



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale e della Produzione

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Gestionale LM-31**

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi teorica e sperimentale sull'impatto dei cobot in termini
di sostenibilità ambientale, sociale ed economica**

Relatori:

Prof. Luca Mastrogiacomo

Prof. Alessandro Simeone

Candidato:

Enrico Salvatore

Anno Accademico 2023-2024

SOMMARIO

PRIMA PARTE.....	4
CAPITOLO 1 - I ROBOT: DAI PRIMORDI ALL'AUTOMAZIONE AVANZATA.....	4
1.1 <i>L'evolvere dei robot industriali: verso la collaborazione</i>	5
1.2 <i>L'innovazione dei cobot nel nuovo millennio</i>	5
1.3 <i>La nascita della Universal Robot e il successo del modello UR5</i>	6
CAPITOLO 2 - COMPONENTI CHIAVE DI UN COBOT: UN'ANALISI DETTAGLIATA	7
2.1 Braccio robotico a sei assi.....	7
2.2 End effector.....	7
2.3 Teach Pendant:	9
2.4 Unità di Controllo:.....	9
CAPITOLO 3 - ROBOT COLLABORATIVI: UNA RIVOLUZIONE NELL'INDUSTRIA 4.0	10
3.1 <i>Aree di impiego</i>	10
3.2 <i>Vantaggi e svantaggi</i>	10
CAPITOLO 4 - SICUREZZA NEI ROBOT COLLABORATIVI.....	12
4.1 <i>Tecniche e caratteristiche di sicurezza</i>	12
CAPITOLO 5 - ANALISI DI MERCATO	14
5.1 <i>Periodo Covid</i>	15
5.2 <i>Segmentazione di mercato</i>	16
5.2.1 <i>Carico Utile</i>	16
5.2.2 <i>Settore e applicazioni</i>	16
5.2.3 <i>Area Geografica</i>	17
5.3 <i>Attori del mercato</i>	18
5.4 <i>Sviluppo prodotto – tendenze future</i>	18
5.5 <i>Conclusioni dell'analisi di mercato</i>	20
CAPITOLO 6 - FOCUS SULL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE APPLICATA ALLA PRODUZIONE.....	21
CAPITOLO 7 - IL RUOLO DEI COBOT A FAVORE DELLA SOSTENIBILITÀ	23
7.1 <i>Agenda ONU 2030</i>	23
7.1.2 <i>Contributo dei cobot all'Agenda 2030</i>	24
7.2 <i>Focus su automazione del packaging e sostenibilità ambientale</i>	28
7.2.1 <i>Che cos'è il packaging e perché è importante per le aziende</i>	28
7.2.2 <i>Ruolo del packaging</i>	28
7.2.3 <i>Limitazioni del packaging manuale</i>	29

7.2.4 Automazione del packaging con i cobot	30
7.2.5 Tipologie di cobot impiegati nel packaging	31
7.2.6 Fattori di selezione del cobot.....	31
7.2.7 Implementazione dei cobot nel packaging: aspetti da considerare	31
7.2.8 Esempi di automazione del packaging con i cobot nel settore alimentare	32
7.2.9 Vantaggi nella produzione alimentare:.....	32
7.3 Applicazioni sostenibili di successo della robotica collaborativa.....	33
7.3.1 Case History: Atria Scandinavia.....	33
7.3.2 Case History: Cascina Italia	34
SECONDA PARTE.....	37
INTRODUZIONE AGLI ESPERIMENTI.....	37
CAPITOLO 1 - ESPERIMENTO 1	38
1.1 Raccolta dati	38
1.2 Analisi dati.....	43
1.2.1 Strumenti per l'analisi dati	43
1.2.2 Analisi multifattoriale	44
1.2.3 ANOVA.....	45
1.2.4 Regressione Lineare con OLS.....	46
1.2.5 Considerazioni sulla significatività statistica:	48
1.2.6 Test di significatività con Kruskal-Wallis	48
1.3 Conclusioni primo esperimento	50
CAPITOLO 2 - ESPERIMENTO 2	51
2.1 Raccolta dati	51
2.2 Analisi dati.....	54
2.2.1 Strumenti per l'analisi dati	54
2.2.2 Modalità di movimento: Move J vs. Move L.....	55
2.2.3 Focus sulla modalità Move J.....	56
2.3 Conclusioni secondo esperimento	62
CONCLUSIONI.....	64
RINGRAZIAMENTI.....	66
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	65
Bibliografia	65
Sitografia	65

INTRODUZIONE

L'era dell'automazione ha visto una progressiva evoluzione dei robot industriali, culminata nell'avvento dei robot collaborativi, noti come cobot, che hanno ridefinito il panorama dell'Industria 4.0.

