



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Edile

Management e Sicurezza delle Costruzioni

“ Sviluppo di un approccio olonico per la gestione della fase di esercizio di un edificio industriale ”

“ Development of a holonic approach for the use and operation management of a factory building ”

Relatore:

Prof. Ing. Alessandro Carbonari

Correlatore:

Prof. Ing. Massimiliano Pirani

Tesi di Laurea di:

Andrea Di Marco

Anno Accademico 2023 / 2024

INDICE

INTRODUZIONE	1
1 - FACILITY MANAGEMENT E MANUTENZIONE DEGLI EDIFICI	3
<i>1.1 CONTROLLARE E MIGLIORARE LE PERFORMANCE</i>	<i>3</i>
<i>1.2 ORGANIZZAZIONE E PIANI DI MANUTENZIONE</i>	<i>3</i>
<i>1.3 KEY PERFORMANCE INDICATOR (KPI).....</i>	<i>4</i>
<i>1.4 DIGITALIZZAZIONE E MODELLAZIONE PER PREDISPORRE I DATI</i>	<i>5</i>
2 – APPROCCIO PER I SISTEMI COMPLESSI.....	8
<i>2.1 SISTEMI COMPLESSI E DESIGN FOR UNEXPECTED (D4U)</i>	<i>8</i>
<i>2.1.1 Differenze tra sistemi semplici, complicati e complessi.....</i>	<i>10</i>
<i>2.1.2 Le caratteristiche dei sistemi complessi, il comportamento emergente.....</i>	<i>11</i>
<i>2.1.3 Leggi dell'artificiale</i>	<i>12</i>
<i>2.1.3.1 Legge 1: I sistemi olonici.....</i>	<i>12</i>
<i>2.1.3.2 Legge 2: Massa critica degli utenti</i>	<i>13</i>
<i>2.1.3.3 La legge 3: Controllo senza centralizzazione.....</i>	<i>15</i>
<i>2.1.3.4 Legge 4: Immaginazione Collettiva e Proattiva</i>	<i>16</i>
<i>2.1.4 L'organizzazione olarchica per i sistemi di produzione olonici.....</i>	<i>16</i>
<i>2.1.5 Interoperabilità.....</i>	<i>19</i>
<i>2.1.6 L'importanza della partecipazione e del coinvolgimento degli umani nelle fasi gestionali e il ruolo delle tecnologie ICT.....</i>	<i>20</i>
<i>2.2 ARCHITETTURA DI RIFERIMENTO: PROSA</i>	<i>22</i>
<i>2.3 ARCHITETTURE DI CONTROLLO OLONICO (HCA) E LE SUE CLASSIFICAZIONI</i>	<i>25</i>
<i>2.4 TENDENZE FUTURE E NUOVE SFIDE</i>	<i>49</i>
<i>2.5 EVOLUZIONE VERSO I SISTEMI DINAMICI: HMT (HOLONIC MANAGEMENT TREE)</i>	<i>52</i>
<i>2.5.1 I sistemi cyber-fisici ed i sistemi cyber-fisici umani</i>	<i>52</i>
<i>2.5.2 I CPSoS e l'HMT.....</i>	<i>57</i>
3 – STRUTTURA SEMANTICA DI MODELLAZIONE DEI SISTEMI	60
<i>3.1 KPI PER LA DEFINIZIONE DEI COLLI DI BOTTIGLIA NEI SISTEMI DISTRIBUITI: OEE E OTE ...</i>	<i>60</i>
<i>3.2 STRUTTURE ELEMENTARI E SCHEMI DI COMPUTAZIONE DELL'ALBERO</i>	<i>62</i>
<i>3.3 CONSIDERAZIONI E DIREZIONI FUTURE DELLA RICERCA</i>	<i>69</i>
4 – TECNOLOGIE DIGITALI	72
<i>4.1 REALTA' AUMENTATA</i>	<i>72</i>
<i>4.1.1 VR, AR, MR e le loro applicazioni.....</i>	<i>72</i>
<i>4.1.2 Base della Tecnologia: HOLOLENS 2.....</i>	<i>79</i>
<i>4.2 MODELLAZIONE BIM: GEMELLO DIGITALE</i>	<i>82</i>

5 – SPERIMENTAZIONE	86
5.1 PRESENTAZIONE DELL'EDIFICIO	86
5.1.1 Modellazione in BIM: Architettonico e MEP	86
5.2 LOGICA DELL'ALBERO NEL CASO DI STUDIO	106
5.3 DIMOSTRAZIONE DELLA TECNOLOGIA E APP PER IL SUO CONTROLLO	115
5.4 RISULTATI	120
5.5 SVILUPPI FUTURI	128
CONCLUSIONI	130
APPENDICE: ESEMPI DI PROGETTO DI SISTEMI DI PRODUZIONE OLONICI	132
BIBLIOGRAFIA	138
RINGRAZIAMENTI	139

INTRODUZIONE

In un mondo in continua evoluzione, in cui le città crescono e le esigenze della popolazione cambiano, è cruciale comprendere come le nostre costruzioni, le infrastrutture e gli spazi pubblici interagiscano tra loro e con l'ambiente naturale. Un tema fondamentale per il nostro futuro è l'ambiente costruito pensato come sistema complesso. L'ambiente costruito non è semplicemente un insieme di edifici e strade; è un sistema complesso in cui vari elementi interagiscono in modi che spesso non possiamo prevedere. Questi elementi includono non solo le strutture fisiche, ma anche le persone che vi abitano, le attività economiche, le pratiche urbanistiche, e persino gli ecosistemi naturali che circondano queste costruzioni.

In un sistema complesso, ogni parte è interconnessa. Le decisioni che prendiamo oggi nella progettazione e nella costruzione degli edifici hanno ripercussioni a lungo termine sull'ambiente e sulla qualità della vita. Ad esempio, la scelta di materiali sostenibili non solo influisce sull'impatto ambientale immediato, ma può anche determinare la salute degli abitanti e la loro qualità della vita nel tempo. Disegnare spazi pubblici accessibili e inclusivi può promuovere la coesione sociale e ridurre l'isolamento, creando comunità più forti e resilienti.

Inoltre, l'ambiente costruito deve essere in grado di adattarsi ai cambiamenti. Le sfide del cambiamento climatico, come l'innalzamento del livello del mare e le temperature estreme, richiedono un approccio innovativo e flessibile. Le città devono evolvere, sviluppando infrastrutture verdi, sistemi di drenaggio sostenibili e strategie di mobilità che riducano la dipendenza dai combustibili fossili. Solo attraverso una visione integrata e sistemica possiamo affrontare queste sfide. Tale visione rientra pienamente nei canoni delle linee di produzione, nel settore del Manufacturing, e bisogna auspicare di ereditare tale visione e traslarla nell'ambiente del costruito per avere un miglioramento controllato.

La tecnologia gioca un ruolo cruciale in questo contesto. L'uso di big data, intelligenza artificiale e simulazioni ci permette di analizzare e prevedere il comportamento dei sistemi complessi. Questi strumenti possono aiutarci a progettare ambienti più efficienti, a monitorare il consumo energetico e gestire le risorse in modo più sostenibile. Tuttavia, è fondamentale che l'innovazione non sia fine a sé stessa, ma orientata al miglioramento della vita delle persone e alla salvaguardia dell'ambiente (di ogni tipo). In ogni modo, in un sistema così dinamico, ogni piccolo cambiamento sposta l'equilibrio e impatta su un sistema più grande; anche le persone stesse, inconsapevolmente, riescono a spostare gli equilibri di un sistema solo a causa di un incidente d'auto, ad esempio. Questo comporterà un blocco del traffico, ritardi di appuntamenti, nervosismo e instabilità. In questo esempio l'adattamento è importante

in quanto, un sistema di navigazione GPS deve recepire i dati istantaneamente e creare un percorso alternativo per evitare la congestione del traffico.

Infine, è essenziale coinvolgere le comunità nel processo di progettazione e costruzione. Le persone che vivono e lavorano in un'ambiente complesso devono avere una conoscenza unica delle loro esigenze e delle loro aspirazioni. Favorire un dialogo aperto permette di rispondere realmente ai bisogni della popolazione, promuovendo un senso di appartenenza e responsabilità collettiva.

1 - FACILITY MANAGEMENT E MANUTENZIONE DEGLI EDIFICI

1.1 Controllare e Migliorare le performance

Il Facility Management (FM) rappresenta un approccio integrato alla gestione delle strutture e dei servizi che supportano le attività di un'organizzazione. Esso include una vasta gamma di attività, dalla manutenzione degli edifici alla gestione degli spazi, fino ai servizi di supporto come la sicurezza e la pulizia. In questo contesto, la manutenzione degli edifici riveste un ruolo cruciale, poiché garantisce non solo il corretto funzionamento delle infrastrutture, ma anche la sicurezza e il benessere degli utenti.



Figura 1 - Campo di Applicazione del Facility Management

1.2 Organizzazione e Piani di Manutenzione

L'organizzazione della manutenzione degli edifici si basa su piani strategici che definiscono le modalità di intervento e le risorse necessarie. Questi piani devono essere adattati alle specifiche esigenze di ciascun edificio e possono essere suddivisi in tre categorie principali:

1. Manutenzione preventiva: Questa tipologia di manutenzione è programmata e si svolge a intervalli regolari per prevenire guasti e deterioramenti. Essa può includere ispezioni periodiche, pulizie e sostituzioni di componenti usurati.
2. Manutenzione correttiva: Si tratta di interventi non pianificati che vengono effettuati per riparare un guasto o un malfunzionamento. È importante che

questa manutenzione venga eseguita tempestivamente per ridurre al minimo i disagi e i costi associati.

3. *Manutenzione predittiva*: Questa forma di manutenzione si basa su tecnologie avanzate e analisi dei dati per prevedere quando un componente potrebbe guastarsi. Ciò consente di intervenire prima che si verifichino problemi, ottimizzando così le risorse e i tempi di intervento.

Un piano di manutenzione efficace è fondamentale per garantire la longevità e l'efficienza degli edifici. Esso deve contenere informazioni dettagliate sugli interventi programmati, le risorse necessarie, i costi associati e i responsabili delle attività.

La creazione di un piano di manutenzione deve seguire le seguenti fasi:

- **Analisi dello stato attuale**: Valutare le condizioni degli impianti e delle strutture esistenti per identificare le necessità di intervento.
- **Definizione degli obiettivi/target**: Stabilire obiettivi chiari e misurabili per la manutenzione in base alle esigenze dell'organizzazione e agli standard di qualità attesi.
- **Programmazione delle attività**: Pianificare gli interventi su base annuale, mensile o settimanale, tenendo conto delle risorse disponibili e delle priorità operative.
- **Monitoraggio e revisione**: Creare un sistema di monitoraggio per valutare l'efficacia delle attività di manutenzione e apportare modifiche al piano quando necessario.

1.3 Key Performance Indicator (KPI)

I Key Performance Indicators (KPI) sono strumenti essenziali per misurare l'efficacia del Facility Management e dei piani di manutenzione. I KPI consentono alle organizzazioni di monitorare le prestazioni e di identificare aree di miglioramento. Alcuni KPI comunemente utilizzati nel contesto della manutenzione degli edifici includono:

- **Tempi di risposta agli interventi di manutenzione**: Misurano la rapidità con cui vengono gestiti i guasti e le richieste di intervento.
- **Tasso di completamento degli interventi programmati**: Indica la percentuale di interventi di manutenzione preventiva completati rispetto a quelli pianificati.
- **Costo totale di manutenzione per metro quadrato**: Questo KPI fornisce una visione dei costi associati alla manutenzione in relazione all'area totale dell'edificio.
- **Soddisfazione degli utenti**: Valuta il livello di soddisfazione degli occupanti riguardo alla qualità degli ambienti e all'efficienza dei servizi di manutenzione.

1.4 Digitalizzazione e modellazione per predisporre i dati

Negli ultimi anni, la digitalizzazione ha rivoluzionato il settore del Facility Management, offrendo nuove opportunità per la raccolta e l'analisi dei dati. L'implementazione di tecnologie come il Building Information Modeling (BIM) e i sistemi di gestione della manutenzione computerizzati (CMMS) ha permesso una gestione più efficace degli edifici. Il BIM, ad esempio, consente di creare modelli digitali tridimensionali degli edifici, integrando informazioni relative a materiali, impiantistica e manutenzione. Questi modelli possono essere utilizzati per pianificare interventi, monitorare le condizioni degli edifici e prevedere le necessità future di manutenzione.

La digitalizzazione nell'ambiente costruito offre vantaggi sia per l'ambiente che per gli utenti e le aziende. Essa può ridurre la domanda energetica degli edifici, diminuire il carbonio incorporato, migliorare l'efficienza operativa e contribuire alla flessibilità e resilienza del sistema energetico. L'analisi dell'IEA (Agenzia Internazionale dell'Energia) indica che la digitalizzazione e i controlli intelligenti possono portare a guadagni di efficienza che ridurrebbero le emissioni del settore edilizio di 350 megatonnellate di CO₂ entro il 2050. (2)

Durante la fase di costruzione, la digitalizzazione consente la raccolta sistematica di dati sulle prestazioni dei materiali e delle pratiche edilizie, promuovendo la realizzazione di edifici a basso carbonio, efficienti dal punto di vista energetico e termicamente confortevoli. Il Programma “*IEA Energy in Buildings and Communities*” si dedica a ricerche e sviluppi per raggiungere emissioni di carbonio quasi zero nel settore costruito. (2) La digitalizzazione può anche ridurre il carbonio incorporato negli edifici attraverso una migliore raccolta dei dati, un design più efficiente e una riduzione dei tempi di costruzione e degli sprechi. Nella fase operativa, i guadagni di efficienza energetica possono derivare dall'“efficienza intelligente”, un sistema di dispositivi smart che ricevono input e ottimizzano autonomamente il loro consumo energetico. Gli edifici intelligenti offrono benefici multipli, oltre al risparmio energetico, come il miglioramento del comfort e l'adattamento dei consumi energetici in tempo reale.

Gli edifici efficienti possono fornire flessibilità al sistema energetico, consentendo di spostare il consumo energetico di alcuni elettrodomestici verso periodi in cui le fonti rinnovabili sono attive, riducendo così le emissioni di carbonio. Si stima che nel 2040 gli edifici potrebbero fornire oltre 4.000 TWh di potenziale risposta alla domanda.

La digitalizzazione degli edifici può anche incrementare la partecipazione ai programmi di risposta alla domanda, specialmente tra i consumatori residenziali. Nel 2018, programmi comportamentali negli Stati Uniti hanno fornito oltre 785 MW di capacità flessibile, con 2,7 milioni di partecipanti. Un esempio significativo è il programma “*SmartEnergy Rewards*” di Baltimora, che offre incentivi ai partecipanti

per ridurre il consumo durante i giorni di picco. Questo consente anche di avere sotto controllo le risorse energetiche, risparmiando e riallocandole grazie ai residenti.

Un altro beneficio della digitalizzazione è il fatto che consente la creazione di nuovi modelli (business) di servizio e finanziamento che beneficiano i residenti. Modelli come "riscaldamento o raffreddamento come servizio" utilizzano dati per ottimizzare il comfort e i costi. Ad esempio, a Pune, in India, è stato implementato un sistema di raffreddamento intelligente alimentato da energia solare, utilizzando algoritmi per ottimizzare le prestazioni.

Nonostante i benefici, ci sono barriere significative all'adozione della digitalizzazione, come la gestione dei dati e la necessità di protocolli di comunicazione standardizzati. È fondamentale il coordinamento tra vari stakeholder (Fig. 2) dei settori edilizio, tecnologico ed energetico. Inoltre, le normative edilizie dovrebbero includere misure per garantire la prontezza alla risposta alla domanda.

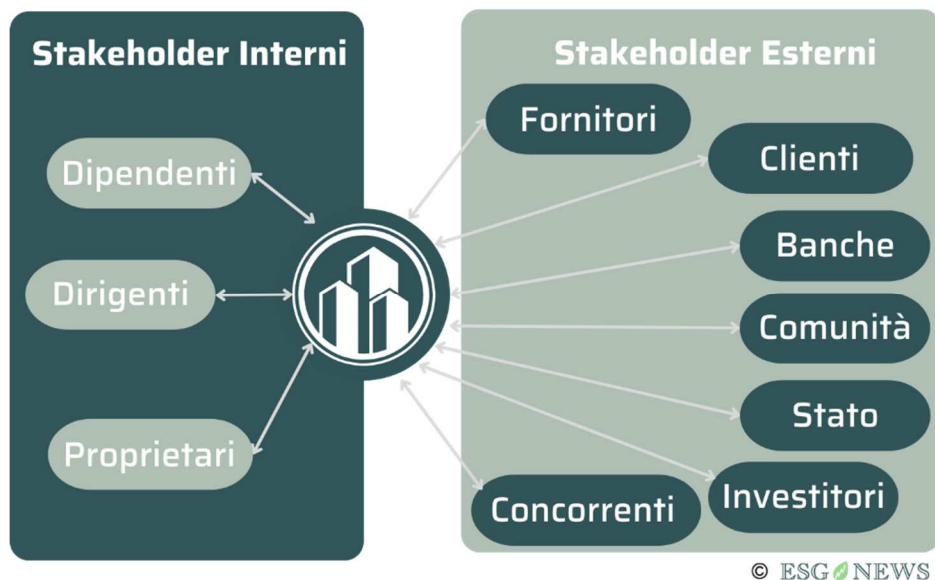


Figura 2 - Mappa degli Stakeholder

Per garantire un approccio sistematico e standardizzato alla manutenzione degli edifici, è fondamentale seguire normative e linee guida specifiche. In Europa, la Normativa **EN 15221** fornisce un quadro di riferimento per il Facility Management, mentre la **ISO 55000** tratta della gestione degli asset, evidenziando l'importanza della pianificazione e della manutenzione predittiva. Questi standard aiutano le organizzazioni a implementare pratiche di gestione efficaci e a migliorare la qualità dei servizi offerti.

Il Facility Management e la manutenzione degli edifici sono fondamentali per garantire la funzionalità e la sicurezza delle strutture. Attraverso una pianificazione strategica, l'uso di KPI e l'adozione di tecnologie digitali, le organizzazioni possono ottimizzare le loro operazioni e migliorare l'efficienza. La conformità a normative e standardizzazioni rappresenta un ulteriore valore aggiunto, garantendo risultati sostenibili e di alta qualità nel tempo.

In sintesi, la digitalizzazione dell'ambiente costruito offre enormi opportunità per ridurre le emissioni, migliorare l'efficienza energetica e creare sistemi energetici più flessibili, ma richiede anche un impegno coordinato tra vari attori per realizzarne il pieno potenziale.

2 – APPROCCIO PER I SISTEMI COMPLESSI

2.1 Sistemi Complessi e Design For Unexpected (D4U)

Negli anni '80, la comunità dell'automazione industriale ha avviato lo sviluppo di sistemi di produzione integrata da computer (CIM), con l'obiettivo di integrare postazioni di lavoro automatizzate all'interno di fabbriche completamente automatizzate. Sebbene questi sistemi di sistemi siano stati progettati prima che diventassero un argomento popolare nell'ingegneria dei sistemi, i risultati ottenuti sono stati deludenti.

All'inizio, ci si aspettava di scoprire limitazioni intrinseche che portassero a concludere che poco si potesse fare. Tuttavia, i risultati della ricerca hanno rivelato il contrario: sebbene ci siano limitazioni significative, è possibile progettare sistemi che migliorano la situazione attuale in vari domini applicativi. Non facendo assunzioni sul sistema di sistemi, l'argomento principale è la progettazione di sistemi per l'imprevisto. Per sviluppare sistemi più piccoli in grado di evitare o gestire collisioni, è fondamentale non imporre vincoli arbitrari. Viene elevato il concetto di "low-and-late commitment" a un livello scientifico, combinandolo con preparazione anticipata. I risultati della ricerca non solo si applicano all'integrazione in un sistema di sistemi, ma affrontano anche le frustrazioni nel tentativo di migliorare grandi organizzazioni complesse, dove gli sforzi in una località possono fallire a causa di sistemi vicini. Inoltre, la ricerca ha mostrato come progettare sistemi che non diventino futuri sistemi legacy in senso negativo. Viene presentato uno schema generico per generare previsioni a breve termine, permettendo di affrontare l'imprevisto. Due laici hanno etichettato questo risultato come "predizione dell'imprevisto".

Il design per l'imprevisto non è applicabile a qualsiasi tipo di sistema, ma si concentra sui sistemi informativi in relazione a un mondo di interesse che deve possedere determinate proprietà: risorse preziose, attività che utilizzano queste risorse, coordinazione intelligente che genera valore e la possibilità di replicare attività e risorse in modelli computerizzati eseguibili. Questi sistemi informativi, progettati per l'imprevisto, potrebbero diventare parte della vita quotidiana, contribuendo a risolvere situazioni attuali insoddisfacenti, come gli ingorghi del traffico, e prevenendo risultati indesiderati, come combinazioni tossiche di farmaci. Inoltre, la ricerca evidenzia l'importanza di considerare gli aspetti sociali e umani, implementando comportamenti socialmente accettabili e meccanismi di controllo sociale minimamente invasivi. Ciò permette l'emergere di beni comuni, in particolare quando combinato con meccanismi in grado di prevedere l'imprevisto.

In questa lettura viene rappresentato l'inizio dello sviluppo di infrastrutture informative che oltrepassano significativamente le attuali e penetrano profondamente nelle nostre vite, mostrando durabilità poiché si adattano alle future esigenze. Oggi, il tema principale dell'agenda di ricerca è creare una società meccatronica che sia empowerment, considerata e ospitale verso gli esseri umani.

L'esempio illustrativo seguente della vita quotidiana serve per introdurre il concetto di "design per l'imprevisto" (D4U) in una società meccatronica ed è applicato alla mobilità, un tema di riconosciuta complessità e attualità.

Paul deve viaggiare da Leuven a Bruxelles per un evento. Il suo sistema di navigazione inizia a pianificare il viaggio virtualmente non appena l'evento viene registrato nell'agenda elettronica. Questa pianificazione tiene conto di vari fattori, come il tempo disponibile e i costi di congestione. Quando Paul è a metà del percorso, un incidente rallenta la capacità stradale del 30%, ma il sistema di navigazione reagisce in modo controllato, senza sovraccaricare l'utente di informazioni. Gli elementi di coordinamento del traffico D4U osservano l'incidente attraverso i sistemi di navigazione dei veicoli coinvolti e aggiornano rapidamente le stime sull'incidente. La navigazione di Paul prosegue senza cambiamenti immediati, poiché la sua destinazione (un parcheggio) non è direttamente colpita dall'incidente, mentre i veicoli che transitano nell'area del sinistro si adattano velocemente per evitare la congestione. Il sistema di navigazione di Paul esplora alternative, ma informa anche delle reali condizioni disponibili. Alla fine, Paul riesce ad arrivare al suo parcheggio previsto, pur percorrendo un tragitto leggermente più lungo.

Il principio chiave del design D4U è che non si devono fare affidamenti su previsioni o assunzioni pericolose; le decisioni devono essere basate su riflessioni accurate della realtà, il che è essenziale per una navigazione efficace. Il D4U propone di garantire che il sistema di navigazione rispecchi accuratamente la realtà (forma di "*mirror of the world in which I live*" – WOI – *World Of Interest*). La rappresentazione mirroring deve essere corretta e aggiornata costantemente, e ogni parte deve avere un'unica rappresentazione (Single Source of Truth) per evitare conflitti. Il sistema deve essere in grado di adattarsi quando emergono nuove informazioni, preservando la coerenza e la completezza. Inoltre, ci deve essere un meccanismo di allocazione delle risorse chiaro che permetta di ridurre l'inerzia delle scelte di design opache, facilitando l'adattamento in tempo reale alle nuove circostanze. Questi principi si applicano a diverse aree del sistema, che includono risorse (come mappe delle infrastrutture stradali), attività, stati mentali e meccanismi decisionali.

L'implementazione di un sistema ITTS (Intelligent Traffic and Transportation System) informa tutti gli utenti su come gli eventi influenzano il sistema di trasporto e come gli elementi decisionali devono adattarsi. Anche se il D4U è solo all'inizio, l'infrastruttura può già essere costruita, consentendo l'integrazione di elementi decisionali personalizzati in modo efficiente non appena disponibili. Questo approccio promette di ridurre i tempi e gli sforzi necessari per implementare soluzioni di alta performance nella navigazione e nei sistemi decisionali legati alla mobilità.

2.1.1 Differenze tra sistemi semplici, complicati e complessi

Un sistema può essere semplice, complicato, complesso. Un sistema Semplice (etimologia: sine+plico, ovvero senza pieghe) è un fenomeno o un sistema lineare, ripetibile, con un chiaro rapporto di causa-effetto, e di cui è possibile realizzare modelli matematici che permettono di prevederne gli sviluppi.

Un sistema Complicato (etimologia: cum plico, ovvero con piegature, che è possibile “s-piegare”) è un fenomeno o un sistema scomponibile nelle sue parti lineari, ripetibile (a parità di condizioni al contorno), anch'esso con un rapporto di causa-effetto, e di cui è possibile realizzare modelli matematici che permettono di prevederne gli sviluppi, pur con difficoltà di calcolo e di approssimazione (riferimento al metodo scientifico classico, al riduzionismo e al determinismo).

Un sistema Complesso (etimologia: cum+plēcto ovvero intrecciato, tessuto insieme), invece, è un sistema non lineare, composto di molti elementi collegati tra loro e dipendenti uno dall'altro, non riducibile (l'insieme è superiore alla somma delle parti), non ripetibile né prevedibile, senza più nessun rapporto lineare di causa-effetto; richiede una visione sistemica, reticolare, non sequenziale.

In questa parte si discutono in particolare, le differenze tra sistemi semplici, complicati, complessi e complessi adattivi (CAS), focalizzandosi sulla natura dei loro componenti e sulle interazioni tra di essi. Viene spiegato che un sistema semplice, come una bicicletta, ha un insieme di componenti interconnessi in modo fisso e predicibile, mentre un sistema complicato, come un'automobile, è più complesso a causa del numero maggiore di componenti, ma rimane comunque prevedibile seguendo regole di assemblaggio ben definite. I sistemi complessi, come una pianta di produzione o un sistema economico, presentano una variabilità di risultati anche a condizioni iniziali identiche, a causa delle interazioni dinamiche e meno prevedibili tra i componenti.

2.1.2 Le caratteristiche dei sistemi complessi, il comportamento emergente.

Comportamento emergente e auto-organizzazione sono caratteristiche dei sistemi complessi, in cui l'organizzazione e il comportamento non possono essere compresi osservando solo i singoli elementi isolatamente. L'auto-organizzazione si riferisce alla capacità di un sistema di riorganizzarsi autonomamente per rispondere a determinate condizioni. Si possono fare esempi pratici a riguardo: costruire un'autostrada è complicato, mentre gestire il traffico urbano è complesso per il numero di variabili in gioco. Un altro esempio è il sistema immunitario umano, che si adatta e impara, mostrando comportamento adattivo. I sistemi di mecatronica sono identificati come sistemi complicati a livello micro, ma le loro interazioni possono dar vita a complessità a livello macro, portando a società mecatroniche, che sono sistemi complessi e adattivi.

La dicotomia tra approcci di progetto è evidente nel confronto tra il metodo Taylorista per l'ottimizzazione separata di ogni componente di un sistema e la visione contemporanea che sottolinea l'importanza di considerare l'intero sistema per ottenere l'"ottimalità". La prima strategia tende a portare a colli di bottiglia, mentre la seconda suggerisce che è proprio l'utilizzo del collo di bottiglia di un sistema ad essere cruciale per determinare l'ottimalità. La progettazione mecatronica contemporanea si basa su un approccio progettuale simultaneo, in contrasto con quello sequenziale tradizionale, per affrontare la progettazione di sistemi mecatronici complessi. Nel contesto della programmazione del software, l'approccio tradizionale di "*design top down*" ha rivelato limitazioni, soprattutto in scenari dove i requisiti degli utenti sono instabili, suggerendo che metodologie di design orientato agli oggetti possono offrire una migliore risposta a questa complessità. Viene esplorato, quindi, come l'uso di modelli essenziali – rappresentazioni che riflettono la realtà mantenendo la loro coerenza – può facilitare la progettazione in contesti complessi, suggerendo che le interfacce e la comunicazione attiva tra processi computazionali siano necessarie per rispondere adeguatamente alla realtà complessa.

È necessario avere una maggiore consapevolezza collettiva e di approcci architetturali per affrontare i problemi progettuali, promuovendo il concetto di "Design for the Unexpected" (D4U), che riconosce la necessità di elaborare soluzioni intermedie che possono rispondere a problemi emergenti, piuttosto che inseguire la soluzione ideale prima che emerga il problema. Attraverso questo approccio, è possibile migliorare la scalabilità e l'integrazione nei sistemi complessi, che sono degli obiettivi di ricerca.

2.1.3 Leggi dell'artificiale

Prendiamo uno scenario esemplificativo per capire quale inflessione del termine “legge” si va ad indagare. Viene descritto un episodio in cui un ingegnere civile deve progettare un nuovo serbatoio d'acqua per un comune, ma le idee del sindaco si scontrano con le leggi della fisica, come quella di Newton sulla gravità. Il sindaco, illudendosi di non dover considerare tali leggi, scoprirebbe poi che ignorarle comporterebbe problemi pratici. Qui si distingue tra leggi costruite dall'uomo e leggi scientifiche. Le leggi scientifiche sono verità inevitabili all'interno della loro portata. L'ignoranza di leggi come quella di gravità può portare a scarsa performance e costi elevati. Le leggi dell'artificiale, simili a quelle della natura, forniscono un quadro essenziale da considerare nella progettazione di sistemi complessi; derivano da osservazioni chiave nel mondo, e sono assunte come vere, dunque considerate assiomi. Tra i punti focali delle leggi vi è la razionalità limitata: anche i gruppi più talentuosi hanno capacità di progettazione e risoluzione dei problemi limitate. In ambienti dinamici, esiste una finestra temporale critica per risolvere problemi e implementare sistemi; oltre a un certo limite, le soluzioni arrivano troppo tardi per essere efficaci. Un altro aspetto importante è l'ambiente competitivo, dove l'assenza di miglioramenti porta i sistemi a scomparire. L'adattamento indica che i sistemi cambiano nel tempo, ed è fondamentale progettare tenendo conto di complessità e imprevedibilità.

2.1.3.1 Legge 1: I sistemi olonici

Il termine "*olone*" è stato introdotto da Arthur Koestler nel suo libro "The Ghost in the Machine" (Koestler, 1967). Koestler ha avuto due intuizioni che lo hanno portato a sviluppare i concetti di oloni e sistemi olonici. La prima intuizione riguarda l'osservazione che i sistemi complessi tendono a evolversi più rapidamente da sistemi semplici se esistono forme intermedie stabili. Questa idea è stata influenzata dalla parabola dei due orologiai di Simon (Simon, 1990), che illustra come, in ambienti dinamici e complessi, i sistemi composti da sottosistemi adeguati abbiano maggiori probabilità di emergere e prosperare rispetto a quelli formati da elementi di base privi di stati intermedi stabili. (1)

Koestler sottolinea che la razionalità limitata – intesa come capacità finita di elaborazione delle informazioni e comunicazione – limita la velocità con cui gli elementi possono essere integrati in un sistema. Quando gli elementi sono piccoli, è necessario più tempo e sforzo per costruire un sistema di dimensioni adeguate. In ambienti dinamici, questo porta a sistemi completati troppo tardi per essere competitivi. Al contrario, i sistemi costruiti con unità più grandi si dimostrano superiori

in contesti che richiedono una rapida adattabilità, piuttosto che una prestazione finale teoricamente superiore. Nelle parole di Koestler, gli oloni più grandi (sistemi olonici) sono composti da forme intermedie stabili, definite oloni, e questa composizione si ripete in modo auto-simile fino a quando i componenti diventano più semplici. I sistemi olonici emergono e sopravvivono con maggiore probabilità in ambienti dinamici rispetto a quelli che, pur potendo essere superiori, richiedono troppo tempo e risorse per essere sviluppati, risultando obsoleti prima di diventare operativi. (1)

La seconda osservazione di Koestler è che, sebbene sia facile identificare le parti, "totali" e "parti" non esistono in senso assoluto. Il termine olone descrive quindi la natura ibrida di sotto parti nei sistemi reali, dove gli oloni sono sia unità autonome che dipendenti. Koestler definisce questo comportamento "effetto Giano": gli oloni sono unità autonome capaci di affrontare situazioni impreviste senza richiedere istruzioni da autorità superiori, ma sono anche soggetti a controlli esterni. Koestler definisce un sistema olonico o olarchia come una gerarchia di oloni autoregolanti che funzionano sia come totalità autonome nei confronti delle loro parti, sia come parti dipendenti rispetto a controlli superiori, coordinandosi con l'ambiente locale. L'obiettivo principale è spiegare perché l'universo sia dominato da sistemi con strutture gerarchiche, che Koestler chiama "olarchie" per distinguerle dalle gerarchie rigide degli artefatti umani. Definisce l'autonomia del sottosistema o olone come la sua capacità di adattarsi a cambiamenti e incertezze, mentre la cooperazione dell'olone con il sistema complessivo è fondamentale. Tuttavia, l'analisi di Koestler riguardo alla stabilità delle forme intermedie non può essere considerata una legge universale. (1)

2.1.3.2 Legge 2: Massa critica degli utenti

La seconda legge, intitolata "Sets Autocatalitici – Massa Critica degli Utenti", esplora il concetto di set autocatalitici, che sono gruppi di entità in grado di generarsi reciprocamente, creando un ciclo di produzione e crescita autonomo. Sebbene il concetto sia originariamente stato applicato a entità molecolari nella biologia, è stato esteso a sistemi complessi, inclusi quelli economici e sociali, e in questo caso, agli artefatti e ai sistemi progettati e realizzati dall'uomo. Un set autocatalitico è un raggruppamento di entità le cui interazioni reciproche consentono la propria produzione ed espansione. Questa autocatalisi si rivela fondamentale per l'emergenza e la sopravvivenza di sistemi che, a loro volta, diventano sottosistemi di strutture più grandi. Le proprietà come l'autonomia e l'adattabilità sono considerate secondarie rispetto all'autocatalisi, in quanto servono a mantenere e aumentare l'autocatalisi in

ambienti dinamici e mutevoli; ciò mette la seconda legge dell'artificiale in una posizione superiore rispetto alla prima.

Nel contesto di sistemi olonici e mecatronici, è necessario identificare set autocatalitici rilevanti per artefatti e sistemi software. Un software di successo appartiene a due tipi di set autocatalitici:

1. **Set Economico:** Il software offre un valore economico agli utenti, incentivando il flusso di risorse verso gli sviluppatori per mantenere e migliorare il software.

2. **Set di Feedback Informativo:** Gli utenti forniscono riscontri che, combinato con le risorse economiche, permette agli sviluppatori di adattare e migliorare continuamente il software.

I sistemi con una forte autocatalisi sono più competitivi e possono evolvere in sottosistemi di sistemi più complessi. Le caratteristiche di qualità e funzionalità del software possono notevolmente migliorare grazie a questi processi autocatalitici.

Grazie ai fenomeni di autocatalisi, i sistemi riescono a rigenerarsi e ogni volta con un qualcosa in più. Una questione critica è il fenomeno di *“lock-in”*, in cui una soluzione inizialmente vincente domina il mercato, rendendo difficile la competizione per le alternative superiori. Processi autocatalitici che iniziano per primi tendono ad esaurire le risorse e a rendere le altre soluzioni inefficaci. Il lock-in può semplificare l'ambiente, ma può anche portare a scelte progettuali infelici che sono difficili da correggere.

Le scelte iniziali di design possono compromettere la capacità di creare e mantenere sistemi più grandi e migliori nel futuro, creando quello che è noto come un *“legacy”* negativo. Questo è problematico poiché rifugge la capacità di migliorare progressivamente attraverso soluzioni a breve termine. In questo caso viene in aiuto il concetto di Design For Unexprcted (D4U) che si propone di sviluppare soluzioni che evitino problematiche nelle scelte progettuali o che consentano di correggere facilmente scelte problematiche future, puntando a creare una base libera da *“lock-in”*. Questo approccio mira a garantire che le scelte future non siano limitate da decisioni passate problematiche, promuovendo così un progresso sostenibile e incrementale.

2.1.3.3 La legge 3: Controllo senza centralizzazione

Questa legge illustra come la crescita delle sistemazioni competitive che favoriscono dimensioni più grandi porti a una riduzione della fattibilità della coordinazione e del controllo centralizzato a causa della razionalità limitata. Nell'ambito dei sistemi complessi e di conoscenza, l'informazione in eccesso può portare a una scarsa elaborazione dei dati a livello superiore. La razionalità limitata impedisce una corretta sintesi delle informazioni, causando distorsioni. In tal modo, il controllo centrale diventa o inefficace o addirittura dannoso. Quando i leader si sentono obbligati a “guidare” in modo centralizzato, ciò rende il sistema problematico. La leadership efficace dovrebbe invece facilitare e sostenere le performance dei livelli inferiori evitando un comando esplicito, riconoscendo che questi livelli possono operare autonomamente e senza imposizioni.

La Legge 3 stabilisce che quando la competizione premia i sistemi più grandi, questi non possono essere controllati in modo efficace con un approccio centralizzato. Sono necessari nuovi meccanismi di coordinamento, ispirati ad esempio dal comportamento degli insetti sociali, come le formiche, che usano feromoni per guidare i membri verso fonti di cibo senza necessità di controllo centrale (*stigmergia*). Si richiede di progettare un ambiente che:

- Aumenti la visibilità e la chiarezza delle informazioni;
- Permetta deviazioni dal comportamento medio senza ripercussioni;
- Fornisca strumenti per valutare il risultato di diverse azioni;
- Crei capacità collettive evitando obblighi;
- Favorisca impegni tra i partecipanti, aumentando la prevedibilità senza una centralità;
- Semini l'ambiente con informazioni per facilitare decisioni senza imposizioni.

In definitiva, la coordinazione e il controllo nei sistemi complessi non saranno centralizzati a causa della razionalità limitata. Tuttavia, è possibile e utile un importante sforzo di progettazione del sistema per facilitare comportamenti collettivi e individuali positivi.

2.1.3.4 Legge 4: Immaginazione Collettiva e Proattiva

Questa legge sottolinea l'importanza dell'adattamento nei sistemi complessi. Un esempio di adattamento è la vaccinazione, che ha effetti non solo a livello individuale ma anche su scala sociale. L'adattamento del comportamento umano aiuta a superare le situazioni competitive dove già si è fallito. Le previsioni basate su dati storici possono fallire quando un numero elevato di individui cambia il proprio comportamento in risposta a previsioni di congestione, invalidando i dati passati. Il sistema è troppo complesso per un controllo centralizzato e una progettazione completamente decentralizzata manca della capacità di "immaginare" gli effetti futuri delle azioni. Le decisioni, quindi, devono tener conto delle interazioni future, e gli agenti che operano solo sulla base delle informazioni personali non possono avere una visione chiara. Per affrontare questa sfida, è possibile eseguire modelli di piccole componenti del sistema per anticipare gli effetti delle azioni collettive. Questa esercitazione virtuale permette di mantenere aggiornate le previsioni. I partecipanti possono esplorare nuovi corsi d'azione e adattarsi sulla base di informazioni collettive.

In sintesi, la Legge 4 afferma che per una proattività efficace è necessaria la capacità di immaginare gli esiti delle azioni da intraprendere, incluse le interazioni future. Creando un'immaginazione collettiva, i partecipanti non solo prevedono il futuro ma possono anche attivamente contribuire alla sua creazione e mantenimento, sfruttando la massima sinergia nel loro processo decisionale.

2.1.4 L'organizzazione olistica per i sistemi di produzione olistici

In questa parte vengono presentati i risultati preliminari nello sviluppo di una "struttura" per sistemi di produzione olistici, con un'enfasi particolare su produzione e logistica. Le intuizioni discusse nei capitoli precedenti sono state utilizzate come linee guida importanti per garantire la validità delle scelte fatte nel corso dello sviluppo. Tra i fattori chiave che hanno influenzato le decisioni vi sono il design per l'imprevisto (impegno basso e tardivo) e la massimizzazione del potenziale per raggiungere una massa critica di utenti. Le prime fasi di sviluppo si concentrano sui sistemi di esecuzione della produzione (MES), affrontando importanti sfide come processi produttivi imprevedibili, eterogeneità dei prodotti e delle attrezzature, e un ambiente competitivo. In questi contesti, il design per l'imprevisto diventa una necessità. Inizialmente, si presupponeva che un'unica organizzazione decidesse quale software installare e utilizzare, adottando quindi un'assunzione di mondo chiuso che limitava i concetti sviluppati a sistemi "chiusi". Successivamente questi presupposti sono stati abbandonati, permettendo l'emergere di un "società mecatronica umana".

I sistemi olistici, come anticipato nel capitolo 2.1.3.1, si basano sulla "Legge dei Sistemi Olistici" di Koestler e Simon, che osserva che sistemi complessi evolvono più rapidamente da sistemi semplici se esistono forme intermedie stabili. (1) Gli "oloni" vengono proposti come rappresentazione della natura ibrida di parti e tutto in sistemi reali. Gli oloni sono unità autonome che gestiscono le contingenze senza dover chiedere istruzioni a autorità superiori, ma allo stesso tempo sono soggetti al controllo di livelli superiori. Un sistema olistico o olografico è una gerarchia di oloni autogestiti che funzionano come enti autonomi (sovraordinati), ma anche come parti dipendenti (sottordini) in coordinamento con l'ambiente locale. Dopo la sua pubblicazione, il concetto di sistema olistico è stato riconosciuto dai ricercatori giapponesi nei loro sforzi di reinventare le fabbriche del XXI secolo, utilizzando il concetto di sistemi olistici come base per il futuro della produzione.

I sistemi di produzione olistici (HMS) sono stati sviluppati come risposta alle carenze dei sistemi di fabbrica tradizionali, spostandosi da architetture di controllo centralizzate, gerarchiche ed eterarchiche, ognuna con i propri vantaggi e svantaggi. I sistemi di controllo centralizzati hanno una scarsa reattività e affidabilità; quelli gerarchici introducono livelli di controllo rigorosi con vantaggi e rigidità; le architetture eterarchiche favoriscono l'autonomia ma soffrono di bassa prevedibilità. I sistemi di produzione olistici mirano a combinare le prestazioni previste dei sistemi gerarchici con la robustezza e l'agilità dei sistemi eterarchici, consentendo a singoli oloni di rispondere rapidamente agli imprevisti in gerarchie flessibili. Queste gerarchie non sono rigide e permettono agli oloni di appartenere a più gerarchie o formare gerarchie temporanee. Nella realizzazione di un sistema di produzione olistico, i concetti di Koestler sono stati tradotti in definizioni utili per la produzione. Un olone è descritto come un'unità autonoma e cooperativa per la trasformazione, il trasporto, la conservazione e la validazione di informazioni e oggetti fisici. L'autonomia riguarda la capacità di un olone di pianificare e controllare l'esecuzione delle proprie strategie, mentre la cooperazione concerne lo sviluppo e l'esecuzione di piani accettabili tra più oloni. Infine, i sistemi multi-agente si configurano come una naturale scelta per implementare i sistemi olistici, data la capacità di gestire entità autonome e cooperative. Tuttavia, vi sono differenze rilevanti: un olone può contenere altri oloni, mentre un agente è un'entità software pura. Sorprendentemente, il software Erlang/OTP si è rivelato il più adatto per la ricerca, superando le tecnologie di sviluppo della comunità multi-agente.

La produzione in un'industria è tipicamente organizzata secondo un piano stabilito prima dell'inizio delle operazioni. I sistemi MES, tuttavia, segnalano una lacuna nella pianificazione predefinita: i piani, pur specificando le attività da svolgere, quale

macchina usare e in quali tempi, non forniscono dettagli critici come il modo di trasportare i pezzi, le modalità di stoccaggio o l'uso di strumenti. Questi piani vengono aggiornati regolarmente (settimanali, giornalieri, ogni turno o ora). Nella pratica, l'esecuzione della produzione diverge dai piani già nelle prime fasi. Seppur vengano utilizzate date di rilascio e scadenze, il management delle attività produttive avviene in modo autonomo sulla linea di produzione. I piani sono più utili per il resto dell'organizzazione, per mantenere aspettative realistiche riguardo alla produttività. Viene indicato un divario tra teoria accademica avanzata e pratica industriale. Nonostante ulteriori sviluppi nella tecnologia di pianificazione, il problema di pianificazione e programmazione rimane complesso e computazionalmente difficile (NP-hard). Un algoritmo di pianificazione efficiente che possa risolvere questi problemi senza semplificazioni o scelte arbitrarie è poco probabile.

Le organizzazioni manifatturiere devono bilanciare due obiettivi principali:

1. **Ottimizzazione delle Prestazioni di Produzione:** Riconducibile agli obiettivi di gestione, come riduzione dei costi e soddisfacimento della domanda.
2. **Robustezza e Completezza:** Eseguire gli obiettivi di produzione considerando dettagli critici e gestendo incertezze e disturbi imprevisti. I sistemi di esecuzione della produzione (HMES) sono stati creati per affrontare questo secondo obiettivo.

La cooperazione tra HMES e sistemi di pianificazione è vista come necessaria per ottenere prestazioni elevate, garantite dal pianificatore, e un'esecuzione robusta, gestita dall'HMES.

L' Esecuzione del Programma è il processo che prende decisioni di allocazione delle risorse in tempo reale, basandosi su un programma esistente ma tenendo conto dello stato attuale delle risorse e degli ordini. Nell'HMES, l'esecuzione degli ordini è facilitata attraverso meccanismi di esplorazione e intenzione. La simulazione virtuale delle attività produttive consente di individuare rapidamente eventi imprevisti e di proporre soluzioni alternative. Tuttavia, le implementazioni base degli HMES tendono ad operare con una prospettiva ottimale individuale, necessitando di ulteriori ricerche per integrare la pianificazione esistente. Per bilanciare l'aderenza al programma originale e la capacità di adattarsi a nuove circostanze, sono stati introdotti processi di “ultimo miglio della pianificazione” e “ottimizzazione online”. Questi processi lavorano in congiunzione per generare decisioni di allocazione delle risorse più appropriate e precise.

