



ADDITIVE MANUFACTURING

Soluzioni per la gestione ricambi

Roadshow «RI-CERR-care il futuro: Innovazione, Ricerca e Trasferimento Tecnologico in Emilia Romagna», Tappa #3,
9 giugno 2026

Prof. Elia Balugani

Dipartimento di Scienze e Metodi dell'Ingegneria

elia.balugani@unimore.it

La gestione dei ricambi richiede un equilibrio tra disponibilità, costi e rischio operativo

CONTESTO

La gestione dei ricambi è cruciale per mantenere alta disponibilità dei sistemi di produzione, considerando aspetti economici e tecnici per utilizzatori e OEM.

Caratteristiche dei ricambi

Domanda	Intermittente e difficile da prevedere per quantità e frequenza.
Lead time	Lunghi tempi di riapprovvigionamento.
Costo unitario	Ricambi caratterizzati da costi unitari elevati.
Downtime	Costi elevati quando il ricambio non è disponibile in tempo.

Ruolo potenziale dell'AM

Potenziale	Lead time breve, anche on demand; produzione vicino al punto d'uso, anche on-site.
Questioni aperte	Costi di produzione elevati; proprietà meccaniche delle parti AM.
Decisione richiesta	Supporto su sourcing option (CM o AM) e configurazione della supply chain.

IMPLICAZIONE

Costi elevati quando si applicano approcci gestionali non corretti.

RQ1 — La scelta CM/AM on-demand è formulata come problema di costo totale nella gestione dei ricambi

DISEGNO DELLO STUDIO

Materiale	Acciaio 316L.
Tecnologie	AM: SLM e LENS. CM: cast, forged e wrought.
Post-processing	Polishing, annealing e hot isostatic pressing.
Modello	Single-item periodic inventory model (T, S), differenti dimensioni prodotto.
Policy	Manutenzione correttiva, con AM on demand.

CRITERIO

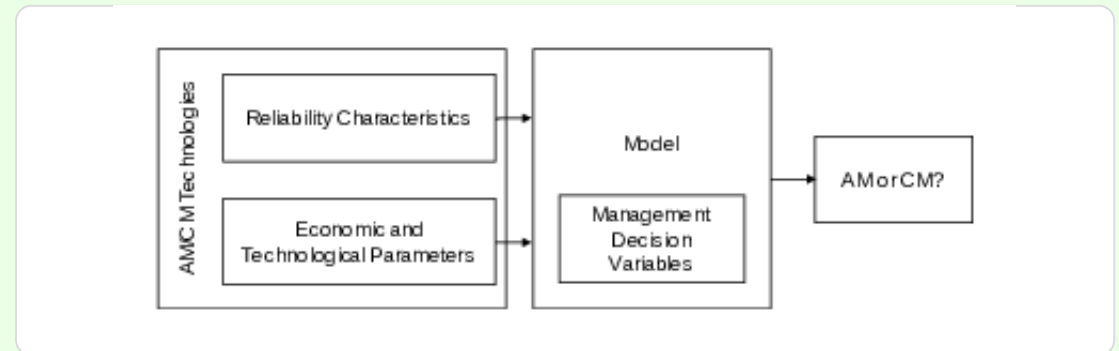
L'opzione preferibile è quella che minimizza i costi di gestione dei ricambi.