Questa tesi si propone di esplorare il mondo dei cobot, suddividendo il percorso di indagine in due parti complementari ma interconnesse.

La prima parte del lavoro si concentra sulla comprensione approfondita dei cobot, analizzando il loro sviluppo storico, le componenti chiave, l'ampia gamma di applicazioni nell'Industria 4.0 e le sfide di sicurezza associate a questa nuova frontiera tecnologica. Attraverso un'analisi di mercato dettagliata, si delineano il contesto attuale e le prospettive future, con uno sguardo particolare alle tendenze emergenti e agli attori di spicco nel settore. Si esplora inoltre l'incidenza dell'intelligenza artificiale nella produzione, evidenziandone il ruolo chiave nel potenziare le capacità dei cobot e si amplia l'orizzonte di questa panoramica includendo gli approfondimenti del Capitolo 7, incentrati sul ruolo dei cobot a favore della sostenibilità. Attraverso l'esplorazione dell'Agenda ONU 2030 e l'analisi di applicazioni sostenibili di successo della robotica collaborativa, si rafforza il legame tra le potenzialità dei cobot e la promozione della sostenibilità ambientale, delineando il contributo fondamentale che tali tecnologie possono offrire nella lotta contro il cambiamento climatico e verso un futuro industriale più ecologicamente consapevole.

La seconda parte della tesi introduce una prospettiva pratica attraverso la presentazione di due esperimenti condotti per approfondire la tematica della sostenibilità nell'utilizzo dei cobot. Attraverso la raccolta e l'analisi dei dati ottenuti durante gli esperimenti, si esplorano le dinamiche legate ai consumi energetici e ai fattori che influenzano l'efficienza dei cobot. Questa sezione si propone di fornire contributi concreti per ottimizzare l'utilizzo dei cobot in chiave sostenibile.

In sintesi, la tesi si articola in un viaggio attraverso la storia, le sfide, le applicazioni e le prospettive dei cobot, con un'attenzione particolare alla loro rilevanza nell'ambito della sostenibilità. La combinazione di approfondimenti teorici e risultati pratici pone il tema della sostenibilità al centro della riflessione, contribuendo a definire il ruolo cruciale dei cobot nella costruzione di un futuro industriale più efficiente ed ecologicamente consapevole.

PRIMA PARTE

CAPITOLO 1 - I ROBOT: DAI PRIMORDI ALL'AUTOMAZIONE AVANZATA

Nel vasto panorama dell'automazione industriale, l'evoluzione dei robot ha rivoluzionato il modo in cui concepiamo la produzione e l'interazione uomo-macchina. Sin dagli albori dell'era industriale, l'idea di utilizzare macchine per eseguire compiti ripetitivi ha ispirato innovazioni che hanno definito il volto della produzione moderna. Tra queste innovazioni, uno degli sviluppi più significativi è rappresentato dal concetto di robot collaborativo, o "cobot".

L'origine dei robot industriali può essere fatta risalire al 1954, quando l'americano George Devol (1912-2011) brevettò il primo braccio robotico. Questo evento segnò l'inizio di una nuova era, poiché il robot divenne rapidamente un elemento cruciale nei processi di produzione di General Motors. L'azienda Unimation, fondata nel 1956 da Devol e Joseph F. Engelberger, produsse il famoso "Unimate", il primo robot industriale programmabile.