2.1.5 Interoperabilità

Questa sezione riguardo all'interoperabilità sottolinea l'importanza di predire e progettare con l'imprevisto, il che richiede una comprensione più profonda dell'integrazione. L'interoperabilità, secondo la comunità di ricerca, connette i sistemi esistenti senza modificarli radicalmente. Al contrario, l'integrazione di sistemi richiede adattamenti sostanziali, rendendo i sistemi integrati meno autonomi. Per integrare i "Design for the Unexpected" (D4U), è sufficiente renderli interoperabili. Questo implica che la maggior parte degli elementi D4U diventa interoperabile, con l'aggiunta di elementi non D4U per completare il sistema. Questi punti generano discussioni su come l'interoperabilità e gli standard possano contribuire a una migliore integrazione.

Alcuni nodi principali riguardanti tali discussioni sono:

1. **Decisioni senza vincoli:** L'interoperabilità riuscirà meglio quando rimarrà priva di decisioni vincolanti (ad esempio, la conversione di coordinate).
2. **Margini ampi:** Le decisioni per rendere i sistemi interoperabili possono essere facilmente ignorate se i margini sono ampi, come nel caso della gestione del tempo tra sistemi che collaborano.
3. **Evitare scelte miopi:** D4U evita di concentrarsi su guadagni minori a scapito di scelte più costose ma necessarie.
4. **Capacità di interagire:** Molti sistemi possono interoperare grazie alla capacità di utilizzare ampi margini di banda o spazio di memoria (es. XML, JSON).
5. **Fallimenti degli sforzi di standardizzazione:** Molti tentativi di standardizzazione falliscono a causa di conflitti intrinseci e lotte per il controllo, evidenziando la necessità di una visione più pragmatica dell'interoperabilità.

L'interoperabilità, oltre ad avere questi campi di discussione appena citati, si ripercuote per forza di cose sull'allocazione delle risorse e nel tempo di allocazione di tali. La sezione sull'allocazione multi-risorsa affronta problemi reali che coinvolgono attività che richiedono più risorse, come nel caso di sistemi logistici ologici. Qui, è fondamentale coordinare non solo le risorse principali (come camion e conducenti) ma anche le operazioni ausiliarie (es. rifornimenti, manutenzione).

Si identificano tre classi di soluzioni:

-Leader-follower: Le risorse principali vengono allocate e, successivamente, quelle secondarie, assumendo che le prime siano scarse.

-Programmazione fissa: Le risorse non principali vengono allocate tramite programmi fissi, rendendo il processo più adattivo con sistemi olonici.

-Pool di risorse: Risorse simili possono essere gestite in pool, facilitando l'allocazione e la riallocazione quando necessario.

Se un'operazione ausiliaria non riesce a mantenere le risorse principali operative, il sistema lo rileverà e si adatterà di conseguenza. In generale, mentre le previsioni offrono opportunità interessanti, sono necessarie ulteriori indagini per affrontare le sfide del mondo reale nell'allocazione multi-risorsa e nella gestione delle operazioni ausiliarie. Da qui in avanti vengono presi in considerazione diversi aspetti legati alla probabilità e alle distribuzioni nel contesto delle operazioni reali, evidenziando la natura stocastica dei risultati.

2.1.6 L'importanza della partecipazione e del coinvolgimento degli umani nelle fasi gestionali e il ruolo delle tecnologie ICT

Per avere una società umana meccatronica bisogna cercare di far interagire il fattore umano, infatti, d'ora in avanti si esplora come le ricerche recenti di D4U si concentrano sull'interazione umana all'interno di sistemi olonici, con particolare riferimento al contesto della salute integrata, coinvolgendo pazienti e fornitori di assistenza sia professionali che non professionali. Si evidenzia l'importanza di affrontare le questioni sociali e umanistiche per una riuscita integrazione delle tecnologie nella società, con l'obiettivo di creare una società più umana. Si sottolinea il potenziale delle analisi dei big data, che spesso operano in modo opaco per l'individuo, e come D4U si differenzi grazie alla sua capacità di incorporare le intenzioni esplicitamente, creando previsioni basate su esperienze passate per stimare comportamenti futuri anche in assenza di dati storici aggregati. D4U si distingue per il suo utilizzo di informazioni più pertinenti e per la necessità di partecipazione attiva degli utenti, creando un'infrastruttura che consente interazioni sociali virtuali per la gestione delle attività quotidiane. Questo sistema mira a ridurre la frustrazione legata a scelte errate dovute alla mancanza di informazioni tempestive. Ad esempio, in caso di uno sciopero ferroviario, D4U permetterebbe ai pendolari di adattare i loro piani di viaggio in anticipo, migliorando l'efficienza e riducendo la congestione.

Diverse opportunità emergono attraverso D4U, tra cui:

- 1. Riconoscimento dei buoni comportamenti:** garantire che le azioni positive siano virtualmente riconosciute, evitando che chi agisce per il bene comune venga penalizzato.
- 2. Transazioni giuste:** consentire la pianificazione dettagliata di transazioni complesse prima della loro esecuzione reale.
- 3. Costruzione di accordi:** permettere ai partecipanti di fare offerte piccole per iniziare negoziazioni senza esporsi a possibili sfruttamenti.
- 4. Gestione partecipativa del cambiamento:** facilitare la visibilità delle responsabilità e delle opportunità in un contesto organizzativo in evoluzione.
- 5. “Coordination among peers”:** ridurre la necessità di controllo gerarchico grazie alla previsione delle attività e alle interazioni tra pari.

Tuttavia, l'infrastruttura D4U è solo una parte della soluzione; è necessaria anche una base legale e culturale per sostenere l'implementazione. L'innovazione culturale e la selezione di obiettivi iniziali sono fondamentali per affrontare i problemi operativi e realizzare progetti di successo, sebbene ci siano sfide da affrontare. Si enfatizza un design incentrato sul paziente, in cui ogni individuo è rappresentato da un "e-Person", un'entità virtuale che raccoglie dati e ruoli associati. Questo approccio offre un controllo senza precedenti ai pazienti sui propri dati, garantendo che le informazioni siano accessibili solo a chi ha l'autorizzazione. Le tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) devono garantire la sicurezza e la privacy dei dati, mentre le politiche devono supportare l'empowerment. Inoltre, l'implementazione di “e-Person” offre opportunità per migliorare la privacy. Gli individui possono gestire le proprie informazioni e decidere quali dati condividere, contribuendo a creare un ambiente di protezione della privacy. È fondamentale garantire che l'accesso ai dati avvenga solo attraverso queste entità virtuali, ponendo ogni individuo al centro del controllo delle proprie informazioni. Infine, si può concludere che, sebbene ci siano molteplici dimensioni da esplorare, la ricerca futura è promettente. D4U offre un vantaggio competitivo rispetto alle attuali strategie di analisi dei big data, poiché consente di co-creare il futuro in modo iterativo e collettivo, richiedendo la partecipazione attiva di tutti gli individui coinvolti. La ricerca interdisciplinare sarà cruciale per affrontare le problematiche sociali prima che diventino reali, progettando ICT che siano in sintonia con elementi legali, sociali, economici ed etici. (1)

2.2 Architettura di riferimento: PROSA

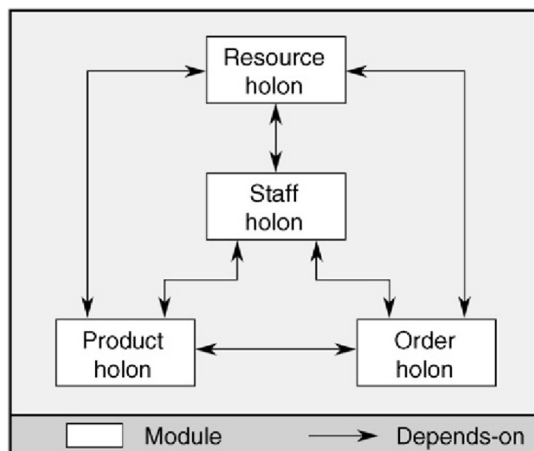


Figura 3- Architettura di riferimento PROSA

La sezione analizza la struttura di un sistema di produzione olistico, noto come sistema di oloni, e la sua architettura, concentrandosi sulla olarchia, ovvero la rete di oloni. Non si occupa della struttura interna dei singoli oloni. Un'architettura di riferimento mappa varie funzionalità in componenti software e flussi di dati, fungendo da base per progettare l'architettura di un sistema specifico. L'architettura di riferimento PROSA ("Product-Resource-Order-Staff Architecture"), sviluppata per il settore manifatturiero, separa elementi essenziali e opzionali, differenzia aspetti strutturali e funzionali e permette l'integrazione di sistemi legacy. PROSA si fonda sul paradigma della produzione olistica, con oloni di varie tipologie: *olone prodotto*, *risorsa* e *ordine*, accompagnati eventualmente da un *olone di staff*. Ogni tipologia di olone rappresenta un'area specifica: pianificazione dei processi, allocazione delle risorse e gestione della logistica.

Olone Risorsa: Rappresenta le risorse fisiche come attrezzature e infrastrutture. L'olone di risorsa offre conoscenze sulla capacità e funzionalità di elaborazione, mantenendo uno stato aggiornato della risorsa e gestendo un'agenda delle operazioni future. Gestisce la sua programmazione locale e deve controllare le operazioni reali.

Olone Prodotto: Rappresenta un tipo di ordine o compito, contenendo le conoscenze necessarie per l'esecuzione. È responsabile della manutenzione delle informazioni sui processi e delle opzioni per le operazioni future, fornendo agli oloni di ordine le informazioni richieste riguardo ai parametri di processo.

Olone Ordine: Rappresenta un ordine specifico e gestisce le allocazioni necessarie per l'esecuzione del compito. Consulta il corrispondente olone di prodotto per conoscere le operazioni da eseguire e cerca le risorse disponibili. Si aggiorna continuamente sul suo stato e le sue ricerche di soluzioni.

Olone di Staff: Fornisce conoscenza e supporto decisionale senza sostituirsi agli oloni di base, mantenendo una certa centralizzazione per garantire buone performance complessive. Può anche offrire consulenze su pianificazione e ottimizzazione.

In sintesi, la struttura di un sistema di produzione olistico è composta da diversi tipi di oloni che collaborano per gestire e ottimizzare i processi produttivi, ognuno con ruoli e responsabilità specifici che facilitano sia l'autonomia che la cooperazione.

Di seguito vengono descritte le interazioni tra i vari oloni all'interno di un sistema olonico, come quello delineato dall'architettura di riferimento PROSA. Le interazioni principali coinvolgono tre categorie di oloni: oloni ordine, oloni prodotto e oloni risorse.

Nell'**Interazione ordine-prodotto** gli oloni ordini si interfacciano con gli oloni prodotto per ottenere indicazioni su come eseguire correttamente le loro operazioni utilizzando determinate risorse. Dopo l'esecuzione di un'operazione (anche virtuale), l'olone ordine comunica all'olone prodotto lo stato risultante e le risorse disponibili per le operazioni successive. L'olone prodotto, a sua volta, offre all'olone ordine un elenco delle possibili operazioni future, come ad esempio il trasporto diretto a destinazione finale o il trasferimento a un hub intermodale.

Nell'**Interazione prodotto-risorsa** gli oloni prodotto condividono informazioni sui processi con gli oloni risorsa. Quando si crea un elenco di operazioni possibili per un olone ordine, l'olone prodotto collabora con gli oloni risorsa per scoprire quali operazioni possono essere eseguite (in base alle risorse disponibili). Inoltre, gli oloni prodotto forniscono agli oloni risorsa i parametri necessari per eseguire correttamente un ordine. Un esempio citato è quello del trasferimento rapido di prodotti refrigerati tra camion in un terminal non refrigerato, dove è fondamentale rispettare un tempo massimo di trasferimento.

L'**Interazione risorsa-ordine**, invece, è fondamentale per la prenotazione delle operazioni sulle risorse. Gli oloni risorsa informano gli oloni ordine sui risultati delle operazioni virtualmente eseguite e riservano capacità quando richiesto. Durante l'esecuzione di un'operazione, gli oloni risorsa comunicano anche agli oloni ordine il risultato e il progresso dell'esecuzione. Le dinamiche di coordinamento e controllo emergono in modo auto-organizzato dalle interazioni tra i vari oloni.

Durante lo sviluppo dell'architettura di riferimento PROSA, è stata prestata particolare attenzione alla separazione delle problematiche. I tre tipi di olone rappresentano preoccupazioni distinte all'interno del dominio sottostante. Una caratteristica fondamentale di PROSA è la separazione tra aspetti di allocazione delle risorse e aspetti specifici del processo. Gli oloni prodotto sono competenti riguardo le capacità delle risorse a loro rilevanti, ma non considerano la capacità e la disponibilità delle risorse stesse. Gli oloni ordine e oloni risorsa si occupano dell'allocazione delle risorse, massimizzando così il potenziale per raggiungere una massa critica nelle implementazioni di sistemi di produzione olonici (HMES) e sistemi di esecuzione leggera (LES). In sintesi, l'approccio PROSA garantisce che la separazione di preoccupazioni contribuisca a una progettazione flessibile e reattiva, riflettendo in modo efficace le reali possibilità operative degli oloni e preparando il sistema a gestire conflitti e incertezze.

Inizialmente, le implementazioni del sistema PROSA funzionavano come sistemi di controllo eterarchico senza ottimizzazione globale, operando in modo "miopico" simile ad automobili in traffico. Questo portava a inefficienze e alla necessità di uno schedatore reattivo per gestire le perturbazioni. Per affrontare questa miopia, i ricercatori hanno cercato ispirazione in due direzioni. La prima era l'idea di emissione di segnali da parte delle stazioni di lavoro prima di diventare inattive, ma questo approccio si è rivelato insoddisfacente, poiché i segnali arrivavano troppo tardi. La seconda fonte di ispirazione è stata il comportamento delle formiche nel foraggiare cibo, noto come stigmergia. Le formiche, quando non trovano segnali nell'ambiente, avviano una ricerca casuale di cibo. Quando trovano una fonte di cibo, depositano una sostanza chiamata feromone che crea un sentiero verso la fonte stessa. Questo sentiero si dissolve nel tempo se non viene rinnovato da altre formiche. Questo meccanismo semplice genera un comportamento emergente altamente ordinato ed efficace nel foraggio, affrontando in modo robusto l'incertezza ambientale e la complessità.

I principi derivati dalla “stigmergia” per progettare sistemi di coordinamento e controllo includono:

- Integrare l'ambiente nella soluzione per gestire la complessità senza esserne esposti.
- Posizionare informazioni rilevanti (feromoni) come segnali nell'ambiente per supportare la coordinazione a livello di sistema.
- Limitare la durata delle informazioni per poter reagire a cambiamenti e perturbazioni.

I risultati della ricerca hanno tradotto le dinamiche di foraggiamento delle formiche in una soluzione per superare la miopia nei sistemi di coordinamento decentralizzati,

rendendo disponibili localmente informazioni non locali, sia in senso geografico che temporale. Questo approccio ha portato all'adozione del termine bene conosciuto "Design for Unexpected" per descrivere l'intero progetto di ricerca.

2.3 Architetture di Controllo Olonico (HCA) e le sue classificazioni

In questo capitolo viene discussa l'evoluzione dei sistemi industriali verso il concetto di Industry 4.0, caratterizzato dallo sviluppo di risorse altamente connesse lungo l'intero processo produttivo; quindi capire come agiscono i sistemi HMES sulla produttività a livello manifatturiero. Questo flusso costante di informazioni, accessibile a tutti gli attori coinvolti, offre numerose opportunità per migliorare l'efficienza in diverse fasi del ciclo di vita del prodotto. I benefici diretti sono previsti in vari ambiti:

- **Design:** L'uso di strumenti digitali avanzati consente uno sviluppo innovativo dei prodotti, permettendo la prototipazione sia fisica che virtuale per la progettazione di prodotti intelligenti, come nel caso della manifattura additiva o della realtà virtuale.
- **Logistica/Fornitura:** La trasmissione immediata delle informazioni lungo l'intera catena di fornitura facilita la sincronizzazione costante tra i diversi attori e permette un adattamento più semplice a cambiamenti imprevisti.
- **Produzione:** L'integrazione di oggetti comunicanti nella linea di produzione consente la raccolta di informazioni in tempo reale riguardo al sistema produttivo, permettendo aggiustamenti immediati in caso di condizioni anomale o cambiamenti.
- **Manutenzione e Riciclo:** Le informazioni raccolte possono portare a nuove capacità di monitoraggio basate su simulazioni e gestione della conoscenza.

Introducendo il concetto nel 2011, l'Industria 4.0 è oggi associata alla digitalizzazione, all'interconnessione e a nuove tecnologie di produzione, con l'obiettivo di sviluppare modelli di business innovativi, un uso sostenibile delle risorse e una produzione economica di prodotti altamente personalizzati. Il termine è definito come un sistema di comunicazione che avviene in tempo reale, con un alto volume di dati e interconnessione tra sistemi cyber-fisici e persone. L'accento è posto sulla necessità che i sistemi di produzione futuri, conformi all'Industria 4.0, rispettino determinati requisiti. Un'analisi di 176 articoli accademici, condotta da Liao et al. (2017), ha portato a una lista di prerequisiti per i sistemi di controllo conformi all'Industria 4.0. *Acatech*, l'Accademia Nazionale Tedesca delle Scienze e dell'Ingegneria, descrive l'Industria 4.0 come un nuovo livello di interazione sociotecnica tra tutti gli attori e le

risorse coinvolte nella manifattura, caratterizzato da risorse autonome e capaci di autogestirsi. In questo contesto, la sicurezza e la protezione dei dati sono vitali. Secondo Brettel et al. (2014), l'Industria 4.0 è realizzabile attraverso sistemi composti da entità distribuite e auto-controllate, in grado di acquisire e processare grandi quantità di dati. I prodotti devono comunicare con l'ambiente circostante e influenzare l'organizzazione del sistema di produzione. Berger (2014) evidenzia l'importanza di robot intelligenti e interfacce uomo-macchina, sottolineando la necessità di gestire il Big Data in modo sicuro. (4)

Schuh et al. (2017) identificano elementi essenziali per l'Industria 4.0, tra cui capacità in tempo reale, analisi dei big data e integrazione verticale e orizzontale dei processi. Gli autori come Vogel-Heuser e Hess (2016) enfatizzano la necessità di auto-organizzazione, adattabilità e integrazione dei dati, mentre Hermann et al. (2016) propongono sei principi di design per l'Industria 4.0: interoperabilità, virtualizzazione, decentralizzazione, capacità in tempo reale, orientamento ai servizi e modularità. (4)

Questi prerequisiti formano una visione coerente delle caratteristiche chiave necessarie per i sistemi di controllo dell'Industria 4.0. È importante notare che questi elementi non sono indipendenti, ma interconnessi; per esempio, la connettività è fondamentale per tutti gli altri abilitatori chiave.

Il modello RAMI 4.0 (Reference Architecture Model for Industry 4.0) illustra la trasversalità di questo approccio lungo il ciclo di vita del prodotto, evidenziando le sfide rimanenti da affrontare. Questo modello tridimensionale (Fig. 4) connette aspetti multi-scala dell'Industry 4.0 (dalla produzione alla catena di fornitura) con un'integrazione verticale dei dati (dalle risorse ai processi aziendali) più intensa di quanto non avvenga attualmente. L'Industry 4.0 presuppone un'adattabilità in tempo reale dell'intera azienda a cambiamenti interni ed esterni, come perturbazioni durante la produzione o variazioni nei rapporti cliente-fornitore. Per gestire efficacemente i dati in questo contesto, è fondamentale definire sistemi informativi aziendali dotati di architetture di controllo connesse, interoperabili, flessibili e reattive.

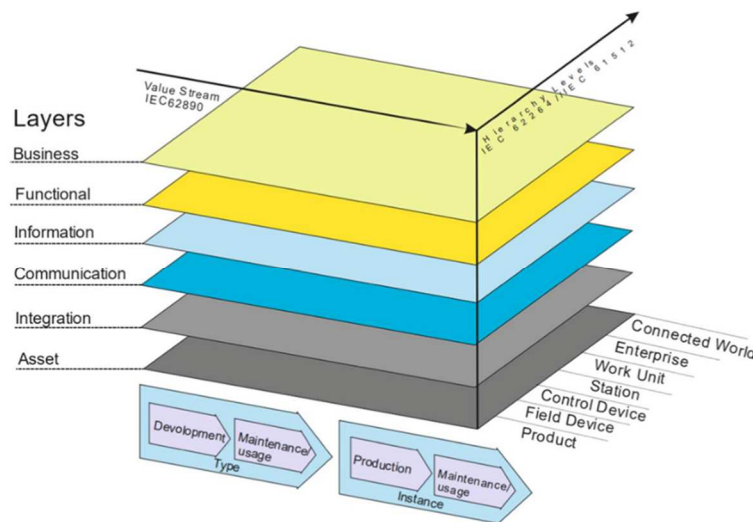


Figura 4 - Modello RAMI 4.0

Nel dominio della produzione, molte ricerche si concentrano sul controllo della produzione, considerando il piano di lavoro come un sistema composto da entità autonome che collaborano per raggiungere obiettivi comuni. Il concetto di "olone" descrive queste entità come parti autonome che possono formare una gerarchia, nota come "olarchia". L'architettura di controllo olistico (HCA) è il termine usato per descrivere la parte informativa di questa gerarchia, che è stata ampiamente studiata e sviluppata negli ultimi venti anni.

L'architettura di controllo olistica (HCA) è un modello organizzativo costituito da oloni, che formano una "olarchia". Un olone è un'entità decisionale comunicante, dotata di input e output, composta da sotto-oloni e parte di un'organizzazione più ampia formata da oloni di livello superiore. Gli oloni possiedono sia una componente fisica sia una digitale, che può essere modellata come agente digitale, avatar o gemello digitale. All'interno di un'olarchia, gli oloni possono prendere decisioni con un certo grado di autonomia. Un aspetto cruciale degli oloni è l'interfaccia olone-olone, ma è necessaria anche un'interfaccia umana-olone per facilitare la comunicazione tra un umano e un olone. Le HCA presentano alcune proprietà generiche, tra cui la capacità decisionale. Da decenni, la ricerca sulla decisione da parte di entità artificiali è attiva. Nella comunità di gestione industriale, decidere significa ridurre un insieme di possibilità. Le attività decisionali classiche comprendono la scelta e il ranking in contesti discreti e continui. Nel contesto delle HCA, il processo decisionale si integra in una dimensione più ampia, che include diverse attività: monitoraggio, attivazione, progettazione delle decisioni possibili, valutazione a priori, decisione, applicazione e valutazione a posteriori. Il comportamento di un olone può essere reattivo, rispondendo automaticamente a stimoli, o proattivo, orientato a obiettivi. Gli oloni cercano sempre di prendere decisioni ottimali a livello locale e globale, utilizzando modelli di

simulazione o di ottimizzazione. La natura ricorsiva della olarchia implica che il processo decisionale può essere implementato su più livelli di oloni. Per esempio, un olone di controllo qualità può essere gestito da oloni di livello inferiore che decidono il miglior livello di attivazione per evitare reazioni eccessive o perdite di clienti.

Un olone opera in un ambiente in continua evoluzione e non sempre prevedibile. Gli obiettivi predefiniti possono diventare non validi in seguito a cambiamenti ambientali; quindi, è necessaria un'adattabilità per modificare i propri obiettivi in base alla conoscenza dell'ambiente. L'apprendimento, inteso come generazione di nuove conoscenze dai dati acquisiti, è essenziale.

L'autonomia è un'altra proprietà fondamentale, definita come il grado di libertà decisionale di ogni olone, indipendentemente dal livello. Può essere fissata in fase di progettazione o regolata da oloni di livello superiore durante l'operatività. Ad esempio, un olone supervisore può limitare le opzioni di risorse disponibili per oloni di prodotto inferiori a causa di operazioni di manutenzione. La cooperazione tra oloni può ampliare o restringere la loro autonomia, attraverso protocolli di negoziazione diretti o comunicazioni basate su feromoni. Questa cooperazione include anche l'interazione con operatori umani.

Un aspetto importante delle HCA è l'apertura, che consente l'integrazione o la rimozione di oloni con un intervento esterno minimo. Le HCA sono caratterizzate dalla possibilità di modificare le relazioni gerarchiche tra oloni senza interventi complessi. Grazie a queste caratteristiche, possono emergere comportamenti a un livello superiore della HCA che non sono stati esplicitamente programmati negli oloni sottostanti. Si ipotizza che le HCA possano soddisfare alcuni requisiti chiave dei sistemi di produzione dell'Industria 4.0. Le proprietà delle HCA, come il supporto decisionale autonomo e decentralizzato, la decisione e l'autonomia, si allineano con i principi dell'Industria 4.0. Tuttavia, è emerso che le ricerche sulle HCA potrebbero coprire solo alcune delle proprietà necessarie, e quindi solo parti dei requisiti dell'Industria 4.0.

Il prossimo passo del lavoro di ricerca sarà analizzare i contributi attuali nel campo delle HCA applicate ai sistemi di produzione, suddividendoli in sei categorie: Storico, Dinamico, Orientato ai Dati, Centrato sul Prodotto, Orientato al Web e Basato su Gemelli Digitali. Queste categorie richiamano i diversi abilitatori chiave dell'Industria 4.0 correlati ai contributi studiati.

Implementare un sistema di controllo su un insieme di entità autonome che comunicano rappresenta una sfida complessa nel campo della ricerca. Diverse opere di ricerca si concentrano sulle Architetture di Controllo Oloniche (HCA) e propongono vari modelli con proprietà specifiche. Tra queste, alcune sono considerate "Architetture Storiche", in quanto fungono da base per la definizione di nuove architetture. Altre si focalizzano sulla proprietà di "adattabilità" dei sistemi olonici, includendo meccanismi di riorganizzazione a livello strutturale, e sono definite "Architetture Dinamiche". Esistono anche architetture che studiano meccanismi di "apprendimento/aggregazione", note come "Architetture Orientate ai Dati". Alcune architetture storiche sono sviluppate specificamente per gestire i dati relativi agli oloni di prodotto e vengono chiamate "Architetture Centrate sul Prodotto". Infine, le "Architetture Orientate al Web" sono progettate per essere compatibili con le tecnologie cloud, mentre le più recenti "Architetture Basate su Digital Twin" integrano il concetto di gemello digitale, rappresentando un'evoluzione nell'approccio alla gestione dei sistemi autonomi comunicanti.

Le **Architetture Storiche**, con un approccio innovativo alla produzione e alla gestione dei sistemi, sono pionieristiche, sviluppate all'inizio del concetto di HCA, incorporano proprietà del paradigma olonico come cooperazione, autonomia e capacità decisionale sia reattiva che proattiva. In questa categoria troviamo:

- **Architettura PROSA**

Nel 1998 hanno presentato l'architettura di riferimento PROSA (Product-Resource-Order-Staff Architecture), derivante da un progetto IMS chiamato "*Holonic Manufacturing Systems*", avviato nel 1996. Questa architettura (Fig. 5) è composta da quattro oloni:

- Olone Prodotto: gestiscono le conoscenze relative alla produzione.
- Olone Risorsa: si occupano delle conoscenze sui processi.
- Olone Ordine: gestiscono l'esecuzione dei processi.
- Olone di Staff: forniscono consulenza globale all'intera architettura, anche se non sono rappresentati nel diagramma.

PROSA è stata ampiamente citata nella letteratura ed è stata alla base di sviluppi in vari domini, come la logistica e la manutenzione ed è tratta nello specifico nel capitolo 2.2.

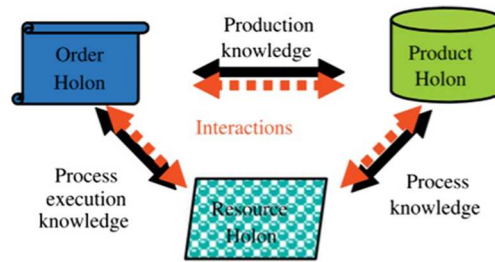


Figura 5 - Architettura semplificata PROSA

○ Architettura PROSIS

Un esempio di architettura successiva è PROSIS (Product, Resource, Order, Simulation for Isoarchy Structure), progettata per un paradigma organizzativo alternativo chiamato “isoarchia”, in cui non ci sono legami gerarchici tra gli oloni. Qui, lo Staff Holon è sostituito da un “Olone Simulazione” che simula l'evoluzione del sistema di produzione attraverso l'analisi delle interazioni tra gli oloni.

○ Architettura HCBA

L'HCBA (Holon Component Based Architecture) rappresenta una fusione di concetti provenienti dallo sviluppo basato su componenti, dai sistemi multi-agente e dagli HMS. Questa architettura decentralizzata include due componenti principali (Fig. 6):

- Resource Component: gestisce la programmazione delle operazioni e l'ottimizzazione dell'uso delle risorse.

- Product Component: include sia una parte fisica (materiali, parti, pallet) che una parte informativa (gestione del programma di produzione, controllo del processo, decisioni).

All'interno di HCBA, i WIP agents (Work in Process) negoziano con la comunità delle risorse per pianificare i processi di lavorazione.

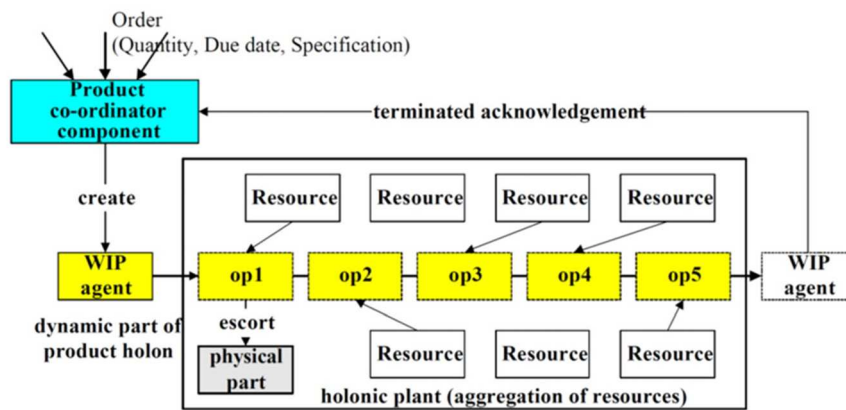


Figura 6 - Struttura dell'architettura HCBA

○ Architettura Delegate MAS:

Il DMAS è un concetto architetturico presentato per chiarire le terminologie relative ai sistemi multi-agente, particolarmente nei prototipi di ricerca HMES (Holonc Multiagent System). Il modello Delegate MAS (Fig. 7) consente a un agente di delegare responsabilità a un gruppo di agenti leggeri, ispirato al comportamento di ricerca del cibo delle formiche.

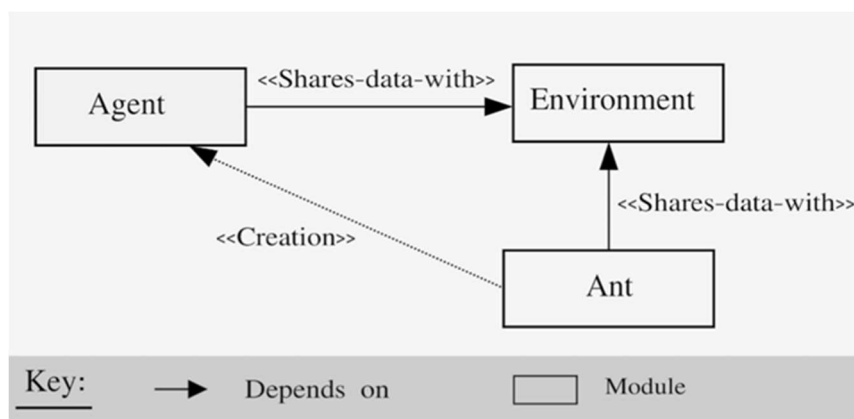


Figura 7 - Vista dell'architettura DMAS

L'architettura DMAS è composta da:

- Pattern Architetturale: Il DMAS rappresenta un modello che definisce come gli elementi coesivi di un'architettura software interagiscono. Comprende la descrizione dei componenti software e delle loro interazioni, includendo restrizioni sui componenti e sulle loro interfacce.
- Delegazione di Responsabilità: Un agente, descritto come un olone, può delegare responsabilità a un gruppo di agenti leggeri (detti ant agents o semplice "ants"), che svolgono compiti specifici per supportare l'olone nell'assolvere le sue funzioni. Un

olone può delegare più responsabilità contemporaneamente e utilizzare combinazioni di DMAS per affrontare una sola responsabilità.

Il DMAS utilizza tre moduli principali per la sua esecuzione:

1. Ambiente: Rappresenta il contesto in cui gli agenti operano.
2. Agente: Rappresenta l'olone che emette i comandi agli ant agents.
3. Ant: Gli agenti leggeri stessi, ispirati agli insetti, progettati per eseguire compiti specifici.

Le relazioni tra i moduli evidenziano che gli agenti e gli ants condividono dati con l'ambiente, mentre la creazione degli ants avviene a partire dall'agente. Gli Ant Agents operano attraverso un processo ben definito che inizia con la loro creazione e inizializzazione. Questi agenti, conosciuti come "ants", vengono generati da un'entità chiamata "olone emittente", partendo generalmente da una posizione che di solito corrisponde alla residenza dell'olone stesso, come nel caso di un portatore di prodotto. Una volta creati, gli ants iniziano a muoversi in modo autonomo all'interno di un ambiente virtuale, esplorando e interagendo con esso. Durante i loro viaggi, che possono avvenire in entrambe le direzioni, gli agents svolgono un'importante funzione: raccolgono e depositano informazioni lungo il percorso, facendo uso di feromoni digitali per comunicare e segnare le loro tracce.

La navigazione all'interno di questo ambiente avviene attraverso una topologia specifica, che permette agli ants di esplorare e scoprire il loro mondo d'interesse. Gli oloni delle risorse giocano un ruolo cruciale in questo processo, poiché sono in grado di conoscere i loro vicini tramite informazioni locali. Questo porta alla creazione di un grafo diretto, che facilita la navigazione degli ants e ottimizza le loro interazioni nel sistema.

Un altro aspetto fondamentale del funzionamento degli Ant Agents è la gestione della popolazione. L'olone che delega la creazione degli ants ha la responsabilità di determinare la dimensione della popolazione e la diversità degli agenti. Questo olone decide con quale frequenza devono essere creati nuovi ants e come devono essere inizializzati, assicurando così un equilibrio e un'efficacia nel funzionamento del sistema. In questo modo, la dinamica degli *Ant Agents* si mantiene vitale e adattabile alle esigenze del contesto in cui operano.

Nei prototipi di ricerca si distinguono tre tipologie di DMAS: "*feasibility*", "*exploring*", and "*intention*" DMAS.

Nel “**Feasibility Ants**” gli ants delegati da un olone di risorsa forniscono informazioni di fattibilità globale localmente agli altri oloni. Operano identificando e depositando informazioni sulle capacità delle risorse in modo che gli oloni degli ordini possano decidere localmente le opzioni di instradamento disponibili.

Gli ants partono da nodi finali nel grafo delle risorse (vedi Fig. 8) e si muovono verso "upstream", raccogliendo informazioni durante il viaggio. Queste informazioni permettono una rapida adattabilità alle modifiche in capacità e topologia nel sistema. In sintesi, il DMAS è un modello che consente ad un olone di delegare responsabilità a un gruppo di agenti leggeri, permettendo una gestione efficace delle informazioni e delle risorse all'interno di un sistema multi-agente.

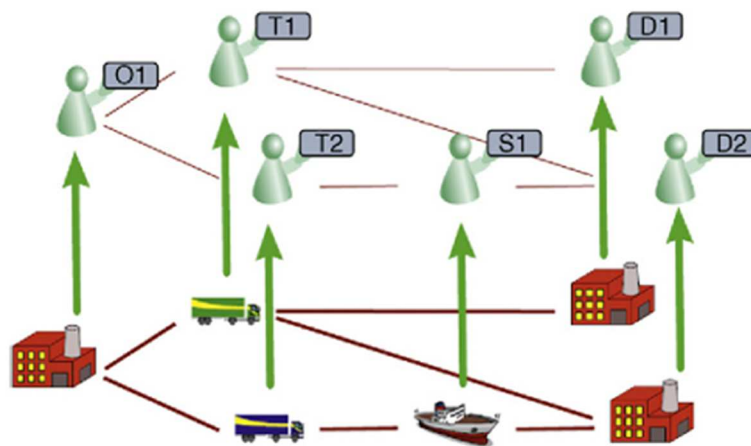


Figura 8 - Esempio di un Grafo di Risorse

Il sistema di gestione della produzione viene gestito attraverso agenti di tipo "ant" (formiche), utilizzati per esplorare e pianificare il lavoro in ambienti produttivi. Questo sistema prevede la generazione di *agenti esploratori* e *agenti di intenzione* da parte di agenti d'ordine, ognuno con compiti specifici.

Gli **Agenti Esploratori** hanno la funzione di cercare un percorso efficace attraverso il sistema produttivo per portare a termine un dato compito. A seconda delle diverse priorità degli ordini (urgenti, normali, di bassa priorità, di manutenzione), questi agenti esplorano sia in avanti (minimizzazione dei tempi di consegna) che all'indietro (accuratezza delle date di consegna).

Gli agenti esploratori applicano una metodologia esecutiva e una strategia differenti. Gli “*explorer agent*” usano lo stesso metodo degli agenti d'ordine per gestire l'esecuzione virtuale dei compiti. Depositano informazioni su delle "lavagne nere" che raccolgono dati sui percorsi validi e invalidi. Non tutti gli agenti esploratori, però, usano la stessa strategia; alcuni cercano percorsi promettenti, mentre altri evitano

risorse critiche. L'importante è che le previsioni siano emergenti, non basate su una strategia specifica.

I due funzionamenti principali degli Agenti Esploratori sono:

- Scoperta dei tragitti: Gli agenti esploratori, mentre esplorano, interagiscono con due tipi di oloni: l'olone prodotto (che fornisce opzioni di percorso) e l'olone risorsa (che fornisce stime di prestazione). Per esempio, un agente esploratore che si muove su un nastro trasportatore calcola i tempi di percorrenza e si dirige verso unità di lavorazione.
- Reportistica: Una volta completato il percorso, l'agente esploratore comunica i risultati all'agente d'ordine, il quale mantiene un elenco di percorsi candidati, aggiornandolo regolarmente in base alle performance stimate.

Gli **Agenti di Intenzione**, invece, sono generati dagli agenti d'ordine e hanno il fine di stimare il carico di lavoro futuro delle risorse. Quando viene scelta una soluzione candidata, si inviano agenti di intenzione per informare le risorse dell'arrivo previsto. Questi agenti effettuano un'esecuzione virtuale della soluzione selezionata, permettendo di prenotare le risorse e permettendo agli oloni di risorse di adattare le loro previsioni di carico. Le informazioni sulle intenzioni "evaporano", richiedendo aggiornamenti regolari per mantenere le prenotazioni.

La combinazione e l'integrazione degli agenti esploratori e di intenzione fornisce previsioni a breve termine sui percorsi e allocazioni delle risorse. Gli oloni d'ordine possono reagire a nuove opportunità o disturbi aggiornando le loro previsioni costantemente. Le previsioni a breve termine aiutano sia gli oloni d'ordine che quelli di risorse a prendere decisioni informate su come procedere, come nel caso di ordini urgenti o pianificazione della manutenzione. Per mantenere l'affidabilità delle previsioni, è importante che gli agenti d'ordine non cambino continuamente le loro intenzioni, per non rendere il sistema troppo instabile.

Gli *oloni ordine* sono entità nel sistema che devono prendere decisioni basate su informazioni distribuite in diverse località virtuali, non sempre allineate con la fonte di verità. Questo implica che l'informazione raccolta da un DMAS rappresenta solo un'istantanea e potrebbe diventare rapidamente obsoleta, richiedendo agli oloni di comportarsi in modo socialmente responsabile quando prendono decisioni.

Due sono i fondamenti del DMAS:

- **Informazione Non Locale:** I DMAS forniscono informazioni sulle capacità e sulle disponibilità delle risorse in località non collegate, consentendo agli "oloni ordine" di prevedere e pianificare l'utilizzo delle risorse.

- **Previsioni a Breve Termine:** Le previsioni generate possono cambiare rapidamente a causa di variazioni nelle intenzioni e nelle condizioni operative, ad esempio a causa di guasti delle macchine.

A causa della mutevolezza delle informazioni e della mancanza di un "lock" sulla verità delle informazioni, il sistema può incorrere in problemi di affidabilità. Se un "olone" modifica la sua intenzione basandosi su previsioni errate, può generare effetti negativi sul sistema. Gli "oloni ordine" devono adottare comportamenti socialmente accettabili, simili a quelli umani, limitando i cambiamenti di intenzione senza valide ragioni e minimizzando l'impatto negativo su altri oloni. Coinvolto in questo processo è il DMAS esplorativo, che scopre e aggiorna costantemente soluzioni candidate.

Per controllare il comportamento degli oloni e prevenire un cambio eccessivo di intenzioni, sono stati progettati tre meccanismi di attenuazione:

1. *“Thresholding”*: Il cambiamento di intenzione avviene solo se il miglioramento delle prestazioni stimato supera una certa soglia, limitando il cambiamento a situazioni significative.

2. *“Cool-off Period”*: Dopo un cambiamento di intenzione, si applica una soglia temporaneamente più alta ad altri cambiamenti, consentendo agli altri oloni di adattarsi.

3. *“Randomized Switching”*: Anche quando un olone desidera cambiare intenzione, ciò avviene solo con una certa probabilità, ritardando l'effetto immediato e riducendo la possibilità di congestione sistemica.

In situazioni di grandi disturbi (come guasti a macchine o rush di ordini), i meccanismi di attenuazione prevengono un cambiamento caotico sincronizzato. Solo un numero limitato di oloni cambierà intenzione, consentendo al sistema di adattarsi senza subire un crollo prestazionale improvviso.

○ Architettura ADACOR:

Proposto da Leitão e Restivo nel 2006, ADACOR (ADaptive holonic COntrol aRchitecture) è un'architettura decentralizzata che include elementi di centralizzazione per ottimizzare il sistema. Gli oloni in ADACOR (Fig. 9) includono “*Product Holons*”, “*Task Holons*”, “*Operation Holons*” e “*Supervisor Holons*”. Questa architettura utilizza un meccanismo di diffusione simile ai feromoni per gestire le informazioni globali e adattare dinamicamente la gerarchia degli oloni in risposta a problemi di produzione.

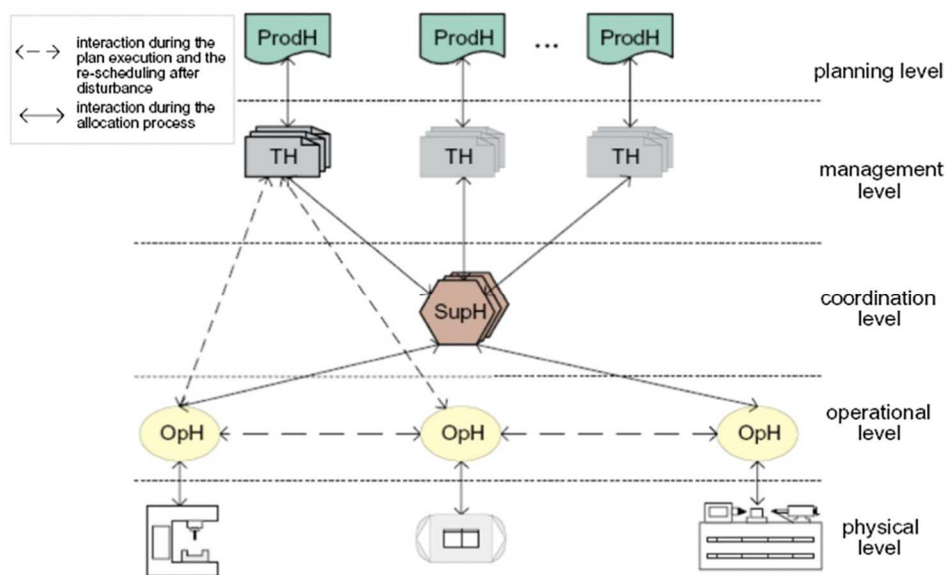


Figura 9 - Ripartizione olonica di ADACOR

In sintesi, queste architetture storiche formano la base del dominio HCA e sono state utilizzate e affinate in diverse direzioni di ricerca, preparando il terreno per architetture più dinamiche e orientate ai servizi, come illustrato successivamente.

Nelle **Architetture DINAMICHE** viene discussa l'evoluzione e le caratteristiche delle architetture di controllo all'interno delle Architetture Oloniche (HCA), evidenziando la loro capacità di reagire rapidamente ai cambiamenti ambientali, superando così i limiti delle architetture centralizzate. Queste architetture storiche, pur essendo reattive, tendono a mantenere un comportamento globale costante, rendendo difficile l'adattamento in situazioni di perturbazione. Il focus attuale è sulle architetture di controllo dinamico, considerate una delle tendenze più promettenti. Queste architetture sono progettate per alterare il comportamento del sistema in modo dinamico, adattandosi alle variazioni ambientali e riducendo i tempi di transizione e la perdita di prestazioni. Diverse architetture dinamiche sono state proposte, tutte caratterizzate da

un "meccanismo di commutazione" che consente di passare da un'architettura olistica a un'altra.

Tra le architetture dinamiche analizzate, quattro sono state evidenziate. La prima è ORCA (Fig. 10), che controlla gli oloni locali tramite un olone ottimizzatore globale. In caso di perturbazione, si attiva un meccanismo di commutazione che permette agli oloni locali di prendere decisioni autonome, ma manca un meccanismo di ritorno. Un'altra architettura prevede un meccanismo bidirezionale per passare tra architetture centralizzate e decentralizzate in risposta a perturbazioni, cercando di mantenere sia l'ottimizzazione globale che l'agilità alle variazioni degli ordini di produzione.

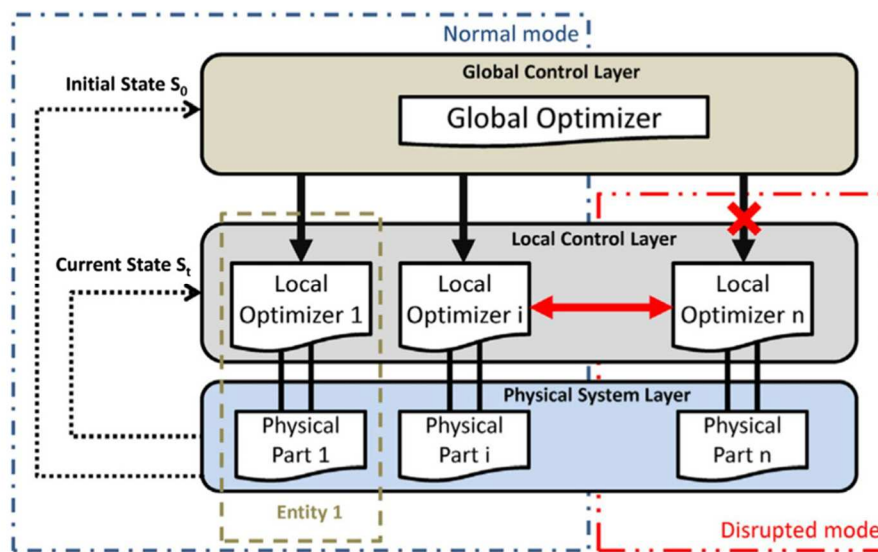


Figura 10 - Organizzazione globale ORCA

L'evoluzione del meccanismo ADACOR, chiamata ADACOR2 (Fig. 11), mira a consentire al sistema di evolversi dinamicamente attraverso configurazioni scoperte online, mantenendo però una struttura simile a ADACOR.

