL) per consentire analisi massive o aggiornamenti in tempo reale.

- **3. Estrazione Operativa dei Dati:**

L'estrazione

avviene preferibilmente utilizzando le routine di esportazione automatizzate (query preimpostate) dei software SCADA o MES. In assenza di tali funzionalità, si rende necessaria la scrittura manuale di *script* di estrazione o *query* SQL dedicate per estrapolare i dati dai server aziendali.

- **4. Identificazione delle Istanze di Processo (Definizione del Case ID):** Affinché l'algoritmo di Process Mining possa ricostruire i modelli topologici (*Process Map*), è mandatorio che il file di *event log* contenga almeno un identificatore univoco per ogni traccia. Questo identificatore (che funge da *Case ID*) corrisponde tipicamente al numero di serie del componente o al codice del lotto di produzione. Per ricostruire la sequenza causale e temporale degli eventi, il *Case ID* deve essere obbligatoriamente associato a un *Timestamp* (marca temporale), permettendo al sistema di distinguere univocamente e in ordine cronologico i vari passaggi fisici del prodotto all'interno dell'azienda.

## Software di Process Mining

Una volta completata l'estrazione e la preparazione del file di *event log*, il dataset è pronto per essere importato nell'ambiente del software di Process Mining. L'ingestione di questi

dati permette agli algoritmi di ricostruire i modelli topologici (*Process Discovery*), rendendo possibile l'identificazione visiva e analitica delle reali sequenze operative e l'individuazione di colli di bottiglia, deviazioni e inefficienze all'interno dei processi aziendali.

Nell'eseguire questa integrazione tra i sistemi di fabbrica e la piattaforma di analisi, è opportuno tenere in considerazione alcune linee guida fondamentali:

- **Specificità dell'Infrastruttura:** Le procedure tecniche per l'estrazione e il routing dei dati variano significativamente in base ai fornitori e alle versioni dei sistemi SCADA, PLC e MES presenti in azienda. È pertanto indispensabile fare riferimento alla documentazione tecnica di ciascun applicativo per configurare correttamente le *query* di esportazione.
- **Compatibilità e Standardizzazione:** Prima dell'importazione, occorre verificare che la sintassi del file (es. delimitatori, formati data) sia compatibile con la piattaforma di Process Mining in uso. Sebbene il CSV sia lo standard testuale di base, in ambito accademico e industriale esistono formati specifici sviluppati appositamente per il Process Mining, come **XES** (*eXtensible Event Stream*) e **MXML**. L'adozione di questi formati nativi garantisce una maggiore strutturazione semantica dei dati e facilita l'interoperabilità e la portabilità dell'analisi tra software differenti.
- **Importanza del Data Cleaning:** L'importazione non deve mai avvenire in modo cieco. È obbligatorio sottoporre il log grezzo a una fase di pre-processamento (*Data Cleaning*). Questa fase serve a normalizzare i dati, rimuovere rumore di fondo, correggere eventuali inconsistenze temporali (es. fusi orari errati sui timestamp) e filtrare record incompleti che comprometterebbero l'attendibilità dell'analisi statistica successiva.

Per illustrare la struttura di base richiesta dal software, si consideri a titolo esemplificativo la seguente tabella, la quale riproduce l'output tipico di un file CSV (dove la virgola funge da separatore di colonna) pronto per l'ingestione:

| Case_ID | Activity                           | Resource                           | Start_Timestamp         | End_Timestamp           | Span   | Work_Order | Qty        | Part_Desc | Worker_ID | Report_Type | Qty_Completed | Qty_Rejected | Qty_for_MRB | Rework |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------|------------|------------|-----------|-----------|-------------|---------------|--------------|-------------|--------|
| Case 1  | Tornitura e Fresatura - Macchina 4 | Macchina 4 - Tornitura e Fresatura | 2026-01-29T23:24:00.000 | 2026-01-30T05:43:00.000 | 006:19 | 10         | Cable Head | ID4932    | S         |             | 1             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Tornitura e Fresatura - Macchina 4 | Macchina 4 - Tornitura e Fresatura | 2026-01-30T05:44:00.000 | 2026-01-30T06:42:00.000 | 000:58 | 10         | Cable Head | ID4932    | D         |             | 1             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Tornitura e Fresatura - Macchina 4 | Macchina 4 - Tornitura e Fresatura | 2026-01-30T06:59:00.000 | 2026-01-30T07:21:00.000 | 000:22 | 10         | Cable Head | ID4167    | S         |             | 0             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Tornitura e Fresatura - Macchina 4 | Macchina 4 - Tornitura e Fresatura | 2026-01-30T07:21:00.000 | 2026-01-30T10:58:00.000 | 003:37 | 10         | Cable Head | ID4167    | D         |             | 8             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Tornitura e Fresatura Q.C.         | Controllo Qualità 1                | 2026-01-31T13:20:00.000 | 2026-01-31T14:50:00.000 | 001:30 | 10         | Cable Head | ID4163    | D         |             | 9             | 1            | 0           |        |
| Case 1  | Laser Marking - Macchina 7         | Macchina 7 - Laser Marking         | 2026-02-01T08:18:00.000 | 2026-02-01T08:27:00.000 | 000:09 | 10         | Cable Head | ID0998    | D         |             | 9             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Lappatura - Macchina 1             | Macchina 1 - Lappatura             | 2026-02-14T00:00:00.000 | 2026-02-14T01:15:00.000 | 000:00 | 10         | Cable Head | ID4882    | D         |             | 0             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Lappatura - Macchina 1             | Macchina 1 - Lappatura             | 2026-02-14T09:05:00.000 | 2026-02-14T10:20:00.000 | 000:00 | 10         | Cable Head | ID4882    | D         |             | 1             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Lappatura - Macchina 1             | Macchina 1 - Lappatura             | 2026-02-14T09:05:00.000 | 2026-02-14T09:38:00.000 | 000:33 | 10         | Cable Head | ID4882    | D         |             | 8             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Rettifica Tonda - Macchina 3       | Macchina 3 - Rettifica Tonda       | 2026-02-14T09:13:00.000 | 2026-02-14T13:37:00.000 | 004:24 | 10         | Cable Head | ID4445    | S         |             | 0             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Rettifica Tonda - Macchina 3       | Macchina 3 - Rettifica Tonda       | 2026-02-14T13:37:00.000 | 2026-02-14T15:27:00.000 | 001:50 | 10         | Cable Head | ID4445    | D         |             | 9             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Ispesione Finale Q.C.              | Controllo Qualità 1                | 2026-02-16T06:59:00.000 | 2026-02-16T07:59:00.000 | 001:00 | 10         | Cable Head | ID4493    | D         |             | 0             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Ispesione Finale Q.C.              | Controllo Qualità 1                | 2026-02-16T12:11:00.000 | 2026-02-16T16:12:00.000 | 004:01 | 10         | Cable Head | ID4493    | D         |             | 0             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Ispesione Finale Q.C.              | Controllo Qualità 1                | 2026-02-16T12:43:00.000 | 2026-02-16T13:58:00.000 | 000:00 | 10         | Cable Head | ID4493    | D         |             | 9             | 0            | 0           |        |
| Case 1  | Imballaggio                        | Imballaggio                        | 2026-02-17T00:00:00.000 | 2026-02-17T01:00:00.000 | 000:00 | 10         | Cable Head | ID4820    | D         |             | 9             | 0            | 0           |        |
| Case 10 | Tornitura e Fresatura - Macchina 9 | Macchina 9 - Tornitura e Fresatura | 2026-01-17T07:01:00.000 | 2026-01-17T11:05:00.000 | 004:04 | 251        | Spur Gear  | ID3846    | S         |             | 1             | 0            | 0           |        |
| Case 10 | Tornitura Q.C.                     | Controllo Qualità 1                | 2026-01-17T11:00:00.000 | 2026-01-17T11:15:00.000 | 000:15 | 251        | Spur Gear  | ID4618    | D         |             | 0             | 0            | 0           |        |
| Case 10 | Tornitura e Fresatura - Macchina 9 | Macchina 9 - Tornitura e Fresatura | 2026-01-17T19:24:00.000 | 2026-01-17T20:01:00.000 | 000:37 | 251        | Spur Gear  | ID4132    | S         |             | 0             | 0            | 0           |        |
| Case 10 | Tornitura e Fresatura - Macchina 9 | Macchina 9 - Tornitura e Fresatura | 2026-01-17T20:01:00.000 | 2026-01-17T23:43:00.000 | 003:42 | 251        | Spur Gear  | ID4132    | D         |             | 17            | 0            | 0           |        |
| Case 10 | Tornitura e Fresatura - Macchina 9 | Macchina 9 - Tornitura e Fresatura | 2026-01-17T23:49:00.000 | 2026-01-18T06:32:00.000 | 006:43 | 251        | Spur Gear  | ID4794    | D         |             | 37            | 0            | 0           |        |
| Case 10 | Tornitura e Fresatura - Macchina 9 | Macchina 9 - Tornitura e Fresatura | 2026-01-18T06:59:00.000 | 2026-01-18T07:24:00.000 | 000:25 | 251        | Spur Gear  | ID3846    | D         |             | 4             | 0            | 0           |        |

Figura 1. Estratto del file csv usato per l'analisi

Affinché il software di Process Mining (nel nostro caso sarà Apromore) possa elaborare correttamente i flussi operativi, il dataset in formato CSV deve essere strutturato in colonne specifiche, ciascuna portatrice di un attributo semantico fondamentale. Di seguito viene illustrato il dizionario dei dati (*Data Dictionary*) relativo al tracciato record analizzato (Figura 1), dettagliando il significato di ciascun campo:

- **Case ID (Identificativo dell'Istanza):** Costituisce la chiave primaria dell'analisi. È l'identificativo alfanumerico univoco assegnato a ciascuna istanza di processo (es. numero di commessa, lotto di produzione o ordine di lavoro). La presenza di questa chiave consente all'algorithmo di aggregare tutti gli eventi isolati registrati nel log, ricostruendo l'intero ciclo di vita di un singolo componente e tracciandone la movimentazione all'interno dell'azienda.
- **Activity (Attività):** Descrive la natura dell'operazione eseguita in un determinato istante (es. "Tornitura", "Controllo Qualità", "Imballaggio"). Questo attributo è il mattone fondamentale per la costruzione della *Process Map*, poiché permette agli analisti di categorizzare le azioni, mappare la sequenza logica del flusso di valore e individuare eventuali step non previsti dal ciclo standard.
- **Resource (Risorsa):** Identifica l'entità fisica o logica che ha preso in carico ed eseguito l'attività. In ambito produttivo, indica solitamente lo specifico centro di lavoro (es. Macchina CNC 4), la postazione manuale o, in alcuni casi, il sistema informatico che ha generato l'evento. È un dato cruciale per calcolare la saturazione degli impianti e mappare l'allocazione dei carichi di lavoro.
- **Start Timestamp (Marca Temporale di Inizio):** Registra la data e l'ora esatta (con precisione solitamente al secondo o al millisecondo) in cui un'attività ha

avuto inizio. È il parametro fondamentale per ordinare cronologicamente gli eventi, calcolare i tempi di attesa (coda) prima dell'inizio della lavorazione e individuare pattern temporali anomali.

- **End Timestamp (Marca Temporale di Fine):** Registra la data e l'ora esatta in cui un'attività viene dichiarata conclusa o interrotta. L'incrocio tra l'inizio e la fine dell'attività permette al software di misurare le prestazioni del sistema, quantificare la durata effettiva della lavorazione e diagnosticare i colli di bottiglia capacitivi.
- **Span (Durata):** Rappresenta il delta temporale intercorso tra lo *Start Timestamp* e il *Complete Timestamp*. Espressa in ore o minuti, questa variabile quantifica il tempo di attraversamento del singolo step, permettendo di valutare l'efficienza della risorsa, monitorare il rispetto dei tempi ciclo standard e isolare eventuali inefficienze esecutive.
- **Work Order Qty (Quantità Ordine di Lavoro):** Indica la dimensione del lotto di produzione associato al *Case ID*. Questo valore è indispensabile per parametrizzare le tempistiche: permette agli analisti di correlare il tempo di lavorazione (*Span*) al volume fisico di pezzi da produrre, valutando così l'incidenza dei tempi di setup e pianificando l'assorbimento capacitivo delle macchine.
- **Part Desc. (Descrizione Componente):** Riporta la nomenclatura, il codice articolo o la specifica tecnica del pezzo lavorato. Come dimostrato dall'applicazione della *Group Technology*, questo attributo è vitale per segmentare l'analisi, permettendo di filtrare i dati e correlare specifiche derivate prestazionali alla complessità geometrica o tecnologica del prodotto.
- **Worker ID (Identificativo Operatore):** È il codice matricola o l'identificativo univoco dell'operatore che ha effettuato il log-in in macchina o dichiarato l'avanzamento dell'attività. Oltre a garantire la tracciabilità e la conformità documentale, consente di analizzare le metriche di produttività per turno o per operatore, evidenziando necessità di training o criticità ergonomiche.
- **Report Type (Tipologia di Dichiarazione):** Categorizza la natura del record generato (es. dichiarazione di produzione, fermo macchina per guasto, setup).

Permette di filtrare il database per analizzare verticalmente specifici fenomeni, isolando, ad esempio, i tempi improduttivi da quelli a valore aggiunto.

- **Qty Completed (Quantità Conforme):** Quantifica il numero di pezzi fisicamente ultimati e dichiarati conformi al termine dell'attività. È la metrica base per tracciare l'avanzamento della commessa e misurare la produttività effettiva del processo rispetto a quanto pianificato nel *Work Order Qty*.
- **Qty Rejected (Quantità Scartata):** Registra il numero di pezzi dichiarati non conformi e destinati alla rottamazione. Questo attributo è il sensore principale della non-qualità: fornisce la misura quantitativa degli scarti, permettendo di localizzare le stazioni di lavoro con la più alta incidenza di difettosità e di calcolare i costi della *Poor Quality*.
- **Qty for MRB (Quantità in MRB):** Acronimo di *Material Review Board*, indica i componenti segregati cautelativamente per difformità. Non essendo immediatamente classificabili come scarti definitivi, questi pezzi vengono "congelati" in attesa di un'analisi ingegneristica che ne determini il destino (deroga, riparazione o rottamazione). Tracciare questo valore è essenziale per monitorare il capitale circolante bloccato nei controlli qualità.
- **Rework (Rilavorazione):** Identifica le quantità (o il flag binario) relative ai prodotti che non hanno superato i controlli ma che possono essere recuperati. Traccia i lotti deviati verso cicli di correzione (es. aggiustaggi, rettifiche extra), rendendo visibili quegli "spaghetti pattern" o loop patologici che dilatano i *Lead Time* aziendali.