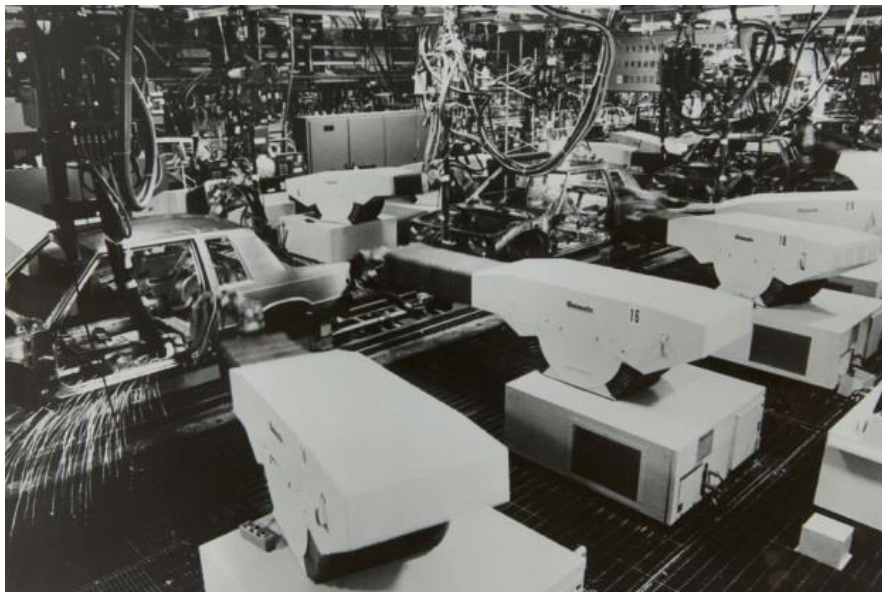


Figura 1.1: Applicazione di alcuni robot Unimate nella fabbrica di GM ad Ewing, New Jersey, anno 1961.

Le prime applicazioni dell'Unimate erano principalmente legate al "pick and place", una pratica che continua a essere una delle applicazioni più frequenti dei robot industriali anche oggi. Tuttavia, la svolta iniziale in applicazioni su larga scala per General Motors si ebbe nel 1961. In questo periodo, l'Unimate fu impiegato in attività estremamente pericolose, come il prelievo di lamiere incandescenti dalla macchina di pressofusione, seguito dalla saldatura di tali lamiere al telaio delle autovetture. Questa applicazione non solo segnò una pietra miliare nell'automazione industriale ma, ancor più significativo, contribuì a proteggere gli operai da attività ad alto rischio.

1.1 L'evolvere dei robot industriali: verso la collaborazione

Negli anni successivi, i robot industriali hanno continuato a evolversi, affrontando sfide sempre più complesse. Tuttavia, con l'avanzare della tecnologia e la crescente consapevolezza delle potenziali sinergie tra robot e operatori umani, e in seguito a una visionaria intuizione di J. Edward Colgate e Michael Peshkin, due professori della Northwestern University, è emerso il concetto di robot collaborativo, o cobot.

Nel 1996, i loro studi e le ricerche sul campo furono documentati in un paper pionieristico, gettando le basi per una nuova era nell'interazione tra robot e esseri umani. I cobot, contrariamente ai loro predecessori, sono progettati per collaborare direttamente con gli operatori umani, aprendo nuove possibilità di applicazione e sicurezza in ambienti di lavoro condivisi.

1.2 L'innovazione dei cobot nel nuovo millennio

Sebbene il concetto di robot collaborativo (cobot) sia stato inizialmente concepito alla fine degli anni '90, è nel periodo tra il 2001 e il 2005 che la vera innovazione ebbe luogo. Un gruppo di ricercatori presso la University of Southern Denmark sviluppò un concetto rivoluzionario di cobot: un braccio robotico antropomorfo con 6 gradi di libertà progettato per lavorare a stretto contatto con gli operatori umani.

1.3 La nascita della Universal Robot e il successo del modello UR5

Nel 2005, tre dei ricercatori coinvolti nel progetto (Esben Ostergaard, Kristian Kassow e Kasper Stoy) fondarono la Universal Robot, portando l'innovazione dei cobot direttamente sul mercato. Nel 2008, lanciarono l'UR5, il primo prodotto Universal Robot, caratterizzato da una straordinaria semplicità di programmazione, leggerezza e flessibilità. Questo cobot fu integrato con successo nelle linee produttive di moltissime aziende, collaborando direttamente con gli operatori umani per automatizzare processi manuali e ripetitivi.