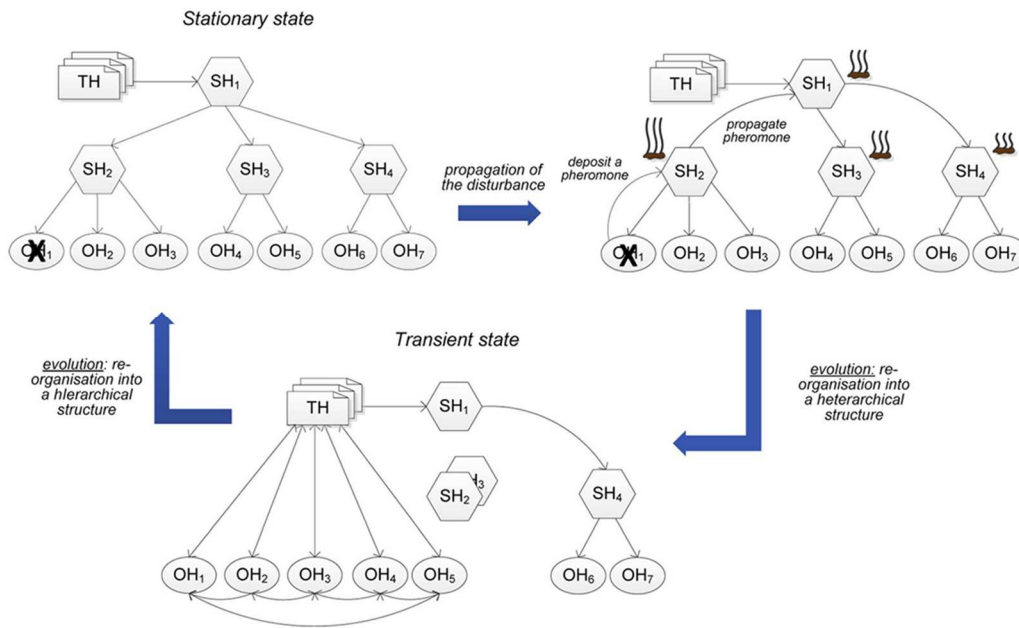


Figura 11 - Evoluzione ADACOR2

Infine, POLLUX presenta un'innovazione nel meccanismo di adattamento dell'architettura, utilizzando parametri di governance che influenzano il comportamento degli Holon a basso livello in base alle perturbazioni osservate. In POLLUX (Fig. 12), è possibile simulare le conseguenze delle diverse opzioni di commutazione, giustificando ogni scelta in base a un miglioramento delle prestazioni.

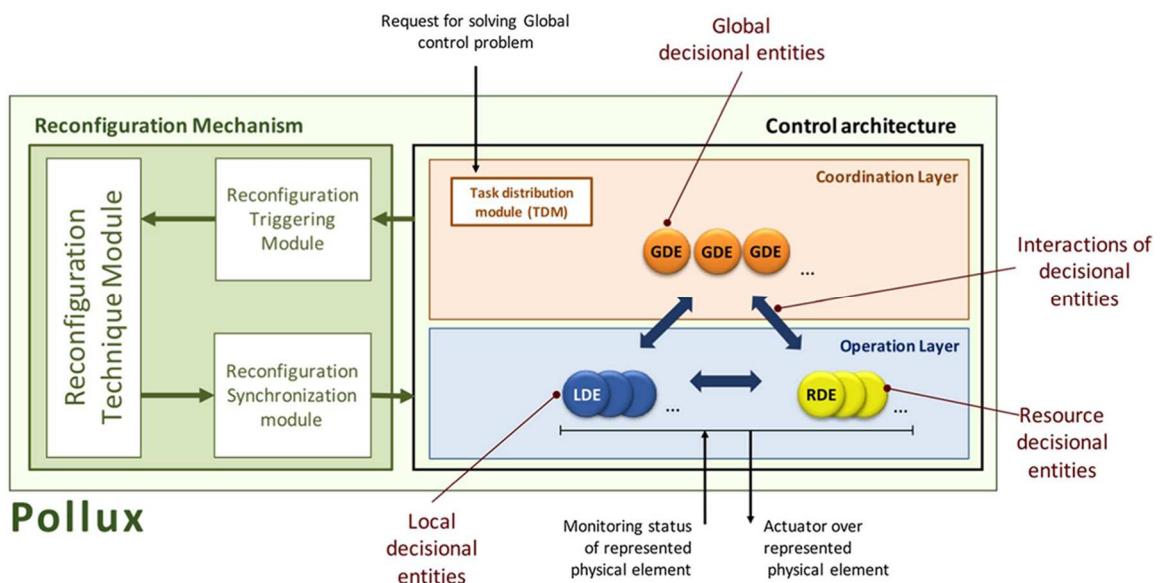


Figura 12 - Meccanismo POLLUX

Le architetture dinamiche offrono vantaggi significativi nella gestione delle incertezze in tempo reale, adattandosi a eventi correnti. Tuttavia, presentano anche svantaggi, come il rischio di "nervosismo" (commutazioni eccessive o troppo rapide) e la "miopia

temporale" (commutazioni non necessarie), senza che il costo delle commutazioni venga adeguatamente analizzato.

Con l'emergere del Big Data, sono diventate fondamentali le **Architetture orientate ai DATI** dove c'è la necessità di controllare i flussi di dati all'interno delle architetture. L'architettura SURFER (Fig. 13), sviluppata da Le Mortellec et al. nel 2013, non è specificamente progettata per la produzione, ma è il risultato di una ricerca storica nel campo delle tecnologie di controllo, in particolare applicata a sistemi complessi come i treni.

Il modello architettonico olistico proposto per la diagnosi è composto da strutture di diagnosi ricorsive che includono sottosistemi e i loro metodi di diagnosi associati. Ogni sistema diagnosticato è formato da una parte di controllo e una parte controllata, che operano in un contesto specifico. La parte di controllo esegue un algoritmo per gestire la parte controllata, che, a sua volta, adotta un comportamento atteso. A livello più basso della struttura olistica, la parte controllata è composta tipicamente da elementi fisici come sensori, interruttori e attuatori, vincolati a limitazioni meccaniche ed elettriche. Questa architettura è progettata per gestire una grande quantità di dati, considerando che la sua applicazione diretta riguarda il monitoraggio di sistemi complessi dotati di centinaia di sensori. In un approccio tradizionale, i flussi di Big Data sarebbero stati raccolti in un unico luogo per caratterizzarli e comprenderne le relazioni. Tuttavia, nell'architettura SURFER, l'aggregazione di oloni consente di creare un'architettura in cui i dati vengono gestiti localmente e propagati al resto dell'architettura a un livello semantico superiore. Ogni olone è in grado di raccogliere e comprendere i dati dal livello inferiore, elaborandoli in anticipo e trasmettendoli in modo comprensibile. Questo meccanismo permette a ciascun livello dell'architettura di fornire un valore aggiunto alla semantica dei dati, riducendo al minimo l'esplosione di dati da trattare a un singolo livello. I dati vengono quindi inviati solo quando sono rilevanti, ottimizzando così la gestione delle informazioni e migliorando l'efficacia del sistema di monitoraggio e controllo.

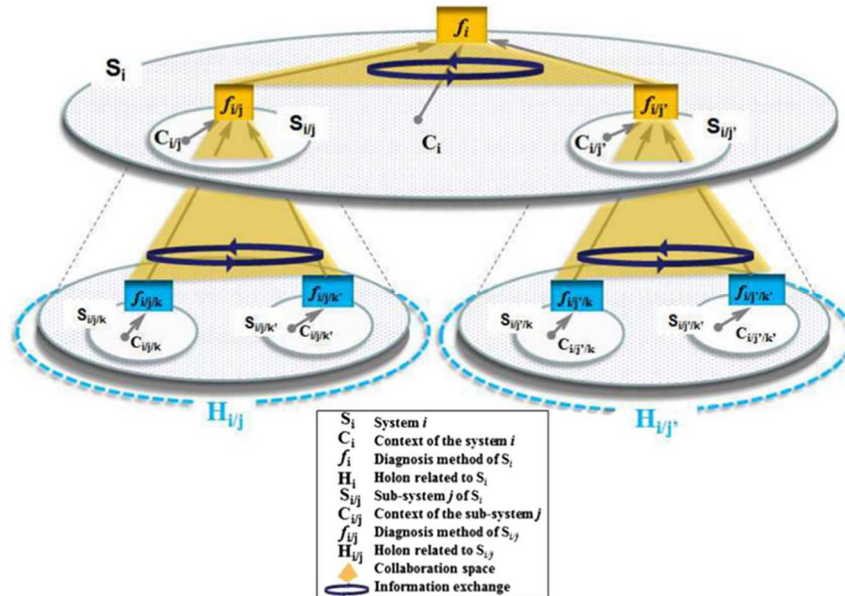


Figura 13 - Basi dell'architettura SURFER

Viene menzionato anche l'uso delle Architetture di Controllo Olistico (Holonc Control Architectures) in ambito di gestione dei dati e interoperabilità. Questi approcci si concentrano sul concetto di "olone di prodotto" o "prodotto intelligente" nell'ambito appunto di **Architetture di controllo incentrate sul PRODOTTO**. Architetture come EPC Global Network, Dialog, WWAI e lo standard O-MI si basano sull'idea che la parte fisica dell'olone prodotto sia dotata di un identificatore, come un tag RFID, un codice a barre o un nodo sensore wireless. Questo identificatore consente di accedere alle informazioni associate al prodotto, rappresentate spesso da un agente digitale. Grazie a questo meccanismo, è possibile tracciare l'evoluzione del prodotto lungo tutto il suo ciclo di vita, portando alla creazione di un sistema di "Gestione delle Informazioni sul Ciclo di Vita del Prodotto". Queste architetture offrono ai diversi attori del ciclo di vita del prodotto meccanismi per recuperare e aggiornare i dati del

prodotto da remoto, interpretati come un'interoperabilità sintattica centrata sul prodotto. Inoltre, l'olone prodotto è visto come un repository di dati.

Alcuni lavori si concentrano sui modelli di dati del prodotto, considerandolo come un sistema di mediazione delle informazioni, in grado di scambiare dati con altri sistemi informatici durante il suo ciclo di vita. Altri studi propongono modelli di riferimento per i prodotti, come OntoPDM, PRONTO e Semantic Object Model (SOM), affermando che il paradigma olistico supporta l'interoperabilità semantica.

Un'altra categoria, **l'Architettura orientata al WEB**, esamina l'evoluzione delle Architetture di Controllo Ibrido (HCAs) nel contesto delle tecnologie basate su cloud, evidenziando l'integrazione di standard web-oriented come i servizi web. Un esempio significativo è l'architettura SoHMS, che si basa su principi del PROSA e incorpora concetti da HCBA e ADACOR. In particolare, SoHMS utilizza gli Oloni di Prodotto (PH), Risorsa (RH) e Ordine (OH) di PROSA, insieme al concetto di *Directory Facilitator* (DF) dai sistemi multi-agente. Sebbene i concetti di base rimangano simili, il loro comportamento è stato adattato per rendere i servizi, in particolare i *Manufacturing Services* (Mservices), il fulcro delle interazioni, mirate alla pianificazione e programmazione delle attività.

Un elemento innovativo dell'architettura è il “*Service Interface Layer*” (SIL), che funge da interfaccia tra le descrizioni dei servizi e i metodi di implementazione a livello di produzione. Ogni risorsa ha una propria istanza di SIL, contenente informazioni su come implementare un servizio a livello operativo. La combinazione dei paradigmi di Sistema di Produzione Ibrido (HMS) e Architettura Orientata ai Servizi (SoA) è stata oggetto di studio per anni. Le ricerche hanno dimostrato che l'HMS fornisce flessibilità a livello strutturale per l'assegnazione dei compiti e le associazioni tra entità (oloni), mentre la SoA si concentra sulla decomposizione e incapsulamento dei processi, consentendo la distribuzione tra le risorse.

Nell'architettura SoHMS, ogni operazione sui prodotti è rappresentata da servizi offerti da una o più risorse. Il modello Mservices permette di definire parametri specifici per ciascuna operazione, adattandosi alla ripetitività tipica dei sistemi di produzione. L'architettura facilita anche la scoperta dei servizi tramite ontologie appropriate. Inoltre, la struttura SoHMS (Fig. 14) prevede un chiaro disaccoppiamento tra oloni dedicati al processo decisionale, che possono essere localizzati su piattaforme cloud, e quelli dedicati al controllo e monitoraggio in tempo reale, implementati vicino al piano di produzione. Questo approccio potrebbe rappresentare un primo passo verso HCA standardizzati per la produzione cloud.

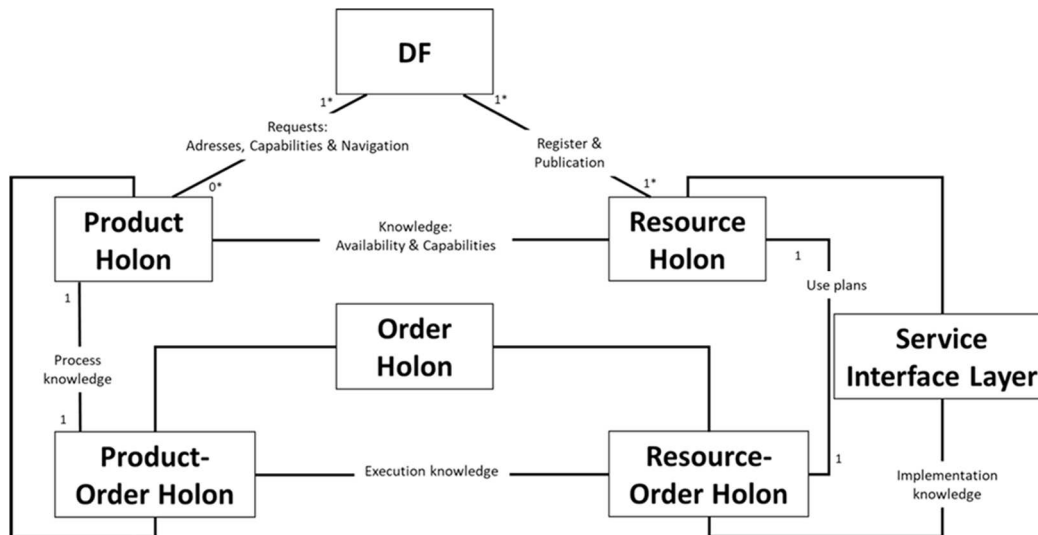


Figura 14 - Struttura SoHMS

Come ultima categoria vengono menzionate le **Architetture basate sul DIGITAL TWIN** (gemello digitale). Il concetto di sistemi Digital Twin nella produzione ha guadagnato sempre più importanza negli ultimi anni, fungendo da interfaccia standard tra dispositivi eterogenei e infrastrutture IT in sistemi di produzione di varie dimensioni. I Digital Twin offrono una visione completa dello stato e del comportamento effettivo del sistema, essenziale per applicazioni come il controllo, la manutenzione predittiva, la realtà virtuale e la simulazione online. Per facilitare questa interoperabilità profonda, è stata sviluppata una nuova architettura di riferimento, nota come **ARTI** (Activity Resource Type Instance), che mira a chiarire l'esistenza del Digital Twin e a fornire una nuova terminologia, separata da quella tradizionale della produzione, per evitare fraintendimenti in altri contesti. Questa architettura è rappresentata graficamente come un cubo (Fig. 15). Nel modello, i cubi blu (riempiti con linee diagonali) rappresentano il Digital Twin, dove ogni elemento del gemello fisico ha un corrispondente virtuale. I cubi gialli (con linee verticali tratteggiate) e i cubi verdi (con un motivo di mattoni) sono considerati cubi di controllo, e qualsiasi altro software può connettersi ai cubi blu per raccogliere informazioni sullo stato attuale del gemello fisico.

È importante notare che i cubi blu non devono necessariamente essere rappresentati come oloni, poiché l'architettura HCA (Holon Control Architecture) è completamente incorporata nei cubi verdi e gialli. Questa HCA è la prima a mostrare chiaramente un livello di Digital Twin, mentre altre HCA generalmente integrano questo livello in modo centralizzato o distribuito, dato che la virtualizzazione del gemello fisico è necessaria per prendere decisioni corrette.

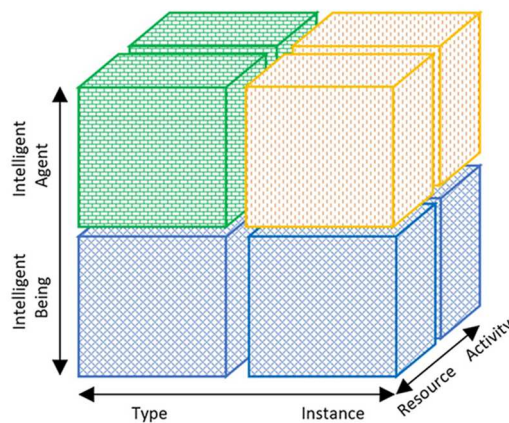


Figura 15 - Architettura di riferimento ARTI

è l'architettura di riferimento Activity-Resource-Type-Instance (ARTI), che propone una raffinazione dell'architettura PROSA (product-resource-order-staff architecture). La motivazione principale per rivedere PROSA è la terminologia specifica del settore manifatturiero, che ha dimostrato di non adattarsi bene ad altri domini come la logistica o la sanità. La necessità di una terminologia genericamente applicabile rappresenta quindi un motivo sufficiente per proporre l'architettura ARTI. ARTI introduce una suddivisione tra "oloni di tipo risorsa" e "oloni di istanza risorsa", riflettendo allo stesso modo la distinzione tra "oloni di tipo attività" e "oloni di istanza attività". Questa struttura consente un design più flessibile, specialmente quando le istanze di risorsa sono utilizzate in ruoli multipli che dipendono da situazioni o contesti temporali.

Il sistema ARTI, come appena accennato, è composto da quattro componenti di base o oloni:

- 1. Activity Types** (Tipi di Attività): Rappresentano classi di attività nel mondo reale, contenendo conoscenze generali applicabili a tutte le istanze di attività di quel tipo, senza dettagli specifici.
- 2. Activity Instances** (Istanze di Attività): Corrispondono all'esecuzione di attività reali e gestiscono le informazioni specifiche dell'istanza, delegando le questioni relative al tipo alla propria Activity Type.
- 3. Resource Types** (Tipi di Risorse): Classi di risorse reali, anch'esse dotate di expertise generale per tutte le istanze di risorse di quel tipo.
- 4. Resource Instances** (Istanze di Risorse): Rappresentano istanze reali di risorse, gestendo le informazioni specifiche dell'istanza e delegando la logica di tipo al proprio Resource Type.

In aggiunta, esistono componenti opzionali chiamati "oloni di staff". La struttura del sistema ARTI è una gerarchia flessibile, o "olarchia", dove i componenti possono essere aggregati in modi variabili nel tempo. È presente anche una relazione di astrazione tra i componenti, dove il membro più concreto implementa tutte le capacità del componente più astratto. Tutti i componenti sono suddivisi in parti di "rispecchiamento della realtà" e "presa di decisione": l'*Intelligent Being* (IB) e l'*Intelligent Agent* (IA). Le IA possono essere ulteriormente suddivise in *Instance Intelligent Agent* (IAI) e *Type Intelligent Agent* (IAT).

Ora si analizza più nel dettaglio cosa fanno e come si muovono i componenti base di tale sistema:

- **Activity Types**

Un "Activity Type" rappresenta una classe di attività reali, assimilata a un esperto nel suo ambito. È il riferimento per piani di processo e requisiti materiali in ambienti di produzione, e per attività correlate in altri contesti, come sistemi di trasporto intelligenti e reti energetiche. Gli "Activity Types" conoscono più modalità di esecuzione e mantengono una natura non-deterministica, ovvero non definiscono un solo modo di attuare l'attività.

- **Activity Instances**

Le "Activity Instances" corrispondono all'esecuzione concreta di un'attività e operano come gestori delle informazioni specifiche di ogni istanza, mentre delegano questioni comuni agli "Activity Types". Sono responsabili dell'esecuzione e dell'allocazione delle risorse necessarie, mantenendo le registrazioni dello stato e della storia di esecuzione dell'attività.

- **Resource Types**

I "Resource Types" corrispondono a classi di risorse reali e conoscono le specifiche tecniche e le capacità comuni delle istanze. Interagiscono con gli "Activity Types" per determinare come le risorse possono essere utilizzate per eseguire attività, fornendo informazioni che il sistema può utilizzare per assegnare e gestire le risorse disponibili.

- **Resource Instances**

Le "Resource Instances" sono istanze reali di risorse, essenziali per l'esecuzione delle attività. Gestiscono le informazioni specifiche e delegano le questioni relative al tipo ai "Resource Types". Monitorano le informazioni di stato, come lo stato operativo e le connessioni alle altre risorse. Anche in questo caso, coinvolgono la decisione

sull'allocazione delle risorse, mantenendo separate le componenti di decisione dalla loro rappresentazione della realtà.

L'architettura ARTI, con la sua struttura a olone e la distinzione tra componenti di tipo e istanza, fornisce una struttura versatile che può essere applicata a diversi domini oltre alla produzione, adattando il linguaggio per facilitarne l'implementazione senza necessità di profonde modifiche. Queste caratteristiche la rendono utile in vari contesti, come la robotica, l'ingegneria all'aperto, la salute e la logistica.

Il protocollo NEU (Next, Execute, Update) è un modello di interazione nel contesto dell'implementazione di sistemi ARTI che gestisce le interazioni tra un'istanza di attività (Act_In) e il suo tipo di attività (Act_Typ). Il protocollo è articolato in tre fasi principali, ognuna delle quali è caratterizzata da specifiche comunicazioni tra i vari componenti del sistema:

- **Fase 1: Inizializzazione**
- **Fase 2: Esecuzione**
- **Fase 3: Finalizzazione**

Il protocollo NEU non è rigido; diverse applicazioni possono richiedere adattamenti o estensioni. Ciò nonostante, le sue qualità fondamentali vanno preservate. La prima è la creazione di indipendenza tra gli oloni (unità autonome di attività e risorse), permettendo una chiara separazione tra esperti (tipi) e manager (istanze). Le istanze delle attività non interpretano i dati forniti dai tipi e viceversa, garantendo che le informazioni di stato rimangano con le istanze e non interagiscano direttamente con le specifiche dei tipi. La seconda qualità è l'immunità a modifiche interne delle rappresentazioni di conoscenza all'interno degli oloni.

In seguito, vengono discusse le interazioni tra diversi tipi di risorse e attività all'interno di un sistema di gestione e lavorazione industriale, evidenziando il ruolo delle istanze di risorse (RI) e dei loro corrispondenti tipi di risorse (RT), così come delle istanze di attività (AI) e dei tipi di attività (AT). Le interazioni sono caratterizzate da due modalità principali: il monitoraggio della realtà e la simulazione/previsione.

Le interazioni principali tra i tipi di oloni presenti all'interno di ARTI sono:

- **RT–RI Interactions**

Le istanze di risorse collaborano con il proprio tipo di risorsa per delegare il trattamento delle informazioni comuni a una certa classe di risorse. In particolare, quando si tratta di stabilire se un'azione è fattibile (come un passo di lavorazione o il passaggio sotto

un ponte), l'istanza di risorsa si rivolge al proprio tipo. In cambio, i tipi di risorsa dipendono dalle informazioni delle loro istanze per aggiornare lo stato e fare previsioni sull'andamento delle azioni. Ad esempio, nel caso di un forno per trattamento termico, il tipo di risorsa conosce il tempo necessario per aumentare la temperatura, mentre l'istanza fornisce le informazioni iniziali utili per i calcoli (come la temperatura di partenza). Inoltre, l'istanza gestisce lo stato degli oggetti che stanno per essere trattati (come l'acciaio), permettendo al tipo di risorsa di determinare la fattibilità del processo e stimarne la durata. Quando il trattamento è eseguito, entrambe le entità aggiornano le informazioni di stato.

○ **AT–RT Interactions**

Le interazioni tra tipi di attività e tipi di risorse riguardano il bisogno di informazioni che dipendono da entrambi. Quando, ad esempio, il tempo di lavorazione di un passo produttivo dipende da un programma CNC e dalla velocità di un attrezzo, entrambi i tipi interagiranno per calcolare questo dato. L'architettura ARTI non stabilisce un criterio rigido su quale tipo debba svolgere determinate funzioni nei calcoli, poiché dipende dalle specifiche circostanze e dall'importanza economica delle scelte. Le interazioni tra tipi di risorse e attività possono essere innescate da istanze individuali, dove un'istanza di attività può scoprire le azioni possibili tramite il protocollo NEU e quindi interagire con l'istanza di risorsa per verificare la disponibilità ad eseguire tali azioni.

○ **AI–RI Interactions**

Le istanze di attività interagiscono con le istanze di risorsa riguardo all'esecuzione delle azioni pianificate e in corso. In un design non proattivo, le istanze si limitano a gestire l'azione successiva secondo un ciclo ripetitivo fino al completamento del lavoro. In un design proattivo, invece, le istanze eseguono virtualmente vari corsi d'azione per valutare alternative e selezionare un'intenzione, che viene comunicata alle istanze di risorsa, influenzando così la loro agenda.

L'architettura di riferimento ARTI consente la costruzione di sistemi complessi attraverso l'aggregazione di componenti, simile a quanto previsto dall'architettura PROSA, essendo anch'essa un'architettura di riferimento. Questo approccio consente di modificare e riconfigurare i sottosistemi nel tempo mantenendo una corrispondenza adeguata con il mondo esterno. L'approccio supporta anche la specializzazione, permettendo a un componente o sottosistema di semplificare l'interazione con ambienti complessi senza dover gestire differenze non rilevanti. Inoltre, è mantenuto il concetto di “oloni staff” da PROSA, dove le entità che non sono decentralizzate in modo

conforme ad ARTI possono avere solo un ruolo consultivo, riducendo il rischio di malfunzionamenti nel sistema esecutivo quando vengono confrontate con informazioni non-sperate.

L'integrazione efficace con la realtà è stato uno dei punti focali iniziali della ricerca, che ha evoluto in una visione di design per l'inaspettato. L'integrazione nella pratica segue uno schema di leader-followers, con la realtà che agisce come sistema dominante. Le architetture devono essere progettate per integrarsi con realtà e variabili esterne. Un modello attuale non fornisce risposte adeguate all'integrazione fra leader, dato che spesso i sistemi più vecchi non si adattano bene alle nuove necessità.

Il paradigma D4U si concentra su elementi di sistema che, non solo devono integrarsi con la loro realtà, ma anche garantire che altre componenti lo facciano, permettendo così un'integrazione fluida con gli elementi D4U stessi. Le sfide legate all'integrazione includono diversi campi:

- **Rappresentazione delle Opzioni:** I componenti D4U devono essere in grado di rappresentare molteplici opzioni per le operazioni in funzione delle domande inaspettate. L'implementazione di piani di processo non lineari è un esempio positivo, ma può risultare costoso.
- **Adattamento alla Dinamicità:** Gli elementi D4U devono tener conto dei cambiamenti dinamici della realtà durante lo sviluppo.
- **Rimanere “Nella Realtà”:** Il sistema di esecuzione deve essere progettato in modo tale da rimanere adeguato alla realtà di riferimento, anche in condizioni di emergenza (esempio del sistema ferroviario).

Infine, un sistema di esecuzione completo non può evitare l'inclusione di elementi non preferiti D4U, sollevando questioni sul processo di sviluppo software e architetturale. Da qui in poi viene analizzato il processo di sviluppo del software e dei sistemi seguendo la filosofia D4U (Design for Use) e ci si focalizza sui cambiamenti necessari per applicare questa filosofia alla progettazione e allo sviluppo. La metodologia di sviluppo suggerita è di tipo incrementale e orientata agli oggetti, simile al Processo Unificato.

Nella **Fase di Inizio**, vengono definiti i requisiti chiave per il sistema di esecuzione tramite l'elaborazione di casi d'uso, che consentono a tutti gli stakeholder di partecipare attivamente. Un caso d'uso è una sequenza di passi che descrive come un attore interagisce con il sistema per raggiungere un obiettivo, ed è redatto in modo semplice per facilitarne la comprensione. Nel contesto D4U, questi requisiti servono a

identificare e definire il "mondo di interesse", ovvero il dominio del problema. È importante mantenere i requisiti stessi "fuori dalla vista" fino a fasi più avanzate dello sviluppo, poiché il focus iniziale deve essere sul determinare il contesto del problema da risolvere, evitando di prendere in considerazione soluzioni già previste (come usare mappe invece di descrizioni stradali per applicazioni di navigazione).

D4U è incentrato sull'architettura; a partire dai casi d'uso e dai requisiti di sistema, viene creato un modello eseguibile del dominio del problema. Questo modello deve adottare l'architettura di riferimento ARTI, un affinamento della PROSA, per massimizzare il potenziale di utilizzo di ogni componente o sottosistema. L'architettura ARTI offre una chiara separazione dei compiti, consentendo di seguire più facilmente le interazioni tra componenti. Inoltre, l'adozione di ARTI porta alla creazione di un design a "singola fonte di verità" (SSOT), in cui le informazioni sono collocate concettualmente vicino alle loro controparti nella realtà. Quando si sviluppano servizi e altre funzioni sopra questo modello di dominio eseguibile, viene applicato il pattern architetturale DMAS, per mantenere la SSOT anche quando vengono utilizzate informazioni globale o non locali.

D4U adotta anche un approccio incrementale, riconoscendo i limiti della progettazione del cervello umano, aiutando così lo sviluppo. Ogni incremento porta alla creazione di un sistema software funzionante, che viene testato e valutato prima di pianificare il successivo passo. Ogni fase incrementale include: delineazione e definizione del modello di dominio, progettazione e implementazione di modelli eseguibili, selezione delle funzionalità, test dell'adeguatezza del modello di dominio e pianificazione del passo successivo. È preferibile coinvolgere precocemente gli utenti nello sviluppo di un prodotto minimo funzionante (MVP), per poter verificare l'accuratezza e l'adeguatezza del modello.

Ad un certo punto, il modello di dominio deve essere completo e non deve mai discostarsi dal suo mondo di interesse. Ciò implica che il modello di dominio di alto livello deve essere un aggregato che include modelli per "il resto del mondo di interesse". Se, ad esempio, stiamo parlando di un sistema di esecuzione in manifattura, il modello di dominio deve rappresentare anche il mondo esterno alla fabbrica, modellando esplicitamente le connessioni tra i modelli.

Nella **Fase di Simulazione** il D4U, essendo incentrato su modelli eseguibili, facilita la simulazione del sistema di esecuzione. La simulazione è fondamentale per una corretta analisi costo-beneficio, considerando che i sistemi di esecuzione spesso comportano investimenti significativi. La fase di simulazione si avvale di modelli che rispecchiano fedelmente la realtà, riducendo al minimo gli sforzi richiesti per la transizione verso

operazioni reali. I modelli necessari per la simulazione possono essere riutilizzati senza riprogrammazione.

In sintesi, il documento presenta un modello di sviluppo software che valorizza l'interazione con gli stakeholder, l'evoluzione incrementale del prodotto e un forte allineamento alla realtà, sostenuto da simulazioni per garantire la validità delle soluzioni proposte.

2.4 Tendenze future e Nuove sfide

Il capitolo ha analizzato l'evoluzione dei sistemi di Architettura Holonica (HCA) negli ultimi 20 anni e le sfide che questi sistemi devono affrontare nell'ambito dell'Industria 4.0. Le HCA hanno integrato vari "abilitatori chiave" dell'Industria 4.0, ma ci sono ancora diverse problematiche da risolvere. Di seguito vengono esposte le principali sfide e opportunità di ricerca nel campo delle HCA:

1. Big Data

L'Industria 4.0 comporta un uso massiccio di sensori che generano enormi quantità di dati non sempre utili o affidabili. Le aziende manifatturiere devono affrontare la gestione di questi dati, un tema noto come Big Data. È fondamentale per un olone apprendere e adattarsi, e ci sono stati tentativi di combinare tecniche di Big Data con HCA per limitare il sovraccarico di dati. Tuttavia, è necessario sviluppare ulteriori funzionalità per elaborare i dati e trasformarli in informazioni utili, migliorando così la capacità degli oloni di apprendere autonomamente dall'ambiente.

2. Adattabilità e Comportamento Emergente

I sistemi devono essere in grado di rispondere a eventi imprevisti e proporre nuovi comportamenti. Le HCA devono gestire comportamenti emergenti per garantire la stabilità del sistema. Ci sono strumenti per controllare il livello di autonomia degli oloni, ma la crescente diversità dei sistemi autonomi richiede lo sviluppo di architetture più generiche e aperte.

3. Adattabilità e Garanzia di Prestazioni

Quando si verificano disturbi, le HCA devono modificare la loro organizzazione per minimizzare l'impatto. Tuttavia, valutare le prestazioni delle HCA è complesso e richiede un sistema di emulazione generico. Sono necessari modelli generici e ingegneria basata sui modelli per validare e verificare le HCA.

4. Orientamento ai Servizi e Cloud Manufacturing

La connettività migliorata consente una gestione della produzione attraverso reti e internet, portando al concetto di Cloud Manufacturing. Tuttavia, la risposta in tempo reale necessaria per il controllo industriale presenta sfide. Architetture multilivello che integrano funzioni con scale temporali diverse potrebbero facilitare questa transizione.

5. Virtualizzazione e Digital Twin

Il concetto di Digital Twin, ovvero la replica virtuale di un sistema di produzione, è di grande interesse. Le HCA già incorporano elementi che potrebbero contribuire alla creazione di un gemello digitale (Digital Twin - DT), ma è necessario un maggiore sviluppo per integrare la parte decisionale e quella di rappresentazione.

6. Cyber-resilienza

L'interconnettività delle HCA pone sfide di sicurezza significative. Le comunicazioni tra oloni devono essere protette, e le architetture dovrebbero includere misure di sicurezza comportamentali.

7. Sostenibilità ed Efficienza Energetica

La gestione dell'energia è cruciale per la sostenibilità nell'Industria 4.0. Le HCA devono adattarsi dinamicamente ai cambiamenti ambientali e integrare informazioni in tempo reale sul consumo energetico.

8. Integrazione dell'Umano nel Processo

L'integrazione dell'operatore umano è fondamentale, considerando la complessità crescente delle decisioni. Le HCA devono facilitare questa integrazione, riconoscendo che gli esseri umani non sono infallibili. Inoltre, l'emergere di sistemi autonomi richiede considerazioni etiche e di fiducia.

Le principali architetture di riferimento sono state suddivise in categorie. Ogni categoria può rispecchiarsi e affrontare specifiche caratteristiche dell'Industry 4.0. Tuttavia, alcuni fattori chiave dell'Industry 4.0 non sono ancora affrontati dalle HCA o necessitano di ulteriori sforzi di ricerca. Pertanto, sarà necessario approfondire o esplorare nuovi temi di ricerca. In questa parte finale si evidenziano diverse direzioni di ricerca che potrebbero portare a nuove HCA:

1. HCA orientate ai dati: integrazione di funzioni di intelligenza artificiale per prevenire o sfruttare il Big Data, con meccanismi di apprendimento distribuito per aumentare reattività e adattabilità.
2. HCA dinamiche comprovate in termini di prestazioni: in grado di manifestare comportamenti emergenti garantendo sempre un certo livello di qualità del servizio.
3. HCA basate su Digital Twin: integrazione dei Digital Twin con le HCA per monitorare e pianificare meglio l'evoluzione del sistema produttivo controllato.
4. HCA basate su cloud sicuro: implementazione di servizi nativi per negoziazioni multi-attore con scambi sicuri.
5. HCA sostenibili: capaci di controllare meglio il consumo energetico dei sistemi di produzione, integrando completamente l'elemento umano nel processo.

Investigare queste direzioni di ricerca porterà a costruire architetture oloniche sostenibili, sicure, completamente integrate ed evolutive, capaci di esibire i diversi fattori chiave necessari per un'applicazione completa dell'Industry 4.0. Viene sottolineato che, mentre le HCA hanno fatto progressi significativi, ci sono ancora molte sfide aperte da affrontare per sfruttare appieno le potenzialità dell'Industria 4.0. La ricerca futura dovrebbe concentrarsi su come integrare efficacemente i nuovi abilitatori, garantire prestazioni ottimali e affrontare le questioni di sicurezza e sostenibilità. L'Industry 4.0 rappresenta una trasformazione significativa nei sistemi di produzione, considerata un'iniziativa strategica a livello globale. Una delle principali evoluzioni future delle HCA sarà probabilmente quella di affrontare la crescente importanza del Digital Twin per integrare meglio l'intero aspetto cyber dei sistemi di produzione cyber-fisici.

2.5 Evoluzione verso i sistemi dinamici: HMT (Holonc Management Tree)

2.5.1 I sistemi cyber-fisici ed i sistemi cyber-fisici umani

Con l'evoluzione verso l'I50, si cerca di integrare valori etici e sostenibilità nella trasformazione industriale. Viene sottolineata l'importanza di non confondere l'I40 e l'I50, in quanto ogni concetto affronta problemi specifici ma interconnessi. Si discute la necessità di una gestione strategica della trasformazione verso l'I50, facendo riferimento a recenti studi che suggeriscono che le tecnologie chiave per l'I40 siano i sistemi cyber-fisici (CPS) e l'Internet delle Cose (IoT). I CPS integrano l'intelligenza artificiale, ma presentano nuove sfide nella loro implementazione. Un elemento innovativo è rappresentato dal "digital twin" (DT), che connette il cyberspazio e le entità fisiche, diventando un pilastro fondamentale dell'I40. I DT consentono la digitalizzazione dei dati lungo tutto il ciclo di vita del prodotto, portando all'emergere di sistemi cyber-fisici industriali (ICPS) che promuovono flessibilità e adattabilità. Si introduce anche il concetto di sistemi cyber-fisici umani (CPHS), che analizzano come le interazioni tra umani e macchine possano essere gestite. Si discute del ruolo centrale degli operatori nell'industria moderna, ora definiti come Operatori 4.0/5.0, e come questa visione si estenda anche ad altri settori, come quello delle costruzioni.

Tre tendenze principali modellano le sfide dell'I40: la decentralizzazione delle gerarchie operative, la visione dell'impresa come un'entità vivente e la crescente complessità dei processi industriali. Queste tendenze hanno portato alla definizione di nuovi concetti come l'Enterprise Cyber-Fisico (CPE) e i sistemi cyber-fisici cognitivi (CCPS), che mirano a migliorare l'interazione tra umani e macchine.

Sono state poste anche tre domande per affrontare queste sfide nella ricerca che ne rappresentano un po' la spina dorsale: l'efficacia della cibernetica transdisciplinare nell'affrontare la complessità dell'I40/I50, la possibilità di arricchire le architetture ologoniche e l'esistenza di tecnologie per dimostrare l'efficacia di tali integrazioni. Per rispondere a queste domande, viene proposta una nuova visione nota come Cibernetica 5.0, che integra la cibernetica moderna con le tecnologie di gestione operative dell'I40. Si discute anche della metodologia HMT (Holonc Management Tree) come strumento per affrontare la complessità della gestione dei CPS. Infine, si evidenzia l'importanza di sviluppare un approccio sistematico per affrontare la complessità dell'industria moderna e propone un'agenda di ricerca per esplorare ulteriormente queste tematiche.

La nascita della cibernetica come disciplina può essere fatta risalire al 1940, prima che Norbert Wiener coniasse il termine per descrivere l'area di studio di un gruppo di studiosi eminenti che partecipavano a simposi interdisciplinari annuali a New York, organizzati dalla Josiah Macy Jr. Foundation.

Questi simposi si concentravano sui "meccanismi causali circolari e di feedback nei sistemi biologici e sociali." Tra i membri illustri di questo gruppo vi erano John von Neumann, Warren McCulloch e Walter Pitts. Successivamente, grazie a una proposta di Heinz von Foerster, il nome del convegno fu abbreviato in "Cibernetica", ricevendo un riconoscimento affettuoso da parte di Wiener. La cibernetica si è sviluppata come disciplina che cerca di applicare le competenze acquisite nelle scienze hard alla risoluzione di problemi complessi nelle scienze soft. Von Foerster ha sintetizzato l'essenza di questa disciplina, affermando che la cibernetica rappresenta un'interfaccia tra le competenze dure e i problemi difficili delle scienze soft, posizionandola come la scienza della regolazione in senso generale.

Tuttavia, la definizione e la comprensione della cibernetica rimangono complesse e soggette a interpretazioni. Negli anni, la cibernetica si è espansa in molte direzioni, abbracciando una vasta gamma di studiosi e discipline, dalle scienze umane alla fisica, fino alla ingegneria dei sistemi come tecnologia di gestione basata sulla scienza dell'informazione. Il contrasto tra le visioni olistiche e riduzioniste ha portato a un allontanamento tra le discipline di ingegneria dei controlli e dei sistemi e la scienza dei computer, facendo perdere alla cibernetica il suo primato nella scienza dell'artificiale negli anni '50. Malapi-Nelson (2015) fornisce un resoconto dettagliato delle motivazioni che hanno portato al declino della cibernetica negli ultimi settant'anni, sottolineando il successo dell'architettura di Von Neumann per l'elaborazione delle informazioni, che ha spostato l'attenzione verso scienze più complesse e complete dell'artificiale. Questo evento storico ha suggerito una direzione dominante nella ricerca, nella tecnologia e nell'innovazione, spesso caratterizzata da un approccio di "Grande Scienza" che procede partendo dalla pratica tecnica e da approcci basati sulla forza bruta. Si osserva che questo è un modello comune nella storia della tecnologia, dove i principi cibernetici di autoregolazione erano già stati anticipati da invenzioni come il regolatore di J. Watt, e altre scoperte nel campo della meccanica quantistica non hanno ancora trovato una teoria unificata.

È importante riconoscere il ruolo fondamentale dell'ingegneria per il progresso, che a volte precede la scienza, contraddicendo il modello lineare di innovazione che sostiene che la scoperta scientifica porti alla tecnologia. Negli ultimi anni, i progressi tecnologici e nella produzione industriale sono stati principalmente il risultato di un'eccellente maestria degli ingegneri e dei praticanti, piuttosto che di svolte scientifiche. Inoltre, il divario tra la scienza dei computer e approcci olistici come la cibernetica ha trovato vantaggio nel principio ingegneristico di evitare la complessità. Von Foerster ha chiarito questo atteggiamento ingegneristico nel suo teorema numero uno, affermando che "più profondo è il problema ignorato, maggiori sono le possibilità

di fama e successo." Oggi, la complessità è tornata al centro della pratica industriale e non può più essere ignorata o affrontata con i consueti approcci specializzati.

In un'analisi della decisione, si osserva che la complessità è soggettiva e varia a seconda della percezione dell'osservatore, basandosi sulle conoscenze individuali. Un esempio citato è il cubo di Rubik: sebbene sembri complesso, la soluzione è raggiungibile in modo casuale se si dispone di tempo illimitato. La scarsità di tempo è quindi all'origine della complessità, specialmente quando si confrontano complessità e complicatezza. I sistemi complicati possono essere compresi e prevedere relazioni tra cause ed effetti, mentre i sistemi complessi presentano interazioni che non possono essere completamente comprese, risultando incerte. In contesti complessi, gli esiti di azioni o decisioni non sono garantiti, ma solo incentivati. La scarsità di tempo porta alla non determinazione e all'emergenza, costringendo i decisori a utilizzare pratiche rapide, con un compromesso tra ottimizzazione e adattamento. Per affrontare la complessità, è necessario un approccio olistico che consideri i dettagli sistemici.

L'industria moderna, specialmente nell'era dell'Industria 4.0 e 5.0, cerca continuamente di migliorare le capacità e l'efficienza attraverso approcci sistemici, lean (snelli) e agili. Le metodologie di misurazione delle performance sono essenziali per il miglioramento continuo, ma devono essere adattate ai casi specifici. La visione cibernetica della produzione complessa è rappresentata come un "mare di complessità" (Fig. 16), dove le soluzioni complicate sono inadeguate e rischiano di affondare. Solo adottando soluzioni leggere e rapide si può rimanere a galla.

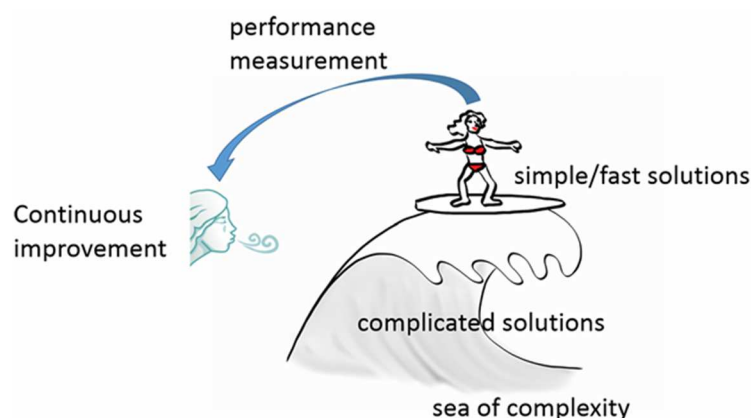


Figura 16 - La visione del mondo del cibernetico sul miglioramento delle prestazioni

Un modello cibernetico aiuta a comprendere il ciclo causa-effetto nel miglioramento della produzione, e la consapevolezza di questo ciclo è fondamentale per evitare disastri economici e sociali. La ricerca recente suggerisce che l'adozione di

metodologie ispirate alla cibernetica potrebbe semplificare la modellazione e il controllo dei sistemi complessi, in grado di emergere nell'industria moderna.

Il cuore della cibernetica è storicamente associato a un lavoro fondamentale di Rosenblueth, Wiener e Bigelow (1943), che si propone di classificare i comportamenti dei sistemi e il concetto di scopo. I comportamenti finalizzati richiedono un riscontro negativo e possono essere suddivisi in due categorie principali: comportamenti "feedback" (o "teleologici") e comportamenti "non-feedback" (o "non-teleologici"). Nei sistemi di produzione associati a processi intenzionali (Industry 4.0), è necessario che siano teleologici, in quanto devono attivamente perseguire obiettivi non stazionari. Giunchiglia e Fumagalli (2017) utilizzano il concetto di teleologia per affrontare il problema di collegare formalmente diversi livelli di conoscenza, partendo da un oggetto del regno fisico fino al suo comportamento e funzione.