Backorder

Holding

Acquisto

INPUT E OUTPUT DEL MODELLO

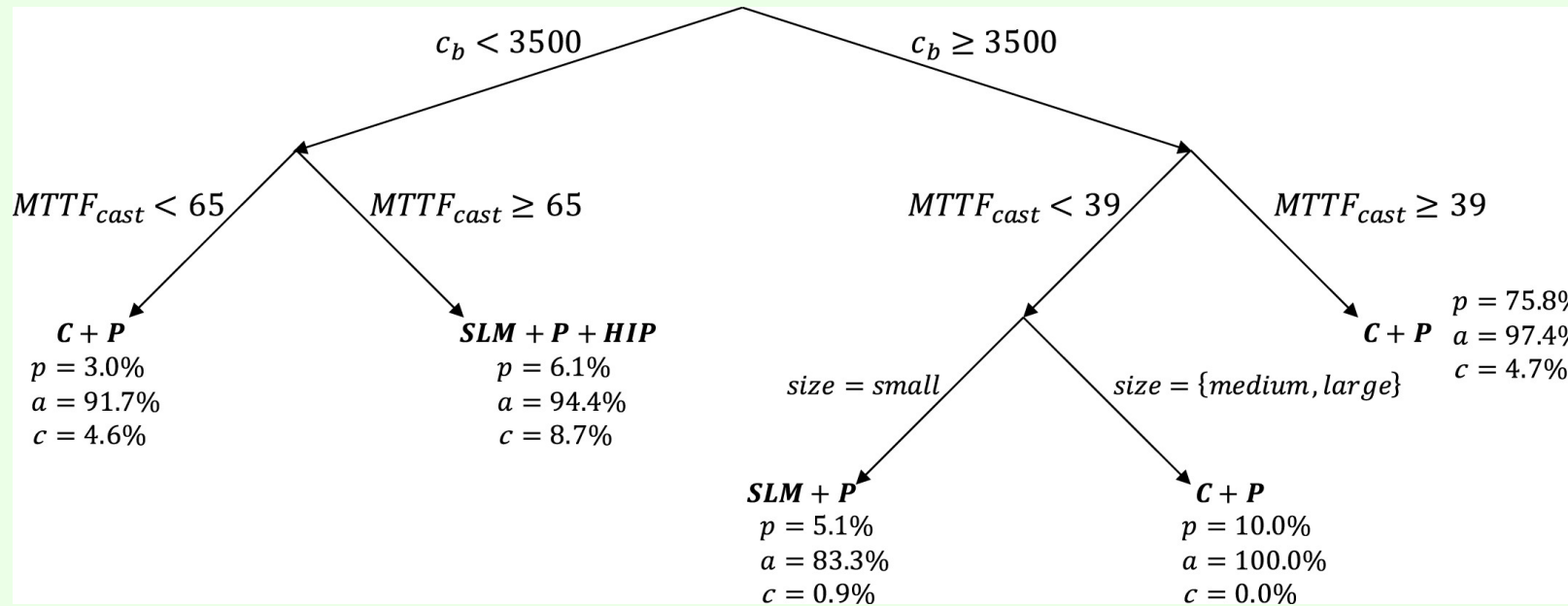


PROPRIETÀ MECCANICHE CONSIDERATE

316L Stainless steel			Cast	Wrought		Forged	
			P	P	P+A	P	P+A
SLM	P	-	5.21	1.98	2.08	0.94	1.03
		HIP	6.80	2.59	2.72	1.24	1.34
	-	-	0.48	0.18	0.19	0.09	0.10
LENS	P	-	1.13	0.43	0.45	0.20	0.22

Rapporti MTF tra AM e CM per acciaio 316L.

RQ1 — AM è conveniente in condizioni specifiche di costo, affidabilità e dimensione del ricambio



LETTURA DEL DECISION TREE

AM migliore

Bassi costi di backorder e alto tasso di guasto della controparte CM.