Da quel momento in avanti, Universal Robot ha continuato a crescere costantemente. Nel 2022, l'azienda ha superato i 1000 dipendenti e ha registrato un fatturato di 326 milioni di dollari. Questo successo non è passato inosservato e l'azienda è diventata un esempio per l'intera industria della robotica. Universal Robot ha dimostrato che la chiave del successo risiede nella capacità di offrire prestazioni straordinarie, con cobot capaci di gestire carichi fino a 30 kg, uno sbraccio massimo di 1,70 metri e la flessibilità necessaria per essere impiegati in una vasta gamma di applicazioni industriali. In tal modo, Universal Robot ha contribuito in modo significativo alla trasformazione del panorama della robotica e dell'automazione, dimostrando come la collaborazione armoniosa tra uomo e macchina possa portare a risultati straordinari.

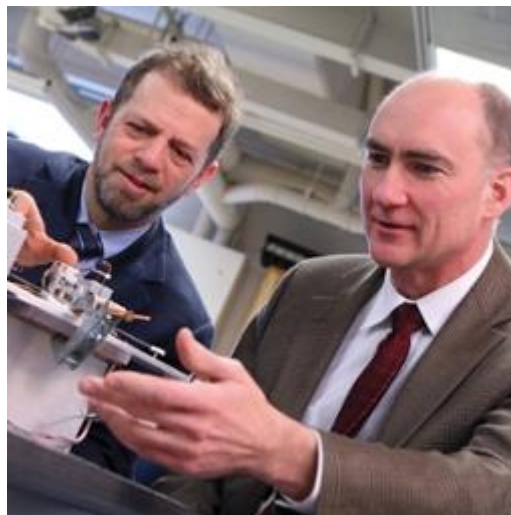


Figura 1.2: J. Edward Colgate e Michael Peshkin

CAPITOLO 2 - COMPONENTI CHIAVE DI UN COBOT: UN'ANALISI DETTAGLIATA

I robot collaborativi (cobot) sono composti da diverse componenti che lavorano sinergicamente per garantire la loro funzionalità, flessibilità e sicurezza. Qui di seguito, un'analisi dettagliata delle principali componenti di un cobot:

2.1 Braccio robotico a sei assi

Il cuore del cobot è il braccio robotico a sei assi, ciascuno dei quali può muoversi di 360 gradi. Questi assi sono:

Base: La parte inferiore del braccio, che permette la rotazione orizzontale.

Spalla: La parte superiore del braccio, che si muove in direzione verticale.

Gomito: La connessione tra la spalla e l'avambraccio.

Polso 1, Polso 2 e Polso 3: Le parti che formano l'avambraccio e il polso, responsabili dei movimenti finali e dell'orientamento dell'utensile o accessorio.

La configurazione a sei assi offre una notevole flessibilità di movimento, consentendo al cobot di raggiungere e manovrare oggetti da diverse angolazioni e posizioni.

2.2 End effector

L'end effector, o effetto finale, rappresenta la parte terminale del cobot responsabile dell'interazione con l'ambiente di lavoro. Esso può essere equipaggiato con diversi accessori, noti come tooling.

Tra le categorie principali di end effector, troviamo i gripper e gli utensili.

I gripper sono i terminali maggiormente diffusi ed i contesti in cui sono utilizzati sono quelli del packaging, dell'assemblaggio, della pallettizzazione/depallettizzazione e del machine loading/unloading.

I gripper, possono essere di varie tipologie:

- *Impactive*: indica un tipo di presa classico con contatto diretto tra effettore e oggetto che viene stretto dalle pinze non appena queste lo toccano;
- *Ingressive*: in questo caso si penetra la superficie dell'oggetto con strutture a pettine o aghi per spostarlo, per esempio nel caso di tessuti o materiali analoghi;
- *Astrictive*: la presa viene realizzata applicando forze di suzione tramite il vuoto (vacuum gripper), oppure applicando forze magnetiche per materiali ferrosi;
- *Contigutive*: la presa avviene per contatto diretto per adesione tramite l'applicazione di collanti.

Oltre alla capacità di carico, i gripper sono caratterizzati dalla grip force, la forza di presa regolabile, e dalla gripper stroke, l'apertura delle dita che definisce le dimensioni degli oggetti movimentabili.

Il cobot, attraverso il suo ultimo asse, il polso 3, può essere equipaggiato con una vasta gamma di accessori, tra cui pinze, ventose e kit specializzati come quelli per saldatura, sabbiatura, levigatura e avvitatura.