Un sistema di produzione, nel contesto dell'Industry 5.0, deve presentare quattro caratteristiche principali:

1. **Comportamento attivo:** il sistema produce risultati nell'ambiente che non possono essere direttamente correlati agli input ricevuti.
2. **Comportamento finalizzato:** il sistema deve essere interpretato come diretto verso un obiettivo.
3. **Comportamento teleologico:** deve essere attivo un circuito di riscontro negativo per raggiungere lo scopo nonostante le perturbazioni o la non stazionarietà dell'obiettivo.
4. **Comportamento predittivo:** il sistema deve essere in grado di prevedere a diversi ordini per dirigere e adattare i meccanismi teleologici.

Rosenblueth et al. (1943) affermano che il comportamento predittivo implica necessariamente tutte le altre caratteristiche, e che organismi, natura e macchine possono essere classificati in modo unificante secondo questi criteri. Ashby (1968) amplia la nozione di macchina, definendola come un sistema il cui stato interno e quello dell'ambiente circostante definiscono univocamente il suo stato successivo. Questa definizione unifica scienze informatiche, teoria degli automi e ingegneria dei sistemi, senza richiedere una posizione meccanicista e materialista.

Nel corso del tempo, la cibernetica è evoluta in una metodologia praticabile per introdurre ingegneria in processi sistematici e fenomeni naturali. Oggi, la cibernetica offre un'epistemologia relazionale e riflessiva, dove il conoscitore è responsabile del proprio significato, valori ed etica. Si può parlare di una tassonomia della cibernetica,

arrivando a definire una cibernetica di terzo ordine, parallela all'evoluzione dell'intelligenza artificiale.

La cibernetica, infatti, può essere riassunta in vari ordini:

- **0° ordine:** la cibernetica è implicita e lo scopo non è definito; emergono strutture e comportamenti senza interpretazione.
- **1° ordine:** la cibernetica dei sistemi osservati, dove si riflette sul comportamento e si rendono esplicite nozioni come feedback e controllo.
- **2° ordine:** la cibernetica dei sistemi osservanti, dove l'osservatore è integrato nel sistema e stabilisce il proprio scopo.
- **3° ordine:** la cibernetica degli ambienti auto-sviluppanti e riflessivi, dove realtà, osservatore e ambiente sono in relazione stretta e attiva.

Attualmente, si osserva una tendenza nella cibernetica a concentrarsi maggiormente sugli aspetti "soft" della realtà, come la gestione e le interazioni sociali, distaccandosi dai problemi ingegneristici. Tuttavia, la cibernetica di terzo ordine potrebbe offrire un quadro efficace per armonizzare scienze dei sistemi e ingegneria dei sistemi, riportando l'interesse verso l'ingegneria con una visione transdisciplinare.

La proposta di Cybernetics 5.0 rappresenta un'evoluzione della cibernetica, utilizzata per affrontare le complessità dell'Industry 4.0 e 5.0. Definita come un quadro transdisciplinare, Cybernetics 5.0 mira a integrare pratiche scientifiche, tecnologiche e ingegneristiche nel contesto socioeconomico, affrontando la complessità con strumenti di cibernetica di secondo, terzo e ordine superiore. La sostenibilità è al centro di questa visione, collegando componenti umani e naturali ai processi ingegneristici, mentre Industry 5.0 reintroduce questi fattori nel sistema.

2.5.2 I CPSoS e l'HMT

In questo capitolo vengono analizzati i concetti di sistemi di sistemi (SoS) e sistemi cyber-fisici di sistemi (CPSoS), evidenziando la loro complessità e dinamicità nel processo produttivo. I CPSoS sono composti da sistemi cyber-fisici interconnessi e interdipendenti, progettati per raggiungere obiettivi comuni mantenendo l'indipendenza operativa e gestionale. Questa indipendenza è una delle caratteristiche principali dei sistemi o architetture oloniche e del modello Holonic Management Tree (HMT). Ad esempio, la Fig. 17 si riferisce alla struttura ad albero definita per l'HMT. Nell'HMT, le foglie e le radici dell'albero sono da considerare pseudo-oloni. Uno pseudo-olone è un olone solo potenzialmente, nel senso che la relazione con un tutto superiore o con parti inferiori può essere lasciata non specificata finché non siano necessarie per un'espansione o ridefinizione dell'olarchia (verso l'alto o verso il basso). In questo modo, la granularità della decomposizione olonica del CPSoS rimane ricorsiva come desiderato.

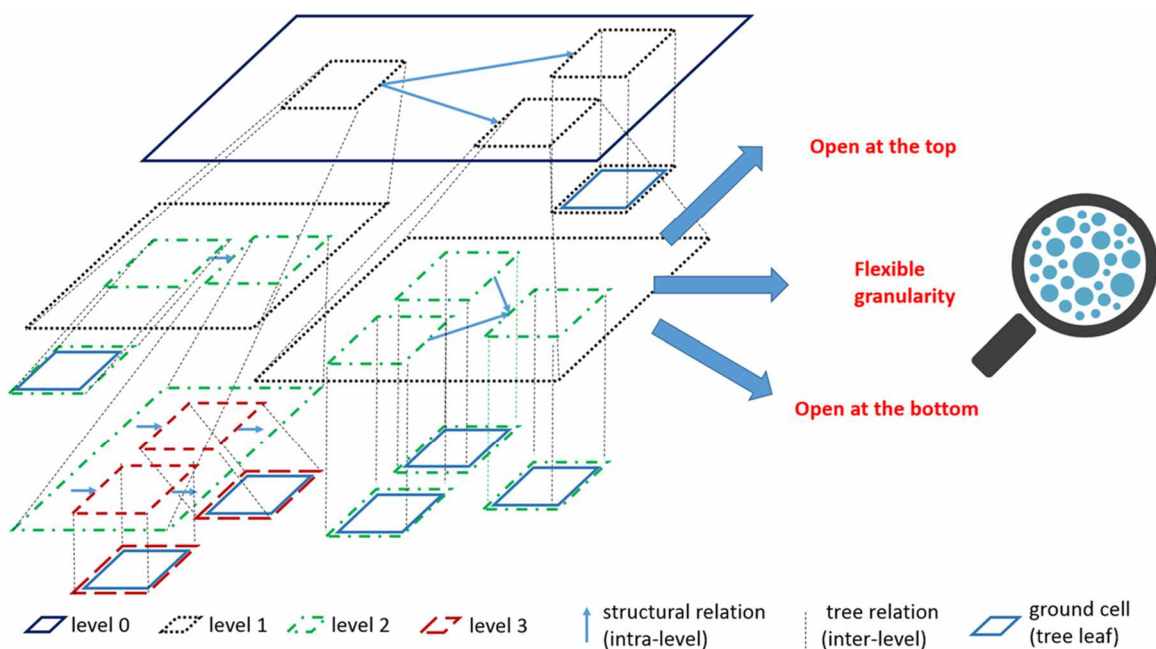


Figura 17 - Struttura HMT vista come un'olarchia aperta

Il concetto di CPSoS permette di integrare diverse tecnologie provenienti dalle tecnologie dell'informazione e comunicazione (ICT), inclusi sistemi cyber-fisici cognitivi (CCPS), gemelli digitali cognitivi (CDT), CPS industriali (ICPS), sistemi di amministrazione degli asset (AAS) e sistemi multi-agente (MAS). I CPSoS possono sfruttare i CDT per monitorare, simulare e ottimizzare in tempo reale, e possono apprendere e adattare il comportamento in base ai dati provenienti da fonti diverse.

Un problema chiave nella decomposizione di un CPSoS è la scelta della granularità, cioè come suddividere il sistema in componenti più piccoli. Le architetture CPS hanno cercato di definire questa granularità, tenendo conto della loro integrazione in un cloud di servizi. Sebbene le soluzioni basate su cloud siano comuni, è necessario che il calcolo recuperi località e corporeità per garantire sostenibilità e prestazioni. È cruciale conferire autonomia ai componenti per consentire adattamenti localizzati e meccanismi di auto-organizzazione.

I paradigmi di calcolo basati su agenti e i sistemi multi-agente sono promettenti per la scalabilità e la riduzione della complessità, ma ci sono ancora barriere all'implementazione industriale. Sono stati compiuti sforzi di standardizzazione per facilitare l'introduzione di agenti industriali. I CPSoS devono essere flessibili e coordinati da entità superiori senza una granularità rigorosamente definita a priori. Qui, viene reintrodotta anche il concetto di "olarchia", una gerarchia di oloni, utilizzata per ridurre la complessità e mappare ecosistemi industriali in forme generiche di organizzazioni che creano valore. Ogni agente, umano o artificiale, è organizzato come produttore di valore, e le interazioni tra gli agenti rendono il sistema responsabile e interconnesso. In un contesto cibernetico, il CPSoS funge da controllore, e deve possedere la stessa varietà del SoS per gestirlo efficacemente. L'approccio olarchico consente di mantenere parti della struttura non specificate, facilitando l'adattamento e l'evoluzione. Il concetto di "*design for unexpected*" (D4U) enfatizza l'importanza di evitare l'over-commitment, che può ostacolare l'adattabilità. Si promuove un approccio di sviluppo "*lazy*", in cui si specificano solo le attribuzioni minime e si lascia spazio per successivi perfezionamenti.

In sintesi, i CPSoS sono presentati come sistemi complessi capaci di adattarsi e rispondere a fluttuazioni esterne, integrando capacità di auto-organizzazione e approcci di calcolo autonomo.

Il sistema "Holon Management Tree" (HMT) (vedi Fig. 17) è una tecnica progettata per scomporre problemi complessi in modelli ricorsivi. Questa metodologia ha dimostrato la sua efficacia in diversi ambiti applicativi, come la robotica, la gestione degli edifici, i processi di produzione e la gestione dei servizi. L'idea centrale dell'HMT deriva dall'osservazione che le strutture frattali si presentano in molti processi produttivi e nelle loro lavorazioni; così, un modello ricorsivo delle strutture di controllo consente un miglioramento continuo dei sistemi.

L'HMT è stato implementato con successo su dispositivi CPS (Cyber-Physical Systems) di dimensioni ridotte, consentendo di scalare verso l'Edge delle reti di controllori distribuiti. La sua semplicità lo rende adatto anche per calcoli manuali, facilitando la collaborazione dinamica tra umani e macchine a vari livelli delle gerarchie di controllo. Questa interazione è in linea con le attuali tendenze che sottolineano una visione umano-centrica nei CPS, come evidenziato da E.A. Lee, che ha parlato di coevoluzione simbiotica tra umani e macchine. (3)

Tuttavia, l'HMT presenta limiti, soprattutto nella fase di costruzione e affinamento dei modelli. Tali sfide sono legate alla cibernetica di ordine superiore e sono state definite come Cibernetica 5.0 nel contesto di Industria 4.0 e 5.0. L'HMT propone soluzioni potenziali per affrontare queste problematiche, con gli oloni che fungono da legame tra le parti e il tutto, formando un'olarchia.

3 – STRUTTURA SEMANTICA DI MODELLAZIONE DEI SISTEMI

3.1 KPI per la definizione dei colli di bottiglia nei sistemi distribuiti: OEE e OTE

Nell'HMT, ogni olone rappresenta un sotto-obiettivo che coordina le sue parti per raggiungere un obiettivo più ampio. Questa interpretazione degli oloni stabilisce un legame con i principi della cibernetica, dove ogni olone è associato ad un obiettivo e ad un indicatore di prestazione chiave (KPI). Questo concetto dei set di indicatori chiave viene espresso e standardizzato all'interno di una norma "**ISO 22400**" dove definisce l'uso degli indicatori chiave di prestazione (KPI) nella gestione delle operazioni di produzione. In particolare, la ISO 22400-2:2014 specifica un insieme selezionato di KPI per ottimizzare le performance nei processi manifatturieri. (6) L'HMT utilizza l'OEE (Overall Equipment Effectiveness), un indicatore comune nella produzione, per misurare simultaneamente l'efficienza, la qualità e la disponibilità nel raggiungimento degli obiettivi.

L'OEE viene applicato principalmente agli "pseudo-oloni" (foglie dell'albero) che ricevono informazioni ambientali. Per misurare l'efficacia a nodi superiori e identificare eventuali colli di bottiglia, l'HMT introduce il concetto di OTE (Overall Throughput Effectiveness), che si basa sull'OEE dei nodi discendenti e viene calcolato in modo ricorsivo. La relazione tra OTE e OEE è stata sviluppata in studi precedenti e consente un calcolo bottom-up dell'efficacia complessiva.

L'HMT riconosce che il suo obiettivo principale è ridurre temporaneamente la complessità e non cercare un'ottimizzazione perfetta. Dopo aver definito OEE e le relazioni strutturali, l'HMT può fungere da sistema di supporto decisionale, suggerendo azioni di controllo per migliorare le prestazioni del sistema verso i suoi obiettivi. Tuttavia, l'HMT deve affrontare problemi aperti come l'evoluzione temporale dei sistemi complessi e l'inevitabile imprecisione nella modellazione dell'OEE, che possono portare a difficoltà operative.

Infine, l'HMT è progettato anche come un "sensore" che segnala malfunzionamenti nei modelli, richiedendo un processo di raffinamento per affrontare eventuali inefficienze. Per garantire una gestione sistematica dell'HMT, è stato sviluppato un framework, chiamato RISSA, che consiste in un approccio per l'ottimizzazione dei processi attraverso l'uso di dati sensoriali e un sistema di feedback chiamato HMT (Holistic Management Tool). Ecco i punti principali:

1. **Aggiornamento dei Dati:** L'introduzione di nuovi dati di sensori, ottenuti tramite processi di acquisizione manuali o automatizzati, porta a un aggiornamento dei valori di OEE (Overall Equipment Effectiveness) e OTE (Overall Throughput Effectiveness). Attraverso questa analisi, vengono identificati i colli di bottiglia associati ai componenti del sistema con i valori più bassi di OTE e OEE.

2. **Miglioramenti Teorici:** Selezionando un elemento tra i colli di bottiglia, il sistema HMT suggerisce possibili aumenti teorici dei fattori OEE per migliorare l'efficienza operativa. Ad esempio, potrebbe essere proposto un nuovo valore di override per un braccio robotico per migliorare il compromesso tra energia ed efficienza.

3. **Previsione e Allerta:** Dopo la fase di acquisizione, HMT può anticipare il miglioramento teorico atteso per la successiva iterazione. Se i miglioramenti attesi non si realizzano, il sistema attiva un allarme, indicando che i modelli sottostanti hanno perso consistenza e necessitano di una "riparazione".

4. **Cibernetica di Primo e Secondo Ordine:** La perdita di efficacia dei modelli attiva un processo di cibernetica di secondo ordine. Qui, si attivano due cicli cibernetici: uno di primo ordine, focalizzato sul controllo e miglioramento continuo, e uno di secondo ordine, che affronta le irritazioni del sistema HMT e richiede una riflessione su come migliorare il modello stesso.

5. **Fasi del Ciclo di Secondo Ordine:** Il ciclo di secondo ordine comprende le fasi di STATS (raccolta dati), REFINE (raffinamento del modello), SPAWN (creazione di una nuova istanza HMT) e APPLY (applicazione delle migliorie). Ognuna di queste fasi ha obiettivi specifici e richiede una certa razionalità scientifica.

- **REFINE:** Raffinamento del modello HMT per determinare KPI e relazioni strutturali, necessitando di una visione causale coerente.

- **IMPROVE:** Identificazione delle scelte di miglioramento disponibili, con la selezione di un'azione basata su previsioni a breve termine.

- **STATS:** Misurazione delle performance attuali e identificazione dei colli di bottiglia.

- **SPAWN:** Creazione di una nuova istanza di HMT, potenzialmente automatizzabile.

- **APPLY:** Implementazione dell'azione di miglioramento, che può essere complessa e richiedere competenze manuali o automatizzate.

La fase di REFINE è centrale per l'evoluzione verso forme più avanzate di cibernetica, affrontando le sfide scientifiche e tecnologiche future. Ci sono questioni relative alla

scalabilità e sostenibilità del calcolo necessario per la fase di REFINE, ma la flessibilità e la granularità variabile degli elementi HMT offrono una resistenza alla complessità computazionale.

3.2 Strutture elementari e schemi di computazione dell'albero

Viene analizzata la struttura e il funzionamento dell'HMT (Holonc Management Tree), un approccio progettato per gestire sistemi complessi attraverso un albero gerarchico di oloni, soggetti a vincoli strutturali. Questi vincoli definiscono le relazioni tra le parti e i loro interi, limitando le possibilità a quattro relazioni strutturali: *serie*, *parallelo*, *assemblaggio ed espansione*. Tali restrizioni sono necessarie per creare un insieme finito di possibilità, pur mantenendo una certa generalità per coprire una vasta gamma di relazioni causali. Inoltre, si sottolinea che la prestazione degli interi (misurata tramite OTE) dipende ricorsivamente dall'OEE (Overall Equipment Effectiveness) dei loro costituenti. Ci sono due sfide principali nell'implementazione dell'HMT: la costruzione di KPI (Key Performance Indicators) e la definizione delle relazioni strutturali. Questi aspetti devono essere formalizzati per stabilire una procedura sistematica che consenta una gestione efficace delle strutture HMT in contesti complessi.

Da qui si introducono le due componenti principali dell'HMT: il "*kernel*" e la "*struttura*". Il kernel riguarda i modelli e le formule che definiscono l'OEE e rappresenta il collegamento tra il dominio cibernetico e quello fisico. La struttura HMT, d'altra parte, si concentra sulla "ricorsione" frattale e auto-similare delle parti negli interi all'interno della gerarchia olonico-associativa.

Il "kernel HMT" (Holonc Management Tree) rappresenta la parte centrale della modellazione di un mondo di interesse, in particolare quello fisico, includendo modelli e formule fondamentali per gli indicatori chiave di prestazione (KPI) della tecnica HMT. È importante notare che la definizione del kernel HMT non è unica e potrebbe essere adattata o modificata. Ogni nodo foglia dell'HMT è tipicamente associato a un KPI OEE (Overall Equipment Effectiveness), composto nel modo seguente:

$$OEE = A_{eff} \times P_{eff} \times Q_{eff} = \frac{T_u}{T_t} \times \frac{T_p}{T_u} \frac{R_{act}}{R_{th}} \times \frac{P_g}{P_a} \quad *1$$

Dove:

T_u = tempo di attività dell'apparecchiatura;

T_t = tempo di osservazione totale dell'apparecchiatura;

T_p = tempo di produzione effettivo dell'apparecchiatura;

R_{act} = tasso di elaborazione effettivo dell'apparecchiatura;

R_{th} = velocità di elaborazione teorica dell'apparecchiatura;

P_g = prodotto di buona qualità prodotto dall'apparecchiatura;

P_a = prodotti reali elaborati dall'attrezzatura durante tempo di osservazione.

Questi fattori definiscono rispettivamente l'idoneità del comportamento di un sistema, l'ambito di valutazione e la tempestività del comportamento stesso. Per interpretare sistematicamente i fattori OEE, si propone di utilizzare una funzione generica X_{eff} che quantifica ciascuno di questi fattori all'interno di un intervallo definito. Le scelte tipiche per la funzione X_{eff} includono una funzione lineare o una funzione logistica (sigmoide), ognuna con vantaggi e svantaggi in termini di aderenza ai comportamenti naturali. L'obiettivo principale dell'HMT è semplificare piuttosto che ottimizzare, affrontando la complessità con soluzioni rapide.

Durante la fase STATS, la variabile X_s rappresenta un livello prestazionale o una misura di raggiungimento degli obiettivi, mentre la fase IMPROVE utilizza i dati raccolti per identificare opportunità di miglioramento. L'analisi delle prestazioni avviene attraverso formule ricorsive, consentendo di generare azioni teoriche di miglioramento a partire dai valori ottenuti nella fase STATS. Il processo REFINE, infine, è attivato per migliorare la precisione del modello e garantire un'evoluzione continua e accurata dell'HMT. Si discute, in seguito dell'importanza di avere un modello causale per prevedere gli effetti delle azioni di miglioramento e la necessità di affinare la modellazione se i risultati effettivi non corrispondono alle previsioni.

L'altra parte dell'HMT è proprio la sua struttura; infatti, in questa sezione di capitolo viene discussa l'importanza del Key Performance Indicator (KPI) OEE (Overall Equipment Effectiveness) e il suo sviluppo in un indicatore più complesso, chiamato OTE (Overall Target Effectiveness), all'interno di una struttura nota come HMT, che aiuta nella decomposizione del problema complesso preso in esame.

Ci sono quattro topologie principali (Fig.18) per la decomposizione degli obiettivi all'interno dell'HMT:

- **Serie:** obiettivi in una cascata causale.
- **Parallelo:** gli obiettivi concorrono simultaneamente e indipendentemente.
- **Assemblaggio:** un obiettivo principale il cui rendimento è influenzato dai rendimenti dei sottoprocessi.
- **Espansione:** un obiettivo principale che influisce sui sottoprocessi con contributi ponderati.

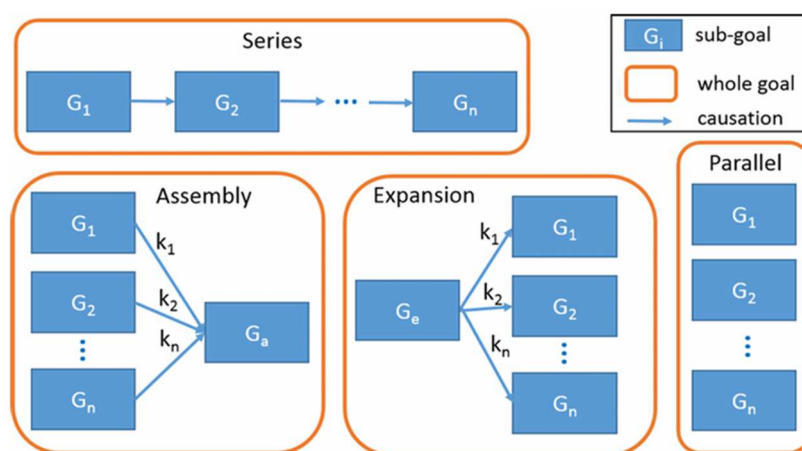


Figura 18 – Quattro strutture di base che formano relazioni causali

La transizione da OEE a OTE introduce un livello di complessità, dove gli effetti emergenti non possono essere facilmente formalizzati. L'emergenza crea una certa opacità nei rapporti causa-effetto tra le parti e il tutto. Nello specifico, relativamente alla fig.18:

- **Serie.** Ogni obiettivo causale $G_{1,i}$ è in una cascata causale, dove $i = 1, \dots, n$. Ogni miglioramento di un processo antecedente che persegue l'obiettivo $G_{1,i}$ influenza causalmente la prestazione del processo successivo che persegue l'obiettivo $G_{1,i+1}$.
- **Parallelo.** La prestazione dei sottoprocessi che perseguono i loro obiettivi $G_{1,1}, \dots, G_{1,n}$ concorrono simultaneamente e indipendentemente alla prestazione del processo che persegue G_1 .
- **Assemblaggio.** $G_{1,a}$ è l'obiettivo principale della struttura. La prestazione del processo principale dell'assemblaggio è influenzata dalla prestazione dei sottoprocessi che si dirigono individualmente per $G_{1,1}, \dots, G_{1,n}$ con contributi ponderati $k_1, \dots, k_n$.

- **Espansione.** La performance del processo che persegue l'obiettivo principale G1, e influenza, con i contributi ponderati $k_1, \dots, k_n$, la performance dei processi individualmente diretti a $G_{1,1}, \dots, G_{1,n}$.

Si parte col valutare l'OEE delle foglie estreme dell'albero che può assumere un valore compreso tra 0 e 1: 1 quando la singola unità produttiva funzionerà correttamente e uguale a 0 quando non funzionerà. Nel mezzo staranno i livelli di efficienza intermedi che usciranno fuori dai vari processi di REFINE.

Tramite delle tabelle relazionali in base al tipo di sottostruttura che si sta utilizzando (serie, parallelo, assembly, expansion) si può calcolare ricorsivamente l'OTE di tutte le parti dell'albero.

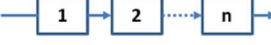
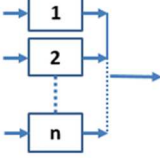
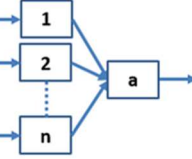
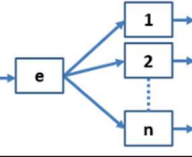
System type		OTE of system	Qeff of system
Series		$\min \left\{ \min_{i=1, \dots, n-1} \left\{ O_i \cdot \prod_{j=i+1}^n Q_j \right\}, O_n \right\}$	$\prod_{i=1}^n Q_i$
Parallel		$\frac{\sum_{i=1}^n O_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}$
Assembly		$\min \left\{ \min_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{O_i \cdot Q_a}{k_{a,i}} \right\}, O_a \right\}$	$\frac{\sum_{i=1}^n k_i Q_i}{\sum_{i=1}^n k_i} Q_a$
Expansion		$\sum_{i=1}^n \min \{ O_e \cdot k_i \cdot Q_i, O_i \}$	$\frac{\sum_{i=1}^n k_i Q_i}{\sum_{i=1}^n k_i}$

Figura 19 - Formule per il calcolo di OTE e Qeff rispetto alle quattro strutture di base del sistema

La notazione della Figura 19 assegna Q come Qeff e O come OTE o OEE, a seconda della posizione dell'unità nell'albero. L'OTE di un nodo padre dipende ricorsivamente dalle seguenti variabili dei sistemi figli: O_i , l'OTE dell'i-esimo figlio; Q_i , il fattore di qualità dell'i-esimo figlio ($i = 1, \dots, n$, dove n è il grado dell'albero). O_a e Q_a sono rispettivamente l'OTE e il fattore qualità del nodo principale in un *assembly*. O_e e Q_e sono rispettivamente l'OTE e il fattore qualità del sistema principale in un'*espansione*. k_i appare, invece, come fattore di ponderazione delle strutture nei sistemi di *assembly* ed *espansione*. La quantità O viene valutata con *1 come un OEE solo sulle foglie dell'albero del sistema. L'O degli altri nodi superiori, ovvero OTE, viene ottenuto ricorsivamente a ogni livello dell'albero con le formule della Figura 19.

Si passa ora alla fase di analisi delle azioni possibili da mettere in atto per eliminare i colli di bottiglia del sistema, cioè quali sono le varie azioni/possibilità di migliorare il sistema.

Tramite delle tabelle relazionali (vedi referenza “*Holonic Management Tree Technique for Performance Improvement Over Self-Similar System Structures*” di Bonci, Longhi, Pirani - 2019), che dipendono dalla tipologia di sottosistema analizzato, vengono individuati i colli di bottiglia. Per risolvere ogni strozzatura saranno disponibili più azioni, ognuna delle quali darà un preciso beneficio in termini di OTE del sottosistema analizzato. (5)

Può essere eseguita un’azione alla volta e questa non potrà mai essere peggiorativa per quanto riguarda il sistema nel suo complesso. Di fatti è proprio questo il pregio fondamentale di questo sistema, cioè permette di fare solo scelte migliorative riguardo alla situazione che si presenta, o immediata o in prospettiva, evitando di prendere strade sbagliate.

La scelta dell’azione da mettere in atto dipende dalla politica, prefissata all’inizio, che si intende perseguire; ad esempio: la politica della maggiore efficienza, la politica del risparmio energetico, ecc...

Una volta effettuata l’azione correttiva si rivalutano i valori di OEE e OTE dell’albero e la procedura può ricominciare dall’inizio iterativamente.

Il framework HMT, appena citato, offre un modo per affrontare la complessità nella gestione degli obiettivi attraverso la decomposizione in sotto-obiettivi, utilizzando strutture causali per analizzare le relazioni tra le parti e il tutto.

La metodologia MHMT (Fig. 20) è quindi vista come un processo sistematico per migliorare la gestione delle prestazioni in ambienti complessi.

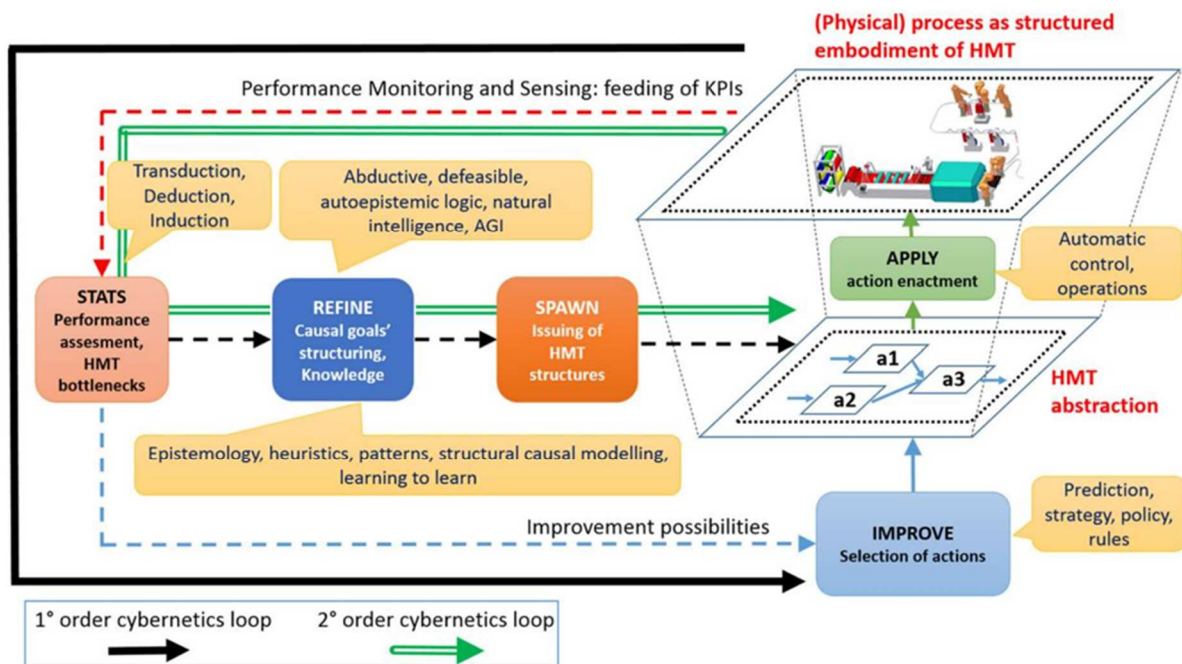


Figura 20 - Diagramma di Flusso della metodologia MHMT

Esempio applicativo

Si discute dell'applicazione della metodologia MHMT (Multi-Hierarchical Management Theory) in un contesto di miglioramento del consumo energetico in un impianto di produzione. L'obiettivo principale è ridurre il consumo energetico complessivo, e il manager utilizza un flusso di lavoro descritto in un diagramma (Fig. 21) che comprende fasi di raffinamento, monitoraggio e miglioramento.

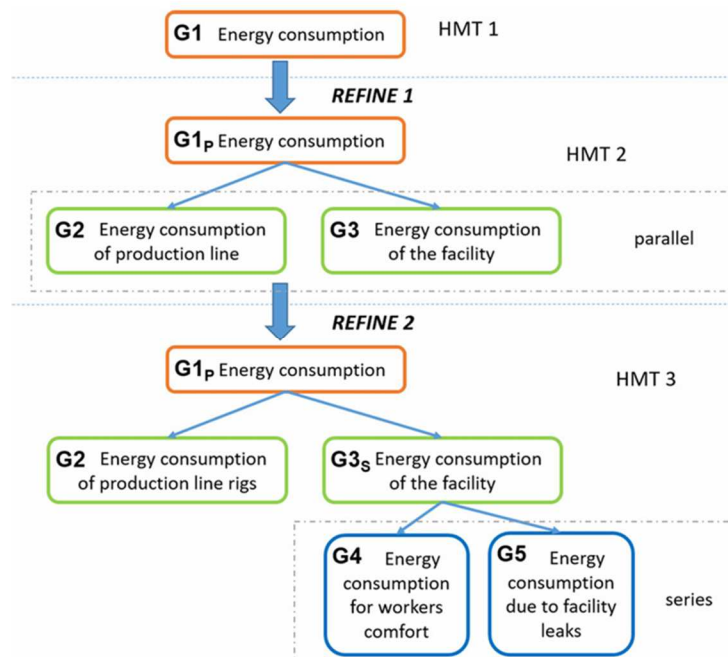


Figura 21 - Evoluzione dell'HMT nell'esempio

Inizialmente, il manager stabilisce il primo obiettivo (G1) di ridurre il consumo energetico, definendo un sistema di metriche in cui la distanza $d1$ rappresenta il consumo attuale rispetto a un valore desiderato. Due approcci per definire $d1$ sono proposti: stabilire un valore ideale e misurare la distanza attuale, oppure partire da un valore medio e migliorare da lì. Il manager sceglie di partire da un valore attuale di 20 kWh con un obiettivo di 15 kWh, stabilendo d_{max} a 10 kWh, il che implica una potenziale riduzione del 25%. Il modello iniziale è molto semplificato e il manager registra i valori di efficienza energetica (OEE) e altre metriche. Dopo una prima iterazione, il manager riconosce la necessità di un nuovo affinamento del modello, incrementando il numero di iterazione n . In una fase di rifinitura, il manager considera che il consumo energetico è composto da due contributi distinti: quello della linea di produzione e quello legato al comfort termico dell'edificio.

Il nuovo modello (HMT 2) si struttura in parallelo, con obiettivi distinti (G2 e G3) per migliorare il risparmio energetico nella produzione e nel comfort termico. Si decide di

concentrarsi su G3, implementando azioni per ridurre le perdite termiche, come limitare l'apertura delle finestre. Successivamente, il manager si rende conto che la riduzione delle perdite non porterà a un risparmio immediato senza prima migliorare il comfort termico (G4). La gestione del comfort è quindi considerata una priorità. Dopo aver implementato alcune azioni correttive (come ridurre la temperatura di riscaldamento), il manager calcola i valori di efficienza e ottiene un miglioramento complessivo.

L'analisi finale mostra come, sebbene l'incremento possa sembrare modesto, il valore numerico non è fondamentale per la metodologia HMT, che si basa su un approccio “costruttivista”. La metodologia ha guidato il manager in un processo di apprendimento e miglioramento, utilizzando le informazioni disponibili in modo efficace. Inoltre, il processo è stato documentato, permettendo di trasferire e applicare le conoscenze acquisite in futuro.

3.3 Considerazioni e direzioni future della ricerca

Viene analizzata la praticità e la solidità dell'HMT (Holonc Management Tree) e della sua struttura meta, nota come MHMT (Meta Holonc Management Tree), evidenziando l'importanza dei concetti di auto-similarità e strutturazione frattale. Questi concetti sono applicabili in vari settori, come quello manifatturiero e delle costruzioni, e si sono evoluti per adattarsi a processi più incentrati sull'uomo, come nelle abitazioni intelligenti, nell'ingegneria del software, nei trasporti e nella gestione dell'energia. Recentemente, si è cominciato a esplorare l'uso di questi principi nella gestione delle infrastrutture e della logistica nel settore sanitario. L'applicazione principale dell'HMT è nel processo decisionale per il miglioramento continuo, anche in contesti con bassa digitalizzazione. Sebbene molti metodi di misurazione delle performance mirino al miglioramento continuo, l'assenza di digitalizzazione non è sempre un ostacolo, come dimostrano studi recenti sul Lean Management e sul Kaizen (miglioramento continuo). Attualmente, vi è un crescente interesse nella sistematizzazione della dimensione umana nelle architetture di controllo olonico, per migliorarne l'efficacia e l'ampiezza d'azione. (3)

Espandendo il campo all'architettura aziendale (EA), l'MHMT si configura come uno strumento promettente in grado di affrontare le prospettive multidimensionali (economiche, sociali ed ecologiche) e rappresentare le preoccupazioni dei diversi stakeholder. L'MHMT integra approcci di pensiero sistemico che si basano su interpretazioni e implementazioni avanzate delle tecnologie digitali. Inoltre,

rappresenta una possibilità concreta per affrontare la grande sfida di "vivere con la complessità" in un'impresa vista come un sistema cibernetico di sistemi.

La sezione esamina l'Holonic Management Tool (HMT) e il suo potenziamento attraverso il nuovo strato proposto chiamato MHMT (Multi-layered Holonic Management Tool). Sebbene l'HMT prometta di essere un toolkit e una struttura generale per la gestione, i risultati sistematici sono ancora in fase di raccolta. L'HMT è progettato per bilanciare il controllo locale e globale, ma occorre approfondire i suoi effetti rispetto ad altre architetture di controllo oloniche e semi-gerarchiche.

L'uso dell'HMT in casi di gestione reale deve affrontare pratiche più consolidate nell'analisi di fallimenti e miglioramenti.

Un esempio è fornito da Mokhtarzadeh et al. (2024), che offrono una revisione della letteratura per assistere gli analisti nello sviluppo di metodologie ibride di analisi dei fallimenti, combinando approcci proattivi e reattivi. L'HMT può essere utilizzato come un nuovo integratore ibrido di queste metodologie, ma questa area è ancora oggetto di ricerca. (3)

Viene menzionato anche il contributo della cibernetica nella gestione della cognizione artificiale, problematica ancora aperta. Si osserva come la comunità cibernetica stia sviluppando framework utili per la formalizzazione dei problemi di cognizione artificiale, paralleli alle strutture ricorsive presenti nell'HMT. L'obiettivo principale è dettagliare la metodologia MHMT, posizionandola come uno strumento importante per la Cibernetica 5.0.

Le limitazioni principali delle applicazioni simili all'MHMT riguardano le difficoltà di automazione e digitalizzazione, specialmente nelle fasi IMPROVE, APPLY e REFINE, che sono essenziali per il controllo in tempo reale. L'MHMT, pur essendo un metodo ingegneristico utile per affrontare eventi imprevisti, deve affrontare sfide di sistematizzazione, in particolare nei processi altamente automatizzati dell'Industria 4.0/5.0. Viene enfatizzata l'importanza dei calcoli relativi all'OEE (Overall Equipment Effectiveness) e all'OTE (Overall Throughput Effectiveness), e si nota che le formule attuali presentano problemi numerici e comportamentali non lineari che ne limitano l'applicazione pratica.

Si discute anche della sicurezza informatica nel contesto dell'MHMT, evidenziando che la riservatezza delle informazioni è cruciale. È necessario implementare misure di sicurezza informatica, come controlli di accesso basati sui ruoli, per proteggere le informazioni all'interno delle gerarchie oloniche.

In definitiva, il capitolo presenta una revisione delle problematiche che collegano gli obiettivi e le difficoltà di Industry 4.0 (I4.0) e Industry 5.0 (I5.0) alla struttura tradizionale del lavoro derivante dalla cibernetica. Si sottolinea l'importanza di un'integrazione disciplinare, enfatizzata dagli sviluppi recenti di I4.0 e dalle nuove ambizioni di I5.0. Introducendo il concetto di Cibernetica 5.0, viene proposta una connessione tra l'iper-specializzazione ingegneristica e la necessità di un approccio sistemico e olistico, già riconosciuto nella manifattura digitale e nelle architetture oloniche basate su sistemi multi-agente.

La proposta principale è articolata in tre domande di ricerca (RQ). La prima (RQ1) chiede una versione modernizzata della cibernetica interoperabile possa fornire un quadro utile per affrontare le complessità sociotecniche delle pratiche industriali attuali e future. La risposta viene data con la proposta di un framework di Cybernetics 5.0, capace di unire la cibernetica moderna e la ricerca in tecnologie di gestione operativa e informativa in modo transdisciplinare, affrontando il problema della complessità nel prendere decisioni e nel controllo.

La seconda domanda (RQ2) si concentra sul potenziale arricchimento delle architetture oloniche in relazione ai principi rinnovati della cibernetica. Qui, si rivede l'approccio olonico presentato con la tecnica HMT (Holonc Multi-Agent Technique) come rappresentativa delle architetture oloniche, sebbene non sia l'unica opzione per collegare cibernetica e problemi di gestione nei CPS per I4.0/I5.0.

La terza domanda (RQ3) indaga le tecnologie in fase di studio e applicazione della metodologia olonica in relazione alla Cibernetica 5.0. Qui, la MHMT (Meta-Holonc Multi-Agent Technique) viene proposta come una struttura per raccogliere in modo sistematico gli sforzi verso nuovi orizzonti per I4.0/I5.0, richiedendo un aggiornamento dettagliato della tecnica HMT.

Infine, sono state annunciate l'inizio di sessioni sperimentali sul campo e presentato una roadmap per il futuro lavoro, che copre due periodi fino al 2030. Questa roadmap ha due scopi: mostrare le intenzioni di ricerca riguardo alle fonti principali di complessità in I4.0/I5.0 e collegare queste attività ai progressi disponibili nella comunità scientifica, selezionando metodologie e tecnologie in grado di mostrare complementarità e sinergia con la MHMT e le sue implicazioni nel contesto della Cibernetica 5.0. La discussione non è esaustiva, ma intende indicare un percorso chiaro anche grazie alle lezioni apprese da esperienze in vari progetti di ricerca e innovazione.

4 – TECNOLOGIE DIGITALI

4.1 REALTÀ AUMENTATA

4.1.1 VR, AR, MR e le loro applicazioni

Con il progresso tecnologico, lo sviluppo dell'Industry 5.0 e dell'incremento tecnologico nella produzione in relazione alla Cibernetica 5.0, non si può non parlare di quanto stia cambiando l'esperienza del cliente (*customer experience*) grazie all'arrivo delle tecnologie di realtà virtuale, realtà aumentata e realtà mista. Queste realtà svolgono un ruolo importantissimo e bisogna imparare a sfruttarle nel modo giusto perché danno forma ad un nuovo ambiente in cui gli oggetti fisici e virtuali sono integrati a diversi livelli. Ad oggi, i recenti sviluppi mettono in dubbio cosa VR, AR e MR significhino davvero, sia per i ricercatori che per i professionisti.

Come prima cosa bisogna iniziare a classificare i vari ambienti dal reale al virtuale e capire quello che possono restituirci concretamente. Questa classificazione spazia dagli ambienti reali a quelli virtuali agli estremi del continuum (Fig. 22). Gli ambienti reali (RE) comprendono la realtà stessa. Gli ambienti virtuali (VE) sono ambienti completamente generati dal computer nei quali gli oggetti che in realtà non esistono vengono “visualizzati” su un dispositivo e dove gli utenti interagiscono in tempo reale attraverso un'interfaccia.

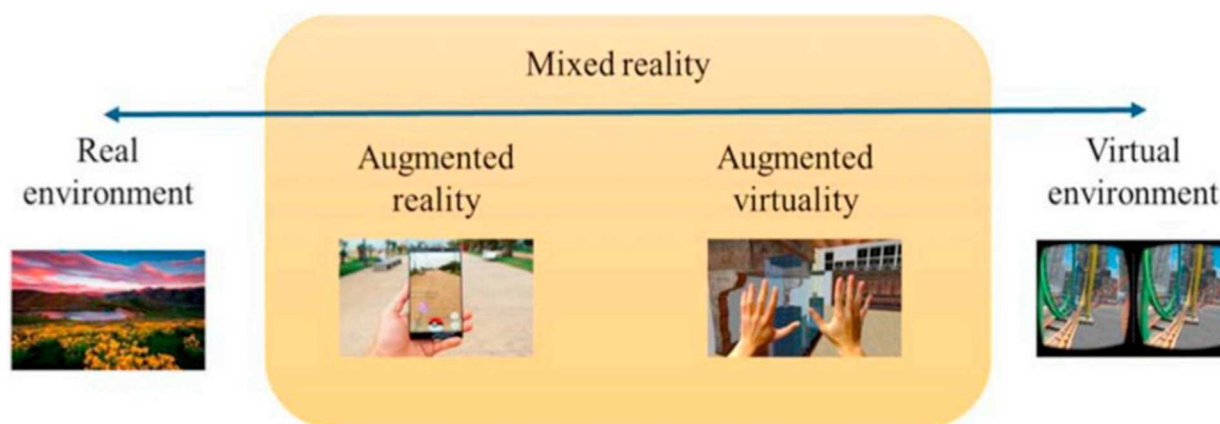


Figura 22 - Continuum Realtà / Virtualità

La realtà virtuale (VR), invece, è un ambiente generato dal computer in cui l'utente può navigare e interagire, innescando la simulazione in tempo reale dei suoi sensi, fornendo un'esperienza sensoriale immersiva. Tra i due ambienti estremi si pone l'ambiente di Realtà Mista (MR), concepita appunto come fusione degli oggetti reali e virtuali. Successivamente, si ha la Realtà Aumentata (AR) e la Virtualità Aumentata (AV) che fanno parte della MR (Fig. 22).

Da un lato l'AR modifica l'ambiente fisico reale dell'utente mediante la sovrapposizione di elementi virtuali; dall'altro l'AV, ambiente meno esplorato, sovrappone elementi del mondo reale ad ambienti virtuali.

Nuovi lanci nell'ambito dell'ICT sono stati etichettati come MR, ma gli utenti sono inseriti in un mondo completamente digitale, che è la caratteristica principale della VR. Pertanto, è necessario stabilire confini chiari tra le realtà che le attuali tecnologie sono in grado di creare. La MR non deve più rappresentare la parte più ampia del continuum che include AR e AV; deve essere considerata come una dimensione indipendente compresa tra AR e AV e caratterizzata da una totale fusione di ologrammi virtuali con il mondo reale. Detto ciò, si è arrivati alla definizione della Pure Mixed Reality (PMR) (Fig. 23). Il contenuto virtuale nella PMR non è sovrapposto all'ambiente fisico (come in AR) ma gli oggetti virtuali vengono renderizzati in modo tale da essere indistinguibile dal mondo fisico. La coerenza visiva è fondamentale elemento di pura realtà mista. Questa “consapevolezza ambientale” implica che non solo gli oggetti virtuali possono agire sull'ambiente reale, ma gli oggetti reali possono modificare anche gli elementi virtuali, indipendentemente da dove si svolge l'esperienza. Attualmente, gli unici sviluppi tecnologici che possono davvero essere considerati generativi di una PMR sono i dispositivi olografici Microsoft Hololens e l'imminente Magic Leap.