### 2.1.2 CSV Importer

Completata la procedura di autenticazione sulla piattaforma Apromore, si accede all'interfaccia principale, strutturata come un *repository* centralizzato. Questo ambiente di lavoro è organizzato secondo una logica gerarchica basata su cartelle e sottocartelle (Figura 2), progettata per consentire una gestione strutturata degli *asset* di progetto. All'interno di queste *directory* vengono archiviati e resi disponibili per l'analisi sia i

dataset storici (*event log*), sia i relativi modelli topologici di processo codificati nello standard BPMN (*Business Process Model and Notation*), come illustrato nella Figura

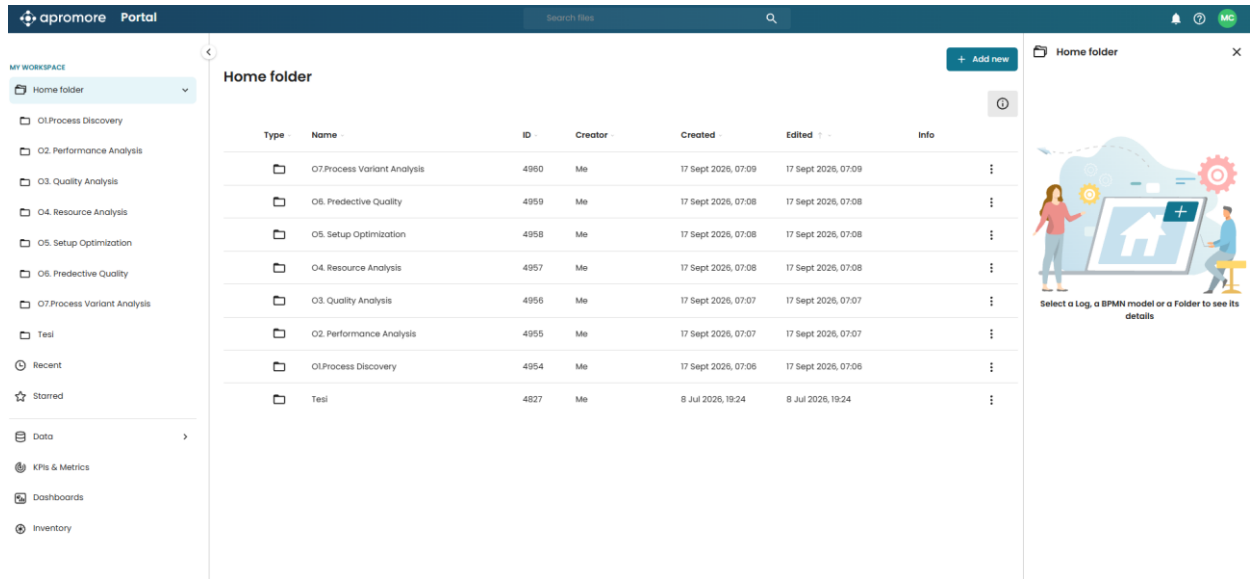


Figura 2. Portale iniziale Apromore

Durante la fase di importazione del dataset in formato CSV, il motore di Apromore esegue un parsing automatico volto a identificare e mappare i principali attributi semantici del log degli eventi, quali il Case ID, l'Activity e le risorse associate (Figura 3). Qualora l'algoritmo di riconoscimento non riesca a dedurre correttamente la tipologia o il formato di specifiche colonne (come, ad esempio, timestamp o valori numerici non standard), l'interfaccia consente all'analista di intervenire manualmente, offrendo la possibilità di ridefinire la mappatura dei campi per risolvere eventuali discrepanze prima dell'ingestione definitiva dei dati.

| Log Importer - Reti_Bomb_File Log.csv |          |                                    |                                    |                |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|---------------------------------------|----------|------------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Event Attribute → Ignore              |          |                                    | Ignore → Event Attribute           |                |                | Encoding: UTF-8 |                 |                 | Detect          |                 |                 |
| Case_ID                               | Activity | Resource                           | Span                               | Work_Order_Qty | Part_Desc_     | Worker_ID       | Report_Type     | Qty_Completed   | Qty_Rejected    |                 |                 |
| Case ID                               | Activity | Resource                           | Event Attribute                    | Case Attribute | Case Attribute | Event Attribute | Event Attribute | Event Attribute | Event Attribute | Event Attribute | Event Attribute |
| String                                | String   | String                             | String                             | Integer        | String         | String          | String          | Integer         | Integer         | Integer         | Integer         |
| 1                                     | Case 1   | Tornitura e Fresatura - Macchina 4 | Macchina 4 - Tornitura e Fresatura | 006:19         | 10             | Cable Head      | ID4932          | S               | 1               | 0               |                 |
| 2                                     | Case 1   | Tornitura e Fresatura - Macchina 4 | Macchina 4 - Tornitura e Fresatura | 000:58         | 10             | Cable Head      | ID4932          | D               | 1               | 0               |                 |
| 3                                     | Case 1   | Tornitura e Fresatura - Macchina 4 | Macchina 4 - Tornitura e Fresatura | 000:22         | 10             | Cable Head      | ID4167          | S               | 0               | 0               |                 |
| 4                                     | Case 1   | Tornitura e Fresatura - Macchina 4 | Macchina 4 - Tornitura e Fresatura | 003:37         | 10             | Cable Head      | ID4167          | D               | 8               | 0               |                 |
| 5                                     | Case 1   | Tornitura e Fresatura Q.C.         | Controllo Qualità 1                | 001:30         | 10             | Cable Head      | ID4163          | D               | 9               | 1               |                 |
| 6                                     | Case 1   | Laser Marking - Macchina 7         | Macchina 7 - Laser Marking         | 000:09         | 10             | Cable Head      | ID0998          | D               | 9               | 0               |                 |
| 7                                     | Case 1   | Lappatura - Macchina 1             | Macchina 1 - Lappatura             | 000:00         | 10             | Cable Head      | ID4882          | D               | 0               | 0               |                 |
| 8                                     | Case 1   | Lappatura - Macchina 1             | Macchina 1 - Lappatura             | 000:00         | 10             | Cable Head      | ID4882          | D               | 0               | 0               |                 |
| 9                                     | Case 1   | Lappatura - Macchina 1             | Macchina 1 - Lappatura             | 000:00         | 10             | Cable Head      | ID4882          | D               | 1               | 0               |                 |
| 10                                    | Case 1   | Lappatura - Macchina 1             | Macchina 1 - Lappatura             | 000:33         | 10             | Cable Head      | ID4882          | D               | 8               | 0               |                 |
| 11                                    | Case 1   | Rettifica Tonda - Macchina 3       | Macchina 3 - Rettifica Tonda       | 004:24         | 10             | Cable Head      | ID4445          | S               | 0               | 0               |                 |
| 12                                    | Case 1   | Rettifica Tonda - Macchina 3       | Macchina 3 - Rettifica Tonda       | 001:50         | 10             | Cable Head      | ID4445          | D               | 9               | 0               |                 |
| 13                                    | Case 1   | Ispesione Finale Q.C.              | Controllo Qualità 1                | 001:00         | 10             | Cable Head      | ID4493          | D               | 0               | 0               |                 |
| 14                                    | Case 1   | Ispesione Finale Q.C.              | Controllo Qualità 1                | 004:01         | 10             | Cable Head      | ID4493          | D               | 0               | 0               |                 |
| 15                                    | Case 1   | Ispesione Finale Q.C.              | Controllo Qualità 1                | 000:00         | 10             | Cable Head      | ID4493          | D               | 9               | 0               |                 |
| 16                                    | Case 1   | Imballaggio                        | Controllo Qualità 1                | 000:00         | 10             | Cable Head      | ID4820          | D               | 9               | 0               |                 |
| 17                                    | Case 10  | Tornitura e Fresatura - Macchina 9 | Macchina 9 - Tornitura e Fresatura | 004:04         | 251            | Spur Gear       | ID3846          | S               | 1               | 0               |                 |
| 18                                    | Case 10  | Tornitura Q.C.                     | Controllo Qualità 1                | 000:15         | 251            | Spur Gear       | ID4518          | D               | 0               | 0               |                 |
| 19                                    | Case 10  | Tornitura e Fresatura - Macchina 9 | Macchina 9 - Tornitura e Fresatura | 000:37         | 251            | Spur Gear       | ID4132          | S               | 0               | 0               |                 |
| 20                                    | Case 10  | Tornitura e Fresatura - Macchina 9 | Macchina 9 - Tornitura e Fresatura | 003:42         | 251            | Spur Gear       | ID4132          | D               | 17              | 0               |                 |

Figura 3. Log importor di Apromore.

Terminata la procedura di importazione e la validazione della mappatura semantica, l'*event log* viene consolidato all'interno del *repository* di Apromore, divenendo pienamente operativo per le successive fasi analitiche. A questo punto, l'utente può sfruttare gli algoritmi e i *plugin* nativi della piattaforma per eseguire, in modo completamente automatizzato, il *reverse engineering* del modello di processo (fase nota nella letteratura di settore come *Process Discovery*).

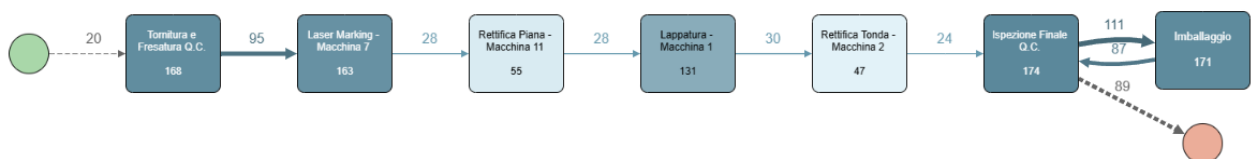
In tale contesto, il *reverse engineering* consiste nell'analisi algoritmica delle singole tracce storizzate nel log al fine di ricostruire la topologia del flusso di lavoro effettivo. Elaborando i dati empirici, il software identifica le attività realmente svolte e ne mappa le relazioni logico-sequenziali, generando un modello visivo (tipicamente una *Process Map* o un modello BPMN) che riflette con assoluta fedeltà il reale comportamento del sistema aziendale, superando i limiti e le approssimazioni dei modelli teorici di partenza.

## 2.2 Process Discovery: Ricostruire il modello di processo reale (as-is) a partire dall'event log, evidenziando le varianti di flusso e le deviazioni dal processo standard.

L'obiettivo della fase di Process Discovery è ricostruire il modello di processo reale (As-Is) a partire dai dati estratti dall'event log aziendale. Questa mappatura permette di visualizzare il reale svolgimento delle operazioni, evidenziando sia le varianti di flusso che le deviazioni rispetto al processo teorico standard.

### Il Flusso Standard (Happy Path)

Filtrando il modello per mostrare solo le attività e i percorsi principali, emerge il cosiddetto "flusso standard".



Come si evince dal diagramma, la sequenza lineare prevede i passaggi cardine della produzione: dalla Tornitura e Fresatura, passando per il Laser Marking, le lavorazioni di

Rettifica (Piana e Tonda) e Lappatura, fino ad arrivare all'Ispezione Finale e all'Imballaggio. Già in questa vista semplificata è possibile notare un ciclo di rilavorazione (rework) tra le fasi di Ispezione Finale e Imballaggio.

### L'emersione della complessità operativa

Aumentando il livello di dettaglio del modello (impostando la visualizzazione a 50 nodi), la struttura del processo cambia radicalmente. Si vede (Figura 4) aumentare drasticamente il numero delle attività, delle macchine specifiche impiegate e delle lavorazioni che si discostano dal normale flusso.

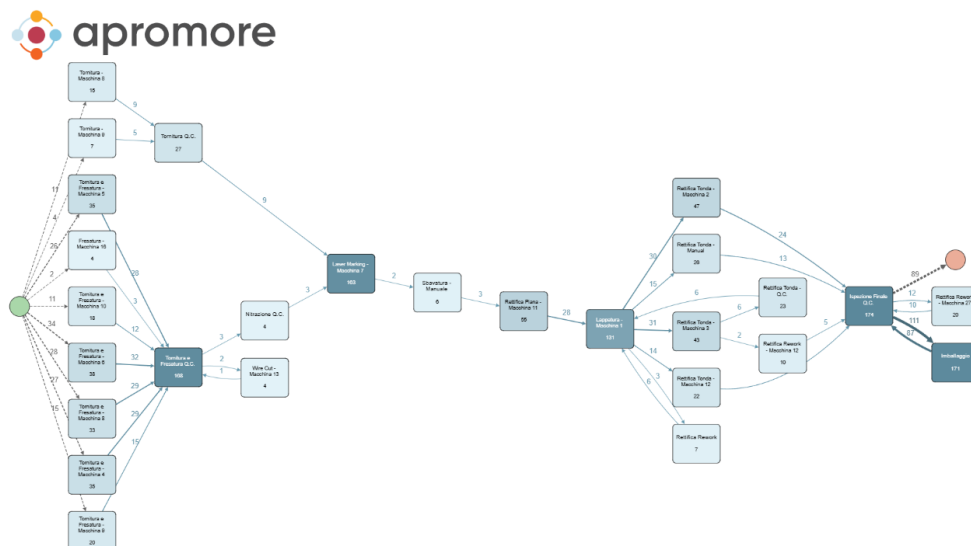


Figura 4. Modello del processo produttivo dettagliato

Il diagramma assume le sembianze di una rete complessa (effetto "spaghetti model"). Questo evidenzia come, nella realtà del plant produttivo, i pezzi seguano routing alternativi attraversando postazioni di lavoro differenti (es. specifiche macchine di tornitura o rettifica) o subendo micro-deviazioni e step aggiuntivi non previsti nel flusso ideale.

### Il Flusso Principale e le macro-attività

Focalizzando l'analisi esclusivamente sulle attività con la frequenza assoluta più elevata, il tool di Process Mining isola il seguente sotto-processo (Figura 5).

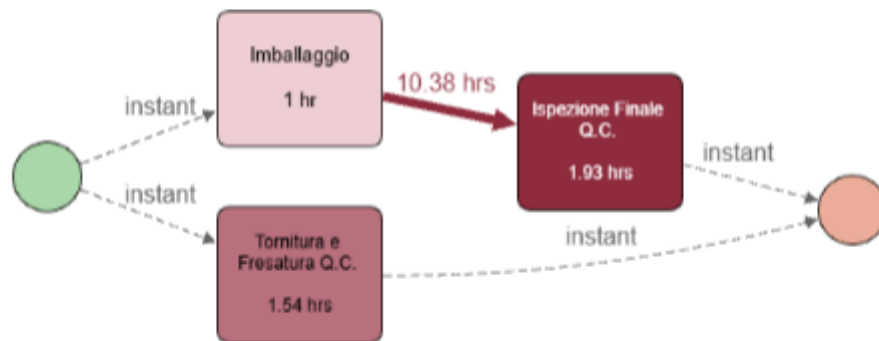


Figura 5. Modello raffigurante le postazioni più utilizzate

Questa vista isola le postazioni che registrano il maggior numero di transazioni o i tempi di transizione più impattanti (come il passaggio verso l'Ispezione Finale), rappresentando di fatto il cuore operativo ricorrente dell'azienda metalmeccanica.

Dall'analisi complessiva delle variazioni di flusso, emerge in modo inequivocabile che l'azienda opera con un modello ad altissima personalizzazione, tipico delle produzioni *Make-to-Order* pensate per soddisfare le richieste specifiche di ogni cliente.

| Case Variant Inspector |                    |                  |       |                |
|------------------------|--------------------|------------------|-------|----------------|
| Case variant ID        | Activity instances | Average duration | Cases | Percentage (%) |
| 3                      | 3                  | 20.18 hrs        | 3     | 1.33           |
| 2                      | 2                  | 19.00 mins       | 3     | 1.33           |
| 4                      | 4                  | 4.00 hrs         | 2     | 0.89           |
| 162                    | 162                | 2.38 wks         | 1     | 0.44           |
| 97                     | 97                 | 2.87 wks         | 1     | 0.44           |
| 87                     | 87                 | 1.16 wks         | 1     | 0.44           |
| 86                     | 86                 | 2.84 wks         | 1     | 0.44           |
| 79                     | 79                 | 5.00 days        | 1     | 0.44           |
| 75                     | 75                 | 2.86 wks         | 1     | 0.44           |
| 73                     | 73                 | 6.73 days        | 1     | 0.44           |

« < 1 / 3 > » [ 1 - 100 / 220 ]

Figura 6. Case Variant Inspector

Questo aspetto è confermato dai dati estratti dal *Case Variant Inspector* (Figura 6). L'azienda possiede pochissimi processi standard in cui le medesime operazioni vengono eseguite dall'inizio alla fine in modo identico. Al contrario, la tabella mostra una

frammentazione estrema: le varianti di processo sono centinaia e la variante più comune in assoluto rappresenta appena l'1,33% del totale dei casi registrati. Questo dato certifica che quasi ogni codice prodotto segue un routing differente, portando a una fabbricazione di fatto univoca, altamente flessibile e totalmente personalizzata.

## 2.3 Performance Analysis: Identificare i colli di bottiglia, le attività critiche e i tempi di attraversamento, con particolare attenzione ai tempi di attesa tra le fasi.

L'obiettivo della fase di *Performance Analysis* è individuare le inefficienze del sistema produttivo, analizzando i tempi di evasione degli ordini e prestando particolare attenzione alle fasi a non-valore aggiunto, come i tempi di attesa inter-operazionali.

### 2.3.1 Analisi dei Tempi di Attraversamento (Lead Time)

L'analisi dei tempi di attraversamento ha lo scopo di misurare la permanenza temporale complessiva di un ordine nel sistema, dalla presa in carico fino alla fase di imballaggio o spedizione. A tal fine, è stata configurata una dashboard analitica (Figura 7) tramite la piattaforma Apromore.

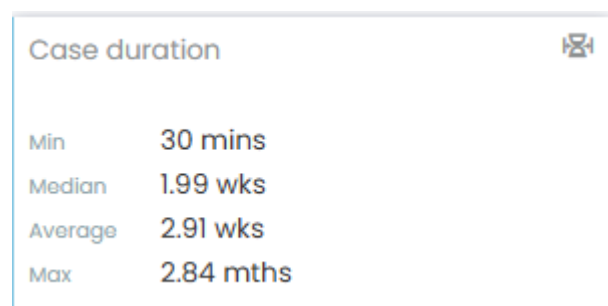


Figura 7. Dashboard Case Duration

Analizzando i KPI relativi alla durata dei casi, emerge una netta divergenza tra il tempo mediano di attraversamento (1,99 settimane) e la media aritmetica (2,91 settimane). Questa asimmetria indica che il valore medio è pesantemente alterato verso l'alto da una minoranza di *outlier*, ovvero casi anomali che richiedono tempistiche di evasione eccezionalmente dilatate. Ai fini della valutazione delle performance standard del *plant* produttivo, la mediana rappresenta pertanto l'indicatore statistico più affidabile.

L'escursione temporale (range) del processo è estremamente ampia: si passa da un tempo minimo di soli 30 minuti (imputabile presumibilmente a resi immediati, ordini annullati o percorsi fast-track per ricambi) a un tempo massimo critico di ben 2,84 mesi. Questo limite superiore riflette le inefficienze più severe della produzione.