La gestione precisa di forze, accelerazioni e velocità rende il cobot estremamente versatile, consentendo l'impiego di avanzati sistemi di visione e sensoristica per guidare il movimento e eseguire attività di controllo qualità.



Figura 2.1: Diversi esempi di utensili applicati ai cobot. Partendo da sinistra vediamo un utensile per la finitura superficiale, un accessorio a ventose per la movimentazione ed un kit per la saldatura.

2.3 Teach Pendant:

Il teach pendant è una console portatile che permette all'operatore di interagire con il cobot. Questo dispositivo consente di avviare e spegnere il cobot, nonché di programmarne i movimenti e le azioni. Il teach pendant è uno strumento fondamentale per la facilità di utilizzo del cobot da parte dell'operatore.

2.4 Unità di Controllo:

L'unità di controllo è il cervello del cobot e comprende:

Scheda elettrica: Responsabile della gestione e dell'invio di segnali elettrici ai motori del braccio robotico. Inoltre è responsabile di gestire tutti i segnali provenienti dalle apparecchiature esterne, tra cui visori e sensoristica di vario tipo.

Scheda SD con software: Contiene il software necessario per il funzionamento del cobot. Questo software determina le modalità di movimento, le interazioni con l'ambiente e la collaborazione con gli operatori umani.

La combinazione del braccio a sei assi, un accessorio personalizzabile e un'interfaccia utente intuitiva come il teach pendant rende il cobot uno strumento ideale per l'automazione collaborativa.

Questa configurazione avanzata consente ai cobot di eseguire con precisione una vasta gamma di compiti, contribuendo così a migliorare l'efficienza e la sicurezza nei contesti industriali.



Figura 2.2: Teach Pendant della Universal Robots



Figura 2.3: Unità di controllo RobIn eBox della Universal Robots

CAPITOLO 3 - ROBOT COLLABORATIVI: UNA RIVOLUZIONE NELL'INDUSTRIA 4.0

3.1 Aree di impiego

I cobot sono progettati con l'obiettivo principale di collaborare in modo armonioso con gli operatori umani, senza la necessità di barriere fisiche, creando un ambiente di lavoro condiviso e sicuro. Questa stretta collaborazione non solo migliora l'efficienza complessiva, ma contribuisce anche a promuovere una cultura lavorativa più collaborativa e partecipativa.

Inoltre, i cobot rivestono un ruolo centrale nell'ambito dell'Industria 4.0, rappresentando una componente fondamentale per l'implementazione dell'automazione intelligente e la connettività avanzata all'interno dei processi di produzione. La loro integrazione favorisce la trasformazione digitale delle fabbriche, consentendo una gestione più efficiente e una maggiore agilità nel rispondere alle sfide industriali moderne.

La versatilità delle attività svolte dai cobot è un ulteriore elemento distintivo. Questi robot collaborativi sono in grado di affrontare una vasta gamma di compiti industriali e non, tra cui la movimentazione, l'assemblaggio, la saldatura, la finitura superficiale di componenti, il controllo qualità e tantissimi altri ancora.

La loro flessibilità li rende adatti a diversi settori e applicazioni, consentendo alle aziende di adattarsi alle mutevoli esigenze di produzione con facilità e precisione.

3.2 Vantaggi e svantaggi

I vantaggi che si possono ottenere dall'utilizzo dei cobot sono innumerevoli; di seguito sono riportati i principali.

Adattabilità a spazi ridotti: I cobot sono ideali per ambienti con spazi ristretti, consentendo una maggiore flessibilità nella disposizione delle attrezzature di produzione.

Semplicità di installazione e programmazione: La loro implementazione è relativamente semplice, con processi di installazione e programmazione che richiedono meno risorse e competenze specializzate rispetto ai robot industriali tradizionali.

Sicurezza collaborativa: I cobot sono progettati con sistemi di sicurezza avanzati che permettono la collaborazione diretta con gli operatori senza compromettere la sicurezza sul luogo di lavoro.

Flessibilità e adattabilità: La loro capacità di adattarsi facilmente a nuovi compiti e ambienti fa dei cobot una scelta flessibile e dinamica per le esigenze produttive mutevoli.