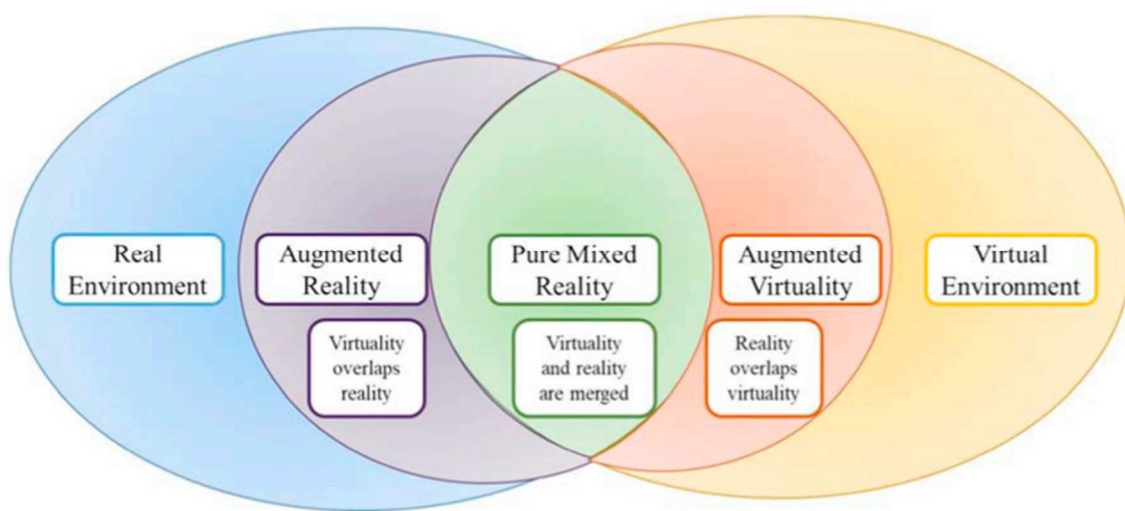


Figura 23 - Nuova Proposta di Continuum Realtà / Virtualità

Una volta stabiliti i confini tra le realtà, l'obiettivo è quello di classificare l'ampia varietà di tecnologie associate, affermando ed estendendo il concetto di interazione uomo-tecnologia (Human-Technology Interaction). Seguendo questo approccio si possono classificare le tecnologie attraverso tre fattori: un fattore tecnologico

(Incarnazione o Embodiment), una dimensione umana (Presenza) e un fattore comportamentale che scaturisce con l'interazione uomo/macchina (Interattività).

Per quanto riguarda il primo fattore, gli utenti per migliorare le loro esperienze usano apparecchiature che estendono le loro funzioni sensoriali, cognitive e motorie. Il massimo livello di incarnazione tecnologica è quello di generare una simbiosi uomo-tecnologia, che porta gli utenti e non uno stato in cui la tecnologia è una parte impercettibile dei loro corpi. Man mano che l'incarnazione aumenta, la tecnologia diventa parte delle azioni dell'utente e migliora le sue capacità. Le attuali tecnologie stanno aumentando il senso di integrazione dell'utente, pertanto, l'immersione gioca un ruolo fondamentale nella creazione di un'esperienza capace di coinvolgere tutti i sensi umani. Si prevede che gli artefatti, come gli occhiali AR e PMR, rivoluzioneranno il comportamento dei consumatori estendendo la loro percezione e adattando le capacità tecnologiche alle competenze degli utenti. Ci sono diversi tipi di incarnazione e quindi di interazione con i dispositivi: si parte da un'incarnazione base, cioè nessuna forma di realizzazione, fino ad arrivare ad un'incarnazione completa, ad esempio impianti microchip sottopelle. In fine, si propone la classifica dei dispositivi tecnologici in base al loro grado di incarnazione, cioè il grado di contatto che ha con i sensi (Fig. 24): i *dispositivi interni* sono inseriti nel corpo umano (dispositivi indossabili e impiantati) e i *dispositivi esterni* non sono integrati nel corpo umano (dispositivi esterni fissi e portatili). L'incarnazione tecnologica comprende due importanti fattori: immersione e stimolazione sensoriale.



Figura 24 - Incarnazione Tecnologica

La Presenza, come secondo fattore, viene definita come la sensazione dell'utente di essere trasportato in un ambiente distinto al di fuori del reale corpo umano. La presenza però, è considerata come una fase psicologica e la tecnologia è soltanto il mezzo e il modo per arrivare a quella fase. Essendo di natura psicologica, viene da sé che la percezione è totalmente soggettiva perché dipende dai vari processi sensoriali, cognitivi e affettivi di ognuno di noi. Questo, fa sì che in base alla natura della tecnologia e ai diversi tipi di dispositivi, si hanno delle percezioni diverse da persona a persona (Fig. 25). Pertanto, i dispositivi interni ed esterni possono generare diversi livelli di immersione. Nello specifico, i dispositivi interni possono trasportare e immergere gli utenti in luoghi distanti (virtuali o fisici, reali o digitali) in misura maggiore rispetto ai dispositivi esterni, grazie alla loro capacità altamente immersiva e al loro attaccamento sensoriale. I dispositivi esterni (ad esempio, schermi di computer, smartphone) stabiliscono i confini tra il mondo fisico e quello virtuale grazie alle loro interfacce e richiedono agli utenti uno sforzo mentale extra per sentirsi altrove.

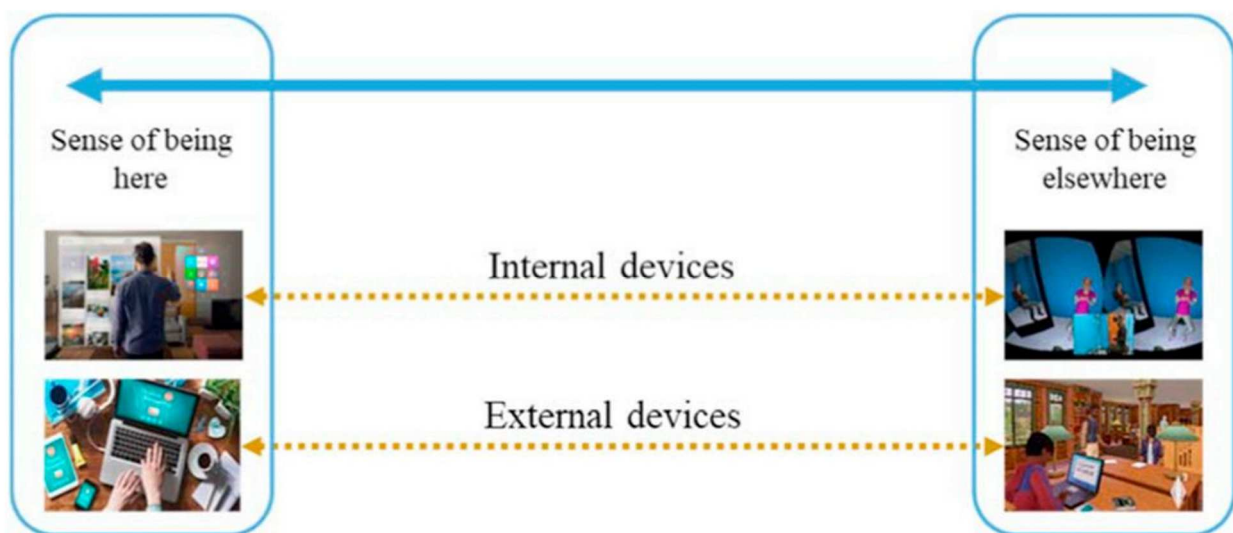


Figura 25 - Continuum della presenza percettiva

Il terzo fattore che si va ad analizzare è l'Interattività, definita come la capacità degli utenti di modificare e ricevere feedback sulle loro azioni nella realtà dove si svolge l'esperienza. Secondo Steuer (1992) ha descritto l'interattività come *“la misura in cui gli utenti possono partecipare alla modifica della forma e del contenuto di un ambiente mediato in tempo reale”*. (7)

Esiste un continuum che va da una bassa interattività comportamentale (controllo della navigazione) ad alta interattività (capacità di controllare e modificare l'ambiente). Inoltre, prendendo in considerazione che ogni tecnologia ha uno spazio diverso per attuare possibili azioni dell'utente, si può distinguere interattività tra tecnologie incorporate interne ed esterne (Fig. 26). Il livello massimo di interattività comportamentale si basa sul concetto di manipolazione, cioè la sensazione di poter modificare la posizione, l'orientamento o qualcosa delle caratteristiche di genere (forma, scala) degli oggetti precedentemente selezionati.

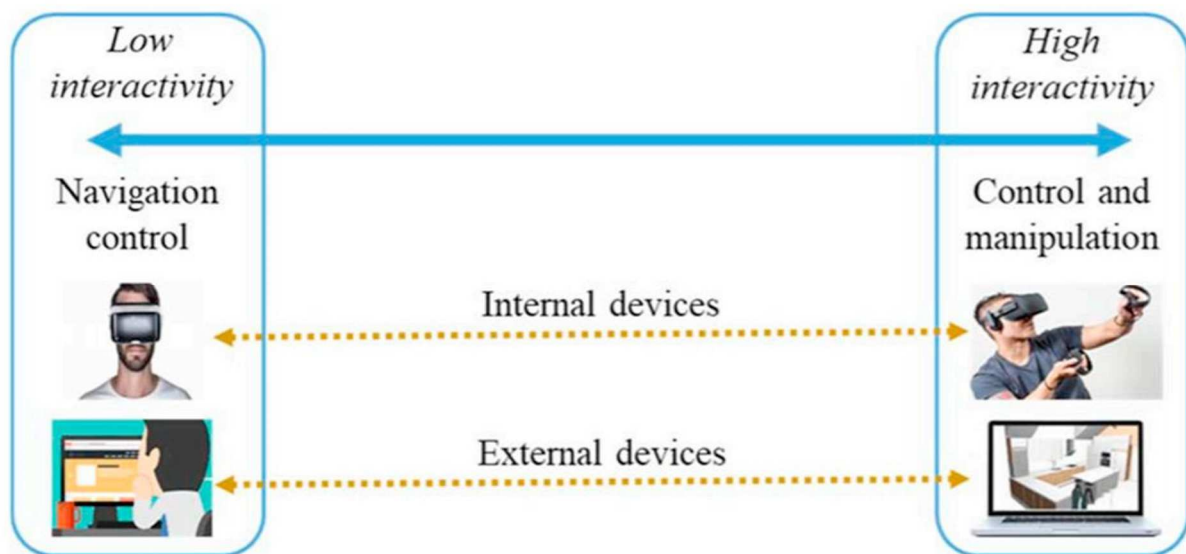


Figura 26 - Continuum dell'interattività comportamentale

Successivamente all'analisi dei tre fattori utilizzati per la classificazione delle tecnologie correlate all' HTI, viene proposto l'"EPI Cube" (Embodiment – Presence - Interactivity Cube), un artificio semplice per comprendere meglio il funzionamento e l'uso delle tecnologie in relazione con l'esperienza dell'utente finale; in breve, i tre fattori precedentemente analizzati uno per uno rappresenterebbero le tre dimensioni del cubo. I vertici del Cubo EPI rappresentano esempi radicali di tecnologie nella loro situazione attuale corrispondente (Fig. 27).

I dispositivi esterni sono posizionati nei vertici da 1 a 4. Si parte dal vertice 1 che rappresenta i media tradizionali come la tv e la radio dove gli utenti possono solo controllare il contenuto di ciò che viene visualizzato senza modificarlo. Passando attraverso i vertici 2 e 3 dove troviamo sempre un basso grado di interattività comportamentale ma che possono arrivare ad avere alti livelli di presenza. Infine, si arriva al vertice 4 con un elevato livello di interattività dove gli utenti sono in grado di manipolare il contenuto.

I dispositivi interni, d'altra parte, sono posti nei vertici da 5 a 8. Nel vertice 5 troviamo le tecnologie che si adattano al corpo umano, come Occhiali per la Realtà Aumentata, così gli utenti possono controllare solo il contenuto digitale che si sovrappone ad una scena reale. Gli occhiali Pure Mixed Reality (dispositivi olografici) invece, sono un esempio radicale del vertice 6, poiché consentono agli utenti di modificare la forma del contenuto visualizzato e di interagire con questi elementi virtuali con il mondo reale. Il vertice numero 7 implica tecnologie interne dove gli utenti possono controllare i contenuti, ma sentono di essere altrove; questo succede, ad esempio, con l'interazione con video HMD a 360 gradi. Infine, nel vertice 8 il livello di interattività comportamentale è elevato. Per esempio, gli utenti che indossano HMD per realtà virtuale e alcune tute tattili che tracciano i loro movimenti, sono in grado di spostarsi attraverso la posizione virtuale e modificare la forma e la posizione degli oggetti digitali.

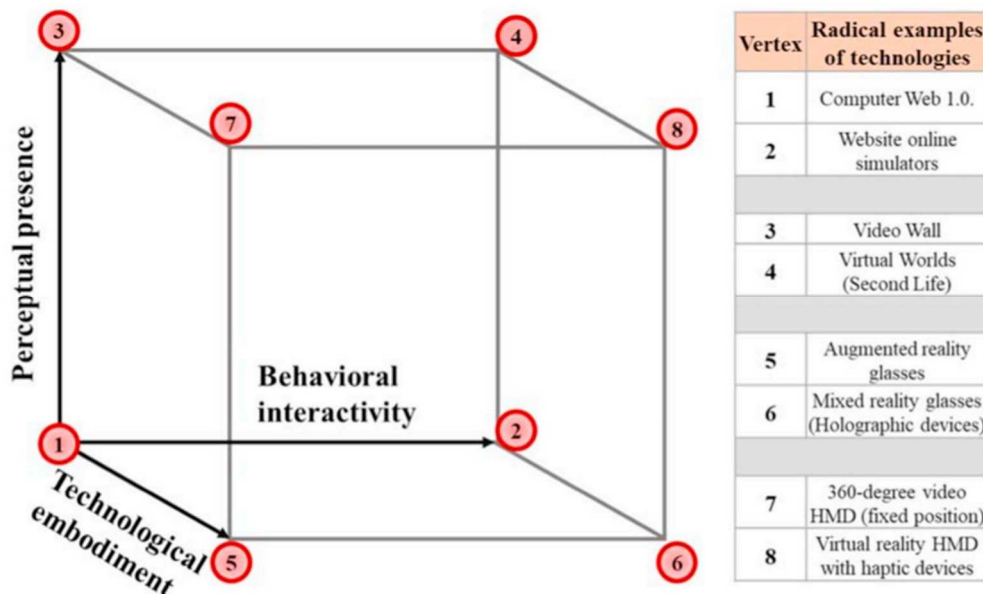


Figura 27 - Il "Cubo EPI" e gli esempi estremi di tecnologie associati

In questo contesto è importante capire con quale dispositivo si sta interagendo perché la riproduzione di un video a 360 gradi su un telefono cellulare può generare un senso di presenza maggiore rispetto a un PC desktop, poiché la sua funzione giroscopica consente agli utenti di controllare ciò che viene visualizzato ruotando il dispositivo, quindi creando un senso di "armonia" tra la loro posizione e il contenuto. Sullo schermo di un computer, l'utente può controllare il contenuto solo facendo clic su una freccia, il che non è così naturale.

In definitiva, il Cubo EPI offre un quadro integrato per una tassonomia più completa delle tecnologie di realtà virtuale esistenti (e potenzialmente nuove), che consente ai ricercatori di comprendere meglio il loro impatto sull'esperienza del cliente. Inoltre, EPI Cube è uno strumento pratico per i manager, che può aiutarli a selezionare le tecnologie più appropriate con cui progettare proposte di valore aggiunto per i consumatori. L'approccio migliore è quello di identificare quale sia la "core experience" del cliente e quale tecnologia viene usata. Una volta definita l'esperienza di base allora si parte da lì come punto di partenza attraverso cui costruire esperienze migliorate. La tecnologia crea una nuova esperienza con una singola entità e questa esperienza può essere correlata o meno all'esperienza principale del cliente. In ogni caso le potenzialità delle tecnologie e della realtà aumentata, virtuale o mixata, possono essere sfruttate in molti ambiti diversi come: vendita al dettaglio, istruzione, turismo, assistenza sanitaria e ricerca. Questo non toglie il fatto che deve garantire un miglioramento di uno stato attuale perché, se non adeguatamente integrata con le esigenze del produttore e del customer può risultare invasiva e, persino avere dei risvolti negativi.

4.1.2 Base della Tecnologia: HOLOLENS 2

Nel capitolo precedente è stata messa in risalto la differenza tra i vari tipi di realtà che ci sono (AR, VR, MR), ed è stata stabilita una classificazione più dettagliata di questo Continuum Realtà / Virtualità (vedi Fig. 23) con la definizione della Pure Mixed Reality (PMR). Attualmente, gli unici sviluppi nell'ambito tecnologico che possono davvero vantare di generare una PMR sono i dispositivi olografici Microsoft HoloLens (adesso aggiornati con la nuova versione Microsoft HoloLens 2).

HoloLens 2 è un dispositivo di realtà aumentata (AR) sviluppato da Microsoft e rappresenta la seconda generazione della linea HoloLens. È stato progettato per fornire un'esperienza immersiva e interattiva che combina elementi digitali con il mondo reale. HoloLens 2, nel dettaglio (Fig. 28), è un visore di realtà aumentata che consente agli utenti di visualizzare ologrammi digitali sovrapposti all'ambiente reale ed è utilizzato in vari settori per migliorare l'interazione con contenuti digitali, facilitare la formazione, la progettazione e la collaborazione.

Per quanto riguarda i componenti hardware abbiamo:

- **Display:** HoloLens 2 utilizza un display micro-OLED con una risoluzione di 2K per occhio, che offre una qualità visiva elevata e un ampio campo visivo (FOV diagonale) di circa 96 gradi.
- **Sensori:** È dotato di una serie di sensori avanzati, inclusi:
 - Telecamere di profondità per la rilevazione del movimento e la mappatura dell'ambiente.
 - Telecamere RGB per la cattura di immagini e video.
 - Sensori di movimento per il tracciamento della testa e delle mani.
- **Processore:** HoloLens 2 è equipaggiato con un processore Qualcomm Snapdragon 850, progettato per gestire applicazioni AR complesse e per garantire prestazioni elevate.
- **Audio:** Il dispositivo include audio spaziale con un array di microfoni a 5 canali, che consente di percepire il suono proveniente da diverse direzioni, migliorando l'immersione.
- **Batteria:** La batteria ha una durata di circa 2-3 ore di utilizzo attivo fino ad una settimana in stand-by ma può essere alimentata anche tramite un cavo.
- **Comfort:** Il design è stato migliorato rispetto al modello precedente per garantire maggiore comodità durante l'uso prolungato, con un sistema di adattamento per diverse forme e dimensioni della testa.

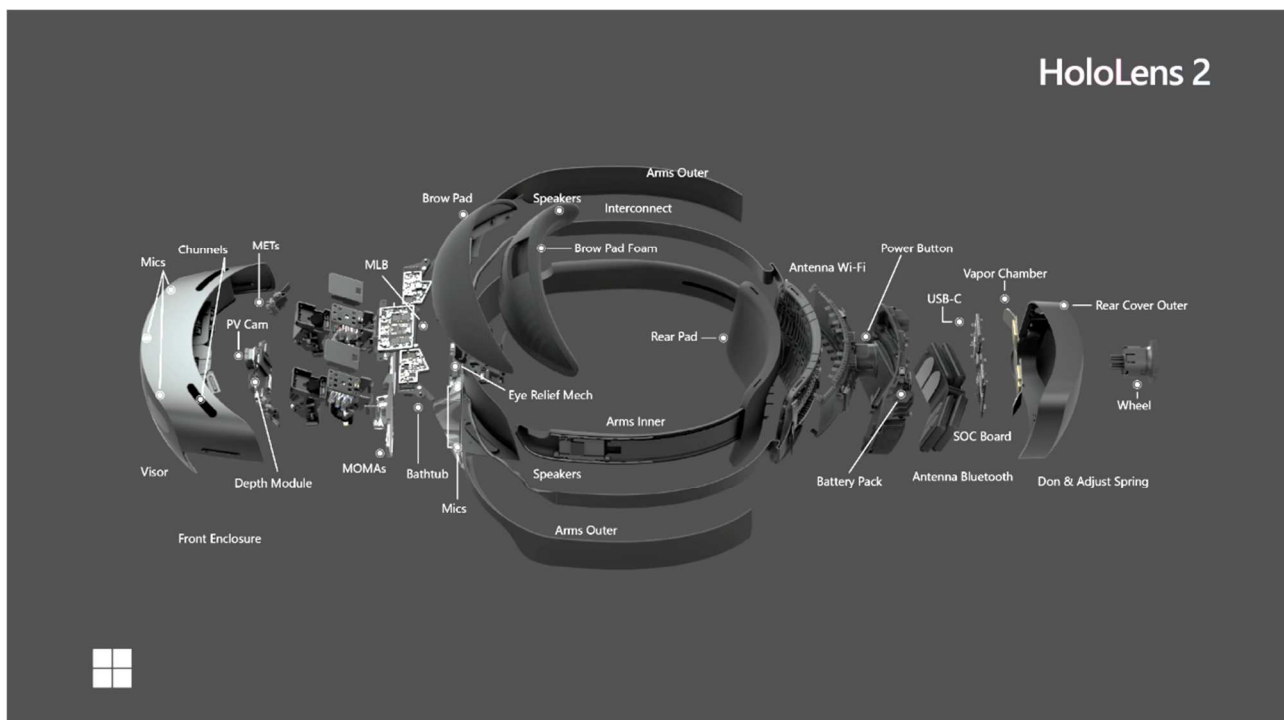


Figura 28 - Struttura e design di HoloLens 2

HoloLens 2 gira su Windows Holographic, un sistema operativo basato su Windows 10 e superiori, progettato specificamente per applicazioni di realtà aumentata. Il dispositivo supporta lo sviluppo di applicazioni tramite strumenti come:

- **Microsoft Mixed Reality Toolkit (MRTK):** Un insieme di strumenti e componenti per facilitare lo sviluppo di esperienze AR.
- **Unity e Unreal Engine:** Piattaforme di sviluppo di giochi e applicazioni che possono essere utilizzate per creare contenuti per HoloLens.

HoloLens 2 può essere utilizzato in diversi modi: con l'Interazione Gestuale, dove gli utenti possono utilizzare gesti per interagire con gli ologrammi. I sensori delle mani permettono di rilevare le azioni come il pinch e il tap. Un'altra modalità di utilizzo è con i Comandi Vocali, cioè il dispositivo supporta comandi vocali tramite l'assistente vocale di Microsoft Cortana e altre interfacce vocali, consentendo un'interazione hands-free. Infine, un ultimo metodo di utilizzo può essere quello del Controllo tramite Occhiali, in cui gli utenti possono anche utilizzare i comandi attraverso il movimento degli occhi (eye-tracking) per selezionare ologrammi e interagire con l'interfaccia.

Questa tecnologia ha trovato applicazione in diversi settori, tra cui:

1. *Industria e Manifattura*: Per la formazione, la manutenzione e la progettazione, consentendo agli ingegneri di visualizzare ologrammi di macchinari e sistemi.
2. *Sanità*: Utilizzato per la formazione medica, la pianificazione chirurgica e la visualizzazione di dati clinici in tempo reale.
3. *Architettura e Design*: Gli architetti possono visualizzare modelli 3D delle loro creazioni direttamente nel contesto fisico.
4. *Formazione e Istruzione*: Le istituzioni educative possono utilizzare HoloLens 2 per creare esperienze di apprendimento immersive.
5. *Collaborazione Remota*: Consente ai team di lavorare insieme in ambienti virtuali, migliorando la comunicazione e la produttività.
6. *Giochi e Intrattenimento*: Anche se non è il suo focus principale, HoloLens 2 può essere utilizzato per esperienze di gioco interattive.

In definitiva, HoloLens 2 rappresenta un passo significativo nella tecnologia della realtà aumentata, combinando hardware avanzato e software potente per creare esperienze immersive. La sua versatilità e le sue applicazioni in vari settori lo rendono uno strumento promettente per il futuro della tecnologia AR.

4.2 MODELLAZIONE BIM: gemello digitale

Il BIM, acronimo di Building Information Modeling, è una metodologia innovativa per la progettazione, costruzione e gestione di edifici e infrastrutture. Si basa sulla creazione e gestione di un modello digitale tridimensionale dell'edificio, che contiene informazioni dettagliate su ogni componente, dalla geometria agli attributi fisici, come materiali e costi.

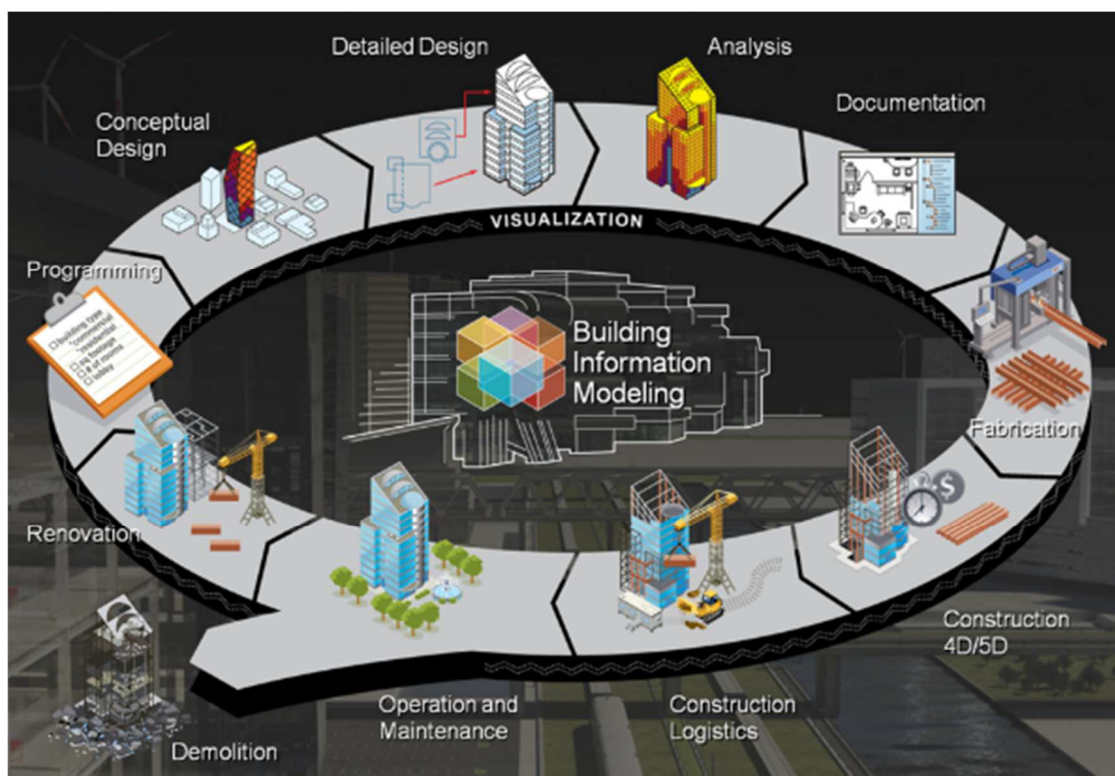


Figura 29 - Flusso concettuale di produzione BIM

Il BIM è più di un semplice software di progettazione; è un approccio collaborativo che integra dati e informazioni lungo tutto il ciclo di vita di un edificio, dalla fase di progettazione fino alla costruzione e alla gestione operativa, come si può vedere dalla Fig. 29. A differenza dei tradizionali disegni bidimensionali, il BIM consente di visualizzare e gestire un progetto in un ambiente 3D, facilitando la rilevazione di conflitti e migliorando la comunicazione tra i vari attori coinvolti.

Il BIM si colloca in tutte le fasi del ciclo di vita dell'edificio:

- **Pianificazione:** Ottimizzate la pianificazione dei progetti combinando l'acquisizione della realtà e i dati reali per generare modelli contestuali dell'ambiente naturale e edificato esistente.
- **Progettazione:** In questa fase, vengono eseguiti i processi di progettazione concettuale, la creazione del modello, analisi, creazione dei dettagli e documentazione. Nella fase di pre-costruzione, i dati BIM vengono utilizzati per le simulazioni delle prestazioni e per definire la pianificazione e la logistica.
- **Costruzione:** Pianificazione e coordinamento delle attività di cantiere, riduzione degli errori e ottimizzazione dei tempi. Durante questa fase inizia la fabbricazione in base alle specifiche del BIM. Le informazioni relative alla logistica della costruzione vengono condivise con i professionisti specializzati e gli appaltatori coinvolti per garantire i massimi livelli di sincronizzazione ed efficienza.
- **Gestione:** Utilizzo del modello per la manutenzione e la gestione delle strutture. I dati BIM si estendono anche alla gestione operativa e alla manutenzione degli asset costruiti. I dati BIM possono essere utilizzati in una fase successiva, ad esempio per una ristrutturazione economica o per uno smantellamento efficiente.



Figura 30 - Fasi di dettaglio del ciclo di vita dell'edificio

Il funzionamento di un modello BIM, per quanto posso sembrare complesso, è abbastanza semplice:

1. **Modellazione 3D:** Gli architetti e gli ingegneri utilizzano software di BIM per creare un modello tridimensionale dell'edificio, che include non solo la geometria ma anche informazioni sui materiali, le prestazioni energetiche e i costi.
2. **Collaborazione:** Il modello BIM è accessibile a tutti gli stakeholder (architetti, ingegneri, appaltatori, proprietari, ecc.), consentendo una comunicazione più efficace e la condivisione di informazioni in tempo reale.

4. Gestione del ciclo di vita: Una volta completato l'edificio, il modello BIM può essere utilizzato per la gestione e la manutenzione dell'immobile, facilitando operazioni come la pianificazione dei lavori di manutenzione e la gestione delle risorse.

- Autodesk Revit: Uno dei software BIM più popolari, utilizzato per la progettazione architettonica, ingegneria e costruzione.
- Archicad: Software BIM focalizzato sull'architettura.
- Bentley Systems: Software per ingegneria civile e infrastrutture.
- Navisworks: Utilizzato per la revisione e il coordinamento dei modelli.
- Tekla Structures: Specializzato nella modellazione di strutture in acciaio e cemento.



Figura 31 - Esempi di software di BIM authoring

Il BIM trova applicazione in vari settori, tra cui:

- *Architettura*: Progettazione di edifici e spazi pubblici.
- *Ingegneria civile*: Progettazione di infrastrutture come ponti, strade e ferrovie.
- *Costruzione*: Coordinamento delle attività di cantiere e gestione dei costi.
- *Gestione degli impianti*: Manutenzione e gestione degli edifici esistenti.
- *Urbanistica*: Pianificazione e sviluppo urbano.
- *Sostenibilità*: Analisi delle prestazioni energetiche e ambientali degli edifici.

Detto ciò, il Building Information Modeling (BIM) rappresenta una rivoluzione nel settore delle costruzioni, fungendo da gemello digitale per edifici e infrastrutture. Questa tecnologia consente di creare un modello tridimensionale dettagliato che integra informazioni geometriche, temporali e funzionali, offrendo una visione olistica del ciclo di vita dell'opera. Il BIM non solo facilita la progettazione e la pianificazione, ma consente anche una gestione più efficiente delle risorse, riducendo i costi e minimizzando gli errori in fase di esecuzione. Grazie alla sua capacità di simulare scenari e operazioni future, il gemello digitale diventa uno strumento cruciale per la manutenzione predittiva e l'ottimizzazione delle performance edilizie, promuovendo la sostenibilità e l'innovazione nel settore. In questo contesto, l'adozione del BIM si traduce in una maggiore collaborazione tra i vari attori coinvolti, dal progettista all'appaltatore, migliorando la comunicazione e assicurando che le decisioni siano basate su dati accurati e aggiornati.

In sintesi, il BIM rappresenta un cambio di paradigma nel modo in cui vengono progettati, costruiti e gestiti gli edifici, portando a processi più efficienti e sostenibili nel settore delle costruzioni.

5 – SPERIMENTAZIONE

5.1 Presentazione dell'edificio

5.1.1 Modellazione in BIM: Architettonico e MEP

Ennstal Milch KG è un produttore di prodotti lattiero-caseari, noto per la sua ampia gamma di formaggi e altri articoli alimentari. La società è localizzata a Stainach-Pürgg, in Austria, precisamente in Bahnhofstraße 182; e si offre anche come partner per la co-produzione nella lavorazione dei latticini. Non avendo avuto la possibilità di osservare il sito di produzione nel dettaglio, ho dovuto farmi un'idea su come fosse stato realizzato, attraverso il materiale che mi è stato dato dall'università e quello che sono riuscito a recuperare nell'ampio panorama del web.

In riferimento alla caratterizzazione architettonica sono andato ad indagare quali fossero le soluzioni tecniche più usate ed efficienti per realizzare uno stabilimento industriale di produzione. Tra i produttori che ho analizzato, nei loro cataloghi, c'era un denominatore comune a livello tecnico cioè l'uso dei pannelli sandwich; naturalmente ognuno con differenze quali, ad esempio, l'uso o meno della coibentazione, oppure vari tipi di finitura (nervata o no, liscia, decorata ecc.).

Tra i produttori esaminati abbiamo “**Astron**” che ha una struttura d'acciaio come struttura primaria e come sistema di chiusura verticale un pannello sandwich del tipo LPA900, Polar Wall o LPI12000 – LPG1000 in base alle esigenze.

Un'altra impresa, “**Manni Group – Building Future**” utilizza pannelli sandwich coibentati per l'edilizia commerciale e industriale. Per venire incontro ad esigenze come la sostenibilità e realizzare edifici di grandi dimensioni in tempi ridotti, si preferiscono soluzioni costruttive cosiddette “a secco”, che contano su strutture portanti prefabbricate e tamponamenti esterni verticali e orizzontali realizzate con elementi anch'essi prefabbricati come i pannelli sandwich coibentati. Anche in questo caso abbiamo diversi rivestimenti sia per quanto riguarda la copertura e sia per la realizzazione a secco dei muri. In questo modo si ha la possibilità di usare materiali sempre più innovativi e si è in grado di arrivare ad un livello di personalizzazione elevato. In questo ambito, il marchio punta molto sulla linea “Fortelia” di Isopan, frutto di una collaborazione tra mondo accademico e realtà aziendale.

“Kopron”, invece, è un'azienda che permette di realizzare capannoni equivalenti ai tradizionali fabbricati in calcestruzzo con tempi di costruzione molto più rapidi. Il rivestimento in pannelli garantisce il massimo isolamento termoacustico dall'esterno, rendendo la struttura non solo un luogo ideale per lo stoccaggio merci (per esempio), ma anche un'utile area di lavoro. Per quanto riguarda la copertura, che può essere mono

falda, a due falde o con veletta, si predilige un pannello tetto autoportante con un lato esterno grecato e un lato interno micronervato. Relativamente alle pareti, sia interne che esterne, si utilizzano dei pannelli metallici bilamiera a fissaggio nascosto con isolamento poliuretano.

Altra impresa del settore è “**Deltabi Costruzioni**” che progetta e realizza capannoni prefabbricati per l’utilizzo commerciale, industriale o agricolo; adatti alla realizzazione di magazzini, siti produttivi, centri commerciali, supermercati, padiglioni fieristici temporanei o permanenti. Per garantire tempi rapidi di costruzione, efficienza e sostenibilità, utilizzano capannoni in metallo, in acciaio con anima piena, prefabbricati in ferro con coperture in lamiera e pannelli prefabbricati che garantiscono resistenza e stabilità; nonché quando necessario anche antincendio.



Figura 32 - Milestone di cantiere

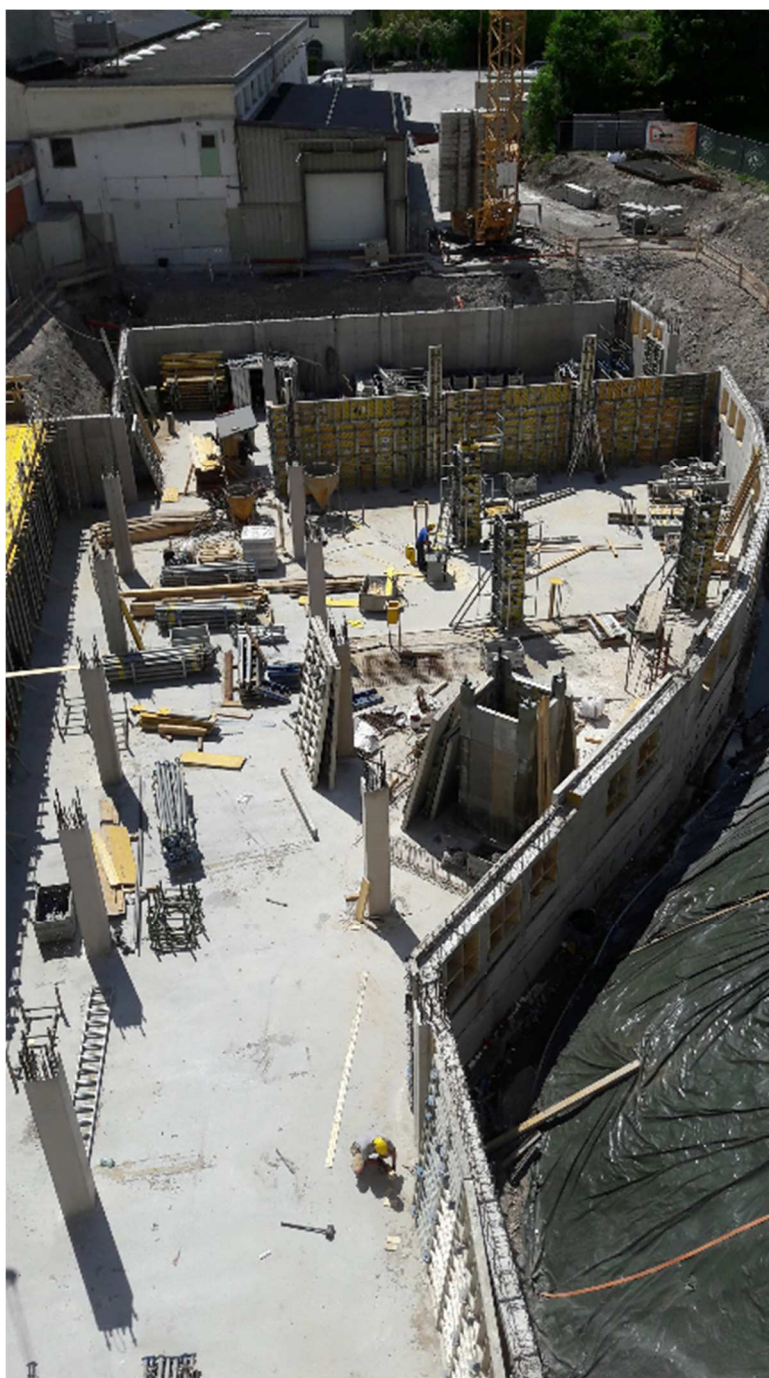


Figura 33 - Fase operativa dell'ala del fabbricato



Figura 34 - Fase di ampliamento Ennstal



Figura 35 - Fase di ampliamento del LUGLIO 2020

Preso visione delle immagini precedenti, dove si evidenziano alcuni procedimenti della costruzione dell'opera, possiamo affermare che una tecnica usata è quella di una struttura primaria in acciaio, completata con una chiusura verticale assimilabile ad un pannello sandwich coibentato e rifinito esteriormente, e come chiusura orizzontale una copertura piana in lamiera prefabbricata adatta a sostenere anche eventuali pesi derivanti da macchinari, impianti e così via. Un'altra tecnica usata per la messa in opera della struttura è l'uso di prefabbricati in cls gettati in opera con chiusure a mo' di lastra monolitica. Ci sono varie tecniche utilizzate circa questo progetto perché il fabbricato comprende diverse sezioni e, andando avanti con il tempo, si è espanso costruendo altri compartimenti e migliorando quelli che già erano presenti. Facendo una ricerca su Google Earth ho trovato la conferma a quanto detto. Navigando nelle immagini storiche ho notato che ci sono stati principalmente tre momenti principali di cambiamento. Il primo è a cavallo tra il 2011 (Fig. 36) e il 2013 (Fig. 37); il secondo passaggio importante è avvenuto nel 2020 (Fig. 38) con la costruzione della parte curva verso nord-ovest e l'ampliamento del plesso a sud dove è stato messo anche il logo della fabbrica. L'ultimo step è stato raggiunto tra il 2022-2024 con la miglioria degli impianti del fabbricato e l'aggiunta dei pannelli solari e fotovoltaici come si può notare dalla Fig. 39.



Figura 36 - Immagine satellite 06/2011

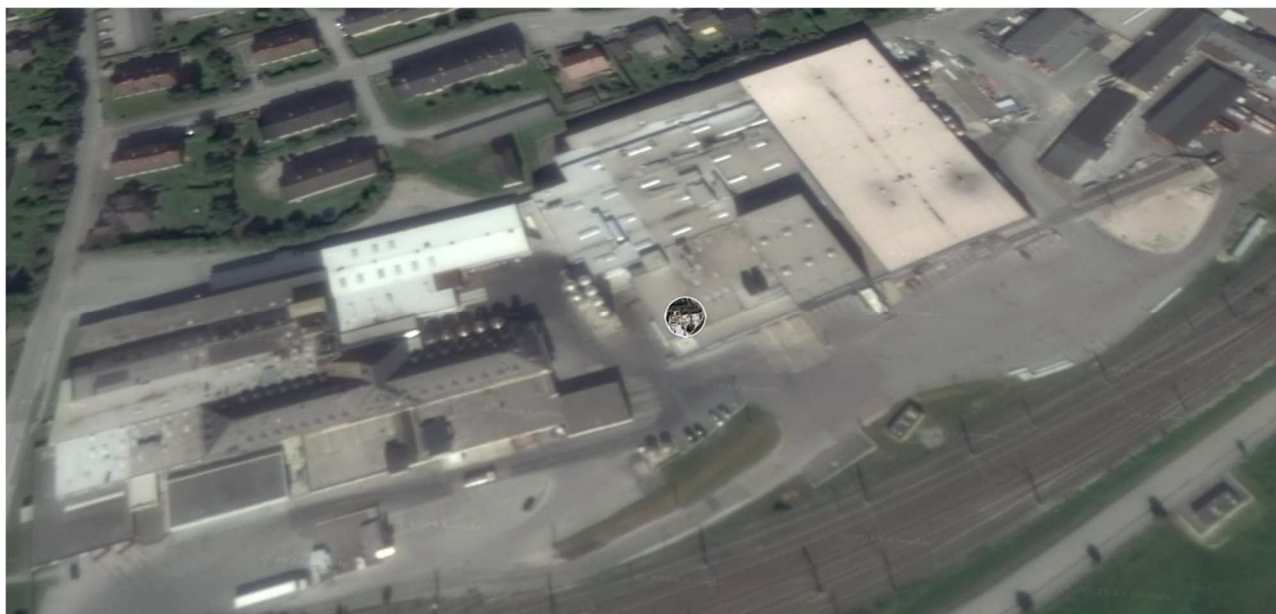


Figura 37 - Immagine satellite 09/2013

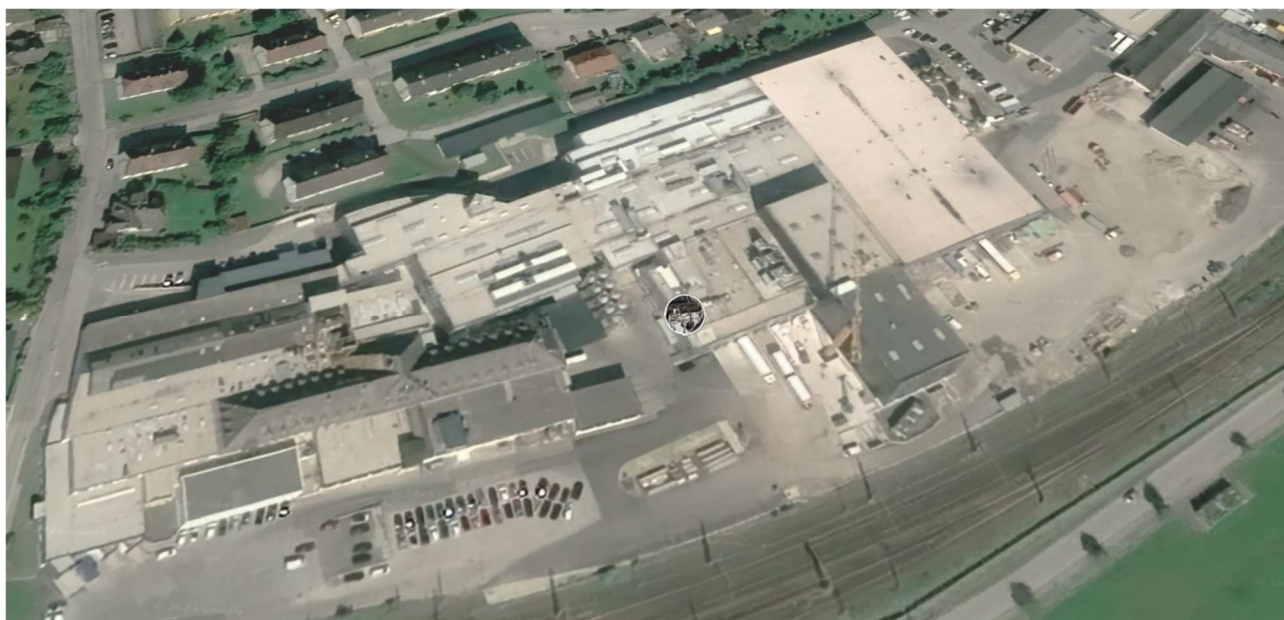


Figura 38 - Immagine satellite 09/2020



Figura 39 - Immagine satellite 08/2024

Una volta appreso queste informazioni, l'attenzione si è posta sulla parte centrale di tutta la fabbrica, anche quella che ha avuto più modifiche nel corso del tempo. Avendo reperito alcuni documenti come piante di progetto e immagini, ho potuto inizializzare il modello BIM grazie al software di modellazione digitale Revit fornito da Autodesk.

Per prima cosa ho inserito la pianta di piano che avevo come immagine di sfondo sul piano di lavoro di Revit. Così facendo ho facilitato e velocizzato la creazione del modello disegnando appunto sopra tale immagine. Ho iniziato disegnando le linee di griglia per l'edificio per poter avere dei punti di riferimento nel disegnare i pilastri e i muri perimetrali.