Figura 8. Istogramma Case Duration

La distribuzione delle frequenze, illustrata nel relativo istogramma (Figura 8), evidenzia una marcata asimmetria positiva (con coda lunga verso destra). Sebbene la massa critica degli ordini venga smaltita in una finestra compresa tra pochi giorni e 3-4 settimane, una porzione rilevante di casi si trascina fino a 12 settimane. Tale dispersione compromette gravemente l'affidabilità del *Lead Time* promesso al cliente finale (Delivery Reliability).



Figura 9. Cases vs Case Variants

Un'ulteriore evidenza critica emerge dal rapporto tra i volumi e la variabilità (Figura 9): su un campione di 225 casi, si registrano ben 220 varianti di processo. Ciò certifica che la quasi totalità dei lotti segue una sequenza di lavorazione unica. Questa profonda mancanza di standardizzazione procedurale si configura come la causa radicale dell'alta variabilità dei tempi di attraversamento.

Dal punto di vista sistemico, si osserva un Work-In-Progress (WIP) che cresce progressivamente, saturando il sistema produttivo (Figura 10). Questo ingorgo di ordini aperti in officina genera code a monte dei macchinari; per il principio sancito dalla **Legge**

di Little, l'incremento del WIP accumulato in coda si traduce in un allungamento proporzionale del tempo di attraversamento totale.

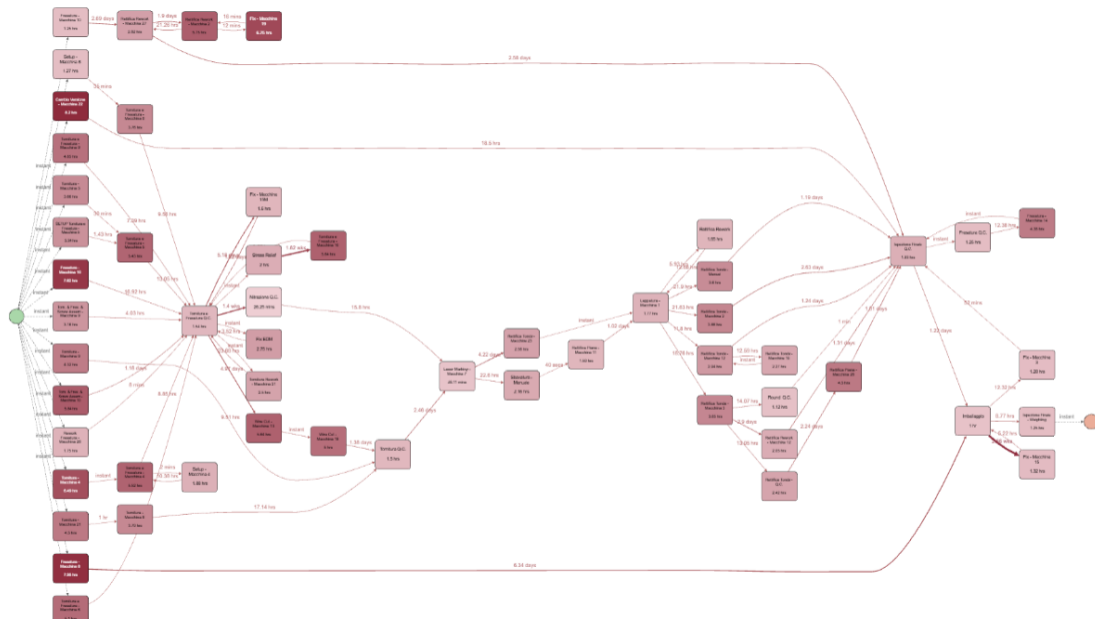


Figura 10. Mapa di Processo coi Tempi in evidenza

### 2.3.2 Colli di Bottiglia e Tempi di Attesa (Focus sulle transizioni)

Nel modello di processo, gli archi (freccie) caratterizzati dalle durate più elevate identificano fisicamente i colli di bottiglia, indicando le fasi in cui i componenti stazionano in attesa che la risorsa a valle si liberi. Le code più critiche si formano sistematicamente a valle delle stazioni di Controllo Qualità (Q.C.), suggerendo che i pezzi scartati o declassati si accumulano bloccando il flusso in attesa di rilavorazione.

- **Il collo di bottiglia principale:** Lo snodo "Tornitura + Fresatura Q.C." agisce come generatore delle attese più severe. I lotti che necessitano di un passaggio successivo verso "Tornitura + Fresatura - Macchina 15" registrano un'attesa media di 1,62 settimane, mentre i transiti diretti verso "Fix KDM" attendono 1,4 settimane. Questo evidenzia un grave squilibrio capacitivo: la stazione di collaudo rilascia i materiali a un ritmo superiore rispetto alla capacità di assorbimento delle stazioni successive (in particolare quelle dedicate al *rework*), generando enormi scorte polmone (WIP).
- **Colli di bottiglia secondari (Transiti trasversali):** Si rilevano dilatazioni temporali significative nei passaggi logistici inter-reparto. A titolo di esempio, il

trasferimento dalla fase di "Laser Marking" alle operazioni di "Rettifica" sconta un ritardo di 4,22 giorni. Inoltre, un arco che attraversa trasversalmente l'intera officina verso l'attività di "Imballaggio" comporta un'attesa di ben 6,34 giorni.

- **Implicazioni per l'azienda:** Questi "tempi morti", misurabili nell'ordine di giorni o settimane, sono i principali responsabili del Lead Time mediano di 1,99 settimane. L'abbattimento di queste code (ottenibile bilanciando la capacità delle macchine di rilavorazione o ottimizzando la schedulazione dei lotti post-Q.C.) rappresenta la leva prioritaria per il miglioramento del *Throughput*.

### 2.3.3 Attività Critiche e Tempi di Lavorazione (Focus sui Nodi)

Le attività evidenziate in rosso scuro nella *process map* rappresentano i nodi critici, ovvero le operazioni che assorbono i maggiori tempi di occupazione (macchina o operatore).

- **L'incidenza di Setup e Rilavorazioni:** Il dato più significativo è che i tempi di attraversamento di nodo più lunghi non sono imputabili alle operazioni a valore aggiunto (es. asportazione truciolo), bensì alle attività preparatorie e correttive. Ad esempio, l'operazione "Fix - Macchina 19" richiede mediamente 6,25 ore, mentre l'attività "Cambio Versione - Macchina 22" impiega 6,2 ore.
- **Lavorazioni Standard:** Tra le attività produttive pure, l'operazione "Tornitura - Macchina 4" si distingue per un'alta criticità, con un tempo di processo mediano di 6,45 ore.
- **Implicazioni per l'azienda:** Un tempo di *Setup* (Cambio Versione) superiore alle 6 ore su un singolo macchinario è un parametro critico che abbatte drasticamente l'indicatore OEE (Overall Equipment Effectiveness). Un intervento raccomandabile consiste nell'implementazione di metodologie **SMED (Single Minute Exchange of Die)**. Razionalizzare e internalizzare/esternalizzare le attività di setup su macchine critiche come la Macchina 22 libererebbe preziose ore di capacità produttiva.

### 2.3.4 Complessità del Flusso (Analisi Morfologica del Modello)

La visualizzazione logica del processo conferma graficamente l'altissima variabilità (220 varianti su 225 casi) riscontrata in fase statistica. L'architettura del flusso si allontana del

tutto dall'impostazione lineare tipica dei flussi discreti standardizzati (es. Taglio → Tornitura → Fresatura → Collaudo), assumendo la conformazione caotica di un cosiddetto *"Spaghetti Model"*.

Il plant è dominato da forti dinamiche di *rework*. I nodi centrali, come "Tornitura + Fresatura Q.C." e "Ispezione Finale Q.C.", operano come smistatori di anomalie: respingono e reindirizzano continuamente i componenti verso decine di stazioni differenti per correzioni geometriche, lappature o interventi generici di "Fix". Questo continuo ritorno di flusso (andirivieni) destruttura la standardizzazione dei tempi ed elide i benefici derivanti dalla ripetitività, rendendo complessa la programmazione della produzione.

## 2.4 Quality Analysis: Analizzare i pattern di difettosità, gli scarti e le rilavorazioni per identificare le cause radice dei problemi di qualità.

Al fine di valutare l'incidenza degli scarti e delle rilavorazioni sul modello di processo, è stata condotta un'analisi mirata sfruttando le potenzialità di filtro (Figura 11) della piattaforma Apromore. Nello specifico, sono state isolate le istanze contenenti attività classificabili come logiche di recupero, quali "Controllo qualità", "Scarto", "Rilavorazione" o "Riparazione".

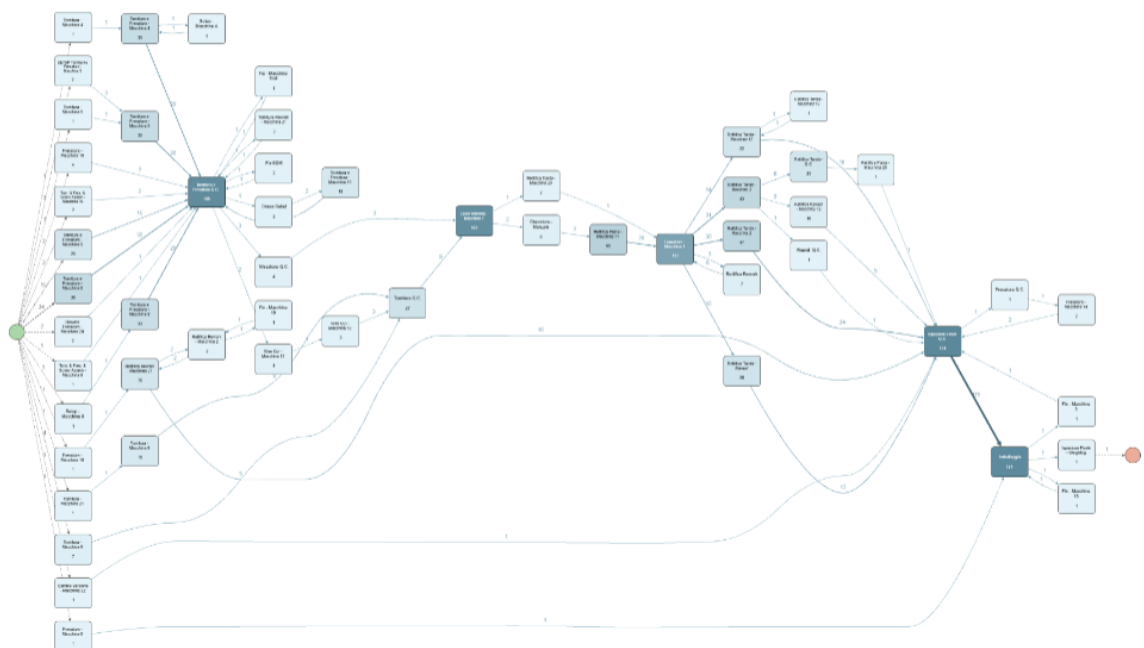


Figura 11. Mappa di processo generale con filtri

## 1. Analisi Strutturale: I colli di bottiglia del controllo qualità

Dall'analisi visiva della mappa di processo emerge un dato significativo: l'intero flusso è governato da due macro-nodi di controllo che agiscono come veri e propri "imbuto" per l'intera produzione:

- **Tornitura e Fresatura Q.C.:** situato all'inizio del ciclo produttivo (168 casi intercettati).
- **Ispezione finale Q.C.:** situato a fine ciclo (174 casi intercettati).

L'elevata densità di connessioni (archi) in ingresso e in uscita da questi due snodi denota una marcata instabilità del processo. Le stazioni di collaudo smettono di essere semplici punti di verifica e si trasformano in hub di smistamento continuo tra componenti conformi e scarti.

Superato il primo *gateway* (Tornitura e Fresatura Q.C.), il flusso teorico dovrebbe procedere linearmente verso l'attività di *Laser Marking*. Si osserva, invece, una proliferazione di deviazioni verso molteplici stazioni di recupero (es. "Fix EDM", "Tornitura Rework - Macchina 21"). Questa frammentazione indica che le non conformità originate nelle prime fasi non derivano da un'unica causa radice isolata, ma necessitano di micro-interventi correttivi distribuiti su asset differenti.

## 2. Rework Loops e Difettosità a Fine Linea

Nella sezione destra della mappa emergono blocchi funzionali dedicati esclusivamente alla gestione degli scarti. I percorsi iterativi che si concentrano in quest'area costituiscono dei tipici "*Rework Loops*": il componente fallisce la verifica delle tolleranze, viene re-inserito in macchina per un'ulteriore lavorazione (es. rettifica) e successivamente sottoposto a un nuovo collaudo.

Un'ulteriore criticità si riscontra a valle della linea. L'attività di "Imballaggio" dovrebbe teoricamente chiudere il ciclo produttivo; tuttavia, il modello evidenzia transizioni anomale in uscita da questa fase verso attività di riparazione (es. "Fix - Macchina 1" e "Fix - Macchina 15"). Questo pattern rappresenta la **tipologia di difettosità in assoluto più onerosa**: intercettare un problema all'ultimo stadio costringe gli operatori a

disimballare il prodotto per eseguire un intervento correttivo tardivo, disperdendo ore di lavoro ed erodendo il margine di contribuzione della commessa.

### 3. Quantificazione del Carico Operativo generato dalle Rilavorazioni

Per identificare il perimetro esatto dei lotti assorbiti dal ciclo della "non-qualità", il dataset è stato segmentato filtrando esclusivamente i casi contenenti le nomenclature "Fix" o "Rework" (Figura 12).

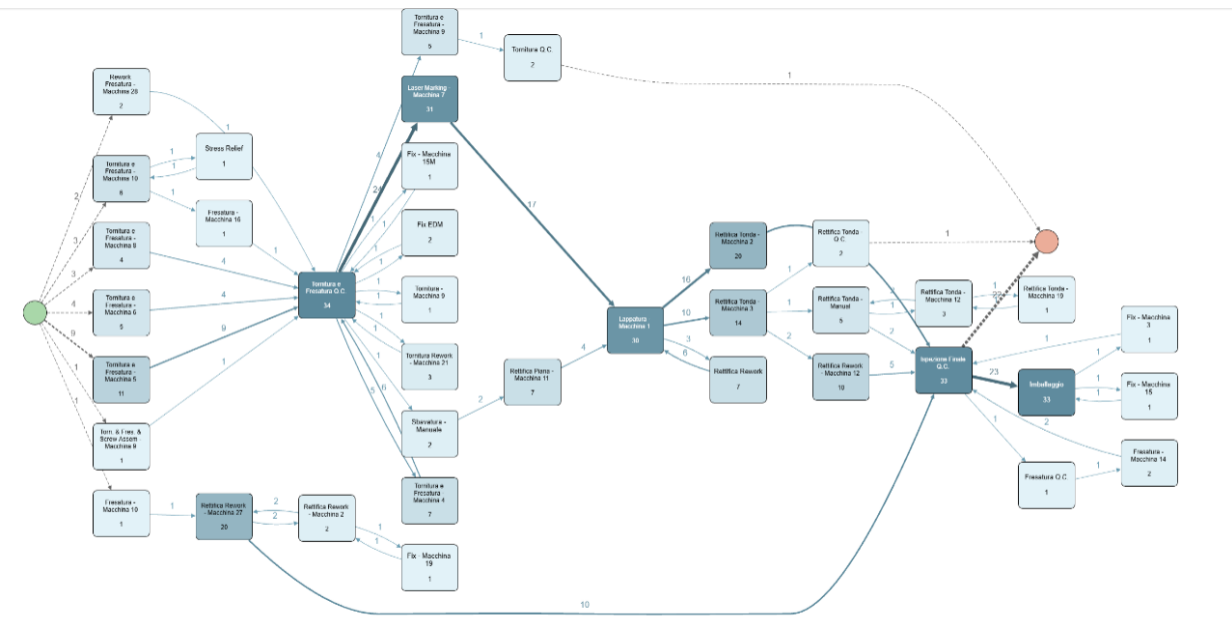


Figura 12. Mappa processi considerando solo le attività di Fix e Rework

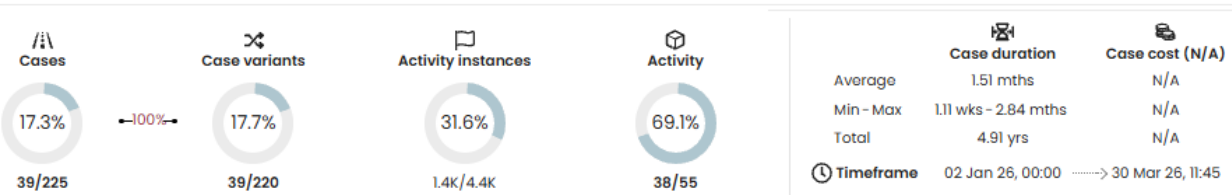


Figura 13. KPI considerando solo le attività di Fix e Rework

Dall'analisi delle frequenze (Figura 13) risulta che 39 commesse su un totale di 225 hanno registrato almeno un evento correttivo, traducendosi in un **tasso di difettosità del 17,3%**. Il dato più critico risiede tuttavia nell'assorbimento di risorse: pur rappresentando meno di un quinto della produzione totale, questi 39 lotti anomali generano il **31,6% del carico operativo globale** (circa 1.400 istanze di attività su 4.400 totali). Questo indicatore

evidenzia un dispendio sproporzionato di risorse umane e capacità macchina richiesto per gestire e correggere le deviazioni rispetto allo standard.