AM migliore

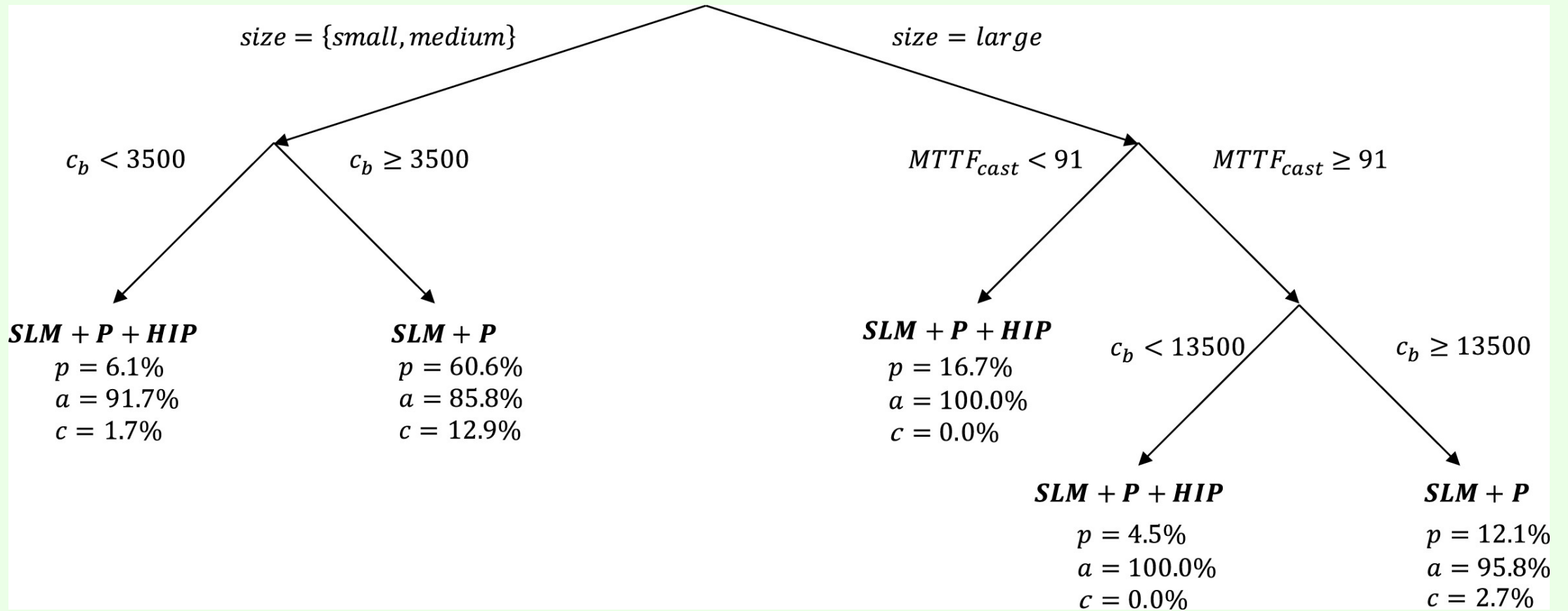
Alti costi di backorder per ricambi di piccole dimensioni.

Opzione AM

SLM è sempre la migliore opzione AM.

Decision tree sviluppato come sistema di supporto decisionale per identificare l'opzione di sourcing più conveniente.