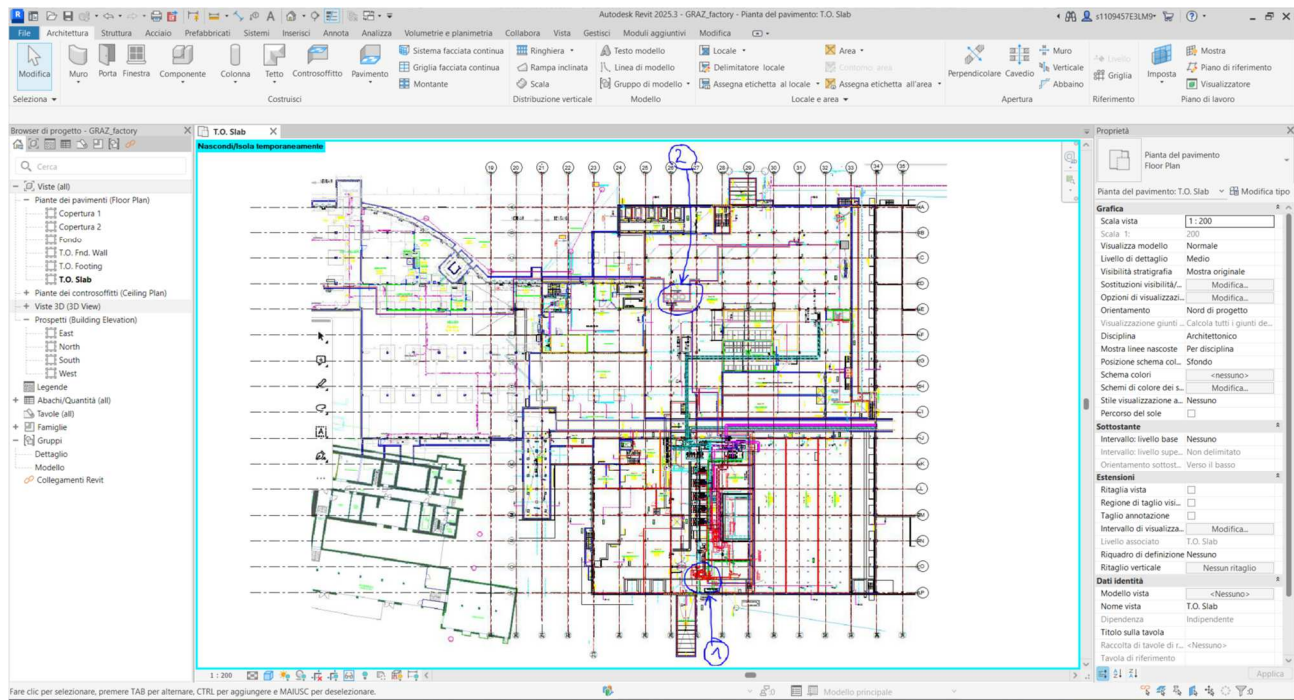


Figura 40 - Layout di Revit con pianta di piano dell'edificio e griglia di riferimento

Per quanto riguarda la costruzione dei livelli del modello, inizialmente ho messo dei valori veritieri non sapendo quali fossero realmente. Successivamente, non avendo informazioni a riguardo, sono andato ad indagare le varie altezze del fabbricato esaminando le immagini che ho trovato su Google Maps e proponendo delle ipotesi facendo dei raffronti con oggetti o veicoli di cui sapevo già le dimensioni.

Una volta impostati i riferimenti, ho iniziato a disegnare tutti i pilastri in cls armato di dimensione 50x50 cm con il comando “Colonna”. La Famiglia utilizzata per il pilastro in cls è “M_Concrete-Rectangular-Column” (Fig. 41) e il tipo appunto “500x500mm”; in questa famiglia è possibile cambiare le dimensioni, cambiare materiale, cambiare/togliere/aggiungere copriferro come vogliamo e di conseguenza qualsiasi cambiamento si ripercuote poi su tutti gli oggetti creati con quella famiglia specifica.

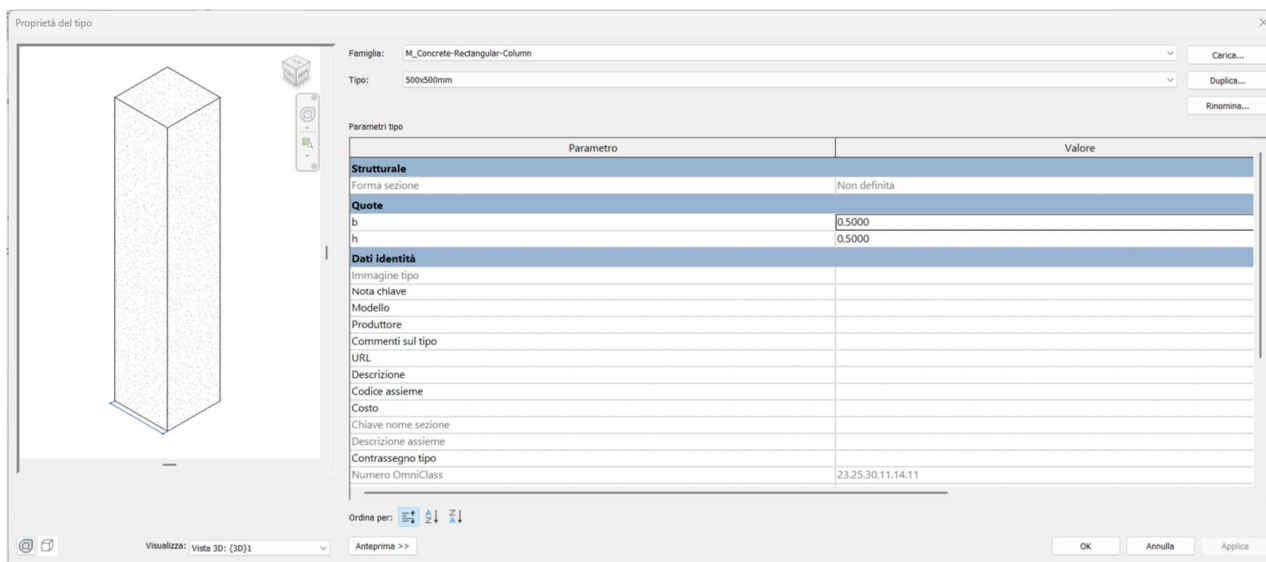


Figura 41 - Finestra delle proprietà del pilastro su Revit

Una volta inserito tutti i pilastri, sono stati inseriti tutti i muri perimetrali e muri interni di divisione in cls. In quanto elementi prefabbricati o gettati in opera, ho usato una famiglia generica di muri in cls dove, in base allo spessore che doveva essere utilizzato, sono andato a cambiare il tipo di famiglia su Revit per avere un riscontro della realtà il più preciso possibile. La famiglia utilizzata è “Famiglia di sistema: Muro di base” (Fig. 42) di tipo “Generic-xxx mm” con tutte le varie declinazioni dei tipi in base allo spessore.

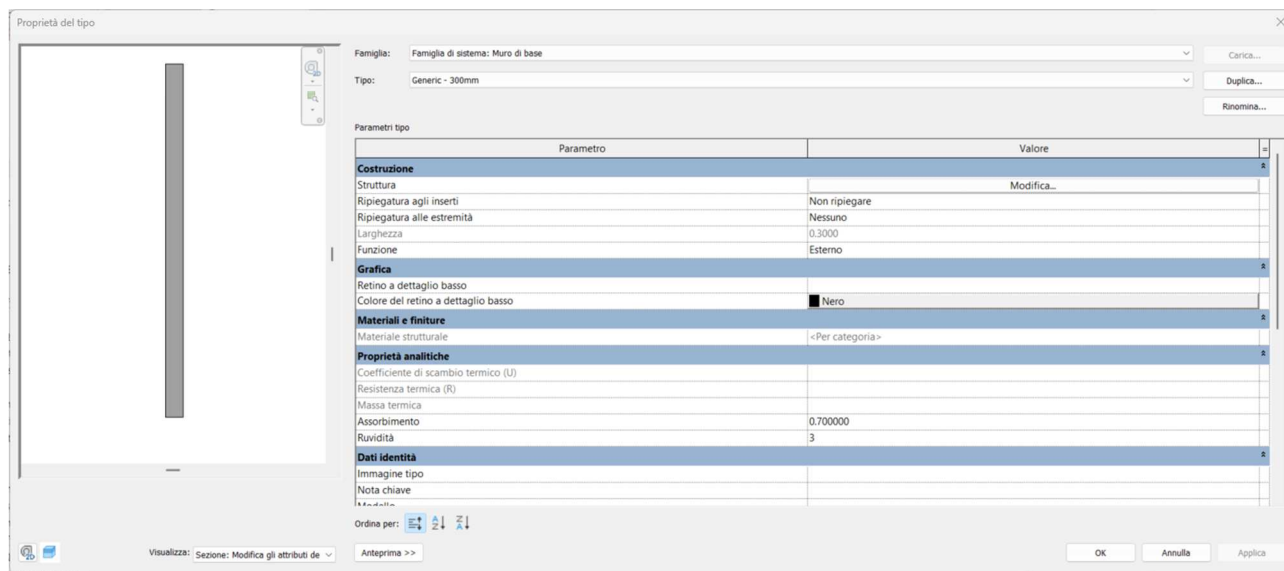


Figura 42 – Finestra delle proprietà del muro di base su Revit

In seguito, sono stati inseriti tutte le tramezzature da interno per la divisione degli ambienti e dei compartimenti. Per completare questo lavoro sono state utilizzate delle Famiglie di muri da interni come “Famiglia di sistema: Muro di base” di tipo: “Interior – Blockwork xxx” (Fig. 43).

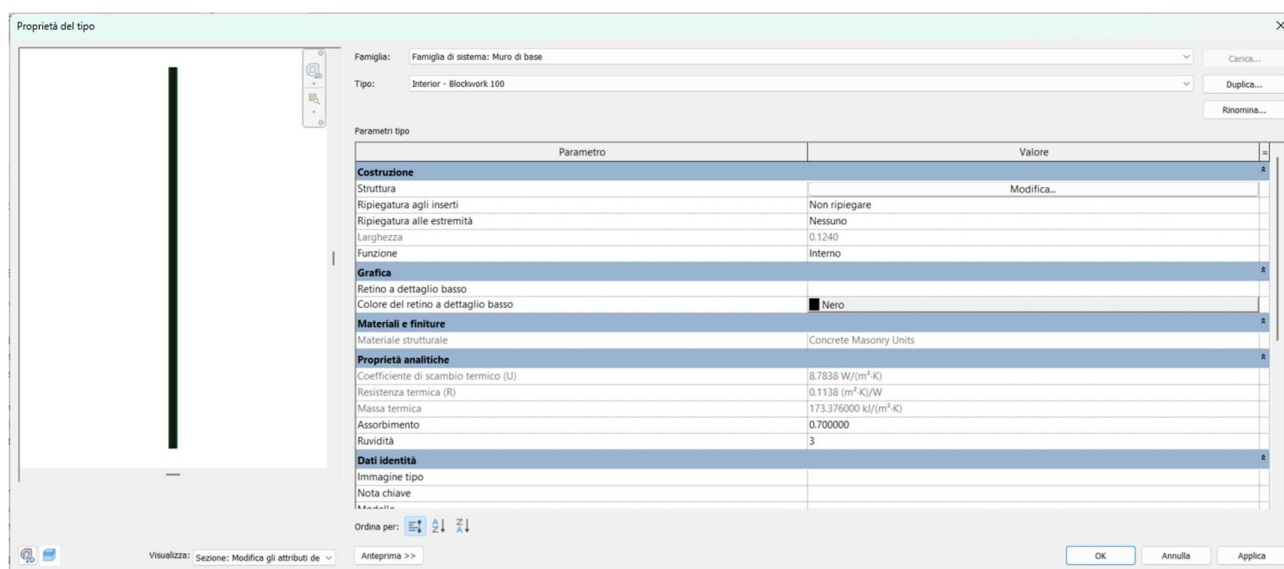


Figura 43 - Finestra delle proprietà dei tramezzi su Revit

Ultimata la geometria scatolare dell'edificio, ho introdotto la pavimentazione, che si può dividere principalmente in due: quella esterna, dove c'è il transito dei mezzi di trasporto come camion e autovetture e quella interna dell'edificio adibita al passaggio dei lavoratori, carrelli, e l'utilizzo dei materiali. Per l'esterno ho utilizzato la famiglia "Pavimento" di tipo "Insitu Concrete 225mm" (Fig. 44) che sarebbe una gettata di calcestruzzo con sopra una finitura di cemento interdetta da uno strato di membrana che controlla l'umidità. Per quanto riguarda la pavimentazione interna ho usato la famiglia "Pavimento" di tipo "Generic 150mm" (Fig. 45) che è strutturato come una soletta di CA che ricorda il pavimento industriale. Per pavimento industriale si intende generalmente una piastra di calcestruzzo armato, gettato direttamente in opera, di spessore pari o superiore a 15 centimetri (generalmente 15 – 25 cm), corazzato superficialmente con uno spolvero a base quarzo.

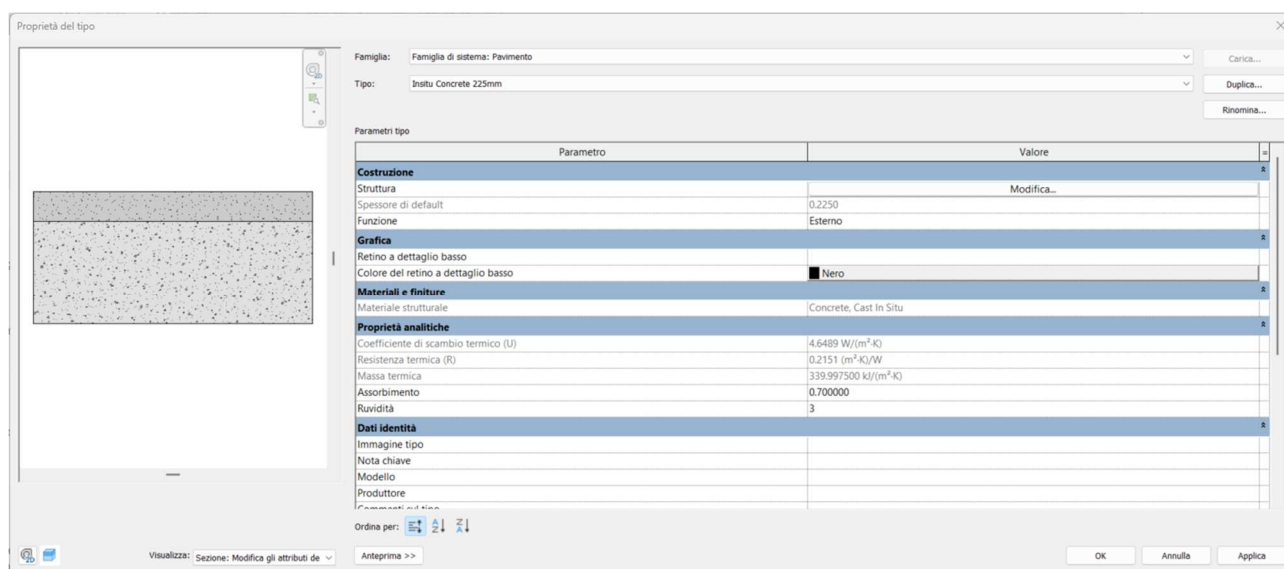


Figura 44 – Finestra delle proprietà della pavimentazione esterna su Revit

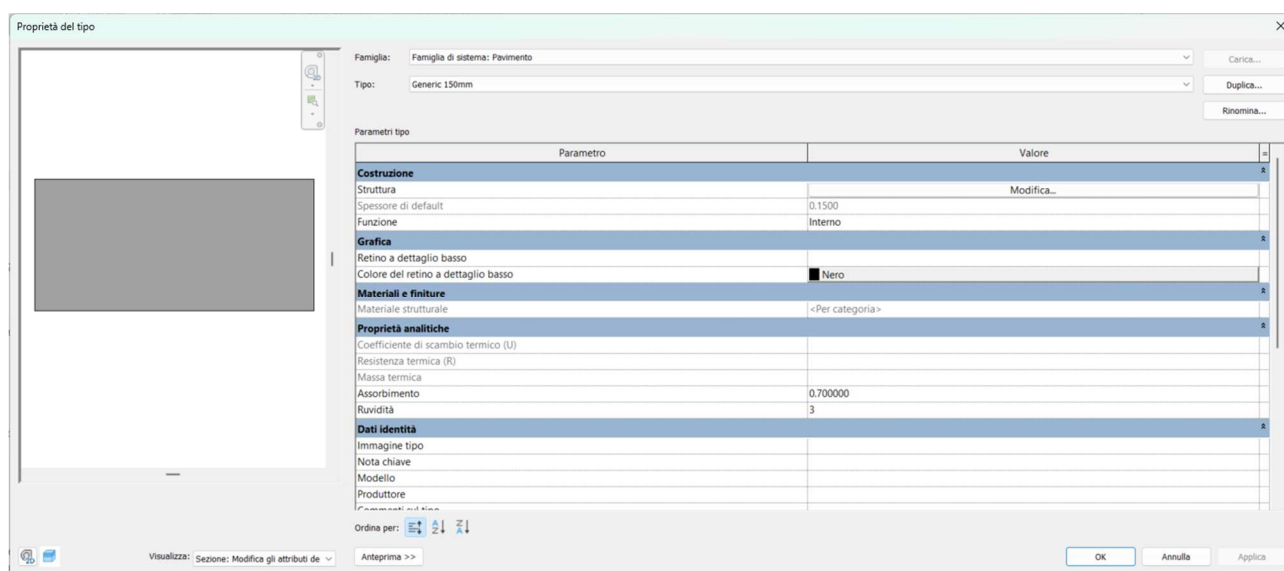


Figura 45 - Finestra delle proprietà della pavimentazione interna su Revit

Successivamente ho introdotto nel modello BIM le aperture, cioè porte e finestre. Relativamente alle porte, si hanno tre famiglie principali: la famiglia “M_Single-Flush” (Fig. 46) che sarebbe una porta con un singolo battente classica; la famiglia “STS_DL_T30_IT” (Fig. 47) di tipo “Servizio token di sicurezza30-xxx” che rappresenta una porta a doppio battente con il servizio di sicurezza e poi infine, c’è la famiglia “ASSA_ABLOY_HPD_HS9010PFR” (Fig. 48) che mostra la porta standard automatica, con eventuali segnali acustici e luminosi, che serve per il passaggio tra due ambienti con caratteristiche diverse come, ad esempio, l’ingresso in un’ambiente refrigerato.

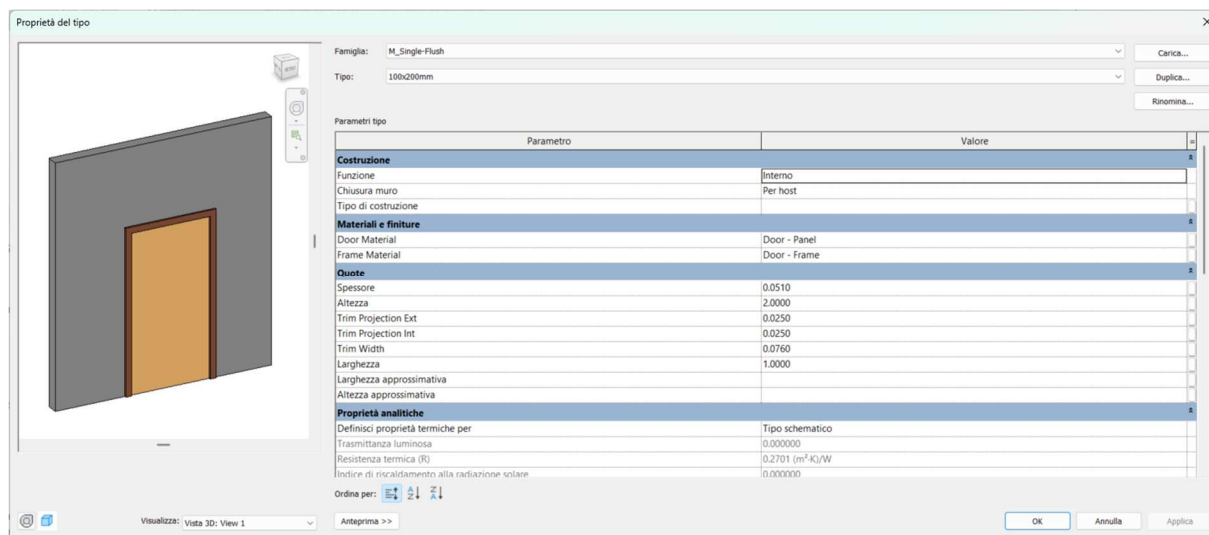


Figura 46 - Finestra delle proprietà della porta interna singola su Revit

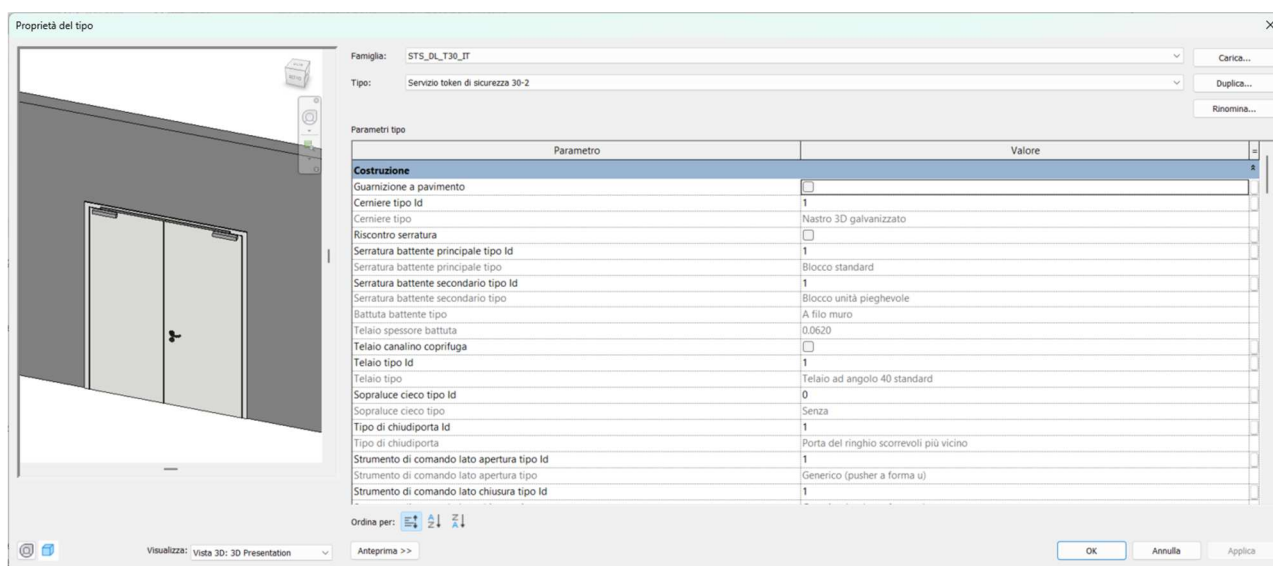


Figura 47 - Finestra delle proprietà della porta interna doppia su Revit

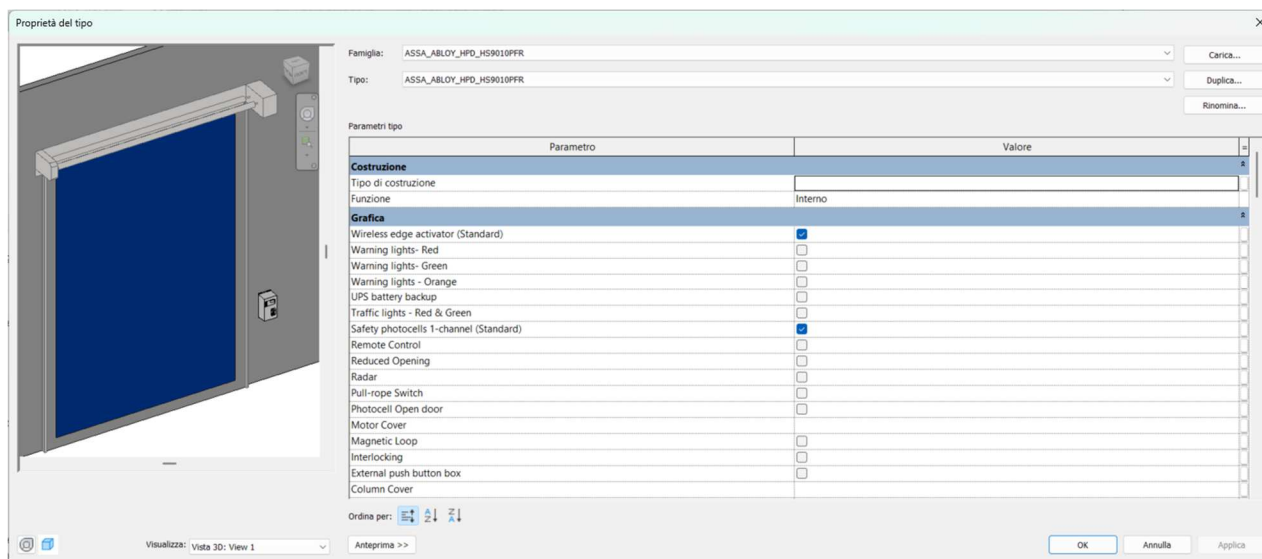


Figura 48 - Finestra delle proprietà della porta interna automatica su Revit

Per quanto riguarda le finestre ho inserito solo due tipologie di famiglie semplici distinguendo per lo più la finestra singola dalla finestra doppia. Le famiglie utilizzate nel modello di Revit sono state: “Finestra Filo Muro” (Fig. 49) per la finestra singola con vetro standard, posizionata a filo muro con sporgenza della soglia, e la famiglia “Finestra Doppia” (Fig. 50) per la finestra doppia con vetro standard e telaio in alluminio, anch’essa con l’eccedenza della soglia da entrambi i lati.

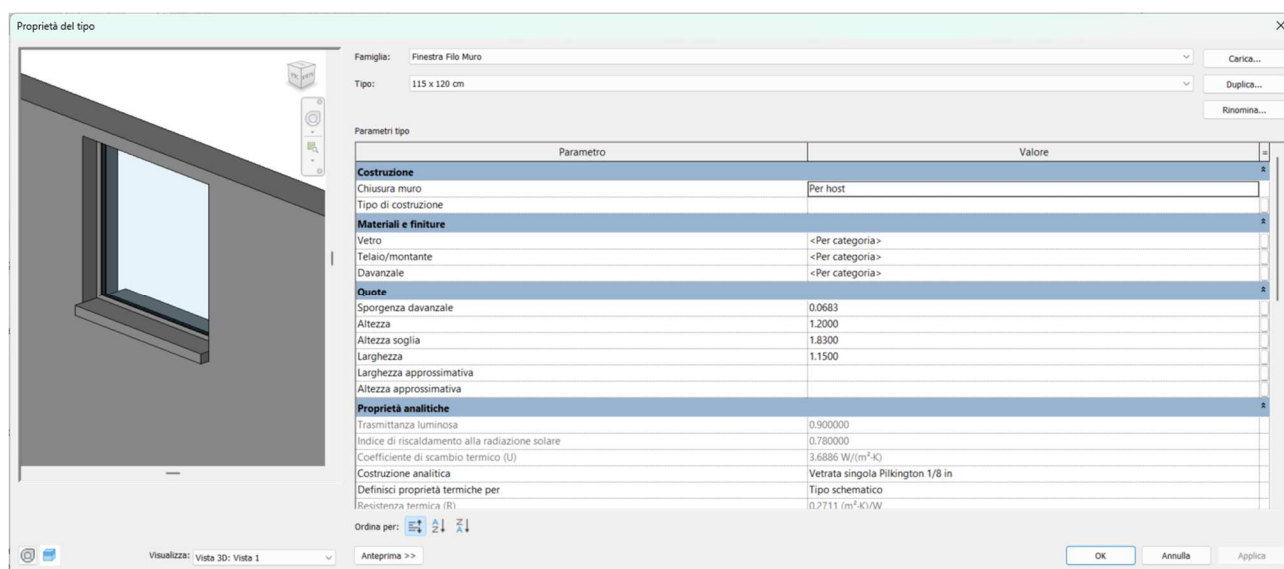


Figura 49 – Finestra delle proprietà della finestra singola su Revit

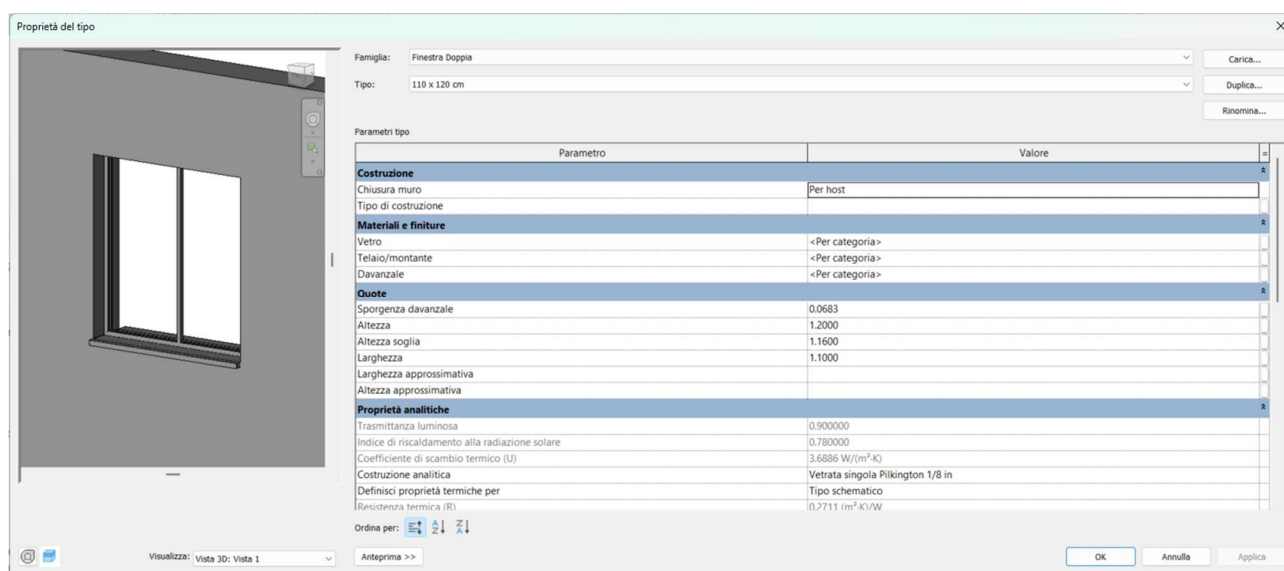


Figura 50 - Finestra delle proprietà della finestra doppia su Revit

In ultimo sono andato a realizzare le coperture dell'edificio in esame. Per le costruzioni industriali è possibile scegliere prefabbricati in cemento armato ed acciaio, più economici ed anche più facile da smaltire in caso di riorganizzazione della produzione, cambiamento di zona del fabbricato o della struttura stessa dell'edificio. La famiglia della copertura che ho usato è "Tetto di base" di tipo "Cold Roof – Concrete" (Fig. 51), che rappresenta il tetto per uso industriale che può assorbire molto calore e deve essere progettato con un coefficiente di dilatazione adeguato; deve essere anche resistente ai carichi statici e calpestabile in quanto deve sorreggere operai per eventuale riparazione o manutenzione delle apparecchiature impiantistiche poste in sommità.

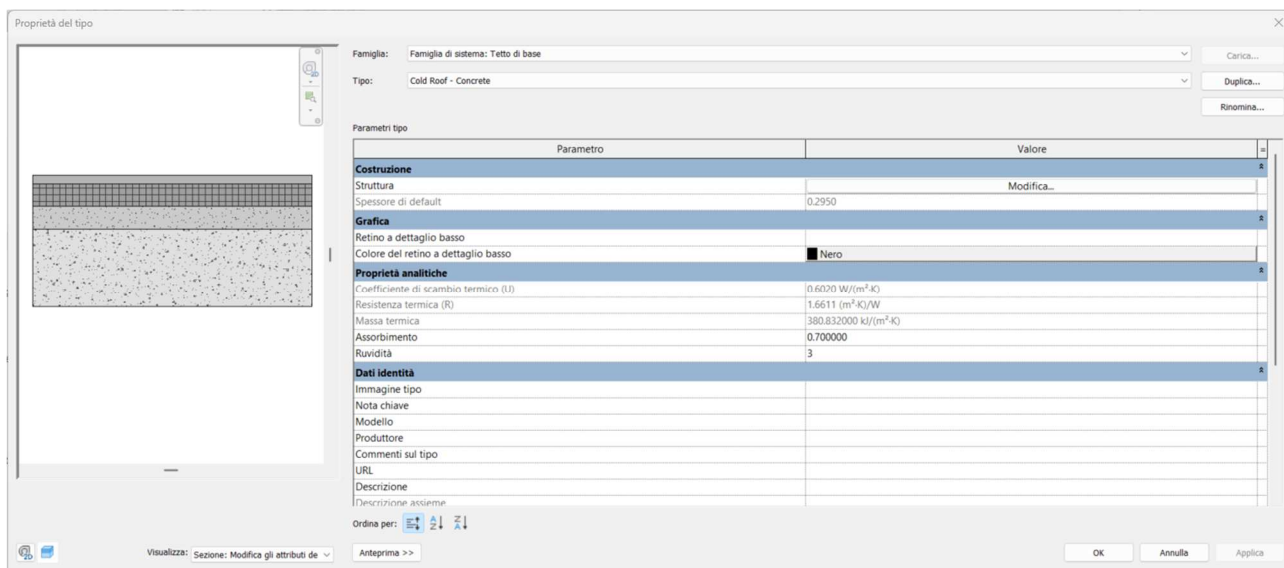


Figura 51 - Finestra delle proprietà della copertura su Revit

Con l'ultimazione della copertura ho concluso il modello BIM di Revit per quanto riguarda l'architettonico. Ora è necessario modellare una parte impiantistica che è in grado di esemplificare l'andamento dell'efficienza energetica e della produzione, inerente al mio caso di studio e per quelle che sono le finalità di tale modellazione. Nella pianta di piano dell'edificio, vi erano indicate anche le posizioni degli impianti d'areazione, della circolazione dell'acqua e di apparecchiature e attrezzature che venivano usate dagli impianti stessi. In particolare, ho preso in considerazione l'HTHP, il chiller, o refrigeratore, ed i serbatoi dove viene immagazzinata l'acqua, chiamati anche TES (Thermal Energy Storage). Per modellare a livello impiantistico bisogna addentrarci in Revit MEP (Mechanical-Electrical-Plumbing), e creare un nuovo progetto che abbia come base un modello di sistemi dove appunto compare un layout predefinito nel browser di progetto pronto per navigare alle diverse scale in base ai sistemi che si vanno a trattare. Per avere la base su cui creare il modello MEP, ho dovuto collegare il file architettonico precedentemente salvato con il nome di "GRAZ_factory.rvt" nella stessa directory del PC.

Successivamente ho iniziato una ricerca di oggetti BIM su alcuni siti online, tra cui: BIM Object, MEP Content, BIM & CO e tutti gli altri siti internet di compagnie che hanno all'interno delle librerie BIM da poter scaricare, come: Caleffi, Bosh, Daikin, Aermec ecc. Per scegliere bene quale fosse l'oggetto più adatto, ho dovuto confrontare parametri tecnici come capacità, potenza, provenienti dal materiale che mi era stato fornito in precedenza.

In relazione all'HTHP, che ho scaricato tramite MEP Content, ho dovuto seguire dei requisiti come la capacità massima di riscaldamento di 550 KW; e ho trovato un componente prodotto da Climaveneta che rispettava tali requisiti ed era quella che si

avvicinava maggiormente alla realtà. La famiglia dell'attrezzatura meccanica che ho usato è “HC_Heat Pump_MEPcontent_Climaveneta_NX-W-H-0604-1204_Pumps_INT-EN” (Fig. 52).

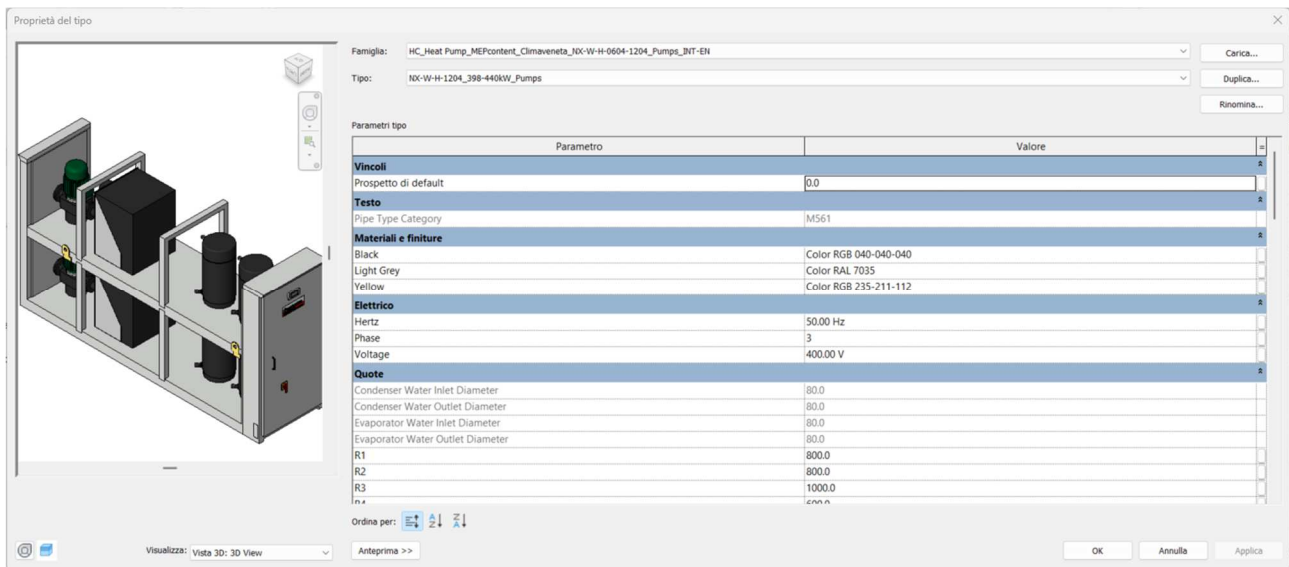


Figura 52 – Attrezzatura meccanica Pompa di calore Climaveneta

In seguito, ho spostato l'attenzione sul refrigeratore, o chiller, dove anche qui avevo due requisiti da rispettare cioè la capacità massima di raffreddamento di 900 KW e il liquido refrigerante che doveva essere l'ammoniaca. Cercando in rete ho trovato un chiller nella libreria del sito MEP Content che viene prodotto sempre da Climaveneta. La famiglia dell'apparecchiatura meccanica che ho usato è “M_Chiller_Liquid_MEPcontent_Climaveneta_TX-W-G05-Y_1D1C_INT-EN” (Fig. 53).

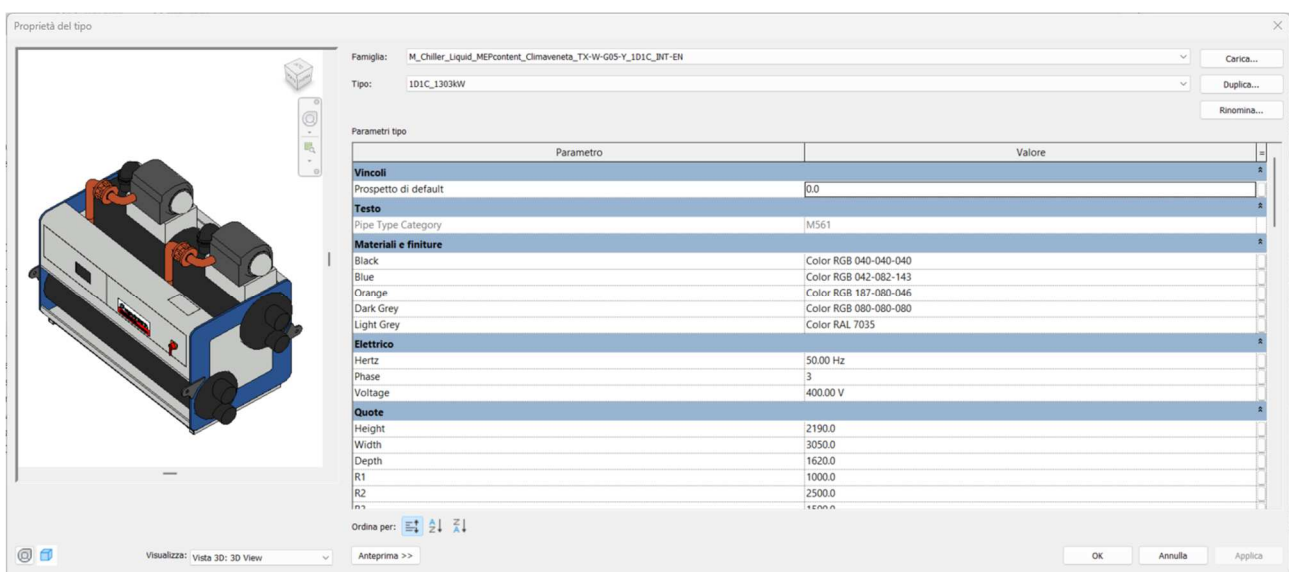


Figura 53 - Attrezzatura meccanica Chiller Climaveneta

Altri elementi importanti sono i serbatoi di accumulo TES, che ne devono essere di numero pari a tre e con un volume totale di 12 m³, quindi 4 m³ ognuno. La famiglia che ho scelto per questi serbatoi è presa sempre da MEP Content ma viene prodotta da CHAROT. Naturalmente, se non viene creata una famiglia apposta per quel determinato componente, non vi è un oggetto BIM nelle librerie online che si presuppone essere identico; però la famiglia “HC_Storage Tank_MEPcontent_CHAROT_Tamfroid 4 Bar_INT-EN” (Fig. 54) che ho scaricato, mi permetteva di cambiare i parametri tipo e quindi di far risultare che ogni serbatoio avesse il volume stabilito.

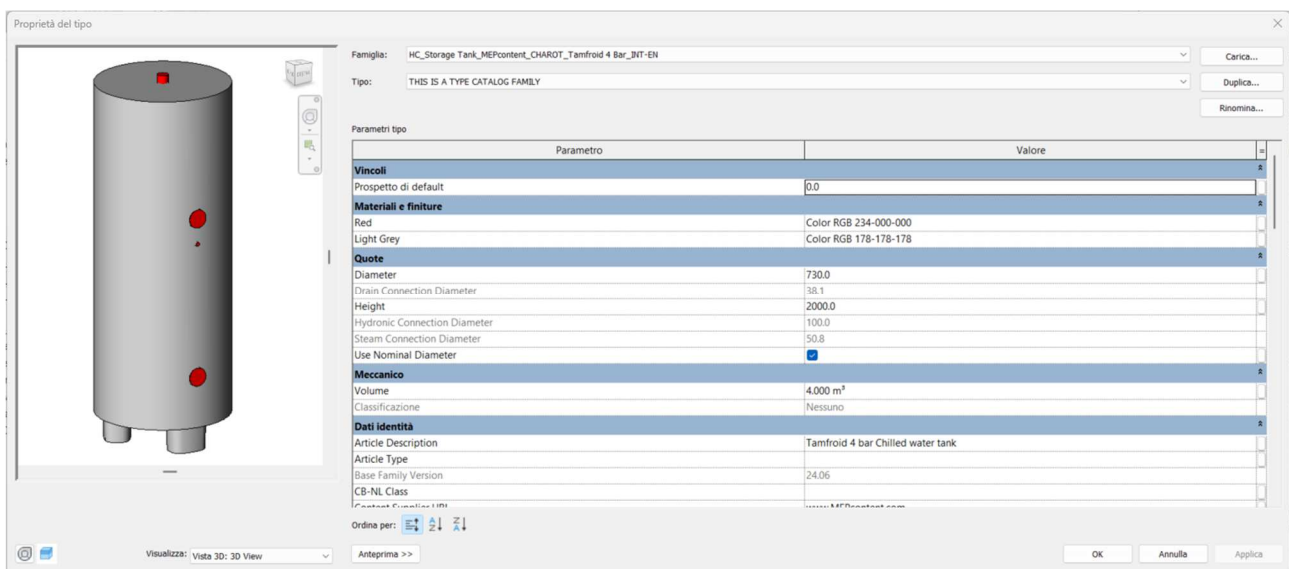
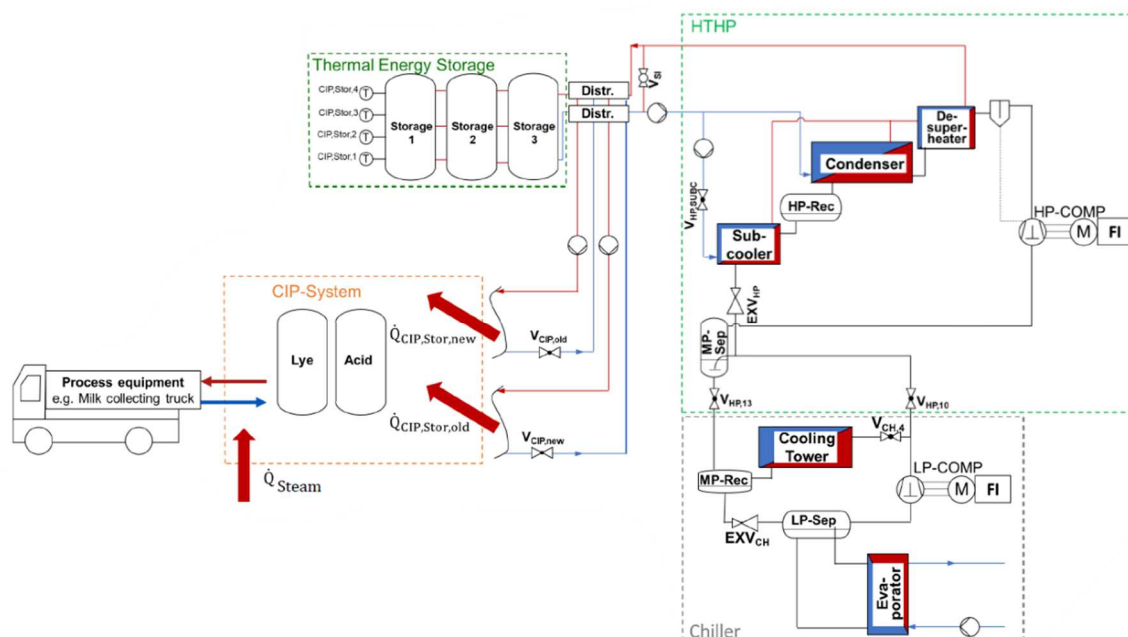


Figura 54 - Attrezzatura meccanica Storage Tank CHAROT

Una volta scaricati e posizionati i vari componenti appena citati, li ho dovuti collegare tra di loro per capire quale fosse il funzionamento generale dell'impianto. Una linea guida sulla funzionalità di questo impianto l'ho trovata nel materiale che mi è stato assegnato, precisamente in uno schema esemplificativo che riporto di seguito:



Schema fornito dal Dott. Manuel Verdnik (TU Graz)

Si parte dal chiller, una macchina operatrice che sfruttando la compressione e l'espansione del fluido refrigerante (per noi l'ammoniaca), consente di sottrarre calore ad un fluido termovettore come l'acqua o l'aria. Una parte del fluido refrigerato va verso la produzione della fabbrica, l'altra andrà verso la pompa di calore per essere trattata e ridistribuita. L'HTHP ha più o meno gli stessi componenti del gruppo frigorifero; la differenza principale tra un chiller e HTHP è la presenza di una valvola di inversione di flusso nella pompa di calore per fare in modo che possa venire usata sia per riscaldamento che per raffreddamento. A valle della pompa di calore, per fare in modo che il fluido (acqua) venga distribuito ottimamente, ho inserito un collettore a 5 vie che sono andato a scaricare dalla libreria BIM del sito Caleffi. La famiglia di Revit che ho usato è "Manifold_for_central_heating_system_3+1-Caleffi-550_DN40" (Fig. 55). Al collettore è stata collegata in ingresso la pompa di calore che restituisce acqua calda, e anche un altro ingresso di sicurezza che viene rappresentato da una scorta di fluido nei casi in cui la pompa di calore non dovesse bastare. Le tubazioni in uscita sono collegate invece, al sistema di Cleaning In Place (CIP). Il sistema (CIP) è un metodo di pulizia delle attrezzature di processo che consente di pulire internamente senza dover rimuovere o smontare i componenti. Questa procedura è utilizzata per garantire la sanificazione delle parti importanti in modo efficiente e automatizzato, riducendo così il rischio di contaminazione e aumentando la produttività. Un altro sistema collegato al collettore è il TESS (Thermal Energy Storage System). Il TESS è un sistema che consente di immagazzinare energia termica per un utilizzo successivo. Questo tipo di accumulo è in grado di gestire e sfruttare il calore, consentendo un'efficiente distribuzione dell'energia termica nelle applicazioni industriali. Per quello

che concerne il nostro studio questo sistema viene mostrato attraverso i 3 serbatoi da 4 m³ ognuno.