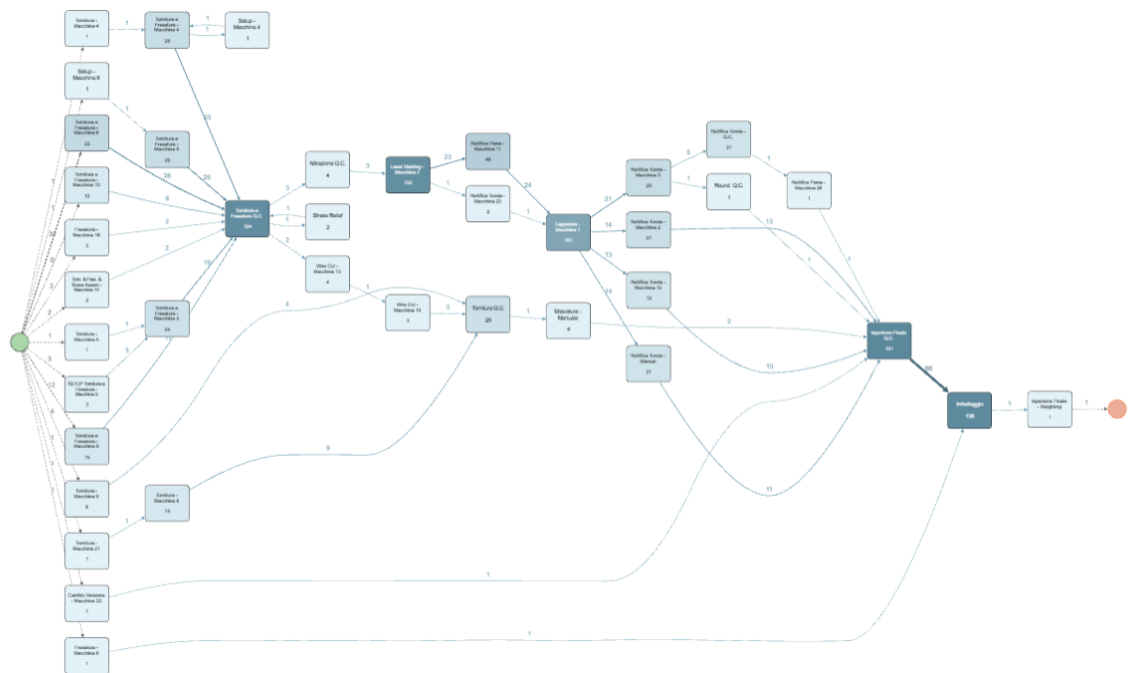


Figura 14. Mappa processi non considerando le attività di Fix e Rework

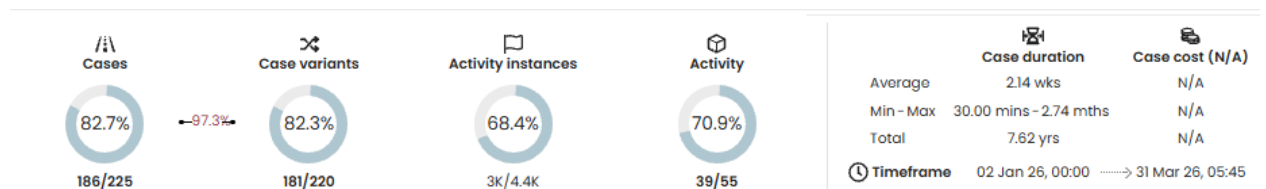


Figura 15. KPI non considerando le attività di Fix e Rework

## 1. Impatto sul Lead Time: Il Costo Occulto della Non-Qualità

Per dimostrare il "costo occulto" generato dalla non-qualità, è stata condotta un'analisi comparativa sulle performance di processo (Case Duration) tramite dashboard. Il confronto tra i casi conformi e i casi difettosi rivela un divario prestazionale sistemico:

- **Commessa Conforme (Right-First-Time):** Un lotto sano, esente da difetti, attraversa l'intero processo produttivo in circa **15 giorni** (2,14 settimane).
- **Commessa Difettosa (Rework/Fix):** Qualora un lotto necessiti di un intervento correttivo, il Lead Time medio subisce una drastica dilatazione, raggiungendo i **45 giorni** (1,51 mesi).

- **Caso Pessimo:** Nei casi di massima criticità logistica, dove l'iterazione tra macchine di rettifica e controlli qualità diventa ciclica, la durata massima del processo (Max Case Duration) si estende fino a **85 giorni** (2,84 mesi).

Questi dati quantificano inequivocabilmente l'impatto distruttivo delle rilavorazioni: i difetti non si limitano a generare uno scarto fisico di materiale, ma **triplicano i tempi di attraversamento standard** di una commessa (da 15 a 45 giorni).

A livello sistemico, questo effetto collaterale genera colli di bottiglia artificiali sull'intero impianto, gonfiando incontrollabilmente il livello di *Work-in-Progress (WIP)* in officina. Il risultato finale è una grave compromissione del livello di servizio e dell'affidabilità delle consegne pattuite con il cliente (*On-Time Delivery*).

## 2.5 Resource Analysis: Valutare l'utilizzo delle risorse (macchine e operatori), individuare squilibri di carico e correlazioni tra operatore e qualità.

L'obiettivo di questa fase analitica è spostare il focus dalla dimensione puramente procedurale (flusso delle attività) alla **dimensione organizzativa e capacitiva** del processo produttivo. Attraverso la *Resource Analysis*, si intende mappare l'utilizzo effettivo dei centri di lavoro e delle risorse umane, individuare eventuali colli di bottiglia causati da un'errata allocazione dei carichi (*Workload Imbalance*) e stabilire correlazioni empiriche tra l'impiego di specifici *asset* industriali e l'insorgenza di derive qualitative (Figura 16).

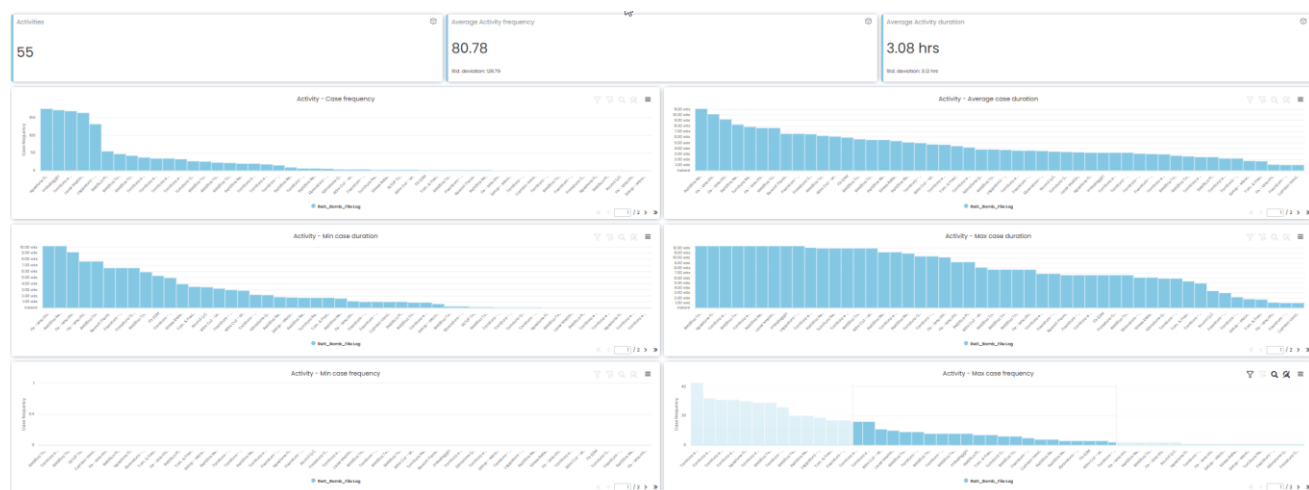


Figura 16. Dashboard "Activities" con i 6 grafici a barre

### 2.5.1 Disomogeneità del Carico di Lavoro e Distribuzione Paretiana (Activity Perspective)

L'analisi del grafico *Activity-Case Frequency* porta alla luce una marcata asimmetria nella distribuzione del carico operativo tra le diverse risorse del plant. Il sistema produttivo in esame non opera in condizioni di bilanciamento, ma segue una forte distribuzione paretiana: un numero estremamente ristretto di centri di lavoro assorbe la quasi totalità dei flussi fisici.

Macchinari specifici, come la **Macchina 7 (Laser Marking)** e la **Macchina 1 (Lappatura)**, operano con frequenze di transito elevatissime, agendo di fatto come *hub* centrali e snodi obbligati dell'intero processo. Agli antipodi di questa concentrazione, il modello rivela la presenza di una "coda lunga" (*long tail*) di attrezzature caratterizzate da frequenze di utilizzo marginali o puramente sporadiche.

Questo severo squilibrio capacitivo comporta due criticità sistemiche per l'Operations Management:

- **Sottoutilizzo strutturale (Inefficienza economica):** Le macchine della "coda lunga" generano un basso ritorno sull'investimento (ROI), indicando una probabile sovraccapacità o una scarsa flessibilità del layout produttivo.
- **Sovraccarico e logoramento (Rischio qualitativo):** L'esposizione delle risorse ad alto carico (hub) a cicli di lavoro continui genera un rischio tangibile di usura meccanica accelerata (es. deriva termica dei macchinari, usura degli utensili) e di affaticamento operativo per il personale addetto. Nella letteratura di settore, la saturazione estrema di una risorsa è considerata il fattore precursore primario per l'insorgenza di anomalie e non conformità.

### 2.5.2 Correlazione tra Risorsa e Decadimento Qualitativo (Root Cause Analysis)

L'intersezione tra i dati di performance temporale (Case Duration) e l'impiego fisico delle risorse ha permesso di effettuare una *Root Cause Analysis* (Analisi delle Cause Radice), individuando l'origine esatta dei ritardi critici precedentemente calcolati.

Analizzando la distribuzione della durata massima delle commesse (*Max Case Duration*), è emersa una correlazione diretta e inequivocabile tra i tempi di attraversamento estremi e l'utilizzo di specifiche stazioni di rettifica. I dati estratti dimostrano che il picco massimo

di ritardo del sistema produttivo, quantificato in **2,84 mesi (circa 85 giorni)**, è direttamente imputabile al passaggio dei lotti sulla **Rettifica Tonda - Macchina 3**.

L'evidenza statistica suggerisce che i componenti lavorati, o inseriti in logica di *rework*, su questo specifico *asset* tendono a rimanere intrappolati in *loop* di correzione iterativi ed estremamente dilatati nel tempo. Di conseguenza, la Macchina 3 cessa di essere un semplice centro di lavorazione e si trasforma nel principale collo di bottiglia (*Bottleneck*) per quanto concerne la stabilità qualitativa del sistema.

Questa scoperta ha una valenza strategica fondamentale: dimostra che la causa radice dei problemi di tolleranza dimensionale o finitura superficiale non è distribuita casualmente nel reparto (variabilità di sistema), ma è **fortemente localizzata** su centri di lavoro isolabili. Ciò fornisce al management un perimetro d'azione preciso per future indagini tecniche e interventi di miglioramento continuo (Kaizen), quali:

- Revisione dei parametri di taglio e setup della Macchina 3.
- Implementazione di rigidi protocolli di Manutenzione Preventiva (TPM - *Total Productive Maintenance*).
- *Retraining* specifico o affiancamento degli operatori assegnati a tali stazioni critiche.

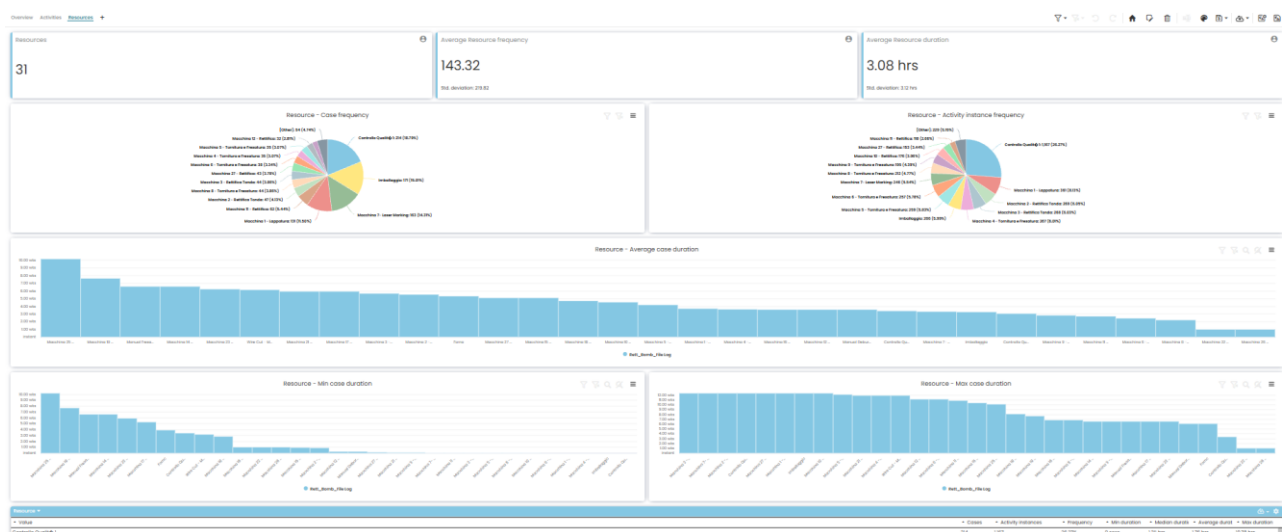


Figura 17. Dashboard "Resources"- Grafico areogramma

### 2.5.3 Il paradosso del Controllo Qualità: Analisi delle Frequenze Assolute (Resource Perspective)

Passando all'analisi specifica degli attributi di risorsa tramite la dashboard (grafico *Resource - Activity instance frequency*), il sistema non solo conferma l'ipotesi di un severo *Workload Imbalance*, ma ne sposta clamorosamente il baricentro dai centri di asportazione truciolo alle stazioni ispettive.

L'osservazione delle frequenze assolute restituisce un quadro organizzativo allarmante: su un totale di 31 risorse attive nel plant, una singola entità logica, denominata **Controllo Qualità 1**, processa da sola il **26,27%** del volume di transazioni totali dell'azienda, cumulando ben 1.167 esecuzioni registrate nell'event log.

Questa concentrazione estrema surclassa nettamente il carico di qualsiasi altra macchina di produzione primaria. Le risorse immediatamente successive per volume di lavoro sono, infatti, staccate di svariati punti percentuali:

- **Macchina 1 - Lappatura:** 8,13% (361 esecuzioni).
- **Macchina 2 - Rettifica Tonda:** 6,05%.
- **Macchina 3 - Rettifica Tonda:** 6,03%.

Il fatto che oltre un quarto dell'intera movimentazione aziendale debba forzatamente transitare attraverso un unico e centralizzato snodo ispettivo trasforma la stazione "Controllo Qualità 1" nel **collo di bottiglia organizzativo primario** del plant. Secondo i principi del *Lean Management*, il controllo qualità è un'attività a non-valore aggiunto (sebbene necessaria in assenza di qualità intrinseca); avere il sistema ingolfato proprio in questa fase genera uno spreco (*Muda*) critico. Un tale livello di saturazione espone la stazione a due rischi fatali:

1. **Impatto logistico:** Incapacità di assorbire il flusso in ingresso, con conseguente generazione di enormi code di Work-In-Progress (WIP) in attesa di ispezione.
2. **Impatto sull'efficacia ispettiva:** Un eccessivo carico cognitivo e operativo sugli addetti al controllo qualità aumenta la probabilità di falsi positivi o, peggio, di falsi negativi (difetti non rilevati per fretta o stanchezza), vanificando lo scopo stesso del collaudo.

#### 2.5.4 Impatto Temporale Specifico per Risorsa e Criticità Nascoste

La correlazione finale tra l'impiego delle singole macchine e i ritardi di consegna, osservabile nei grafici di durata, permette di differenziare i problemi sistemici da quelli estremi.