Efficienza energetica: Un ulteriore vantaggio dei cobot è il loro basso consumo energetico, posizionandoli come soluzione sostenibile e efficiente dal punto di vista energetico, in linea con le moderne pratiche industriali orientate alla riduzione dell'impronta ambientale.

Per quanto riguarda gli svantaggi, gli unici che si potrebbero notare, se confrontati con i robot industriali tradizionali, sono una velocità operativa inferiore e una capacità di carico limitata, ma nonostante ciò i cobot stanno guadagnando sempre più popolarità nel panorama industriale. Queste limitazioni sono, in realtà, una manifestazione diretta delle caratteristiche che li rendono attraenti.

La velocità inferiore è una scelta consapevole, mirata a garantire un elevato livello di sicurezza per gli operatori umani, sottolineando l'approccio centrato sulla collaborazione dei cobot. Allo stesso modo, la capacità di carico limitata li rende ideali per applicazioni specifiche, dove la flessibilità e la collaborazione sono prioritarie rispetto alla manipolazione di carichi estremamente pesanti.

Nonostante queste sfide, i cobot stanno emergendo come protagonisti nella trasformazione del panorama industriale. La loro capacità di offrire soluzioni flessibili e collaborative li posiziona come attori chiave nella costruzione di un futuro industriale più automatizzato e interconnesso.

CAPITOLO 4 - SICUREZZA NEI ROBOT COLLABORATIVI

La sicurezza rappresenta un aspetto cruciale nei cobot dato il loro ruolo di collaborazione diretta con gli operatori umani.



Figura 4.1: Collaborazione tra operai e cobot nello svolgimento di operazioni di assemblaggio su un telaio automobilistico.

4.1 Tecniche e caratteristiche di sicurezza

1. Algoritmi di controllo:

I cobot sono dotati di algoritmi di controllo avanzati che monitorano in tempo reale il movimento, la forza e la velocità del braccio robotico. Questi algoritmi consentono una risposta istantanea e dinamica alle variazioni dell'ambiente di lavoro, garantendo la massima sicurezza durante la collaborazione con gli operatori umani.

2. Forme arrotondate:

La progettazione fisica dei cobot prevede superfici arrotondate e prive di spigoli vivi. Questo aspetto contribuisce a evitare lesioni in caso di contatto accidentale tra il cobot e gli operatori umani.

3. Limitazioni della velocità:

Nei luoghi di lavoro in cui cobot e operatori condividono lo stesso spazio, vengono implementate limitazioni di velocità. Queste limitazioni assicurano che il cobot si muova a velocità sicure nelle aree comuni, riducendo il rischio di collisioni accidentali.

4. Sensori di collisione:

I cobot sono equipaggiati con sensori avanzati che rilevano la presenza di oggetti o persone nelle vicinanze. Questi sensori consentono al cobot di rallentare o fermarsi completamente quando viene rilevato un ostacolo imprevisto nel suo percorso.

5. Stop di emergenza:

Ogni cobot è dotato di sistemi di stop di emergenza immediata. Questi sistemi possono essere attivati manualmente o automaticamente in risposta a situazioni di emergenza, arrestando istantaneamente tutte le attività del cobot.

6. Impostazioni sulla coppia massima:

Le impostazioni sulla coppia massima rappresentano un altro strumento di sicurezza critico. Se la coppia esercitata dal cobot supera i limiti preimpostati, il sistema si blocca automaticamente, evitando danni alle attrezzature o, ancor più importante, prevenendo lesioni agli operatori.

7. Interfaccia uomo-macchina intuitiva:

L'interfaccia uomo-macchina (HMI) è progettata per essere intuitiva e di facile utilizzo. Gli operatori possono monitorare e controllare facilmente le attività del cobot, ricevendo avvisi tempestivi in caso di situazioni di pericolo.

8. Monitoraggio continuo delle condizioni di lavoro:

I cobot sono in grado di monitorare continuamente le condizioni dell'ambiente di lavoro, adattandosi dinamicamente a qualsiasi cambiamento per garantire la sicurezza degli operatori.