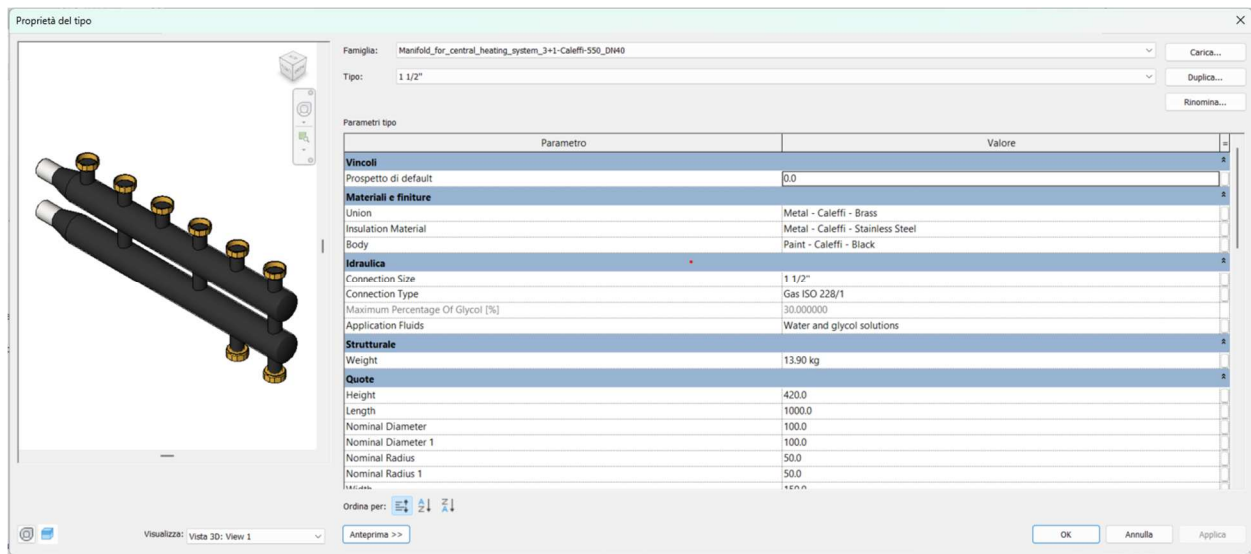


Figura 55 – Accessori per tubazioni Caleffi: Collettore

Una volta finiti tutti i collegamenti e instradato le tubazioni, ho associato il collegamento architettonico del modello BIM architettonico per fare in modo di avere un unico file di riferimento comprendente sia il MEP che l'architettura. Successivamente, ho proceduto con l'esportazione del file unificato in un formato Open cioè IFC (Industry Foundation Classes), in modo tale da poter essere visibile a chiunque con un programma di BIM Viewer. Alla fine, il risultato finale della modellazione appena conclusa, la si può osservare nello stralcio di immagine (Fig. 56) restituita grazie al software "BIM Vision 3".

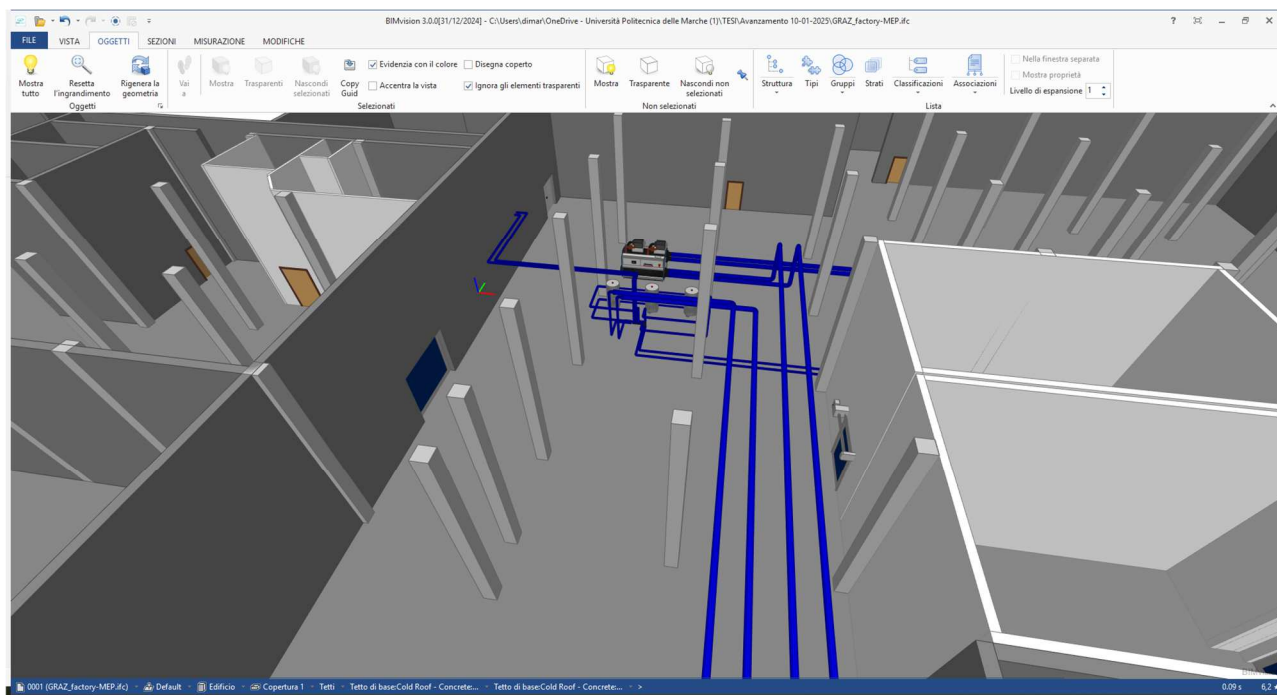
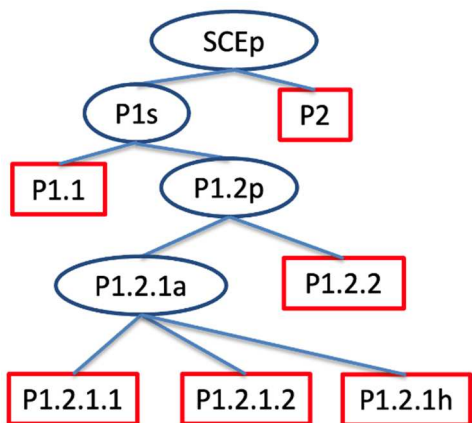


Figura 56 - Stralcio di vista modello BIM su BIM Vision 3

5.2 Logica dell'albero nel caso di studio

La sperimentazione rientra all'interno di un progetto europeo che si chiama ENOUGH, accordata con altri partner. Questo progetto riprende i risultati del precedente progetto ENCORE e li implementa accoppiando la metodologia dell'HMT con la Realtà Mista (MR) grazie alla tecnologia olografica di Microsoft HoloLens 2. Tale progetto ha come obiettivo principale quello della riduzione delle emissioni di GHG (Green House Gas emission). Al centro di tale sperimentazione c'è lo stabilimento lattiero-caseario della Ennstal Milch KG in Austria. Il responsabile dello stabilimento di produzione di latticini deve ora affrontare un miglioramento del suo processo. Con l'uso dell'HMT+MR gli operatori saranno in grado di controllare l'ambiente fisico, di testare le prestazioni attuali dei sistemi di produzione alimentare e di simulare gli impatti previsti di eventuali modifiche e possibili miglioramenti che possono essere apportati al processo di trasformazione alimentare. Il mio lavoro si inserisce all'interno di un progetto più grande, che mira alla gestione di un'intera Supply Chain Entity (SCE) la quale comprende più luoghi e più fasi di produzione. Gli esperti nel settore in questo progetto hanno già fatto la modellazione della parte alta della SCE e hanno individuato questi livelli gerarchici fino ad arrivare agli ultimi nodi. Uno di questi nodi riguarda il "Dairy Plant" (stabilimento caseario) nella sua parte di gestione edile, sezione in cui si concentra il mio studio. Per visualizzare tale complessità si riporta l'albero costruito fino all'introduzione della gestione dello stabilimento latticino-caseario.



In questa rappresentazione ad albero possiamo vedere che il Dairy Plant (lo stabilimento) si innesta al livello del rettangolo rosso denominato "P1.2.1h", cioè la testa (head) della struttura assembly.

Gestire l'edificio e l'impianto visto nel capitolo precedente, è altrettanto complesso e, nello specifico, lo scopo è quello di usare l'HTHP per ottenere risparmi di GHG prelevando il calore in eccesso dall'impianto di refrigerazione nella fase di produzione e utilizzarlo per accumulare acqua calda in serbatoi (tank) che verranno poi utilizzati per la pulizia in loco (CIP) di alcuni veicoli. Il CIP, necessitando di acqua calda, consuma gas naturale. In questo caso, l'uso di gas naturale viene evitato, parzialmente o completamente, a causa dell'acqua calda disponibile nell'accumulo (TES).

In questo scenario, il gestore dello stabilimento sa che:

- Non può controllare la periodicità del processo produttivo né la quantità di rifiuti che si producono;
- L'HTHP è un sistema già ottimizzato e con poche possibilità di miglioramento se non in campo di manutenzione e calibrazione;
- I serbatoi di accumulo di acqua calda (TES) hanno una capacità fissa;
- Il CIP (Cleaning In Place) ha un comportamento variabile in funzione degli arrivi irregolari dei veicoli.

Il primo passo è stato la creazione di un albero per la gestione dell'asset dello stabilimento, che essendo un'organizzazione complessa, si può definire come una gestione di livello più basso rispetto all'intera SC definita dal progetto di ricerca.

In funzione dell'albero richiamiamo le quattro strutture di base della metodologia HMT con le rispettive formule per l'identificazione dell'OTE.

Tipo di Struttura: **SERIES**

$$OTE = \min\{O_1 Q_2, O_2\}$$

Tipo di Struttura: **PARALLEL**

$$OTE = \frac{O_1 + O_2}{2}$$

Tipo di Struttura: **ASSEMBLY**

$$OTE = \Delta k_2 = k_1 - \frac{O_1}{O_e Q_1}$$

Tipo di Struttura: **EXPANSION**

$$OTE = k_1 Q_1 \min\left\{\frac{O_1}{k_1 Q_1}, O_e\right\} + k_2 Q_2 \min\left\{\frac{O_2}{k_2 Q_2}, O_e\right\}$$

Da queste formule scaturisce una differenza sostanziale tra serie e parallelo. Nella serie l'operatore *min* indica quale sia il valore minore tra l'OTE del nodo 1 moltiplicato per il fattore di qualità del nodo 2 e l'OTE del nodo 2; questo fa sì che la performance complessiva venga limitata dal componente con valore minore, introducendo un collo di bottiglia. Nel parallelo, invece, l'operatore *min* scompare e la performance viene calcolata come una media tra il nodo 1 e il nodo 2; questo non introduce strozzature e aumenta il valore del KPI avendo sempre un miglioramento. Per quanto concerne i

fattori di qualità presenti all'interno delle formule, si impongono, nelle maggior parti di casi, uguale all'unità e questo è un punto su cui ancora si sta indagando.

La cosa più importante che è venuta fuori è che la soluzione migliore per il raffinamento dell'albero e quindi del sistema, è la divisione binaria che via via, con semplicità, riesci ad indagare tutti i fattori che possono portare a colli di bottiglia.

In primo luogo, grazie agli esperti del settore del progetto ENOUGH, la filiera è stata divisa in due (Fig. 57): da una parte abbiamo la fornitura e dall'altra la produzione, con una struttura in parallelo in quanto il miglioramento di ogni nodo produce un effetto complessivo sempre positivo, ovvero non sono presenti colli di bottiglia. La creazione dell'albero va di pari passo con il diagramma di flusso della metodologia HMT. Nel momento in cui si fa un REFINE si dettaglia l'albero con la creazione di una nuova istanza migliorativa (SPAWN).



Figura 57 - Primo step della costruzione dell'albero

Il secondo passaggio è stata la divisione della produzione in due settori di gestione: uno che comprende l'effettiva elaborazione e processamento dei cibi e l'altro la gestione dell'edificio, in cui rientrano tutti gli impianti, le scorte, gli operatori responsabili dei processi e il loro confort termoigrometrico e ogni tipo di alimento sottoposto a trasformazione.



Figura 58 - Secondo step della costruzione dell'albero

Questa fase di raffinamento dell'albero è importante per la scomposizione della complessità e, riferendoci alla metodologia del flusso di lavoro dell'HMT, possiamo collocarci all'interno della fase di REFINE. Ogni qualvolta che si entra nella fase di REFINE vengono richiamate le quattro strutture di base dell'albero che sono a disposizione del manager per modellare il sistema e, in base all'esperienza e alla conoscenza dell'edificio, le usa adeguatamente per raggiungere lo scopo. Per adesso ci sono state due fasi di REFINE che hanno portato gli esperti a gerarchizzare l'albero in questo modo. La stessa cosa viene applicata anche alla parte di GESTIONE DELL'EDIFICIO su cui si incentra la nostra sperimentazione.

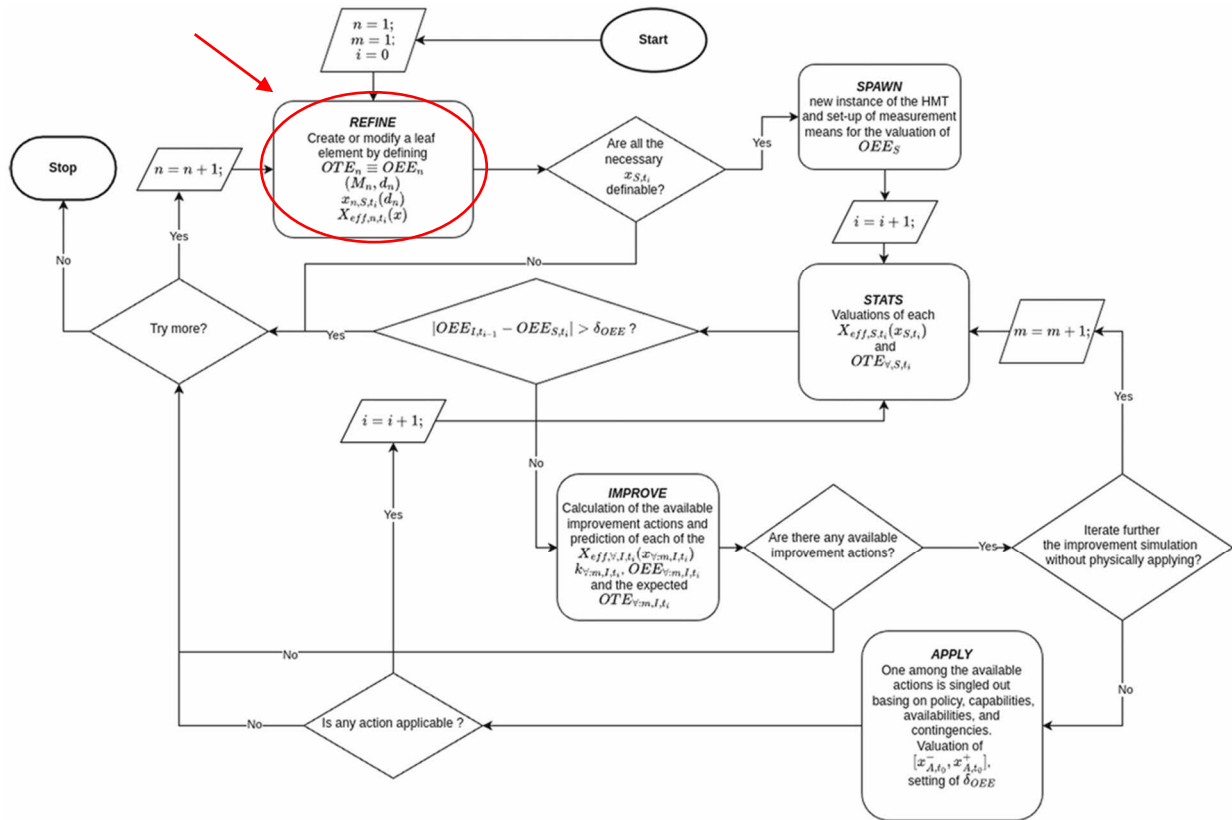
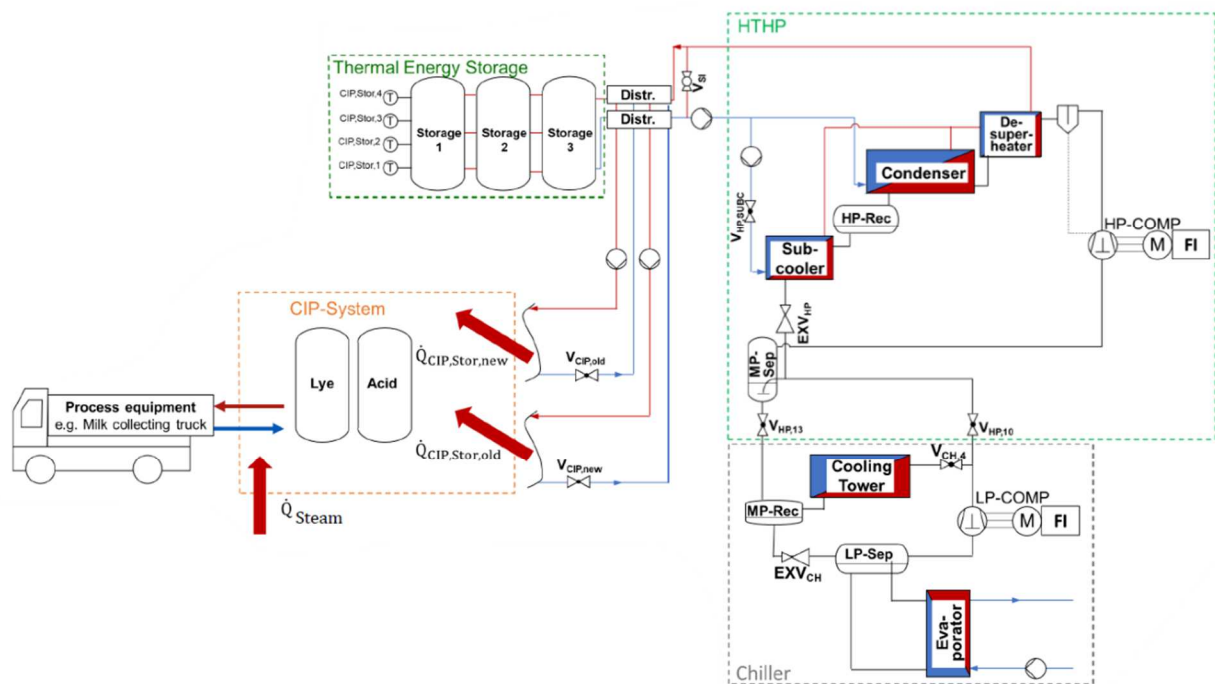


Figura 59 - Punto in cui ci troviamo all'interno del flusso di lavoro HMT

Per andare avanti con la logica di costruzione dell'albero è necessario fare una fase di STATS, dove vengono appresi risultati, valori e simulazioni. In questo caso l'informazione necessaria è la costituzione dell'impianto dell'edificio; questo è stato possibile grazie ai colleghi della Graz University of Technology (TU Graz), siamo riusciti ad avere uno schema semplificato dell'impianto dello stabilimento lattiero-caseario. Qualitativamente, si prevede che quando l'albero funziona, lo STATS acquisirà i valori dai modelli di quelle specifiche sezioni dell'impianto; così facendo si riesce a prevedere come funzionerà quando sarà in esecuzione.



Schema fornito dal Dott. Manuel Verdnik (TU Graz)

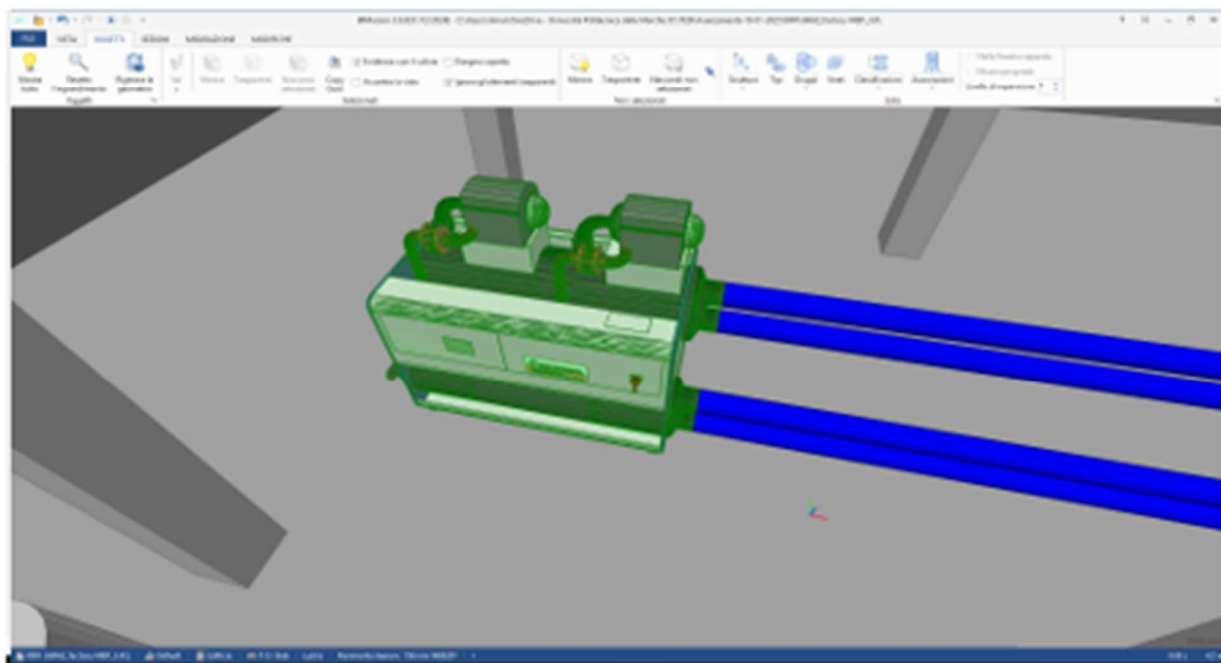
La fase di REFINE successiva è avvenuta all'interno di tale sezione, dove il manager ha stabilito una relazione parallela tra l'impianto di refrigerazione (adibito alla produzione del formaggio) e l'HTHP da una parte, e l'accumulo di energia attraverso i serbatoi (TES) e l'attività di Cleaning In Place (CIP) dall'altra. Questa relazione è giustificata dal fatto che non c'è un chiaro legame tra l'HTHP e l'accumulo, in relazione all'obiettivo del progetto di ridurre le emissioni di GHG.



Figura 60 – Terzo step dell'albero

I riferimenti dei componenti BIM associati ai nodi dell'albero sono mostrati nelle immagini seguenti.

1.2.2_P.1 PRODUZIONE CON IMPIANTO DI REFRIGERAZIONE E HTHP



CHILLER

&

HTHP

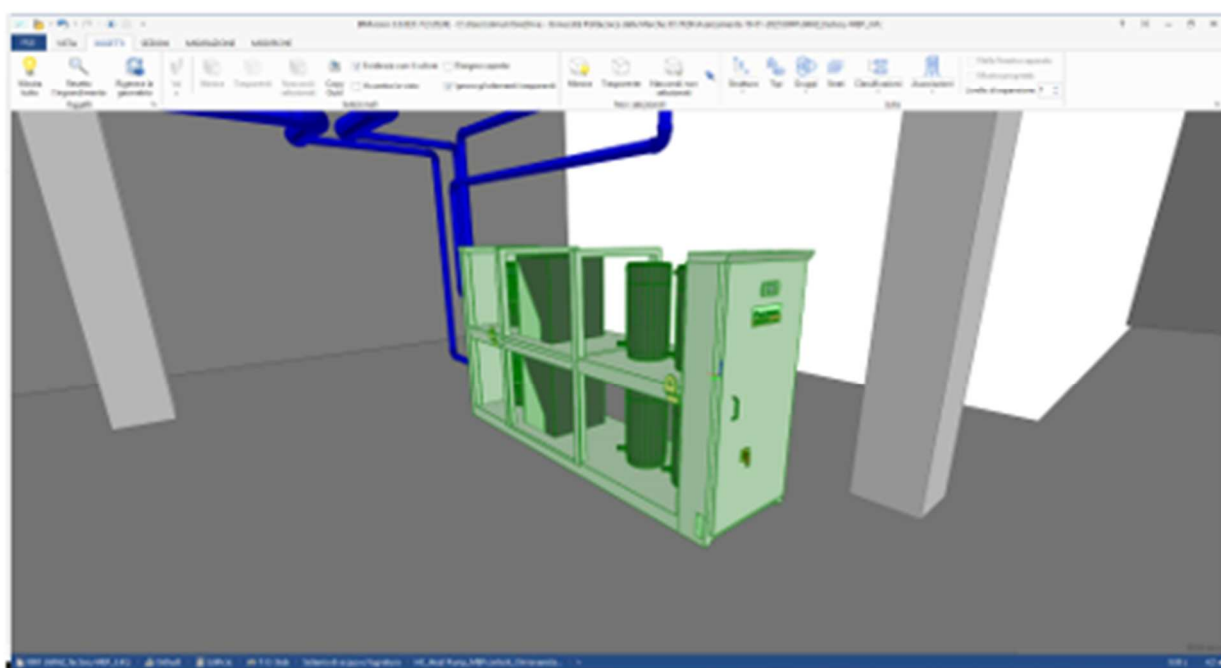
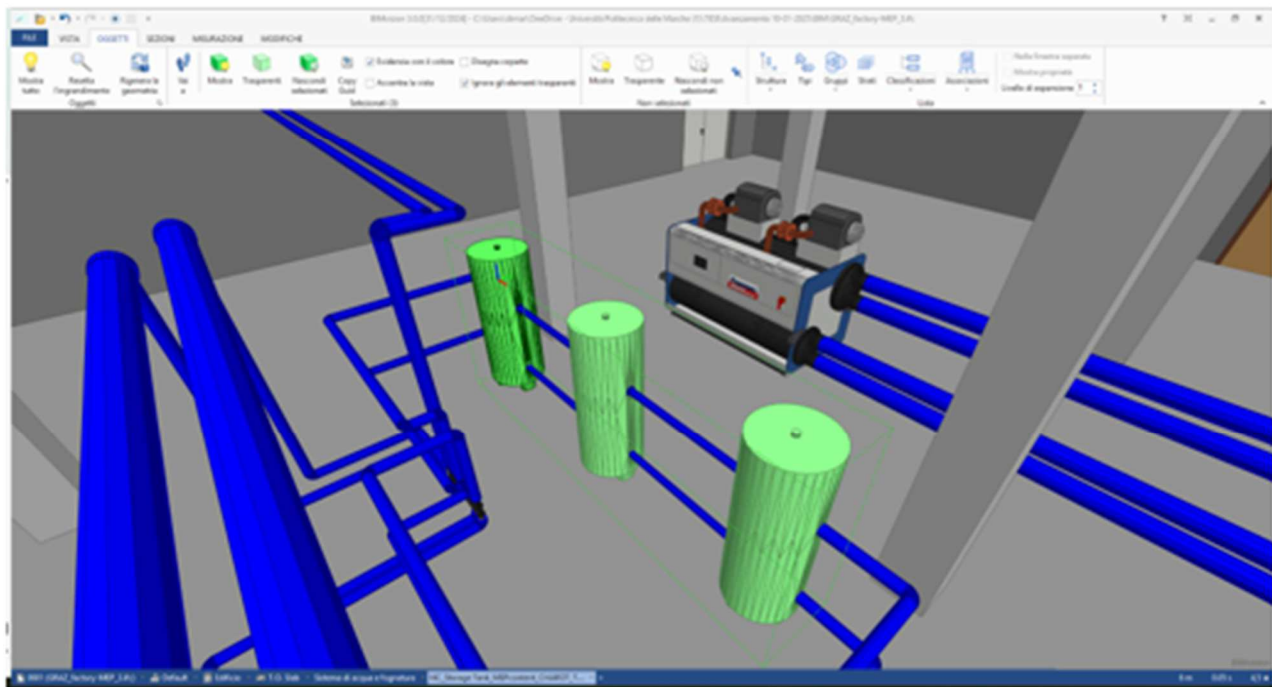


Figura 61 – Dettaglio dei componenti associati al nodo 1.2.2_P.1

1.2.2_P.2 ACCUMULO ENERGIA E CIP



ACCUMULO DI ENERGIA (TES)

&

CLEANING IN PLACE (CIP)

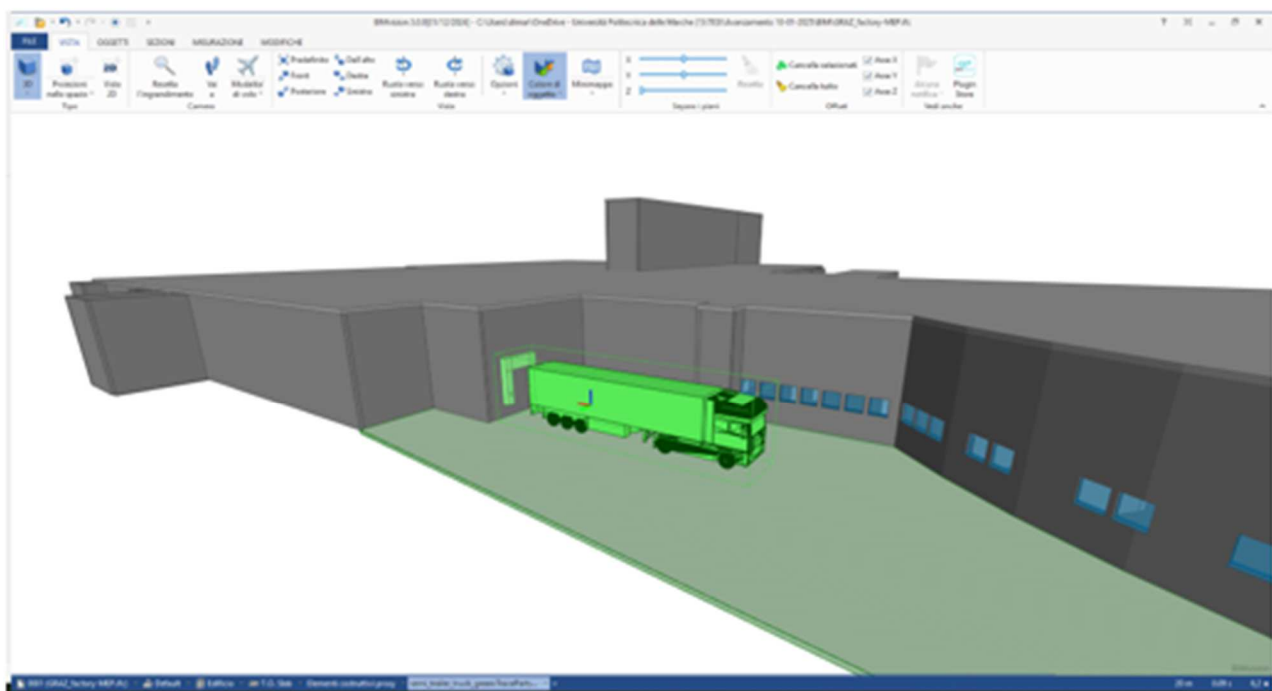


Figura 62 - Dettaglio dei componenti associati al nodo 1.2.2_P.2

Nel nostro caso la scelta da fare tra le quattro strutture di base dell'albero deriva anche da come i componenti dell'impianto dell'edificio sono collegati fra loro. Infatti, il quarto passo per la costruzione dell'albero è stato individuare nelle sezioni "1.2.2_P.1" e "1.2.2_P.2" quali relazioni avessero i componenti dell'impianto e come fossero collegati in modo da poter inserire vincoli strutturali adeguati non solo in base all'obiettivo finale del progetto. L'ultima fase di REFINE, quindi, corrisponde al quarto ordine gerarchico di scomposizione dell'albero dove sono state create altre due istanze di miglioramento, una per ogni parte dei rami dell'albero.

Nel caso del nodo padre del ramo di sinistra "1.2.2_P.1 PRODUZIONE CON IMPIANTO DI REFRIGERAZIONE E HTHP", il gestore ha pensato di suddividere il chiller e l'HTHP con una struttura in serie, giustificata dal fatto che, se l'impianto di refrigerazione non funziona correttamente (O_1), il sistema HTHP (O_2) non riesce a prelevare il calore in eccesso dal chiller durante la produzione e non può alimentare il meccanismo di accumulo.

Relativamente al ramo di destra "1.2.2_P.2 ACCUMULO ENERGIA E CIP", l'affinamento è caratterizzato dalla distinzione tra l'accumulo di energia nei serbatoi (TES) (O_1) e la pulizia in loco dei veicoli (CIP) (O_2) con una struttura in parallelo. Questa decisione è maturata in seguito al ragionamento per cui un miglioramento nell'accumulo di acqua calda nei serbatoi (per esempio, un'espansione della capacità dei serbatoi) o una regolarità negli arrivi dei veicoli per la CIP, o un miglioramento della tecnologia stessa per la pulizia, fa sì che non si vada incontro a dei colli di bottiglia bensì ad un incremento di prestazioni dell'insieme.

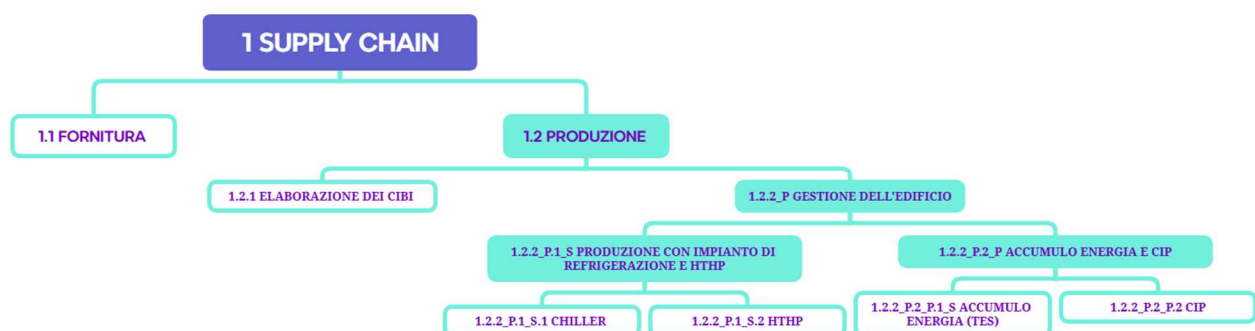


Figura 63 - Quarto step dell'albero

Questa costruzione dell'albero è stata fatta seguendo le conoscenze dell'edificio, ipotizzando di essere il manager competenze. L'HMT che esce fuori da questa logica è abilitante alla gestione del diagramma di flusso di questa metodologia.

5.3 Dimostrazione della tecnologia e App per il suo controllo

Grazie alla tecnologia olografica di Microsoft HoloLens 2, il processo di associazione dei nodi ai riferimenti del modello tridimensionale è possibile farlo in sito. Tutto parte dalla modellazione in BIM (vedi cap. 5.1.1), che rappresenta l'edificio con tutti i suoi attributi, partendo dalla geometria fino alle finiture, i materiali e i componenti dell'impianto. Il formato del file che esce dalla modellazione BIM dell'edificio è un file proprietario in quanto Revit, come software di authoring, restituisce il formato “.rvt”. Per essere in grado di visualizzarlo bisogna esportare il file di Revit in un formato open chiamato IFC 2x3 (Industry Foundation Classes – formato open). Per usare il file nell'applicazione tecnologica della nostra ricerca è necessario convertire il file IFC in un altro formato. Esistono due tipi di convertitori, uno meno recente, che converte i file IFC in due file: .GLTF (formato leggibile umano) e .JSON; e un altro più nuovo che genera sempre due file: un .GLB (dove B sta per Bytes) e un .JSON. Nel GLB sono presenti le coordinate, le strutture semplici dell'oggetto e la collocazione nello spazio; mentre nel file JSON sono presenti tutti gli ID, la GUI (interfaccia grafica) e le caratteristiche degli elementi. Nel nostro caso è stato usato il convertitore in GLB. I file GLTF e GLB sono utili per rendere i modelli architettonici e le informazioni di costruzione più adatti per l'uso su piattaforme web e applicazioni grafiche, come videogiochi e visualizzazioni interattive. Mentre gli IFC sono progettati per lo scambio di dati nei progetti di costruzione, i GLTF/GLB sono ottimizzati per la grafica a bassa latenza, facilitando la visualizzazione e l'interazione online. Il manager competente, grazie a questo ambiente di immersione virtuale (PMR), riesce ad individuare i componenti e associarli ai vari nodi dell'albero selezionandoli e interrogando il modello, essendo appunto all'interno della realtà mista.

Questi passaggi informatici sono stati possibili grazie alla collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Informatica (DII) dell'UNIVPM. Il DII ha utilizzato “Unity”, che è una delle principali piattaforme di sviluppo di applicazioni in tempo reale. Unity offre l'infrastruttura necessaria per supportare qualsiasi utente per la creazione di giochi, filmati e animazioni o anche per il rendering di concetti architettonici o ingegneristici in un mondo virtuale. Per testare le applicazioni olografiche nel PC senza l'uso di un dispositivo HoloLens fisico si usa l'”Emulatore HoloLens” che riproduce il contenuto mostrato all'interno degli occhiali sullo schermo del PC e grazie ai comandi della tastiera e del mouse è possibile interagire con il modello.



Figura 64 - Visualizzazione del Modello BIM all'interno di UNITY

L'applicazione web che è stata sviluppata dal DII dell'UNIVPM per creare l'albero si chiama HMT+MR e contiene un menù laterale con un bottone Home e tre viste principali: SUPPLYCHAIN, SETTINGS and TREE e un bottone home. Di seguito andremo a vedere come funzionano le singole schermate dell'app.

La vista “*SUPPLYCHAIN*” mostra la cronologia dei REFINE presenti nel modello corrente. Da questa schermata si effettua ogni REFINE, anche quello iniziale, premendo il pulsante blu in alto a destra.

The screenshot displays the 'SUPPLYCHAIN' view interface. On the left, a vertical sidebar contains four icons: a home icon, a link icon, a gear icon, and a magnifying glass icon. The main content area is divided into two panels. The left panel, titled 'Data of the Supply Chain entity', contains four input fields: 'Created', 'Archived', 'Name', and 'Note'. The 'Note' field is a larger text area. The right panel, titled 'REFINE', features a blue 'REFINE' button at the top and a table below it. The table has two columns: the first column lists refinement types, and the second column shows their counts, all of which are currently zero.

REFINE	
No Refine	0
No actual test	0
No bottleneck	0
No diag	0
No apply	0

Figura 65 - Vista "SUPPLYCHAIN" delle varie fasi di REFINE

Nella schermata “*SETTINGS*” vengono impostate le caratteristiche principali dell'intero modello ed è lì che viene creato l'albero.

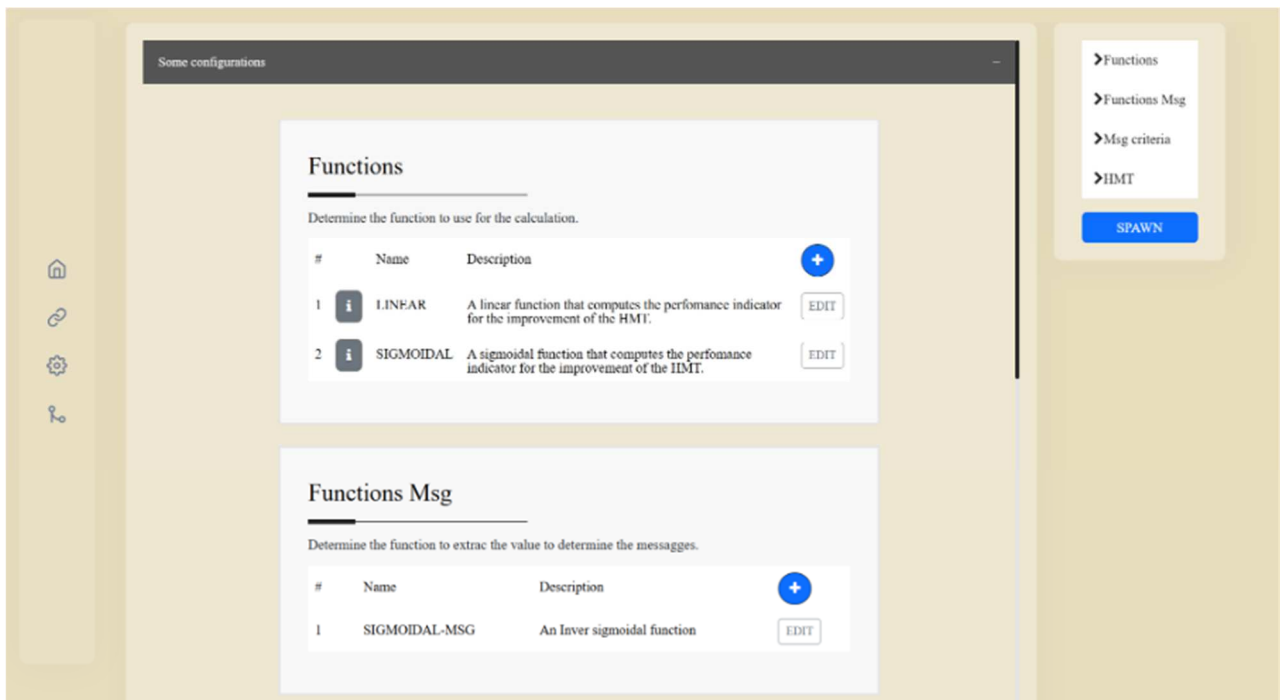


Figura 66 - Creazione dell'albero

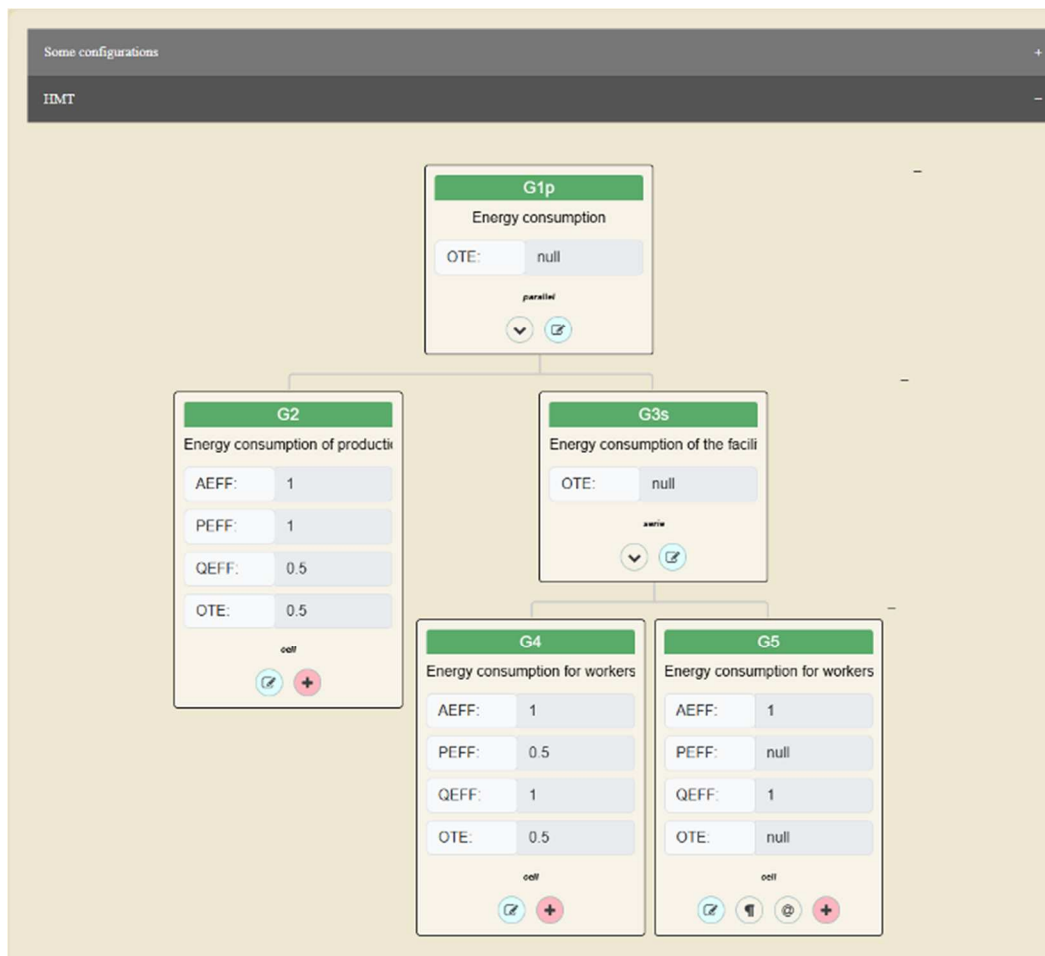


Figura 67 - Esempio di schermata di configurazione dell'albero

Nell'ultima vista “*TREE*”, invece, possiamo vedere l'effetto di STATS e IMPROVE sull'albero precedentemente creato nella vista SETTINGS. Dopo STATS l'algoritmo determina i colli di bottiglia presenti nell'albero e viene mostrato visivamente all'utente con i colori rosso, se presenti nel nodo, e verde in caso contrario. Il collo di bottiglia in HMT rappresenta il punto di possibile intervento. Quindi, sono il punto di opportunità di miglioramento delle prestazioni. Potrebbero essere presenti molte scelte alternative.