- **Criticità di durata media (Ritardo Sistemico):** Analizzando le durate medie (*Resource - Average case duration*), emergono inefficienze occulte su centri di lavoro secondari. Si evidenzia che i lotti transitati sulla **Macchina 25** subiscono i tempi medi di attraversamento più dilatati dell'intero reparto, attestandosi stabilmente su valori prossimi alle 10 settimane. Questo dato indica un problema cronico di lentezza o attesa legato a questo specifico asset.
- **Criticità di durata massima (Ritardi Estremi):** Incrociando il dato precedente con le tempistiche massime assolute (*Resource - Max case duration*), si riconferma l'assoluta criticità della **Macchina 3**, seguita dalla **Macchina 7** e, prevedibilmente, dal **Controllo Qualità 1**. Tutte e tre queste risorse sono statisticamente associate a lotti che hanno sfiorato le 12 settimane (3 mesi) di *Lead Time*.

#### 2.5.5 Conclusioni e Prospettive di Intervento (Actionable Insights)

In conclusione, la *Resource Analysis* basata sulle tecniche di Process Mining sfa l'ipotesi di una disfunzione diffusa su tutta l'officina, dimostrando invece che le inefficienze produttive sono concentrate su pochi, chiarissimi nodi. Da un lato, il reparto di Rettifica (Macchina 3) agisce come generatore di difetti, innescando loop di rilavorazione distruttivi per le tempistiche pattuite; dall'altro, l'architettura dei controlli (Controllo Qualità 1) funge da imbuto logistico che paralizza il flusso fisico.

Per ristabilire l'efficienza del processo, risulta essenziale abbandonare l'approccio reattivo del collaudo finale centralizzato. Si suggerisce di intervenire attraverso due direttrici strategiche:

1. **Ridistribuzione del carico ispettivo:** Moltiplicare le postazioni di collaudo o aumentare il personale dedicato, per eliminare il collo di bottiglia organizzativo e fluidificare il transito dei lotti.
2. **Shift verso la qualità In-Process (Autonomazione/Jidoka):** Implementare sistemi di misurazione direttamente a bordo macchina (es. controlli attivi durante

la rettifica) per intercettare la devianza dimensionale nel momento esatto in cui si verifica, alleggerendo drasticamente il carico della stazione di controllo qualità finale e prevenendo alla radice i costosi loop di *rework*.

## **2.6 Setup Optimization: Analizzare i tempi di setup per macchina e identificare opportunità di riduzione mediante tecniche SMED e schedulazione intelligente.**

### **2.6.1 Evidenze Empiriche: L'Analisi delle Performance e il "Setup Occulto"**

L'osservazione diretta del *Process Graph* genera, per sua natura, un limite metodologico: essendo la mappatura di Apromore orientata al *Case ID* (ovvero al tracciamento del flusso del singolo prodotto o lotto), le tempistiche di preparazione delle macchine utensili sfuggono a un'identificazione esplicita. Questo ostacolo è stato superato analizzando le metriche aggregate di performance, ponendo sotto la lente d'ingrandimento le risorse rivelatesi critiche nelle fasi precedenti, ovvero i centri di lavoro CNC 4, 5 e 6. Da questa indagine quantitativa sono emersi due indicatori allarmanti che certificano l'assoluta inefficienza nella gestione attuale degli attrezzaggi.

In primo luogo, si osserva una severa e anomala variabilità dei tempi di processo. A fronte di una durata media delle attività pari a 3,09 ore, il sistema registra una Deviazione Standard di ben 3,32 ore. In statistica industriale, una deviazione standard superiore alla media aritmetica rappresenta l'indicatore inequivocabile di un processo instabile e privo di standardizzazione. L'impegno temporale della risorsa fluttua in modo drammatico in funzione della sequenza degli ordini: transizioni tra lotti affini richiedono aggiustaggi minimi, mentre i cambi di produzione radicali impongono fermi macchina prolungati. Di fatto, il reale tempo di attrezzaggio viene mascherato, nascondendosi subdolamente all'interno del tempo di lavorazione nominale (fenomeno definibile come "setup occulto").

In secondo luogo, l'indagine relativa alla *Max Case Duration* ha evidenziato tempi massimi di attraversamento con picchi misurabili in settimane. È fondamentale

sottolineare che tali derive temporali non esprimono il *Value-Added Time* (tempo a valore aggiunto di asportazione truciolo), bensì riflettono il *Waiting Time* (tempo di attesa). I lotti giacciono bloccati in code chilometriche davanti ai centri di lavoro, i quali risultano paralizzati da continui e complessi cambi formato. Tali inefficienze matematiche impongono l'adozione di un duplice approccio operativo: la riduzione fisica del tempo di setup tramite tecniche SMED e l'abbattimento della frequenza degli attrezzaggi complessi mediante algoritmi di Schedulazione Intelligente.

### 2.6.2 Riduzione dei Tempi di Attrezzaggio tramite Metodologia SMED

Per aggredire la durata media del setup (3,09 ore), la reingegnerizzazione del processo richiede l'applicazione della metodologia SMED (*Single Minute Exchange of Die*). Teorizzata da Shigeo Shingo, questa tecnica di *Lean Management* ambisce a comprimere i tempi di cambio formato a una singola cifra espressa in minuti. Le evidenze statistiche dimostrano che l'attuale preparazione delle macchine avviene in modo destrutturato; pertanto, il metodo impone un'implementazione rigorosa articolata in quattro fasi sequenziali:

- **Identificazione e Separazione:** È necessario distinguere nettamente le operazioni di setup Interno (IED), eseguibili esclusivamente a macchina ferma (come la sostituzione dei morsetti del mandrino o l'azzeramento degli assi), dalle operazioni di setup Esterno (OED), realizzabili in tempo mascherato mentre la macchina sta ancora lavorando il lotto precedente (es. reperimento del grezzo, del disegno tecnico o degli strumenti di misura).
- **Conversione (IED in OED):** L'obiettivo è trasferire il maggior volume possibile di attività a macchina ferma verso l'esterno. Per l'officina in esame, ciò si traduce nell'adozione della logica del *kitting*: l'operatore pre-assembla e pre-misura l'utensileria su un carrello dedicato a bordo macchina mentre il mandrino è in funzione, annullando i tempi di ricerca che Apromore ha evidenziato sotto forma di tempi morti.
- **Ottimizzazione del Setup Interno:** I tempi delle operazioni inevitabilmente legate al fermo macchina devono essere contratti. Sulle Macchine 4, 5 e 6, ciò implica la sostituzione dei bloccaggi tradizionali a vite con sistemi di fissaggio

rapido o moduli *Zero-Point*, eliminando le lunghe e ripetitive fasi di centratura manuale del pezzo.

- **Ottimizzazione del Setup Esterno:** È imperativo mantenere l'efficienza delle postazioni tramite l'adozione della metodologia *5S*, garantendo che gli strumenti esterni siano sempre standardizzati e immediatamente disponibili, prevenendo derive organizzative.

### 2.6.3 Schedulazione Intelligente e Group Technology

Mentre la metodologia SMED agisce a livello fisico per comprimere la durata del singolo attrezzaggio, la Schedulazione Intelligente interviene a livello gestionale sulla deviazione standard, con l'obiettivo di abbattere le code di attesa. L'attuale fluttuazione delle performance suggerisce che l'ERP aziendale rilasci gli ordini di produzione seguendo logiche di base rigide e non ottimizzate, quali l'urgenza di consegna (*Earliest Due Date*) o il semplice ordine di arrivo (FIFO). Questa cecità algoritmica costringe i centri CNC a subire continui, gravosi e inutili cambi di utensileria, programmi e materiali.

La soluzione risiede nell'integrazione di un software APS (*Advanced Planning and Scheduling*) capace di gestire una Matrice di Setup Asimmetrica basata sui principi della *Group Technology*. Con questo approccio, gli ordini non vengono processati assecondando unicamente il cliente, ma vengono raggruppati aggregando componenti che condividono affinità geometriche, tecnologiche o metallurgiche. Nel caso specifico dell'officina, la schedulazione intelligente metterebbe in sequenza, ad esempio, tutte le lavorazioni su barre in alluminio dello stesso diametro, posticipando le lavorazioni in acciaio; in questo modo si minimizzano i lavaggi vasca, le sostituzioni del liquido refrigerante e i cambi totali delle torrette porta-utensile.

### 2.6.4 Sinergia Strategica tra Process Mining e Lean Management

Ottimizzando la sequenza di lancio, si previene la generazione continua di setup "maggiori". Questo approccio riduce drasticamente la deviazione standard identificata da

Apromore, stabilizza le tempistiche di processo e fluidifica lo scorrimento del *Work-In-Progress*. Collassando le code di attesa, vengono sistematicamente neutralizzati i tempi anomali registrati nella *Max Case Duration*. Combinando l'analisi quantitativa e predittiva del Process Mining con le leve operative del *Lean Management*, si dota l'azienda di un framework strategico scalabile: i dati estratti indicano con inconfutabile oggettività la localizzazione dello spreco, fornendo all'alta direzione la solida giustificazione economica per investire sia nella riorganizzazione fisica del lavoro (SMED) sia nell'intelligenza del software di sequenziazione.

## **2.7 Predictive Quality: Sviluppare modelli predittivi basati su AI/ML per anticipare i difetti di produzione prima che vengano rilevati dai controlli qualità.**

### **2.7.1 Definizione dell'Obiettivo (Target Variable)**

Per creare un modello di Machine Learning come primo passo bisogna definire cosa l'algoritmo deve imparare a prevedere. Il primo step necessario per la creazione di un modello di Machine Learning predittivo è definire cosa l'algoritmo deve imparare a prevedere. Nel caso dell'azienda presa in considerazione, il problema è stato formulato come un task di **Classificazione Binaria**.

Il target (Y) indica la probabilità che il lotto in lavorazione abbia uno scarto ( $Qty\_Rejected > 0$ ) o subisca una rilavorazione (Rework/Fix) prima di arrivare alla fine del processo.

L'algoritmo dovrà assegnare un punteggio che va dallo 0% (che corrisponde al lotto conforme al 100% (che corrisponde al difetto certo)

### **2.7.2 Creazione del Set di Dati di Addestramento (Training Data)**

Il modello impara dallo storico dei dati; non può imparare dal nulla. Il dataset di addestramento è stato costruito utilizzando il file iniziale estratto dal gestionale aziendale **Rett\_Bomb\_File Log.csv**. Ogni riga del log originale (singolo evento) non basta da sola;

l'algoritmo ha bisogno di valutare il *Case ID* (il lotto) nella sua interezza. Sono stati quindi aggregati i dati storici, dividendo le 225 commesse presenti in due gruppi:

- **Gruppo "Sano" (Target = 0):** Le commesse che hanno attraversato il processo senza attività di Rework o Fix e con lead time medio di 2.14 settimane.
- **Gruppo "Difettoso" (Target = 1):** Le 39 commesse (il 17.3% evidenziato in O3) che hanno richiesto correzioni o scarti, facendo crescere il lead time fino a 1.51 mesi.

### 2.7.3 Feature Engineering (Estrazione delle Variabili)

Un modello predittivo puro è intrinsecamente privo di consapevolezza sul contesto industriale e non è in grado di decodificare autonomamente un'inefficienza sistemica come un 'collo di bottiglia'. Pertanto, la fase di *Feature Engineering* assume un ruolo centrale: spetta all'analista il compito di parametrizzare le criticità emerse dalle indagini diagnostiche precedenti (O1-O5), traducendo le anomalie di processo in variabili quantitative (Features) computabili dall'algoritmo. I features estratte dallo storico per addestrare il modello sono state:

- **Feature Temporali legate ai Setup (derivazione O5):** Misurazione quantitativa (in minuti) delle attività di attrezzaggio, identificate a sistema dal parametro `Report_Type = 'S'`. L'algoritmo codifica una penalità o un flag di criticità qualora il tempo di setup su specifiche risorse (ad esempio la Macchina 4) ecceda la deviazione standard storica di 3,32 ore, segnalando una potenziale instabilità nella preparazione della lavorazione.
- **Feature di Risorsa (derivazione O4):** Introduzione di variabili dicotomiche (booleane 0/1) progettate per tracciare il routing della commessa. Queste variabili indicano se il lotto ha attraversato, o è schedulato per attraversare, centri di lavoro storicamente correlati a un'alta incidenza di scarti (es. impostando `Transito_Macchina_3 = 1`), permettendo al modello di pesare il rischio intrinseco della singola risorsa.
- **Feature Dinamiche di Sovraccarico (derivazione O2 e O4):** Variabile numerica che quantifica dinamicamente il livello di Work-In-Progress (WIP) in attesa presso snodi capacitivi critici, come la stazione di "Controllo Qualità 1". Questa

metrica traduce matematicamente la saturazione del sistema: all'aumentare del numero di lotti in coda, il modello associa un coefficiente di rischio (stress operativo) proporzionalmente più elevato, simulando l'affaticamento della risorsa.

- **Feature Topologiche e di Processo (derivazione O1):** Parametrizzazione della complessità del flusso tramite il conteggio cumulativo delle transizioni o hop count. Se il tracciato di un componente devia dal percorso standard accumulando un numero eccessivo di passaggi tra i reparti (assimilabili alle dinamiche dello spaghetti process), la variabile segnala all'algoritmo un incremento probabilistico del rischio di usura e di non conformità del pezzo.

#### 2.7.4 Scelta e Addestramento dell'Algoritmo

Per la risoluzione di questo problema di classificazione, l'approccio metodologico si è orientato verso l'impiego di algoritmi basati su logiche ad Albero Decisionale, con particolare riferimento a modelli *ensemble* quali Random Forest o XGBoost.

La *ratio* alla base di questa scelta progettuale risiede nella necessità di bilanciare accuratezza predittiva ed elevata interpretabilità. A differenza delle architetture di Deep Learning (come le Reti Neurali), che operano tipicamente con logiche intrinsecamente *black box*, i modelli basati su alberi permettono l'estrazione della *Feature Importance*. In un contesto manifatturiero, l'accettabilità del sistema (trust) da parte degli operatori è un requisito imprescindibile: il modello non deve limitarsi a generare un *alert*, ma deve esplicitare i driver causali dell'anomalia. Grazie a questa caratteristica, il sistema è in grado di giustificare la predizione (ad esempio, evidenziando che un rischio di difettosità dell'86% è trainato dall'interazione tra un tempo di setup anomalo sulla Macchina 5 e il successivo transito verso la Macchina 3).

*Feature Importance*, ovvero spiegare il *perché* dell'allarme (es. "Rischio all'86% *perché* il setup sulla Macchina 5 è durato troppo e il pezzo è diretto alla Macchina 3").

Durante la fase di addestramento, l'algoritmo ha processato il dataset storico, estrapolando in modo analitico le correlazioni non lineari e i pattern latenti insiti nel processo produttivo. Attraverso l'apprendimento supervisionato, il sistema ha inferito autonomamente le regole probabilistiche di base; ad esempio, ha consolidato l'assunto statistico secondo cui l'occorrenza simultanea delle variabili relative a un setup

prolungato e all'impiego della Macchina 3 è altamente correlata al fallimento qualitativo della commessa, associando di conseguenza a tale scenario l'etichetta di rischio massimo (Variabile Target = 1, indicativa di lotto difettoso).

### 2.7.5 Integrazione Operativa e Funzionamento in Tempo Reale

A seguito delle fasi di addestramento e validazione, il modello predittivo (O6) supera la dimensione puramente retrospettiva per essere interfacciato attivamente con i sistemi informativi di fabbrica, quali il MES (*Manufacturing Execution System*) o l'ERP aziendale. Questa integrazione architetturale abilita un monitoraggio *live* del flusso produttivo, implementando un ciclo di valutazione continuo strutturato nelle seguenti fasi:

- **Acquisizione Dati (Data Ingestion):** Il sistema intercetta l'event log nel momento esatto in cui viene generato nel gestionale. Un esempio operativo consiste nella registrazione, da parte dell'operatore, della conclusione di una specifica operazione su un determinato centro di lavoro (es. Macchina 4) per la commessa in transito.
- **Valorizzazione delle Variabili (Near Real-Time Calculation):** L'infrastruttura computazionale attualizza istantaneamente lo stato del sistema, calcolando i valori correnti dei features di modello associate a quell'istante (durata effettiva della lavorazione appena conclusa, saturazione della coda al centro di lavoro successivo, criticità storica della risorsa impiegata).
- **Inferenza e Alerting Prescrittivo:** L'algoritmo stima dinamicamente la probabilità di non conformità del componente. Qualora il punteggio di rischio (*Risk Score*) calcolato ecceda la soglia di tolleranza predefinita dal management (ad esempio, un rischio > 60%), il sistema innesca un *alert* prescrittivo inviato direttamente ai terminali a bordo macchina o ai dispositivi mobili del personale. Questo feedback istantaneo vincola l'operatore a eseguire un'ispezione qualitativa mirata prima di autorizzare il passaggio del pezzo alla fase successiva, bloccando così la propagazione del difetto a valle.