Queste caratteristiche dimostrano l'impegno nella progettazione e nello sviluppo di robot collaborativi che siano non solo efficienti ma anche estremamente sicuri per interagire direttamente con gli operatori umani. La combinazione di tecnologie avanzate e criteri di progettazione mirati alla sicurezza fa dei cobot un elemento fondamentale nell'evoluzione delle pratiche industriali verso una collaborazione più sicura e efficiente tra uomo e macchina.

CAPITOLO 5 - ANALISI DI MERCATO

Il mercato globale dei robot collaborativi è stato valutato a 1.614,91 milioni di dollari nel 2023 e secondo le previsioni emerse dallo studio fatto dal portale “Polaris Market Research” è previsto un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 32,5% durante il periodo di previsione 2024-2032.

Per il 2024 il valore previsto per questo mercato è di 2.135,07 milioni di dollari, per arrivare al 2032 con un valore stimato di 20.258,74 milioni di dollari.

Nella figura seguente, è riportato un grafico di Polaris Market Research, che mostra le previsioni per la dimensione di mercato della robotica collaborativa, nel periodo 2019-2032, diviso per aree geografiche.

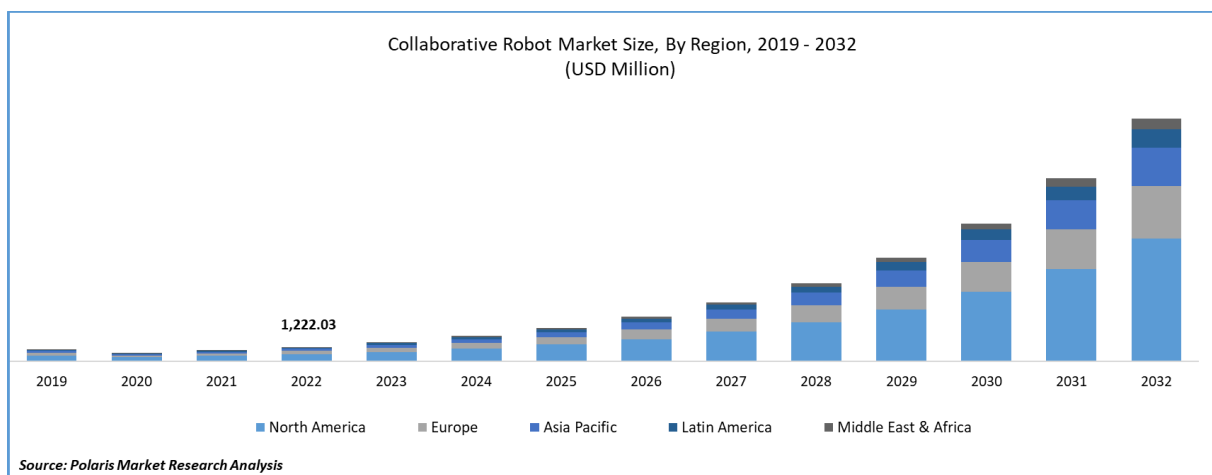


Figura 5.1: Previsione della dimensione del mercato della robotica collaborativa, per regione, nel periodo 2019-2032

I robot collaborativi stanno diventando sempre più accessibili e facili da utilizzare, aprendo nuove opportunità per diverse organizzazioni. La crescente attrazione per i cobot al di fuori dei tradizionali settori manifatturieri, insieme alla diminuzione dei costi, agisce come un catalizzatore significativo per l'espansione del mercato. Inoltre, i continui progressi nelle interfacce uomo-macchina, mirati a incrementare la produttività, l'implementazione di software avanzati per migliorare la sicurezza umana e la semplificazione dei processi di programmazione, emergono come fattori chiave che stimolano la crescita del mercato dei robot collaborativi.

I cobot non offrono solo un'opzione economicamente vantaggiosa, ma presentano anche benefici aggiuntivi, come la riduzione della necessità di supervisione umana nelle attività di manutenzione. Ciò si traduce in un notevole aumento di efficienza e redditività per le imprese. A differenza dei robot industriali tradizionali, spesso compresi in una fascia di prezzo tra 50.000 e 80.000 dollari, i robot collaborativi, o cobot, propongono una soluzione più conveniente, con prezzi che oscillano tra i 25.000 e i 50.000 dollari. Questo equilibrio tra costi e benefici rende i cobot un'opzione più praticabile ed economicamente vantaggiosa, particolarmente adatta per le industrie di piccola scala con capacità di produzione limitate e le imprese di minori dimensioni.