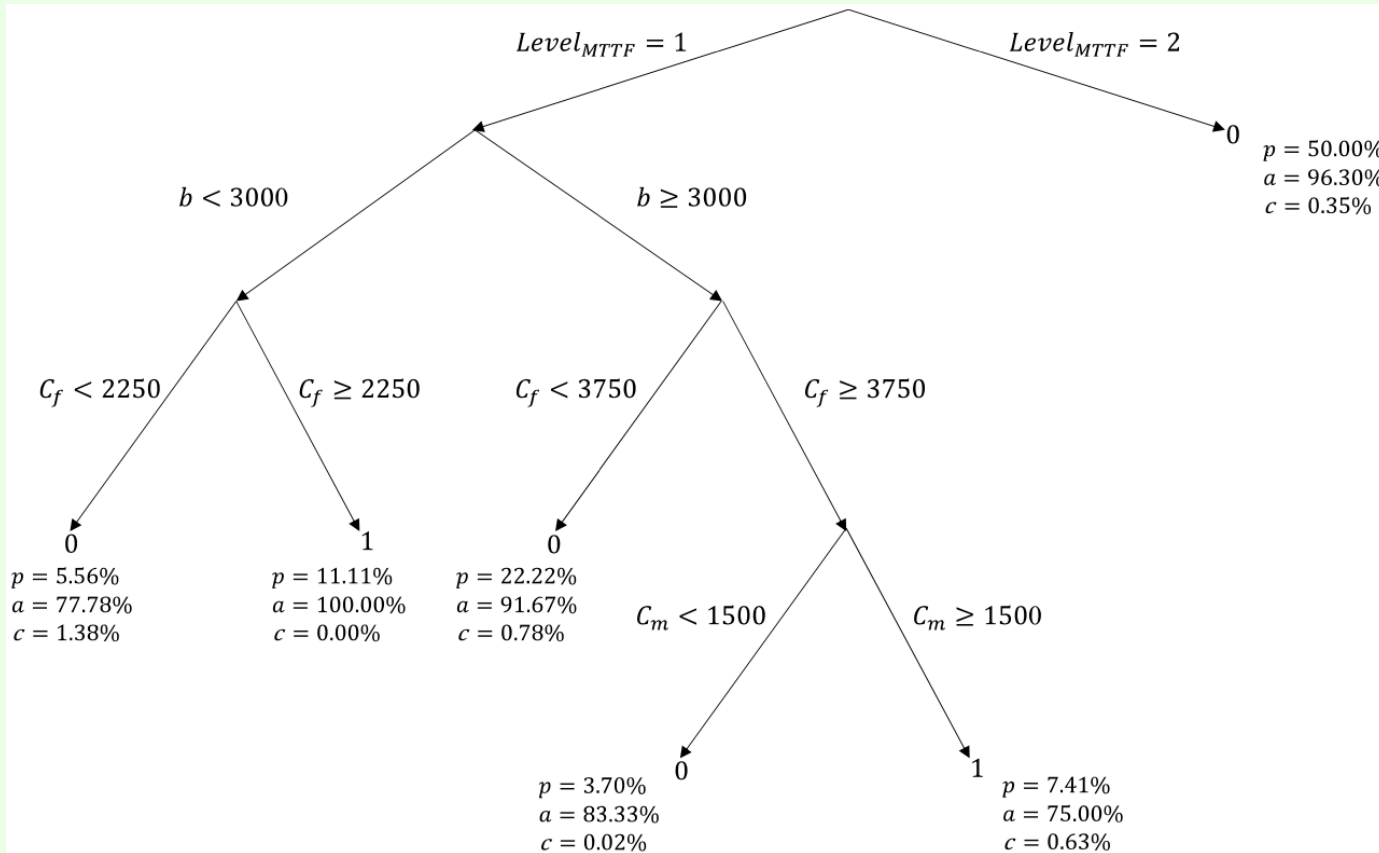
RQ1 — Con spazio di magazzino limitato a un solo pezzo, AM è sempre la migliore opzione di sourcing



CONDIZIONE ANALIZZATA
Spazio di inventario limitato, con massimo 1 pezzo disponibile a stock.

CONCLUSIONE
AM è sempre la migliore opzione di sourcing.

RQ2 — Nella manutenzione preventiva, l'MTTF delle parti AM guida la scelta tra policy AM-based e CM-based



RESEARCH QUESTION

Quando AM è una buona opzione di outsourcing per sostituire parti CM in un framework di manutenzione preventiva?

CM-based favorita

Basso MTTF delle parti AM.

AM-based favorita

Bassi costi di backorder; alti costi di failure; alti costi di maintenance.

RQ3 — L'insourcing AM non è più profittevole in generale, ma lo diventa con capacità di stock vincolata