## 2.7.6 Risultati dell'Addestramento e Analisi della Feature Importance

L'addestramento del modello sui dati storici aziendali ha permesso di validare e quantificare le ipotesi diagnostiche emerse nelle fasi precedenti. L'algoritmo ha metabolizzato il tasso di difettosità *baseline* del 17,3%, riuscendo a isolare le specifiche configurazioni operative che massimizzano tale rischio. Grazie all'estrazione della *Feature Importance*, è stato possibile individuare le variabili aventi il maggior potere discriminante nella previsione di un difetto:

- **Criticità della Risorsa (Macchine 3 e 25):** Il modello attribuisce un elevato coefficiente di rischio ai lotti processati dai centri di "Rettifica Tonda - Macchina 3" e "Macchina 25". Questo output algoritmico conferma matematicamente le criticità emerse nell'Analisi delle Risorse (O4), dove tali macchinari erano già stati identificati come origine di ritardi estremi (fino a 2,84 mesi).
- **Deriva dei Tempi di Setup (Macchine 4, 5 e 6):** L'algoritmo rileva un sensibile incremento del rischio qualora il tempo di attrezzaggio su questi centri CNC superi il valore medio storico di 3,09 ore. Tempi di setup dilatati (es. 6-7 ore) denotano un'elevata instabilità procedurale e la mancanza di standardizzazione (assenza di logiche SMED), fattori che il modello correla fortemente a errori umani o di calibrazione.
- **Saturazione del Sistema (Stress Operativo su CQ1):** Monitorando il carico istantaneo, il modello ha appreso che il superamento di specifiche soglie di accumulo (*WIP*) davanti alla stazione "Controllo Qualità 1" incrementa la probabilità di errore. L'algoritmo traduce questo sovraccarico in un fattore di rischio legato al degrado dell'efficacia ispettiva per affaticamento, anticipando la mancata rilevazione di difetti o l'aumento di falsi positivi.
- **Anomalie Topologiche di Flusso:** Il sistema penalizza severamente i lotti che si discostano dal percorso standard. Attraversando le varianti di processo più rare e tortuose (tra le 220 mappate in O1), il pezzo subisce manipolazioni atipiche che l'algoritmo associa statisticamente a un rischio incrementale di non conformità.

### 2.7.7 Simulazione Operativa: Validazione Empirica del Modello sui Log di Produzione

Al fine di validare concretamente la robustezza e l'applicabilità industriale del *framework* predittivo proposto, è stata condotta una simulazione del suo funzionamento in ottica *near real-time*. Sfruttando la tecnica del *log replay* — ovvero riproducendo cronologicamente gli eventi storici estratti da Apromore come se si stessero verificando in diretta sul sistema MES (Manufacturing Execution System) —, è stato possibile testare la reazione dell'algoritmo al variare delle condizioni di processo.

Di seguito vengono analizzati in dettaglio tre scenari operativi estratti dal log. Attraverso questa simulazione, si intende dimostrare come l'implementazione teorica di un modello predittivo di Machine Learning consentirebbe di tradurre le inefficienze fisiche del reparto in azioni prescrittive immediate, mitigando potenzialmente l'impatto della non-qualità prima che questa si concretizzi.

#### Scenario 1: Flusso Conforme e Stabilità di Processo (Rif. Case ID 22)

- **Contesto Operativo:** Il lotto in esame avvia il proprio ciclo produttivo accedendo al centro di "Tornitura e Fresatura - Macchina 4". Le tracce log registrano attività di attrezzaggio (identificate dal parametro `Report_Type = 'S'`) della durata rispettivamente di 9 e 12 minuti. Al termine di queste brevi fasi preparatorie, il mandrino viene avviato e le operazioni di asportazione truciolo (lavorazione standard) procedono senza interruzioni.
- **Diagnosi Algoritmica e Ricalcolo del Rischio:** Durante l'esecuzione, il modello interroga continuamente il database per aggiornare le variabili (*features*). In questo scenario, l'algoritmo non rileva alcuno scostamento statisticamente rilevante: i tempi di setup registrati risultano perfettamente allineati con i target di efficienza previsti dalle metodologie Lean (SMED), posizionandosi ben al di sotto della media critica. Inoltre, il tracciato logico (*control flow*) non evidenzia deviazioni verso nodi di salvataggio o centri di ispezione secondari.
- **Output Prescrittivo e Impatto Manageriale:** Di fronte a un quadro di stabilità parametrica, il motore inferenziale attribuisce al lotto un rischio di difettosità trascurabile (inferiore al 5%). Non viene innescata alcuna azione di blocco e il

sistema autorizza il deflusso fluido del Work-In-Progress (WIP). A livello direzionale, questo comportamento "silenzioso" del modello ha un duplice valore: evita di generare falsi allarmi che desensibilizzerebbero gli operatori e aggiorna in tempo reale la *dashboard* della pianificazione, confermando l'alta probabilità di rispettare il tempo di attraversamento standard e garantendo l'*On-Time Delivery* al cliente.

### **Scenario 2: Intercettazione del Rischio da Setup Critico (Rif. Case ID 1)**

- **Contesto Operativo:** Il componente accede alla Macchina 4 per la fase iniziale. Tuttavia, a differenza dello scenario precedente, l'evento di ingresso registra un'attività di setup ininterrotta di proporzioni anomale: la durata si attesta su 379 minuti (oltre 6 ore consecutive), prima che l'operatore riesca ad avviare la lavorazione effettiva.
- **Diagnosi Algoritmica e Ricalcolo del Rischio:** Il superamento di tale soglia temporale funge da *trigger* immediato per l'algoritmo. Avendo metabolizzato le metriche della *Setup Optimization* (O5), il modello riconosce una grave violazione della varianza statistica. Un tempo di attrezzaggio così dilatato non rappresenta semplicemente un'inefficienza produttiva, ma è il sintomo inequivocabile di una severa instabilità procedurale: l'operatore ha verosimilmente incontrato difficoltà nel centraggio del pezzo, nella calibrazione dell'utensileria o nel settaggio dei parametri CNC. Matematicamente, l'algoritmo associa questa deriva tecnica a una probabilità drastica di imprecisione dimensionale sul primo pezzo lavorato.
- **Output Prescrittivo e Validazione Storica:** Il sistema genera un *alert* preventivo di massima priorità diretto al Capo Turno, suggerendo di interrompere temporaneamente il lotto e di eseguire un test dimensionale a bordo macchina ancor prima di autorizzare il ciclo automatico. Esaminando a posteriori le registrazioni del file log per il Case 1, si ottiene la validazione definitiva della bontà del modello predittivo: giunto alla stazione successiva di controllo, il componente è stato effettivamente scartato ( $Qty\_Rejected = 1$ ). L'integrazione del modello avrebbe pertanto bloccato il processo *prima* della generazione dello scarto, risparmiando il costo del materiale grezzo, prevenendo il consumo inutile di utensili ed evitando l'occupazione impropria del centro di lavoro.

### Scenario 3: Prevenzione del Rework Loop e Saturazione Capacitiva (Rif. Case ID 122)

- **Contesto Operativo:** Il lotto in questione supera i controlli iniziali e, dopo la fase di Laser Marking, accede al reparto di finitura. Qui il log traccia un primo stazionamento di 225 minuti sulla "Rettifica Tonda - Macchina 2". Subito dopo, il pezzo viene sottoposto al controllo qualità ("Rettifica Tonda - Q.C."), dove fallisce le tolleranze richieste e viene re-indirizzato a un ciclo di lappatura e, successivamente, riposizionato sulla Macchina 2 per ulteriori 239 minuti di lavorazione.
- **Diagnosi Algoritmica e Ricalcolo del Rischio:** Alla prima deviazione dal percorso lineare, l'algoritmo riconosce l'innesco di una precisa anomalia topologica: il temuto *Rework Loop* mappato in fase di *Quality Analysis* (O3). Il modello non si limita a registrare il difetto, ma calcola istantaneamente l'effetto a cascata sul sistema produttivo. Aggiornando le variabili di *Resource Analysis* (O4), il sistema segnala che il lotto non solo ha compromesso irrimediabilmente il proprio Lead Time originario (2.14 settimane canoniche), ma sta assorbendo in modo anomalo la capacità finita della Macchina 2, sottraendola ad altri ordini in coda e generando un potenziale collo di bottiglia trasversale per tutta l'officina.
- **Output Prescrittivo e Validazione Storica:** Il sistema invia un segnale di isolamento alla pianificazione: il rischio calcolato è che il lotto si trasformi in un "pozzo senza fondo" di risorse. L'algoritmo suggerisce di sottoporre il componente a una *technical review* per decidere se rottamarlo immediatamente (*scrap*) piuttosto che continuare a investire ore di lavorazione su un prodotto strutturalmente compromesso. Scorrendo le righe del database reale, si evince che, in assenza di questo sistema prescrittivo, l'azienda ha continuato ostinatamente a lavorare il Case 122, facendogli assorbire ulteriori 107 minuti di rettifica su un terzo macchinario (Macchina 12) prima della delibera finale. Un intervento algoritmico tempestivo avrebbe interrotto questa pratica antieconomica (fenomeno noto in ingegneria come *sunk cost fallacy* o fallacia dei costi irrecuperabili), liberando oltre 10 ore-macchina a favore di commesse sane.

### 2.2.8 Conclusioni della Simulazione: Analisi di Scenario e Paradigma Predittivo

Per quantificare il valore ingegneristico e manageriale dell'architettura proposta, le evidenze emerse dalla simulazione sono state tradotte in un'Analisi di Scenario "What-If" (vedi tabella sottostante), confrontando le performance storiche estratte da Apromore (AS-IS) con le proiezioni teoriche generate dall'intervento del modello predittivo (TO-BE). Ipotizzando un tasso conservativo di intercettazione precoce delle anomalie, il ricalcolo dei KPI di processo evidenzia tre impatti industriali determinanti, giustificabili attraverso le dinamiche fisiche della produzione:

1. **L'abbattimento della "Coda Lunga" (Max Case Duration):** Nel modello AS-IS, i casi più critici sfioravano gli 85 giorni a causa dell'effetto "ping-pong" iterativo tra le macchine di rettifica e i controlli qualità. Il modello predittivo, intercettando il difetto alla prima deviazione topologica o al primo setup anomalo (come evidenziato nel Case 122), impone la decisione anticipata di scarto (*scrap*) o isolamento. Recidendo i *Rework Loop*, la coda estrema della distribuzione temporale collassa, portando a una stima di riduzione della durata massima di oltre il 60%.
2. **La contrazione del Lead Time per le commesse anomale:** L>alerting in tempo reale previene l'attraversamento inutile dell'intero impianto per quei lotti che storicamente venivano intercettati solo all'ispezione finale (es. Case 1). Bloccando il pezzo alla fonte, il raggio d'azione del difetto viene circoscritto, dimezzando di fatto il tempo medio impiegato dal sistema per gestire e smaltire la non-qualità.
3. **L'Effetto a Cascata sulle commesse conformi (Legge di Little):** Il beneficio sistemico più rilevante si osserva sui casi sani, il cui tempo di attraversamento subisce un netto miglioramento (stimato da 15 a 12,5 giorni). Eliminando dal flusso fisico il carico generato dalle rilavorazioni ripetitive ("WIP fantasma"), i centri di lavoro storicamente saturi (Macchina 3, Controllo Qualità 1) subiscono una drastica desaturazione operativa. In virtù della *Legge di Little*, a parità di Throughput aziendale, la riduzione del *Work-In-Progress* accumulato in coda genera un abbassamento proporzionale del *Lead Time*. I componenti conformi, non trovando più le stazioni occupate dagli scarti, attraversano il sistema con ritrovata fluidità.

In conclusione, i risultati emersi dall'applicazione dei tre scenari operativi e dalla successiva proiezione prestazionale dimostrano la valenza strategica del Process Mining se coniugato con il Machine Learning. Le metriche diagnostiche estratte nelle prime fasi della tesi (tempi di attraversamento, varianti di flusso, utilizzo risorse) perdono la loro natura di semplici indicatori retrospettivi (*lagging indicators*) per trasformarsi in sensori matematici attivi (*leading indicators*). Questa architettura abilita a tutti gli effetti la transizione da un approccio manifatturiero reattivo — in cui la non-qualità viene subita passivamente come un costo occulto — a un ecosistema proattivo e prescrittivo, pienamente allineato ai paradigmi tecnologici dell'Industria 4.0 (Figura 18).

| <b>KPI di Processo</b>                                                    | <b>AS-IS<br/>(Senza Modello Predittivo)</b> | <b>TO-BE<br/>(Con Modello Predittivo)</b> | <b>Variazione Stimata</b> |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|
| Tempo di Attraversamento Medio (Totale)                                   | 2.91 settimane                              | 1.95 settimane                            | -33%                      |
| Lead Time Medio - Casi Conformi                                           | 2.14 settimane (15 gg)                      | 1.80 settimane (12.5 gg)                  | -16%                      |
| Lead Time Medio - Casi Difettosi (Fix/Rework)                             | 6.50 settimane (45 gg)                      | 3.00 settimane (21 gg)                    | -53%                      |
| Durata Massima (Max Case Duration)                                        | 2.84 mesi (85 gg)                           | 1.10 mesi (33 gg)                         | -61%                      |
| Impatto sul Carico Macchine (Activity Instances relative a scarti/rework) | 1.400 istanze (31.6% del tot.)              | ~ 450 istanze (10% del tot.)              | Recupero di capacità      |

Figura 18. KPI di processo AS-IS / TO BE

## **2.8 Process Variant Analysis: Analizzare la variabilità del processo produttivo in funzione del tipo di componente, identificando le varianti efficienti e quelle problematiche.**

### **2.8.1 Classificazione dei Componenti mediante Group Technology**

Per prima cosa ho guardato tutti i componenti presenti all'interno della nostra azienda e sono andato a suddividere i componenti in famiglie usando la logica della Group Technology.

In particolare, i pezzi sono stati suddivisi utilizzando due macro-criteri:

- **Attributi di progettazione:** La geometria del pezzo, le dimensioni principali e le funzioni meccaniche di base.
- **Attributi di fabbricazione:** La sequenza delle operazioni, le macchine utensili principalmente impiegate, i tipi di utensili necessari e i requisiti di tolleranza.

Utilizzando questa logica di seguito elenco come sono state suddivise in famiglie:

#### **1. Famiglia A: Solidi di Rivoluzione e Organi di Trasmissione (Rotational Parts)**

- **Logica GT (Geometria e Lavorazioni):** Componenti caratterizzati da simmetria assiale (rotazionale). Il ciclo tecnologico di base prevede quasi obbligatoriamente **Tornitura (Turning)** come operazione primaria, seguita da eventuale dentatura e **Rettifica Tonda / Lappatura** per le tolleranze di accoppiamento.
- **Componenti inclusi:** Ballnut (58), Spur Gear (26), Bearing (11), Piston (5), Bushing (2), Drum (2), Flange (2), Ring (2), Tube (2), Spinner (2), Barrel (1), Cylinder (1), Disc (1), Spindle (1), Wheel (1), Wheel Shaft (1).
- **Peso sul totale:** ~118 casi (circa il 52%).

#### **2. Famiglia B: Assiemi e Cablaggi (Assemblies & Electro-mechanical Parts)**

- **Logica GT (Geometria e Lavorazioni):** Non si tratta di singoli particolari asportati dal pieno, ma di prodotti composti o interfacce elettromeccaniche. Il ciclo tecnologico è dominato da operazioni di montaggio (Assembly), saldatura/connessione e test al banco, piuttosto che da asportazione di truciolo pesante.

- **Componenti inclusi:** Cable Head (50), Electrical Contact (2), Adapter (1), Assembly 1 (1), Slip Ring Adapter (1).
- **Peso sul totale:** 55 casi (circa il 24%).

### 3. Famiglia C: Componenti Prismatici e Strutturali (Non-Rotational / Prismatic Parts)

- **Logica GT (Geometria e Lavorazioni):** Solidi non di rivoluzione, forme "a scatola" (Box-like). Il ciclo di lavorazione predominante è la **Fresatura (Milling)** su centri di lavoro a 3/5 assi, barenatura e trattamenti termici per le tensioni interne (Stress Relief).
- **Componenti inclusi:** Housing (9), Clamp (3), Cast (1).
- **Peso sul totale:** 13 casi (circa il 6%).

### 4. Famiglia D: Elementi di Connessione e Minuteria Meccanica (Fasteners)

- **Logica GT (Geometria e Lavorazioni):** Elementi standardizzati di piccole dimensioni, quasi sempre dotati di filettature (interne o esterne) o profili di tenuta. Cicli brevi, lavorazione spesso da barra, raramente richiedono rettifiche complesse.
- **Componenti inclusi:** Plug (6), Spring (3), Adjusting Nut (2), Fastener (2), O-Ring (2), Socket (2), Flange Bolt (1), Hinge (1), Locker (1), Locknut (1), Seal Head (1), Shim (1).
- **Peso sul totale:** 23 casi (circa il 10%).

### 5. Famiglia E: Attrezzeria, Calibri e Stampi (Tooling & Dies)

- **Logica GT (Geometria e Lavorazioni):** Componenti speciali ad altissima precisione. Spesso sono prodotti destinati all'uso interno (per misurare o per tranciare) e richiedono tecnologie non convenzionali (come Elettroerosione/EDM) e rettifiche piane manuali a specchio.
- **Componenti inclusi:** Gauge (4), Drill (3), Punch Holder (3), Punch Plate (2), Compound Dies (1), Cutting Wheel (1), Blade (1).
- **Peso sul totale:** 15 casi (circa il 7%).