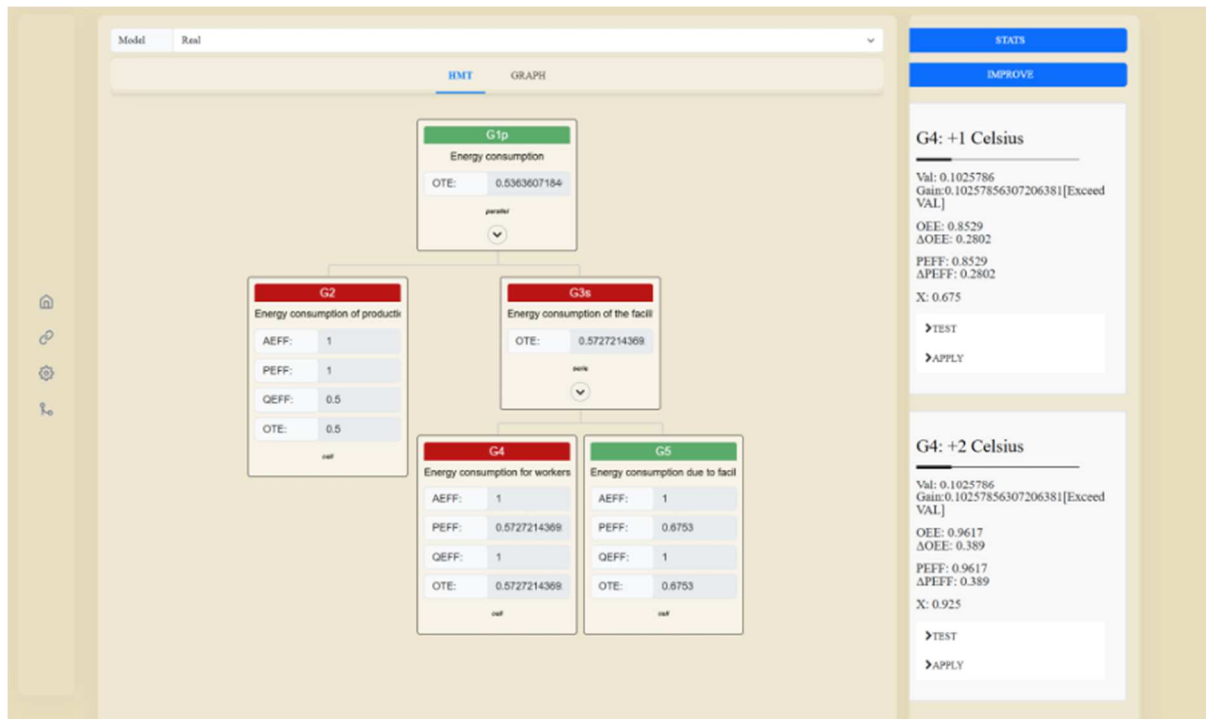


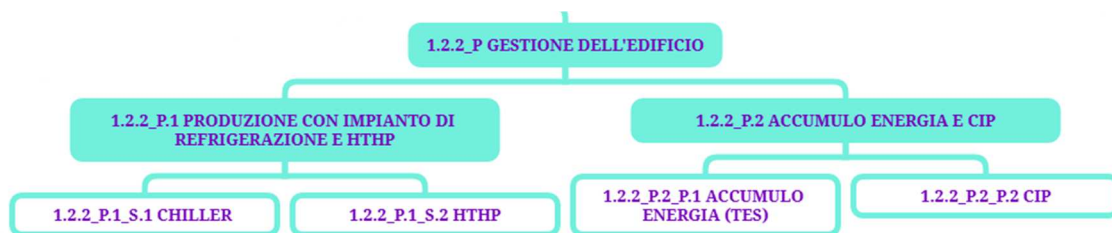
Figura 68 - Visualizzazione dei colli di bottiglia come opportunità di miglioramento

Una volta chiarita la struttura dell'albero nell'applicazione web, siamo pronti per visualizzarla all'interno di HoloLens 2. Nell'interfaccia di HoloLens, il menù di visualizzazione ad albero è stato implementato per connettersi con il nuovo sviluppo apportato nell'applicazione web e per visualizzare l'albero in modo più semplice e dinamico.

Mentre l'applicazione web funziona con la metodologia HMT, la parte MR viene aggiunta nel caso in cui vi sia la possibilità e la necessità da parte dell'utente di essere immerso nell'ambiente in cui avviene il processo decisionale. In questo caso vi è una sincronizzazione delle informazioni tra la pagina web e il sistema MR (ad esempio il sistema HoloLens qui).

5.4 Risultati

Ora riprendiamo la parte di “1.2.2 GESTIONE DELL’EDIFICIO” dove ho applicato la tecnologia per il caso di studio. Ripercorrendo i vari step di costruzione dell’albero olonico, viene mostrato il punto di vista di HoloLens 2 con l’applicazione annessa, nel momento in cui “virtualmente” si associano attributi e nodi dell’albero. È un risultato importante in quanto nella realtà mista, attraverso l’ologramma di HoloLens, si riesce a renderizzare l’albero olonico precedentemente creato, sovrapponendolo alle immagini dentro la realtà aumentata.



Usando l’applicazione web HMT+MR che è stata spiegata nella sezione precedente, sapendo qual è la logica che c’è dietro e come è fatto l’edificio, ho potuto costruire il mio albero olonico di riferimento. Adesso, grazie alla tecnologia di HoloLens 2, si va a verificare la corretta associazione dei componenti ai nodi. HoloLens si collega quindi al database dell’app web in cui è presente l’albero generato ma senza associazione, e poi verrà accoppiato ai componenti “reali” del modello IFC.

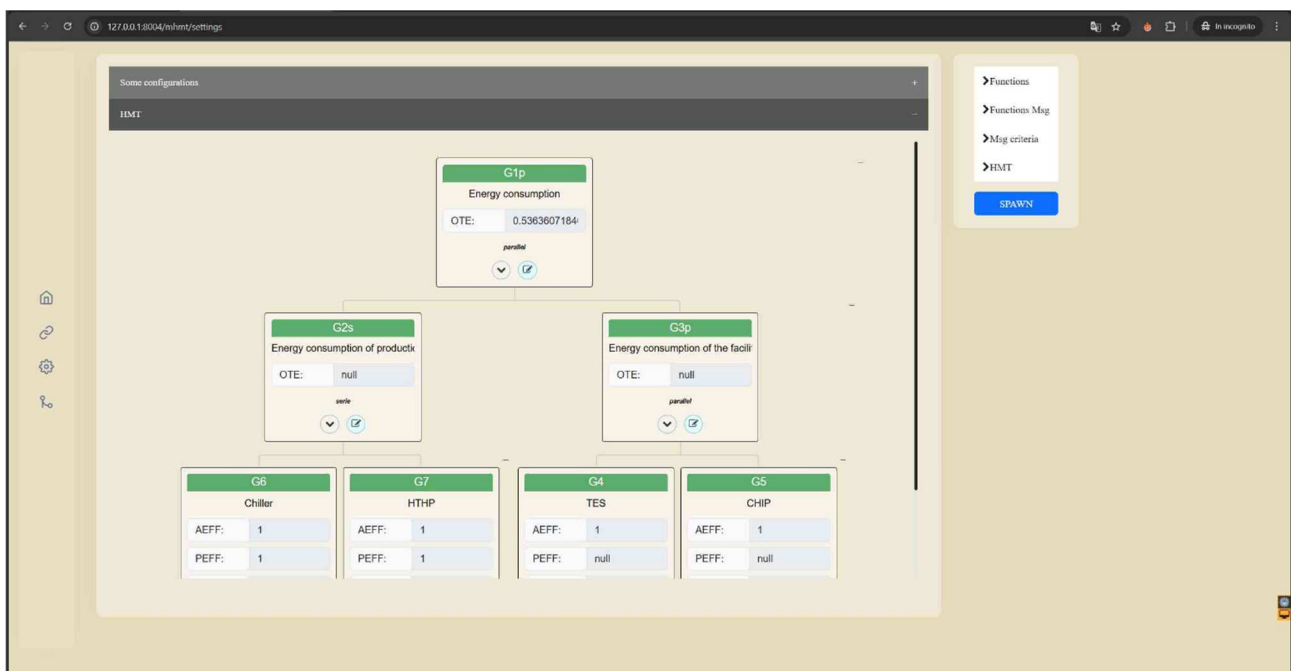


Figura 69 – Schermata dell’App web in cui ho creato l’albero olonico

In primo luogo, prendiamo il nodo “1.2.2_P.1 PRODUZIONE CON IMPIANTO DI REFRIGERAZIONE E HTHP”. Usando HoloLens 2, si può entrare nel modello con gli occhiali di realtà aumentata e selezionare i componenti che fanno parte di quel nodo, mostrando nella schermata blu di fianco il valore della performance di quel nodo. Per questo nodo in HoloLens 2 siamo andati a selezionare il chiller e il sistema HTHP come possiamo vedere dalle schermate acquisite di seguito.

Da qui in avanti è stata fatta la sperimentazione direttamente dall’HOLOLENS dove si riescono ad associare i nodi ai componenti IFC del modello, seguendo il punto di vista integrale dell’operatore.

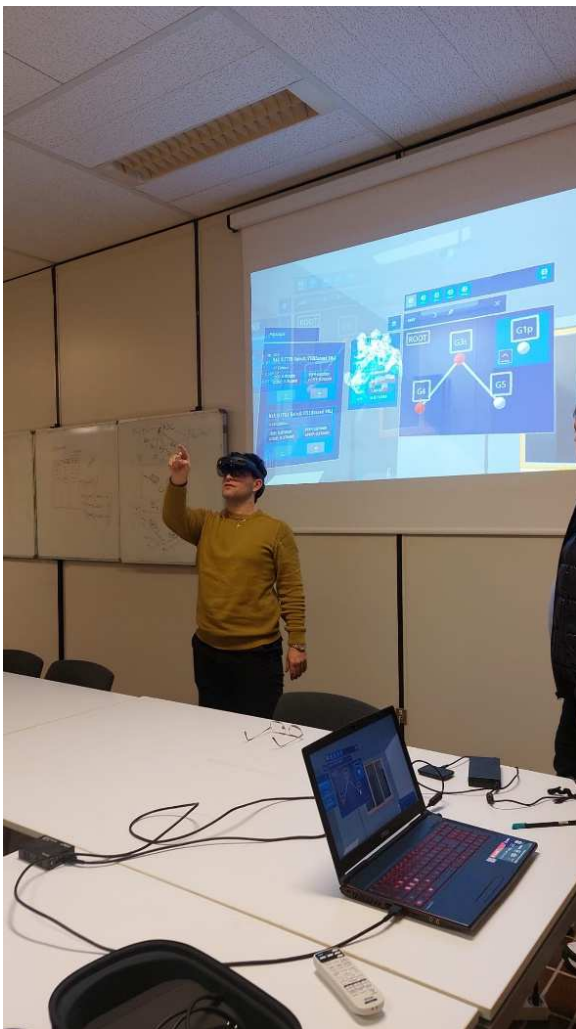


Figura 70.a - Punto di vista dell'uomo

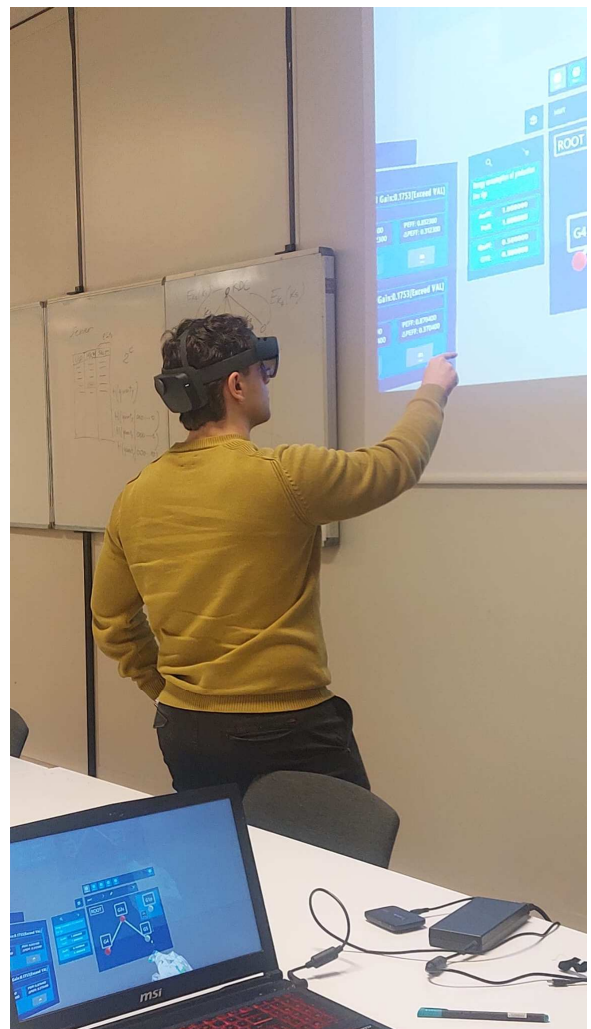


Figura 70.b - Punto di vista dell'uomo

1.2.2_P.1 PRODUZIONE CON IMPIANTO DI REFRIGERAZIONE E HTHP

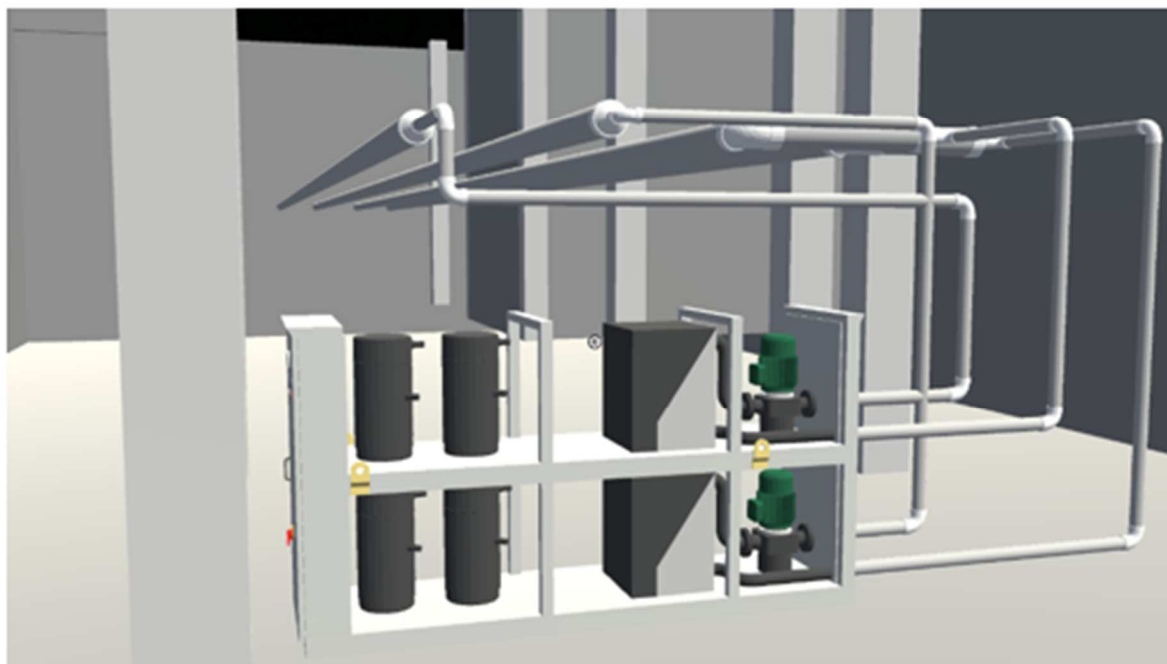
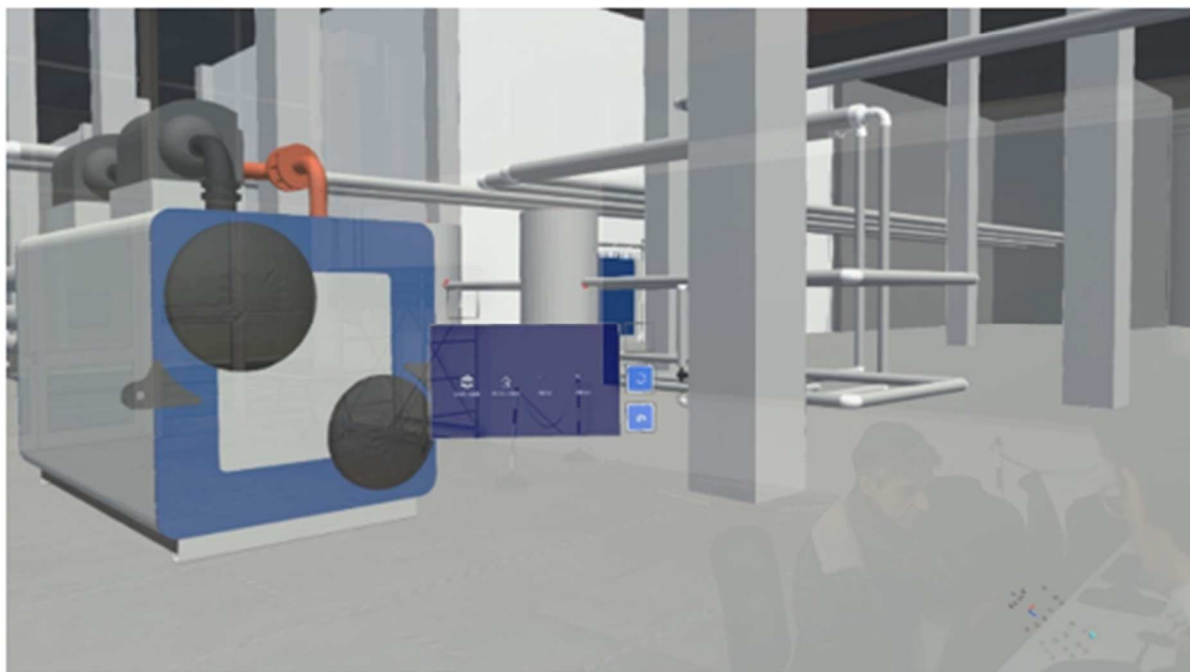


Figura 71 - Prospettiva dal punto di vista dell'operatore in HoloLens 2

In parallelo al nodo precedentemente abbiamo “1.2.2_P.2 ACCUMULO ENERGIA E CIP”. A questo nodo viene associato tutto il sistema di stoccaggio dell’acqua calda (TESS), composta da tre serbatoi collegati tra loro, e la pulizia in loco di veicoli che arrivano (CIP). All’interno di HoloLens 2 quindi andiamo a selezionare tutti e tre i tank per lo stoccaggio e il piazzale di arrivo dei camion dove avvengono tutti i procedimenti di “docking” per il caricamento e lo scaricamento sicuro dei camion.

1.2.2_P.2_P ACCUMULO ENERGIA E CIP

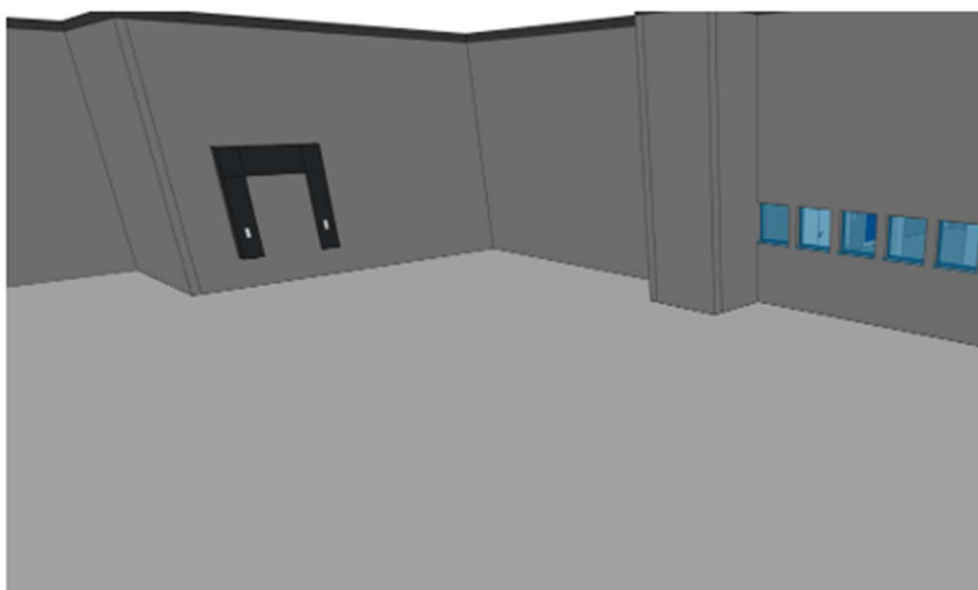


Figura 72 - Prospettiva dal punto di vista dell'operatore in HoloLens 2

Scendendo più nel dettaglio vediamo la distinzione degli altri due nodi in serie “1.2.2_P.1_S.1 CHILLER” e “1.2.2_P.1_S.2 HTHP” che derivano dal ramo di sinistra dell’albero. Per identificare questi due nodi vediamo i componenti selezionati all’interno di HoloLens 2 e ognuno caratterizzato dal suo indicatore di performance scaturito ricorsivamente dall’OEE padre.

1.2.2_P.1_S.1 CHILLER

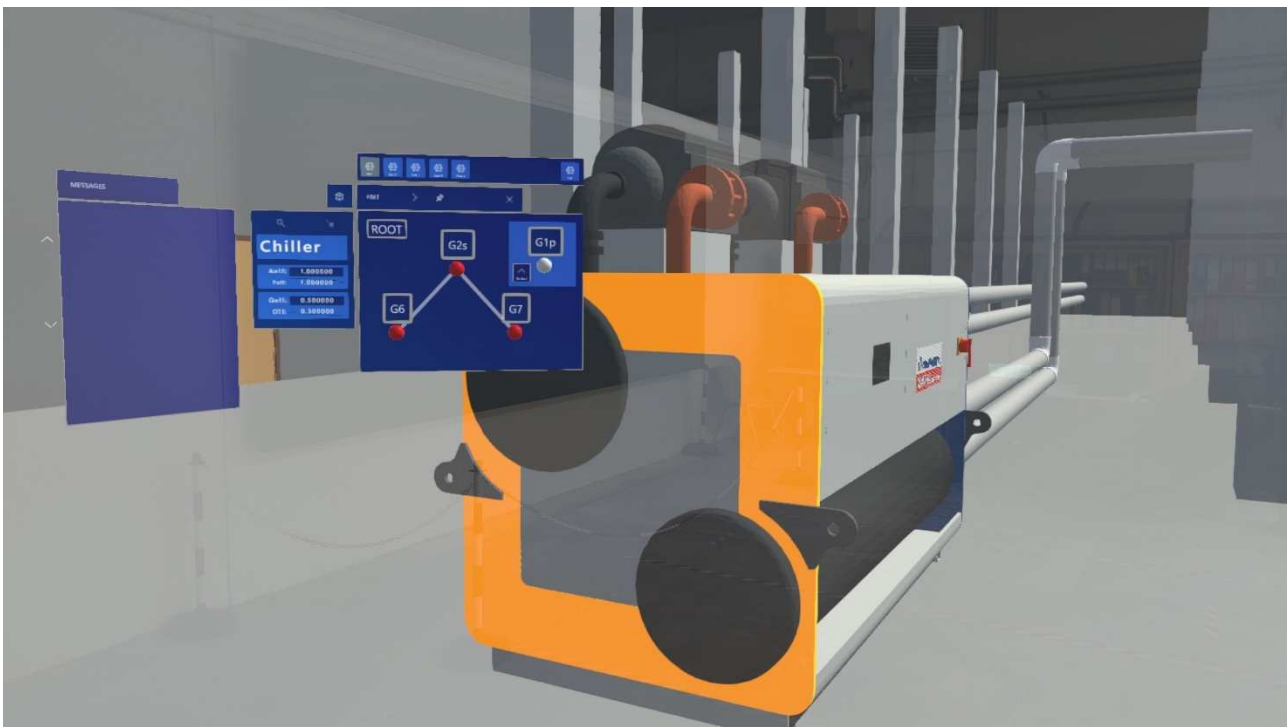


Figura 73 – Punto di vista del Facility Manager in fase di associazione tra i nodi e i componenti del modello

1.2.2_P.1_S.2 HTHP

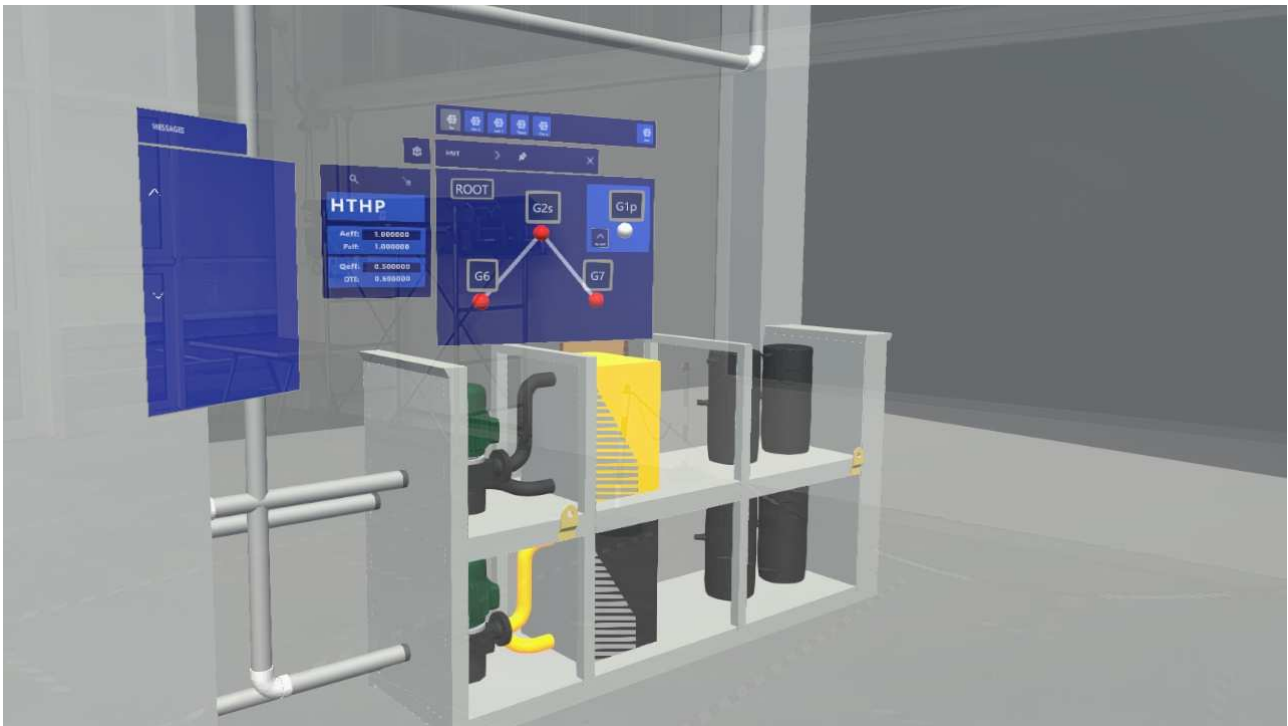


Figura 74 - Punto di vista del Facility Manager in fase di associazione tra i nodi e i componenti del modello

Dal ramo di destra dell'albero olonico, invece, vediamo la scomposizione del nodo "1.2.2_P.2 ACCUMULO ENERGIA E CIP" in due nodi paralleli "1.2.2_P.2_P.1 ACCUMULO ENERGIA (TES)" e "1.2.2_P.2_P.2 CIP" e i relativi componenti associati nell'applicazione sviluppata.

1.2.2_P.2_P.1 ACCUMULO ENERGIA (TES)



Figura 75 - Punto di vista del Facility Manager in fase di associazione tra i nodi e i componenti del modello

1.2.2_P.2_P.2 CIP



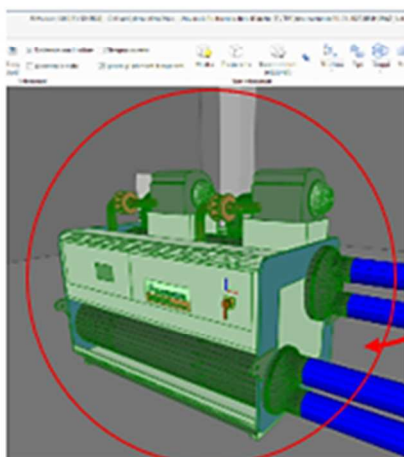
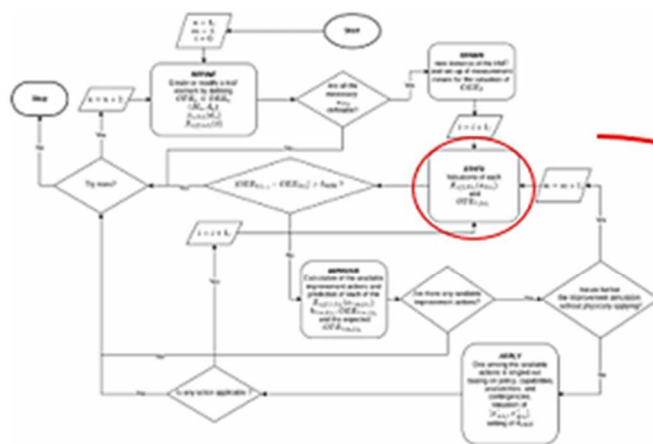
Figura 76 - Punto di vista del Facility Manager in fase di associazione tra i nodi e i componenti del modello

Infine, usando questi passaggi metodologici e associando i componenti fisici del mio modello BIM allo scopo e alla performance del nodo accoppiato, si riesce ad avere controllo su tutto il sistema complesso. Nel caso in cui il manager avrà bisogno di cambiare *in medias res* la struttura dell'albero per qualsiasi ragione, può farlo all'interno di questa realtà/virtualità immersiva avendo immediatamente la risposta al cambiamento appena apportato e giudicare da sé se il mutamento è di carattere positivo o meno.

Questo è un processo che rappresenta una svolta in quanto, grazie al meccanismo HMT+MR e con l'ausilio di un dispositivo di realtà aumentata come HoloLens 2, si riescono a prelevare informazioni dalla realtà e farle diventare virtuali. Così facendo ci permette di avere un'impostazione di gestione dei sistemi più rapida, meno costosa e più sicura dal punto di vista degli errori in fasi di sviluppo. Alla fine del procedimento il risultato che ottengo è un albero di gestione olonico generato grazie alla realtà mista in loco con l'utilizzo di HoloLens 2; il quale albero poi verrà mostrato nell'App desktop sul PC.

5.5 Sviluppi futuri

Nel panorama della gestione di questi procedimenti ci sono due principali sviluppi futuri: uno a breve termine e un altro a lungo termine. A breve termine possiamo dire che, una volta creato l'albero olonico e fatta l'associazione dei nodi ai componenti del modello, posso entrare nel ciclo del processo HMT vero e proprio ed eseguire tutte le fasi del metodo: REFINE, SPAWN, STATS, IMPROVE e APPLY. In seguito, è necessario fare l'associazione dei componenti del modello IFC ai corrispondenti simulatori, al fine di poter calcolare l'albero precedentemente creato e trovare i colli di bottiglia. Questo ci farà capire, in modo assoluto e mirato, quali parametri vanno modificati, dove e come. Pertanto, da questa situazione sapremo l'indicazione di quello che possiamo migliorare per arrivare all'obiettivo stabilito, la riduzione delle emissioni di GHG.



SIMULATORE DEL CHILLER

Figura 77 - Schema esemplificativo degli strati tecnologici per l'implementazione dell'albero

A lungo termine, invece, si suggerisce uno sviluppo di funzioni che permettono di costruire l'albero olonico direttamente dall'interfaccia di HoloLens 2 così da poter usare un solo strumento e dando libertà al manager di creare l'HMT in loco senza passare dall'applicazione web.

CONCLUSIONI

In conclusione, il concetto di ambiente costruito come sistema complesso offre una nuova prospettiva nella gestione di edifici e infrastrutture, spostando l'attenzione dall'analisi di singole componenti alla considerazione del tutto. Attraverso un modello di gestione integrato e olistico, è possibile affrontare le sfide emergenti che caratterizzano il nostro contesto urbano e socioeconomico. La figura del BIM Manager System, tradizionalmente focalizzata sulla componente energetica e sul comfort dell'edificio, si trasforma così in un agente di cambiamento che abbraccia la complessità dei sistemi interconnessi, promuovendo un approccio che guarda oltre il singolo edificio e riconosce il suo ruolo all'interno di una rete più ampia.

L'inclusione dell'uomo come elemento centrale di questa visione implica un'esplorazione di nuove tecnologie, tra cui la digitalizzazione e le tecnologie immersive, che permettono di integrare l'edificio come modello all'interno di un'architettura ologica dinamica. L'analisi dell'architettura HMT ha dimostrato che la sinergia tra digitalizzazione e innovazione tecnologica può abilitare non solo la costruzione, ma anche la gestione proattiva di sistemi complessi, rendendo il processo decisionale più preciso e fondato su simulazioni attendibili.

Guardando al futuro, le opportunità di sviluppo sono promettenti. L'implementazione più doverosa è l'associazione di simulatori per i componenti e nodi in tempo reale che rappresenta un passo fondamentale per un controllo immediato e accurato dei sistemi. A lungo termine, l'evoluzione delle tecnologie hardware e software ci offre la possibilità di migliorare ulteriormente l'interazione con modelli complessi, come quelli rappresentati da HoloLens, facilitando la creazione di un albero ologico direttamente nell'interfaccia utente.

In sintesi, la gestione degli ambienti costruiti come sistemi complessi non è solo un approccio innovativo, ma una necessità per affrontare le sfide del nostro tempo. Solo attraverso una visione integrata e l'adozione di tecnologie avanzate possiamo garantire un futuro sostenibile e resiliente, in cui gli edifici e le infrastrutture non siano isolati, ma parte integrante di un ecosistema più ampio e coeso.

APPENDICE: Esempi di progetto di sistemi di produzione olonici

Sebbene la ricerca storica si sia concentrata sui sistemi di esecuzione olonici, i casi studio esaminati hanno ampliato la portata, includendo l'applicazione di PROSA e DMAS anche in contesti non manifatturieri, in particolare nella sua versione consolidata ARTI.

MANUFACTURING CASE STUDIES

Si analizza lo sviluppo di sistemi di controllo per celle di assemblaggio flessibili, in particolare il sistema FACCS (Flexible Assembly Cell Control System) e i suoi successori, fino ad arrivare a PROSA (Product-Driven Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems) e MASCADA. Questi sistemi sono stati progettati per affrontare le sfide della produzione flessibile e per integrare approcci innovativi come la stigmergia.

FACCS (1985–1990)

Caratteristiche Principali:

- Controllo di produzione guidato dal prodotto: Ogni ordine di produzione gestisce autonomamente il proprio percorso e la sequenza dei passaggi di lavorazione, comportando un controllo eterarchico.
- Piani di processo dinamici: Utilizza grafi di precedenza dinamici per rappresentare sequenze di lavorazione alternative e gestire sequenze mutualmente esclusive.
- Robustezza rispetto alle perturbazioni: In grado di utilizzare sequenze di elaborazione alternative per gestire le perturbazioni in un modo eterarchico.
- Cooperazione gerarchica: Collabora con uno schedatore reattivo per ottimizzare le prestazioni.
- Granularità fine: Supporta passaggi di lavorazione primari dettagliati, garantendo trasportabilità e stoccaggio.
- Indipendenza dal processo: Riusciva a gestire qualsiasi mix di processi produttivi.

Limitazioni:

- Assunzione di job shop: Non gestisce layout di flusso dove le capacità di lavorazione necessarie potrebbero diventare inaccessibili.
- Modello di workstation limitato: Non considera attrezzature, operatori o strumenti.

- Mancanza di capacità predittiva: Gli ordini di produzione non valutano le conseguenze future delle loro decisioni.
- Bassa riusabilità del software: Componenti specifici del caso rendono difficile il riutilizzo.

PROSA (1990–2000)

Contributi:

- Terminologia e comunicazione facilitata: Ha fornito un linguaggio comune per discutere sistemi MES olistici.
- Separazione tra aspetti strutturali e di controllo: Favorisce la scalabilità e la riusabilità del software.
- Controllo di produzione guidato dal prodotto: Riconosce l'importanza delle risorse e dei prodotti come "cittadini di prima classe".

Limitazioni:

- Genericità: Non gestisce tipi specifici di sistemi produttivi.
- Mancanza di supporto per decisioni future: Gli holons di base non possono prevedere le conseguenze delle loro azioni.
- Bassa riusabilità del software sviluppato: Le componenti non sono sopravvissute nel tempo e mancano di flessibilità.

MASCADA e Stigmergia

Innovazioni:

- Stigmergia digitale: Adattamento delle tecniche di coordinazione delle colonie di formiche per il controllo e la coordinazione in ambienti di produzione virtuali.
- Applicazione a casi industriali: Test su un impianto di verniciatura per automobili, affrontando la complessità e l'incertezza del processo produttivo.

Limitazioni:

- Specificità dei componenti: Le soluzioni sviluppate erano troppo specifiche per i casi industriali e non facilmente applicabili ad altri contesti.
- Comportamenti socialmente accettabili: Mancanza di meccanismi per mantenere le intenzioni delle "formiche digitali".

PROGETTI DI MANUFACTURING

PROGETTO Photographic Foil

Contributi:

- Design semplice e robusto: Integrazione di DMAS (Distributed Manufacturing Agent System) per gestire le intenzioni e le esplorazioni in modo efficiente.
- Modularità e adattabilità: Capacità di fungere sia da MES reale che da simulazione del sistema produttivo.

Limitazioni:

- Sviluppo software non duraturo: Mancanza di software pratico che possa sopravvivere oltre il progetto.

PROGETTO MABE

Contributi:

- Gestione della produzione in rete: Capacità di gestire strutture di produzione altamente automatizzate attraverso un approccio olistico.
- Meccanismi di fiducia e reputazione: Sviluppo di un framework per gestire le interazioni in rete tra diverse entità produttive.

Limitazioni:

- Alti costi di adattamento: La tecnologia richiede competenze IT che possono essere carenti nelle fabbriche tradizionali.
- Difficoltà nella generazione automatica di codice: Anche se automatizzata, la generazione di codice rimane complessa e richiede tempo.

In sintesi, si è andato a delineare un percorso di ricerca e sviluppo che si è evoluto nel tempo, partendo da sistemi di controllo di produzione flessibili come FACCS, passando per la creazione di architetture come PROSA, fino all'implementazione di innovazioni pratiche in contesti industriali reali attraverso progetti come MASCADA e MABE. Ogni fase ha contribuito a risolvere problemi di rigidità e inefficienza nei sistemi produttivi, ma ha anche rivelato sfide e limitazioni da affrontare in futuro.

AgCo2 (Agents for Coordination and Control, 2001–2005)/ ACDPS (Autonomic Computing for Decentralized Production Systems, 2006–2010).

Questi progetti hanno riguardato lo sviluppo di sistemi autonomi e multi-agente per la coordinazione e il controllo in sistemi produttivi decentralizzati.

AgCo2 e ACDPS

- AgCo2 (2001-2005) e ACDPS (2006-2010) sono stati progetti di ricerca guidati dall'industria che hanno contribuito all'evoluzione dei risultati di ricerca del PROSA+DMAS, sostenuti finanziariamente dalla KU Leuven.
- DMAS (Delegate Multiagent System) è stato sviluppato come un sistema multi-agente che generalizza la coordinazione stigmergica, migliorando la terminologia per una comunicazione più chiara. Si distingue dall'ottimizzazione delle colonie di formiche, che è una tecnica di risoluzione di problemi.
- È stato completato un framework di fiducia e reputazione, inizialmente avviato dagli obiettivi di MABE, che facilita la cooperazione tra holon di ottimizzazione e il sistema MES holonico PROSA+DMAS.
- È stata proposta una prima strategia per gestire il "nervosismo" degli holon d'ordine, stabilendo meccanismi per mantenere e adattare le intenzioni degli holon in modo giustificato.
- È stata introdotta una distinzione tra componenti software che riflettono la realtà e componenti di decisione, suddividendo le entità intelligenti in "esseri intelligenti" e "agenti intelligenti".
- ACDPS ha applicato il concetto di "Computing Autonomico" a sistemi produttivi e complessi, mirando a rendere autonomi i sistemi di produzione decentralizzati attraverso principi di auto ottimizzazione e auto-apprendimento.

NON-MANUFACTURING CASE STUDIES

Il progetto MASCADA ha portato a uno studio di fattibilità dell'Unione Europea chiamato MAGECC, che ha esplorato l'applicabilità della tecnologia di controllo della produzione di MASCADA in contesti non manifatturieri. Questo studio ha fornito una base per le applicazioni non manifatturiere, tra cui i Sistemi di Esecuzione Logistica Holonici (HLES) e altre aree come la robotica mobile, l'ingegneria all'aperto, la mobilità urbana dinamica, le operazioni ferroviarie e le reti intelligenti.

Sistemi di Esecuzione Logistica Holonici (HLES)

Le operazioni logistiche sono state identificate come un'area di applicazione logica per la tecnologia MASCADA. In particolare, sono stati studiati i sistemi di cross-docking, che riducono i costi e ottimizzano le spedizioni trasferendo direttamente la merce in arrivo ai mezzi in partenza, con un minimo di stoccaggio. Le operazioni di cross-docking richiedono un'allocazione multi-risorsa, in quanto è necessario coordinare diversi elementi come i camion, i porti di carico e i carrelli elevatori. Un altro progetto (ELC2) ha esplorato il controllo olistico di un sistema di trasporto a catena in un centro di distribuzione. È stato utilizzato un modello di esecuzione virtuale per simulare il sistema e analizzare gli effetti di ritardi nel carico e nel trasporto delle merci. Le simulazioni hanno mostrato come il controllo del flusso delle merci possa ottimizzare l'utilizzo delle risorse.

Robotica Mobile

Il progetto ha anche esaminato sistemi di robot mobile, utilizzando l'architettura di riferimento ARTI. La coordinazione tra robot in spazi ristretti è stata un'area chiave, dimostrando come l'allocazione esplicita delle risorse ambientali possa prevenire situazioni di stallo.

Ingegneria all'aperto

I processi di ingegneria all'aperto, come l'estrazione mineraria e la costruzione stradale, richiedono un'ottimizzazione della produttività dei veicoli mobili. Il progetto ha affrontato la necessità di coordinare le operazioni di questi veicoli, gestendo in modo efficace l'allocazione delle risorse e le traiettorie in condizioni di incertezza.

Mobilità Urbana Dinamica (MODUM)

Il progetto MODUM si è concentrato sulla coordinazione del traffico utilizzando un'architettura holonica. Sono stati sviluppati modelli di traffico dinamici per prevedere i flussi di traffico, integrando tecnologie di monitoraggio e simulazione per migliorare la gestione della mobilità.

Operazioni Ferroviarie e Reti Intelligenti

Le operazioni ferroviarie sono state studiate in termini di gestione delle decisioni a lungo termine. In parallelo, le applicazioni delle reti intelligenti si sono concentrate sull'interazione tra produttori e consumatori di energia, affrontando le sfide della domanda e dell'offerta in tempo reale.

In sintesi, il progetto ha dimostrato come la tecnologia MASCADA e i sistemi olonici possano essere applicati a diversi ambiti, ottimizzando i processi attraverso la coordinazione e la gestione delle risorse in contesti complessi e dinamici. La ricerca futura si concentrerà su soluzioni generali per l'allocazione multi-risorsa e la cooperazione con i sistemi di pianificazione, oltre a considerare l'integrazione di tecnologie emergenti nelle reti intelligenti e nei sistemi di mobilità.

BIBLIOGRAFIA

Libri:

- (1) *“Design for the Unexpected – From Holonic manufacturing systems towards a humane Mechatronics society”*, Elsevier, PAUL VALCKENAERS & HENDRIK VAN BRUSSEL.
- (2) *“Empowering Cities for a Net Zero Future: Unlocking resilient, smart, sustainable urban energy systems”*, International Energy Agency (IEA), 2021

Pubblicazioni:

- (3) *“The Meta Holonic Management Tree: review, steps, and roadmap to industrial Cybernetics 5.0”*, Journal of Intelligent Manufacturing, 2024, Massimiliano PIRANI, Alessandro CARBONARI, Alessandro CUCCHIARELLI, Alberto GIRETTI, Luca SPALAZZI.
- (4) *“Industry 4.0: contributions of holonic manufacturing control architectures and future challenges”*, Journal of Intelligent Manufacturing, 2020, William DERIGENT, Oliver CARDIN, Damien TRENTESAUX.
- (5) *“Holonic Management Tree Technique for Performance Improvement Over Self-Similar System Structures”*, Management Studies, 2019, David Publishing, Andrea BONCI, Sauro LONGHI, Massimiliano PIRANI.
- (6) *“Key Performance Indicators for manufacturing operations management – gap analysis between process industrial needs and ISO 22400 standard”*, 8th Swedish Production Symposium, Maggio 2018, Stockholm, Elsevier, Li ZHU, Charlotta JOHNSON, Martina VARISCO, Massimiliano M. SCHIRALDI.
- (7) *“The impact of virtual, augmented and mixed reality technologies on the customer experience”*, Journal of Business Research, 2019, Elsevier, Carlos FLAVIAN, Sergio IBANEZ-SANCHEZ, Carlos ORUS.

RINGRAZIAMENTI