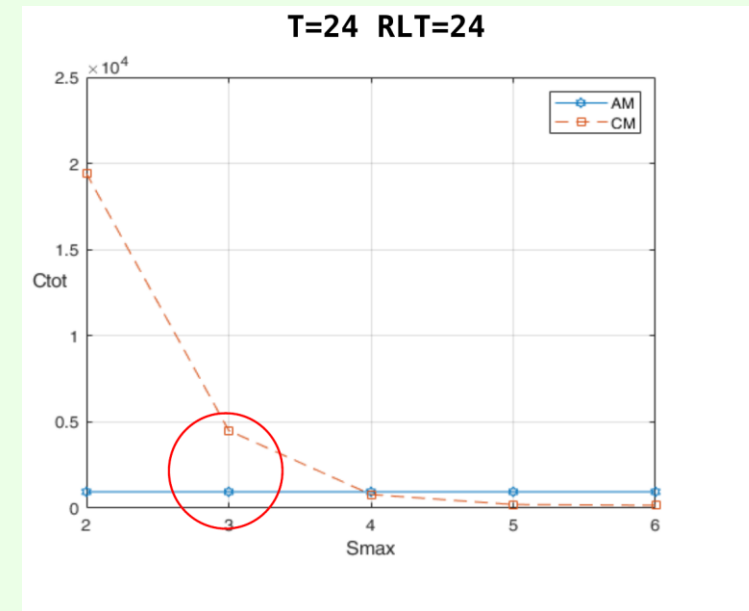
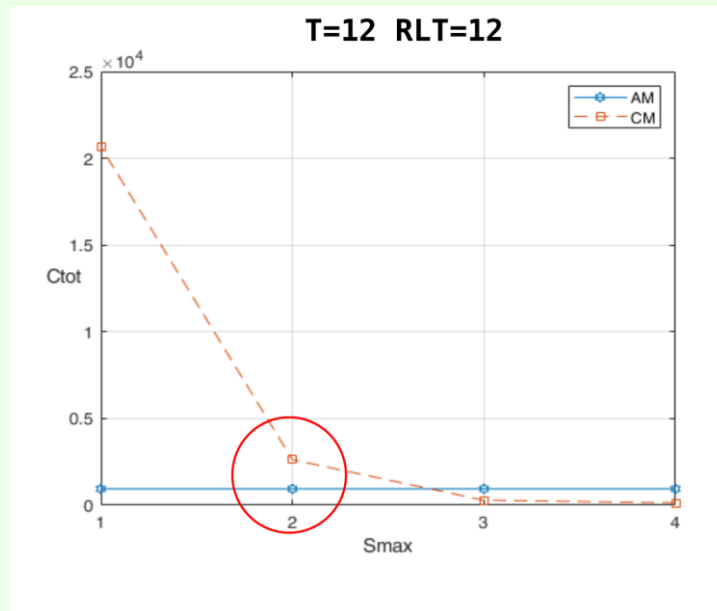
APPROCCIO E RISULTATO

- Simulazione** Sistema simulato variando il numero di server attraverso una analisi multi-scenario.
- Scenario base** L'insourcing AM non è mai stato più profittevole di outsourcing AM o CM.
- Stock vincolato** Quando il livello order-up-to non è ottimizzato, l'insourcing AM diventa vantaggioso.

MESSAGGIO CHIAVE

Per capacità di stock vincolata, l'insourcing AM è indubbiamente benefico.

Confronto tra AM e CM al variare di Smax.



RQ4 — Il rischio di disruption sposta il confronto verso la resilienza della supply chain

MOTIVAZIONE

Supply chain

Le performance sono fortemente influenzate da eventi di disruption e ripple effect.

Ricambi

Questo vale anche per le supply chain dei ricambi, con alti costi di downtime.

SETUP DELLA SIMULAZIONE AGENT-BASED

Policy

Due politiche di stampa per stock, non on-demand: revisione periodica (T, S) e revisione continua (Min, Max).

Configurazione

AM internalizzato e CM esternalizzato.

Sistema

5 differenti ricambi, ciascuno operativo su 18 macchine: 90 ricambi.

Disruption

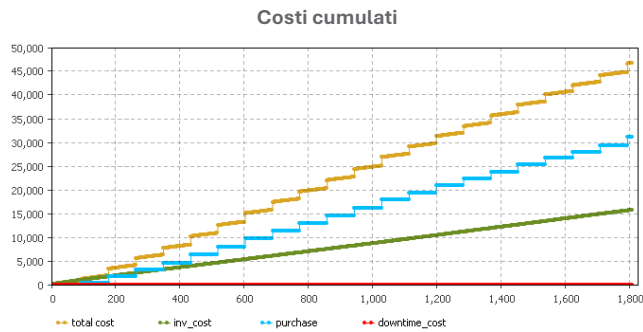
Tre tipi di disruption con tempi normalmente distribuiti, da bassa frequenza–alta durata ad alta frequenza–bassa durata.

RESEARCH QUESTION

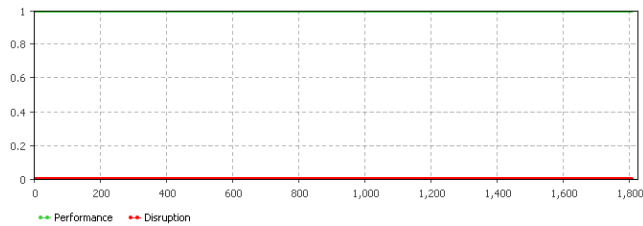
AM migliora la resilienza delle imprese. La profittabilità AM aumenta considerando il rischio di disruption della supply chain?