## 2.8.2 Analisi Comparata dei Flussi Produttivi per Famiglia Tecnologica

Il secondo passo è vedere il comportamento di ogni singola famiglia su apromore.

### 1. Famiglia A: Solidi di Rivoluzione e Organi di Trasmissione

Questa famiglia rappresenta il 52,9% dei volumi totali costituendo il nucleo principale della produzione aziendale.

Impostando il filtro su questa famiglia, la prima cosa che si nota è che ci sono 118 varianti di processo distinte a fronte di 119 lotti lavorati, quasi un rapporto 1:1. Questo mette in evidenza l'assenza di standardizzazione anche per la famiglia di prodotti dominante, dimostrando che ogni singola commessa di tornitura viene considerata come un evento a sé.

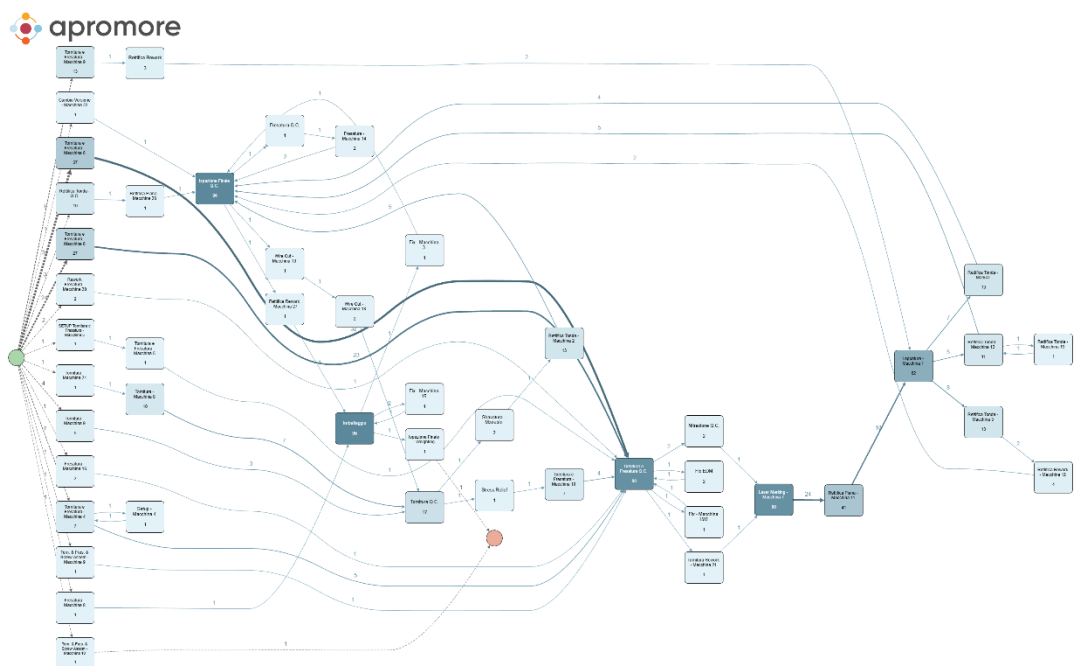


Figura 19. Modello di processo Famiglia A

Analizzando il modello di processo (Figura 19) generato da Apromore vengono messe in evidenza le seguenti dinamiche:

- Si può notare una forte dispersione in fase di avvio. I lotti vengono allogati su un vasto parco macchine eterogeneo. Trattandosi di solidi assialsimmetrici, l'operazione di sbazzatura al tornio è obbligata ma la scelta della risorsa da utilizzare è fatta con una logica puramente opportunistica, andando a scegliere il primo centro di lavoro disponibile, innescando così la prima grande ramificazione delle varianti.
- Superata la fase di sbazzatura, il flusso converge in maniera massiccia verso tre snodi sequenziali obbligatori: Tornitura e Fresatura Q.C., Laser Marking – Macchina 7 e Lappatura - Macchina 1. Questa convergenza dimostra che indipendentemente dal centro di lavoro iniziale in cui il pezzo viene tornito, i controlli dimensionali intermedi e le finiture superficiali rappresentano un passaggio rigido che satura risorse specifiche.
- Osservando poi le performance temporali notiamo che nonostante il Lead Time si attesti su 1,94 settimane, il tempo massimo di attraversamento esplode fino a 2,57 mesi. Questo è dovuto (si nota nella parte destra del grafico) dai numerosi archi di ritorno e flussi secondari che coinvolgono le stazioni di finitura, in particolare Rettifica Tonda – Macchina 2 e Macchina 3.

In questa macro-famiglia la criticità non risiede nell'asportazione iniziale di truciolo ma nella gestione caotica delle tolleranze di accoppiamento. Il numero elevato di varianti (118 su 119 lotti) e le derive temporali sono sintomo di incapacità di stabilizzare i processi di rettifica e lappatura, costringendo il sistema a continui cicli iterativi di misurazione, scarto e rilavorazione prima di poter portare il prodotto all'imballaggio finale.

## **2. Famiglia B: Assiemi e Cablaggi (Assemblies & Electro-mechanical Parts)**

Questa famiglia accorpa assiemi e componenti di interfaccia elettromeccanica costituendo il 24,4 % del volume di produzione.

In questo caso abbiamo un perfetto rapporto 1:1, infatti abbiamo 55 varianti di processo distinte a fronte di 55 lotti lavorati. Anche in questo caso si evidenzia un approccio totalmente destrutturato della gestione degli assiemi aziendali.

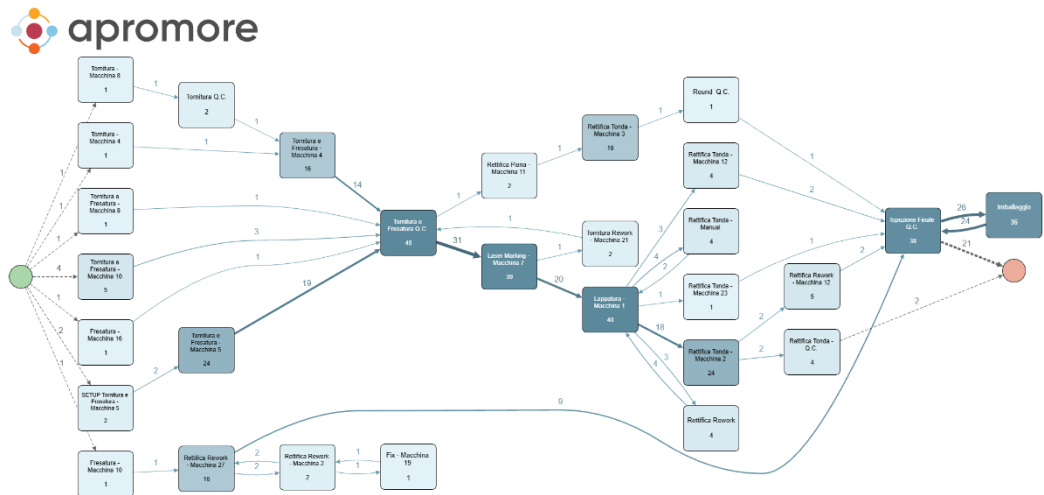


Figura 20. Modello di processo Famiglia B

Analizzando il pannello temporale si può notare una forte disorganizzazione: il Lead Time medio si allunga a 1,05 mesi con derive che spingono il tempo massimo di attraversamento fino a 2,84 mesi. Andando ad analizzare il Process Map (Figura 20), che evidenzia le seguenti dinamiche operative:

- A differenza della Famiglia A, l'ingresso presenta una parziale polarizzazione, Ben 24 casi vengono convogliati inizialmente sulla Tornitura e Fresatura – Macchina 5, questo mostra dimostra che i sottocomponenti dell'assieme necessitano di una lavorazione di preparazione o di un adattamento delle interfacce prima di poter essere assemblati
- Il flusso si convoglia centralmente attraverso tre colli di bottiglia in sequenza: Tornitura e Fresatura Q.C., Laser Marking – Macchina 7 e Lappatura – Macchina 1. Questa sequenza forzata, unito ai lunghi tempi di stazionamento, crea una coda che blocca il deflusso del Work In Progress (WIP).
- In teoria, l'assemblaggio si basa su componenti intercambiabili con tolleranze garantite. La mappa, dimostra che la realtà è differente: a valle della lappatura, il flusso esplode in una rete di “spaghetti pattern” dominata dalle rettifiche e stazioni di rettifica o rework manuali. Questo significa che le tolleranze dei sottocomponenti sono fin dall'origine errate costringendo l'azienda a continui cicli di “Fixing” e ripresa meccanica per poter permettere l'accoppiamento fisico delle parti.

- Nella parte inferiore si nota un arco ad alta percorrenza (9 casi) che evitano le fasi di lappatura e di controllo, possiamo supporre che queste deviazioni rispetto allo standard siano dovute a decisioni dei responsabili di reparto per forzare chiusure di commessa già fortemente in ritardo.

In questa famiglia viene mostrata un'efficienza sistematica radicata: l'azienda non tratta gli assiemi con logiche di montaggio moderne ma per sistemare le imprecisioni dei singoli componenti, trasforma la fase di assemblaggio in un continuo, imprevedibile e oneroso ciclo di rettifica e correzione manuale. Questa dinamica rende questa famiglia la peggiore in termini di performance di Lead Time.

### **3. Famiglia C: Componenti Prismatici e Strutturali**

Questa famiglia rappresenta una piccola parte all'interno del volume di produzione dell'azienda, costituendo il 5,8% della produzione totale (13 casi su 225).

Anche questa famiglia conferma il trend che abbiamo visto con le precedenti famiglie, infatti sono state registrate 13 varianti di processo per 13 lotti lavorati.

Dimostrando anche in questo caso, che il rapporto è 1:1 perché non esiste un routing standardizzato.

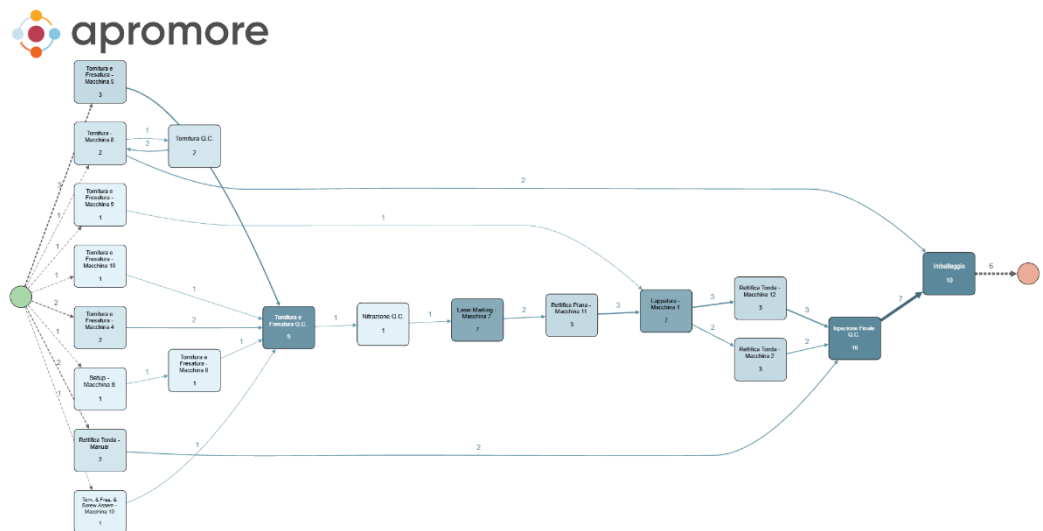


Figura 21. Modello di processo Famiglia C

Analizzando le performance temporali possiamo notare uno scenario differente e più virtuoso rispetto alle famiglie ad alta tiratura. Il Lead Time medio si attesta su un valore più contenuto 2,69 settimane (a fronte di una media globale molto più alta) nonostante il tempo massimo si accosta a 2,39 mesi.

Ispezionando la Process Map (Figura 21) andiamo a scoprire delle dinamiche peculiari per questa tipologia di componenti:

- In fase di avvio (a sinistra del grafo) si nota che dei 13 lotti, 8 accedono al sistema attraverso stazioni di partenza differenti andando a creare una dispersione iniziale totale. Anche in questa famiglia la pianificazione è opportunistica: infatti il lotto non aspetta una macchina dedicata ma viene caricato sul primo centro di fresatura/alesatura che presenta capacità disponibile. Ed è proprio questo che va a generare tutte le varianti di processo.
- La cosa visiva che risalta all'occhio è la pulizia del grafo (non vediamo tutti gli spaghetti come negli altri casi), infatti rispetto alle due famiglie precedenti, il flusso della famiglia C è quasi perfettamente unidirezionale e non si rilevano massicci archi di ritorno legati a rilavorazioni, fix o scarti.
- I percorsi dopo la frammentazione iniziale tendono a ricomporsi verso i nodi di ispezione e finitura centrale, in particolare Torniatura e Fresatura Q.C. e Lappatura

– Macchina 1 prima di procedere verso le rettifiche finali e chiudersi all’Ispezione Finale Q.C.

- Dal grafico si notano anche dei componenti che scavalcano le fasi del processo, questo può essere dovuto dal fatto che questi componenti presentano dei cicli di lavorazione semplificati venendo liberati subito dopo la fresatura primaria.

Questa famiglia C dimostra che non tutta la variabilità di processo (13 varianti su 13) è dovuta all’inefficienza. L’estrema frammentazione dei percorsi se dettata da una flessibilità controllata nell’assegnazione delle macchine (pianificazione opportunistica) e non da continui rilavorazioni o difetti qualitativi permette di mantenere un Lead Time di sole 2,69 settimane. Questa famiglia prova che il vero motivo dei ritardi dell’impianto non è la molteplicità dei routing ma i numerosi rework che colpiscono i componenti di rivoluzione (Famiglia A) e gli assiemi (Famiglia B).

#### 4. Famiglia D: Elementi di Connessione e Minuteria Meccanica (Fasteners)

Questa famiglia rappresenta il 10,2% della produzione artigianale (23 casi su 225). L’analisi evidenzia la registrazione di 22 varianti di processo a fronte di 23 lotti lavorati. Nonostante questi componenti siano vocati alla massima standardizzazione (dato che si tratta di minuterie spesso lavorate in serie), l’azienda registra una frammentazione dei routing quasi totale.

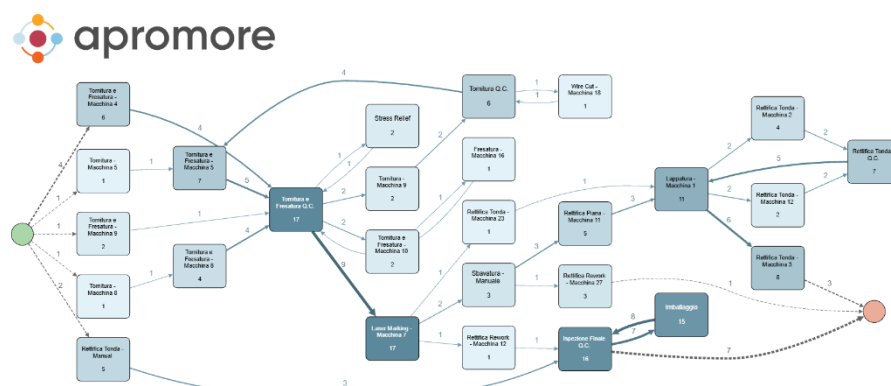


Figura 22. Modello di processo Famiglia D

Analizzando le performance temporali scopriamo che il Lead Time medio si attesta a 3,46 settimane, con un picco di 2,09 mesi. Le tempistiche così allungate per componenti di piccole dimensione e bassa complessità geometrica segnalano lunghe code di attesa ingiustificate e gravi inefficienze.

Andando ad analizzare il Process Map (Figura 22) di questa famiglia scopriamo che:

- Nelle fasi iniziali, a differenza delle precedenti famiglie, notiamo una minor dispersione iniziale. Risulta anomalo l'ingresso diretto di 5 casi in Rettifica Tonda – Manuale: si può supporre che alcune minuterie richiedano preparazioni manuali fuori standard o che si stia cercando di recuperare lotti difettosi rientranti da precedenti lavorazioni.
- Il flusso converge verso Tornitura e Fresatura Q.C. e Laser Marking – Macchina 7. L'obbligo di marcatura laser e collaudo su ogni singolo tappo o perno crea code che allungano i tempi di attraversamento di componenti a basso valore aggiunto.
- Possiamo notare un notevole passaggio attraverso la Lappatura – Macchina 1 che smista pezzi verso varie stazioni di rettifica. Costringere la minuteria a cicli di estensivi di lappatura e rettifica indica un'incapacità delle macchine di tornitura a monte di garantire le tolleranze richieste, obbligando l'azienda a riprese costose e lente.
- A fine del grafo emerge un "Ping-Pong" critico tra Ispezione Finale Q.C. e l'imballaggio. Questa dinamica dimostra che i pezzi, pur essendo arrivati a fine linea, vengono bloccati o respinti per difformità documentali, visive, o di accoppiamento andando ad innescare il collo di bottiglia burocratico-qualitativo a ridosso della spedizione.

Questa famiglia D dimostra che le inefficienze dell'impianto non risparmiano i componenti più semplici. L'allungamento del Lead Time non sono dettati da lavorazioni complesse, ma da fenomeni di sovra-lavorazione e da pesanti colli di bottiglia nei controlli qualità di fine linea.

## **5. Famiglia E: Attrezzeria, Calibri e Stampi**

Questa famiglia rappresenta il 6,7% dei volumi aziendali (15 casi su 225). Osservando anche l'ultima famiglia possiamo notare un rapporto 1:1, registrando 15 varianti su 15 lotti elaborati. Trattandosi di attrezzerie e componentistica speciale, spesso prodotta in pezzi unici, l'assenza di un routing standardizzato è normale: ogni lotto costituisce un progetto costruttivo a sé stante.

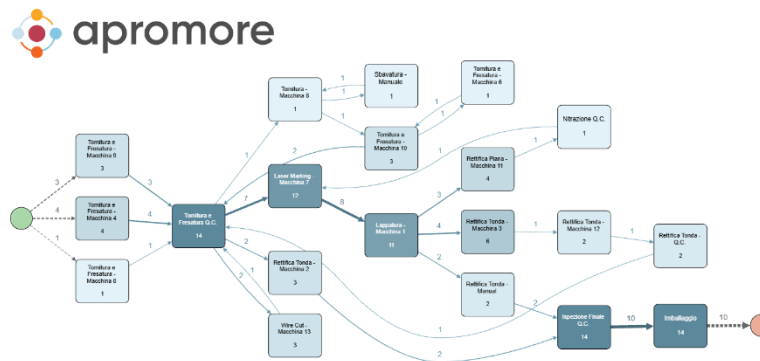


Figura 23. Modello di processo Famiglia E

Analizzando le performance temporali, nonostante il volume ridotto dei pezzi, notiamo un Lead time medio di 3,84 settimane con code che sfiorano i 2,74 mesi. Andando ad analizzare il Process Map (Figura 23) di questa famiglia si evince che:

- In avvio il processo si ramifica su diversi centri di lavoro. Questo indica che i componenti vengono allocati sulle frese o sui torni aziendali nei momenti di disponibilità contingente, dovendo incastrarsi tra i vari lotti di produzione ad alto volume di produzione.
- A differenza delle altre famiglie, il centro di lavoro Tornitura e Fresatura Q.C. agisce come un vero e proprio centro di controllo iterativo. Si possono notare vari archi di ritorno che provengono da tecnologie di altissima precisione come la Wiire Cut – Macchina 13 e la Rettifica Tonda – Macchina 2. Questo è il fondamento dell'attrezzeria dove il pezzo viene aggiustato in maniera progressiva per raggiungere le tolleranze desiderate, generando un pattern circolare.
- A valle della Laser Marking e della Lappatura, il flusso si ramifica verso macchinari e processi termici assenti nelle produzioni di serie.

- Il flusso termina in maniera pulita. I lotti passano all'Ispezione Finale Q.C. e l'imballaggio senza i continui “rimbalzi” o scarti di fine linea visti nella Famiglia D.

L'analisi di questa famiglia dimostra che l'elevata variabilità topologica e i lunghi tempi di attraversamento non sono dovuti ad un'inefficienza gestionale ma ad un processo ingegneristico ad altissima complessità. I continui loop iniziali di misurazione e aggiustaggio, abbinati all'uso di macchine lente (elettroerosione) giustificano le durate registrate dal sistema. L'approccio basato su group technology ha permesso di differenziare le inefficienze patologiche (Famiglia B) dalla complessità puramente fisiologica richiesta dalla lavorazione degli stampi (Famiglia E)

## **Riepilogo**

L'applicazione dei principi della *Group Technology* all'analisi delle varianti ha permesso di destrutturare la complessità dell'intero ecosistema produttivo aziendale, dimostrando che la proliferazione dei percorsi (circa 220 varianti su 225 lotti) non è un fenomeno omogeneo, ma risponde a dinamiche ingegneristiche e gestionali profondamente diverse a seconda della geometria e del ciclo di fabbricazione del componente.

| Famiglia | Categoria GT          | Volume (%) | Variabilità (Casi/Varianti) | Lead Time Medio | Causa Primaria della Variabilità                                           |
|----------|-----------------------|------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b> | Solidi di Rivoluzione | 52,90%     | ~ 1:1 (119/118)             | 1,94 settimane  | Rework patologici per il raggiungimento delle tolleranze di rettifica      |
| <b>B</b> | Assiemi e Cablaggi    | 24,40%     | 1:1 (55/55)                 | 1,05 mesi       | Disorganizzazione cronica e aggiustaggi manuali reiterati                  |
| <b>C</b> | Componenti Prismatici | 5,80%      | 1:1 (13/13)                 | 2,69 settimane  | Assegnazione macchine opportunistica (Variabilità Fisiologica)             |
| <b>D</b> | Minuteria e Fasteners | 10,20%     | ~ 1:1 (23/22)               | 3,46 settimane  | Sovra-lavorazione e colli di bottiglia burocratico-ispettivi               |
| <b>E</b> | Attrezzatura e Stampi | 6,70%      | 1:1 (15/15)                 | 3,84 settimane  | Complessità intrinseca e aggiustaggi millesimali (Variabilità Fisiologica) |

Figura 24. Tabella riepilogativa Group Technology

La comparazione diretta (Figura 24) tra queste famiglie fa emergere tre evidenze strategiche fondamentali per la reingegnerizzazione del sistema aziendale. Per prima cosa, l'analisi sfata il paradigma industriale secondo cui l'alta tiratura favorisca l'efficienza: le Famiglie A e B, pur assorbendo assieme oltre il 77% dei volumi, rappresentano i cluster con i cicli di rilavorazione più severi e con i peggiori colli di bottiglia. Questo dimostra un grave problema di industrializzazione nei segmenti di punta, dove ogni lotto viene considerato come una cosa a sé stante, ignorando i principi di standardizzazione.

In secondo luogo, il confronto incrociato tra la Famiglia C (Componenti Prismatici) e la Famiglia D (Minuteria) permette di disaccoppiare matematicamente il concetto di variabilità da quello di inefficienza. L'estrema frammentazione dei *routing* della Famiglia C non penalizza le tempistiche aziendali, poiché deriva da una flessibilità controllata nell'assegnazione delle macchine di sbazzatura. Al contrario, i lunghi tempi di

attraversamento della minuteria (Famiglia D) smascherano una problematica di sovravorazione qualitativa (*over-processing*), in cui l'azienda cerca di compensare gli errori delle lavorazioni primarie saturando inutilmente i reparti di finitura per componenti a basso valore aggiunto.

In sintesi, la *Process Variant Analysis* dimostra che le derive temporali dell'intero impianto sono generate in modo sistematico dai *Rework Loop* qualitativi e dalla propagazione dei difetti a valle, non dalla complessità fisiologica delle lavorazioni — la quale è stata isolata, compresa e giustificata all'interno della Famiglia E (Attrezzzeria). Questa dimostrazione quantitativa fornisce la validazione ingegneristica definitiva per l'implementazione del modello di *Predictive Quality* proposto in questo elaborato nel punto O6: agendo in maniera proattiva sulle cause che generano dei difetti prima che questi inneschino i cicli di rettifica (come ampiamente diagnosticato nelle Famiglie A e B), l'azienda possiede ora gli strumenti matematici per standardizzare il flusso fisico, spezzare o diminuire le code e recuperare una marginalità tangibile sui propri prodotti *core*.

## CONCLUSIONI

L'attività di ricerca condotta all'interno di questo elaborato ha dimostrato concretamente l'enorme potenziale strategico e operativo del Process Mining, supportato da tecniche di Machine Learning, applicato all'ottimizzazione dei flussi produttivi di un'azienda metalmeccanica. Attraverso l'estrazione e la complessa elaborazione degli *Event Log* dai sistemi informativi aziendali, è stato possibile superare la visione prettamente teorica e documentale dei processi, ricostruendo in Apromore una mappatura fedele, oggettiva e strettamente *data-driven* della reale operatività dell'azienda.

L'indagine diagnostica ha portato alla luce un ecosistema aziendale dominato da un'estrema variabilità topologica, evidenziando una struttura a *spaghetti process* caratterizzata da centinaia di varianti di flusso per un numero pressoché equivalente di commesse. Tale frammentazione, unita a un severo squilibrio nell'allocazione dei carichi di lavoro (*Workload Imbalance*), genera colli di bottiglia critici, localizzati in particolar modo presso specifici centri di rettifica e presso la stazione centrale di Controllo Qualità. Si è dimostrato come l'assenza di standardizzazione procedurale e le prolungate attese inter-operazionali — causate anche da tempi di setup anomali — dilatino significativamente il *Lead Time*, compromettendo l'affidabilità delle consegne.

Il contributo più rilevante dell'analisi è emerso nello studio della qualità e nella segmentazione delle varianti di processo tramite l'applicazione logica della *Group Technology*. Sfatando l'assunto che imputa i ritardi alla pura complessità ingegneristica, si è certificato che la radice primaria delle inefficienze risiede nell'elevata incidenza della difettosità e nei conseguenti *rework loop* (cicli di rilavorazione e aggiustaggio). Famiglie di prodotto ad alto volume, come i solidi di rivoluzione e gli assiemi, arrivano ad assorbire oltre un terzo della capacità produttiva totale a causa di continue correzioni, arrivando a triplicare i tempi di attraversamento rispetto ai percorsi conformi (*happy path*).

A fronte di queste criticità strutturali, il presente lavoro non si è limitato a una diagnosi retrospettiva, ma ha formulato e validato un paradigma di risoluzione proattiva tramite lo sviluppo di un modello predittivo basato su Intelligenza Artificiale. L'integrazione di algoritmi decisionali ad albero in logica *near real-time* permette di trasformare gli indicatori storici di processo in *alert* prescrittivi, capaci di intercettare le derive qualitative ancor prima che si tramutino in scarti effettivi a fine linea. Le simulazioni di scenario

hanno evidenziato come l'anticipazione del difetto e il conseguente abbattimento delle code di rilavorazione abbiano il potenziale di ridurre il tempo massimo di attraversamento del 61% e il *Lead Time* medio del 33%, per il principio sancito dalla Legge di Little.

L'adozione sinergica di Process Mining, principi di Lean Management (come la metodologia SMED) e algoritmi di *Predictive Quality* abilita pertanto una reale transizione del sistema verso i paradigmi dell'Industria 4.0. L'azienda si dota, in definitiva, di un framework ingegneristico scalabile e adattivo, capace non solo di fotografare oggettivamente gli sprechi (*Muda*), ma di neutralizzarli sistematicamente, ripristinando la fluidità del flusso fisico, garantendo il livello di servizio al cliente e recuperando una fondamentale marginalità competitiva sul mercato.

### **Sviluppi futuri**

Sebbene i risultati ottenuti e validati in ambiente di simulazione abbiano ampiamente dimostrato la solidità e l'efficacia del framework proposto, la presente ricerca non rappresenta un punto di arrivo, bensì si configura come una solida base tecnologica e metodologica propedeutica a ulteriori sviluppi implementativi e di ricerca applicata. Le evidenze emerse aprono infatti la strada a diverse direttrici evolutive, orientate a massimizzare l'impatto del modello all'interno del reale ecosistema industriale.

In primo luogo, il passo successivo naturale e prioritario consiste nella transizione dal dominio simulativo al deployment operativo sul campo, attraverso l'implementazione di un progetto pilota (Proof of Concept). Tale fase prevede l'integrazione fisica e architetturale del modello predittivo di Machine Learning con i sistemi informativi di fabbrica attualmente in uso (MES ed ERP). Questa messa in produzione consentirebbe di testare la robustezza e la generalizzazione dell'algoritmo di fronte a variabili esogene non campionate nello storico dei dati, come fluttuazioni anomale della domanda, micro-fermi non tracciati o variazioni repentine nelle performance degli operatori. Inoltre, il deployment sul campo riveste un'importanza cruciale sotto il profilo sociotecnico: permetterebbe di raccogliere il feedback diretto del personale di linea, valutando l'ergonomia cognitiva degli alert generati. Il coinvolgimento attivo degli operatori è infatti un fattore imprescindibile per mitigare la fisiologica resistenza al cambiamento e per affinare la trustability (fiducia) verso il sistema decisionale, garantendo che l'Intelligenza

Artificiale venga percepita come uno strumento di supporto (Human-in-the-Loop) e non come un elemento di mero controllo.

Sotto il profilo dell'accuratezza predittiva, le performance del modello offrono ulteriori e ampi margini di potenziamento attraverso la convergenza del Process Mining con le moderne architetture dell'Industrial Internet of Things (IIoT). Attualmente, l'algoritmo fonda le proprie capacità inferenziali sull'analisi di log di processo discreti (quali tempi di stazionamento, allocazione delle risorse e routing topologico). Arricchendo questo dataset in input con serie storiche continue e dati telemetrici ad alta frequenza — estratti direttamente dai controllori logici programmabili (PLC) e dalla sensoristica edge installata a bordo macchina — si otterrebbe un drastico salto di qualità nella granularità analitica. L'inclusione di parametri fisici in tempo reale, quali le vibrazioni del mandrino, i picchi di assorbimento elettrico dei motori o le derive termiche del fluido lubrificante, consentirebbe all'algoritmo di intercettare fenomeni di micro-usura dell'utensile o anomalie di taglio millisecondi prima che queste si traducano nella generazione fisica del difetto. Questa fusione tra dati gestionali e dati di campo (Sensor Fusion) permetterebbe di unificare le logiche della Predictive Quality con quelle della Predictive Maintenance.

In ultima istanza, spingendo il paradigma analitico verso i confini della Prescriptive Analytics, la prospettiva di ricerca più ambiziosa riguarda l'integrazione strutturale del framework di Process Mining con i software di schedulazione avanzata APS (Advanced Planning and Scheduling). Una simile architettura consentirebbe di superare la logica dell'avviso passivo all'operatore per abbracciare un modello di controllo a ciclo chiuso (Closed-Loop Control). Dinanzi a un potenziale rischio qualitativo o a un improvviso sovraccarico di una specifica stazione (come evidenziato nei colli di bottiglia delle fasi di rettifica), il sistema non si limiterebbe a generare un allarme, ma sarebbe in grado di ri-schedulare dinamicamente e in tempo reale l'intera produzione. Interagendo con l'APS, l'algoritmo potrebbe aggirare automaticamente i macchinari identificati come sotto stress capacitivo, re-indirizzando i lotti in transito verso risorse alternative (Dynamic Routing) o modificando la sequenza di lancio per ottimizzare i setup (Matrice di Setup Asimmetrica). Questa capacità di riconfigurazione autonoma massimizzerebbe la resilienza operativa dell'impianto, completando di fatto la transizione dell'azienda dal mero monitoraggio digitale al paradigma compiuto della vera Smart Factory.

## BIBLIOGRAFIA

Marc Kerremans, Kimihiko Iijima, Andrei Razvan Sachelarescu, Nick Duffy, David Sugden, *Magic Quadrant for Process Mining Tools*, 20 March 2023.

Lars REINKEMEYER, *Process Mining in Action: Principles, Use Cases and Outlook*, Springer Nature Switzerland AG, 2020.

Prof. Wil VAN DER AALST Chief Scientist, Celonis *Object-centric process mining overview, The next frontier in business performance*, Celonis, 2023.

SCS Consulting in collaborazione con il Process Mining Lab di HSPI Consulenti di Direzione, *Il Process Mining a supporto delle Funzioni di Controllo*, 2020.

Francesco LA TROFA, *Cos'è il Process mining. I vantaggi e le applicazioni del mining dei dati per le aziende*, 18 agosto 2022

Webinar “*Process Mining in action with Apromore*”, con il Prof. Marcello LA ROSA (University of Melbourne, CEO & Co-Founder Apromore Pty Ltd, autore di oltre 150 papers su Business Process Mgt e Process Mining).

VAN DER AALST, W. and Adriansyah, A. (2012). Process mining manifesto. In Daniel, F., Barkaoui, K., and Dustdar, S., editors, *Lecture Notes in Business Information Processing*

Gianluca VAGLIO, *PROCESS MINING “uno strumento essenziale e innovativo che permette di migliorare l’efficienza dell’impresa in tempi brevi. Che cos’è? Come funziona? E come adottarlo in azienda*, 2018

## SITOGRAFIA

<https://it.itpedia.nl/2022/11/27/9-belangrijkste-flowchart-symbolen/>

<https://asana.com/it/resources/what-is-a-flowchart>