RQ4 — Con disruption, l'insourcing AM riduce il costo totale fino al 60%

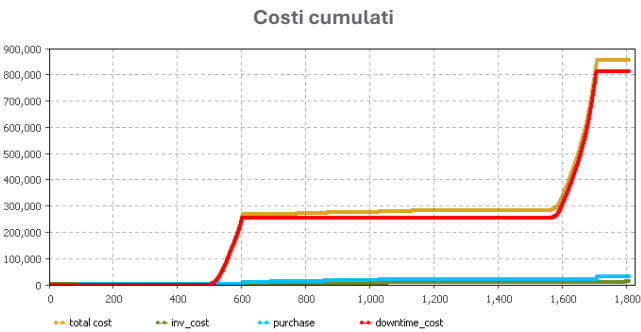
a Nessuna disruption
No AM



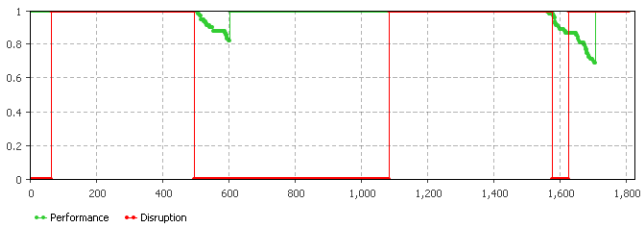
CSL / disruption



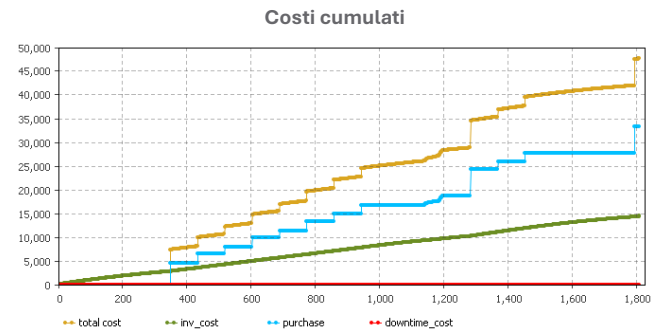
b Disruption
No AM



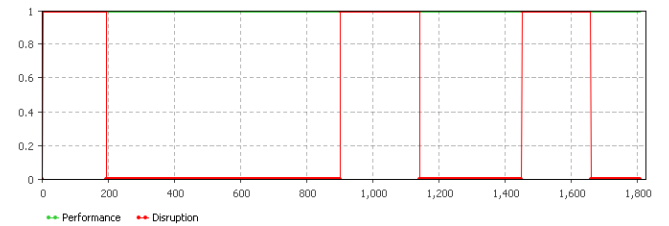
CSL / disruption



c Disruption
con AM



CSL / disruption



RISULTATO

Nel caso c il costo totale diminuisce fino al 60% grazie all'insourcing AM.



Finanziato dall'Unione europea NextGenerationEU



Ministero dell'Università e della Ricerca



Italiadomani PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA

in collaborazione con



ART-ER ATTRATTIVITÀ RICERCA TERRITORIO



ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "AUGUSTO RIGHI"



Università degli Studi di Ferrara



UNIMORE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA



UNIVERSITÀ DI PARMA



Consiglio Nazionale delle Ricerche



ENEA Agenzia Nazionale per le Attività Energetiche, l'Ambiente e lo Sviluppo Economico Sostenibile



UNIVERSITÀ CATTOLICA del Sacro Cuore



POLITECNICO MILANO 1863



INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



ALMACUBE



bi-REX Big Data Innovation & Research Excellence



CENTRO CERAMICO



certimac



CINECA



CRPA



DEMOCENTER



FONDAZIONE REI



LEAP



MISTER SMART INNOVATION



MUSP



PROAMBIENTE



romagnatech



t3lab



TDU



TECNOPOLO REGGIO-EMILIA