5.1 Periodo Covid

La pandemia di COVID-19 ha rappresentato una svolta significativa nel panorama dell'automazione, accelerando l'integrazione dei robot collaborativi (cobot) in diversi settori chiave. Questi cobot hanno svolto un ruolo cruciale durante la pandemia, emergendo come risorsa indispensabile in settori come l'industria manifatturiera, la logistica e l'assistenza sanitaria. La necessità di mantenere distanziamento sociale e di ridurre l'interazione fisica nei luoghi di lavoro ha fatto sì che i cobot diventassero essenziali per garantire la continuità operativa in condizioni di sicurezza.

In particolare, i cobot sono stati ampiamente richiesti per gestire attività cruciali come la movimentazione dei materiali, il controllo di qualità e la disinfezione degli ambienti. La loro adattabilità e versatilità si sono dimostrate fondamentali in ambienti in rapido cambiamento, permettendo alle aziende di affrontare le sfide imposte dalla pandemia in modo efficiente ed efficace.

Il mercato dei cobot ha vissuto una crescita significativa durante la pandemia, poiché le aziende hanno riconosciuto i vantaggi dell'automazione e della collaborazione nelle loro operazioni. Con la capacità di svolgere compiti in modo autonomo e cooperativo con gli esseri umani, i cobot hanno contribuito a mantenere la produttività in settori critici, riducendo al contempo il rischio per la salute dei lavoratori.

Oltre alla gestione delle sfide immediate legate alla pandemia, i cobot si sono affermati come soluzione a lungo termine per migliorare l'efficienza operativa e ridurre la dipendenza da interazioni umane dirette. Si prevede che il mercato dei cobot continuerà a espandersi nell'era post-pandemia, poiché le aziende apprezzano sempre di più i benefici dell'automazione collaborativa nei contesti lavorativi.



Figura 5.2: Cobot impiegato in attività di disinfezione durante la pandemia Covid

5.2 Segmentazione di mercato

Per comprendere meglio il mercato dei cobot è necessario segmentarlo per capacità di carico, settore, applicazione e area geografica, come mostrato nella tabella seguente.

Per capacità di carico utile	Per settore	Per applicazione	Per area geografica
<ul style="list-style-type: none">• Fino a 5 kg• Fino a 10 kg• Superiore a 10 kg	<ul style="list-style-type: none">• Metalli e macchinari• Plastica e polimeri automobilistici• Mobili e attrezzature• Elettronica• Prodotti alimentari e bevande• Farmaceutico• Altri	<ul style="list-style-type: none">• Confezionamento• Assemblaggio• Pick and place• Test di qualità• Asservimento macchine• Incollaggio e saldatura• Altri	<ul style="list-style-type: none">• Nord America• Europa• Asia Pacifica• America Latina• Medio Oriente e Africa

5.2.1 Carico Utile

Analizzando la segmentazione per capacità di carico, si prospetta che le versioni con un carico utile fino a 5 kg manterranno la loro predominanza nel mercato dei cobot durante il periodo di previsione.

Questi robot collaborativi si contraddistinguono per la loro versatilità e la capacità di adattarsi a una vasta gamma di compiti. Eccellono, in particolare, in applicazioni come l'assemblaggio, le operazioni di prelievo e posizionamento, l'imballaggio e la movimentazione di piccole parti. La loro utilità diffusa abbraccia diversi settori, tra cui l'elettronica, l'industria automobilistica, il settore dei beni di consumo e quello farmaceutico, dove la richiesta di precisione e competenza risulta essere fondamentale.

Parallelamente, si prevede che le versioni con una capacità di carico maggiore saranno oggetto di sviluppo continuo e crescita nel mercato dei cobot.

5.2.2 Settore e applicazioni

Il settore automobilistico eserciterà un'influenza dominante sul mercato dei robot collaborativi nel periodo di previsione. All'interno di questo settore, tali robot troveranno un'ampia gamma di

applicazioni, coprendo attività che spaziano dalla catena di montaggio alla movimentazione dei materiali, dalla logistica al controllo e all'ispezione della qualità, dalla verniciatura e finitura ai test e alla convalida.

In particolare, nell'ambito delle catene di montaggio automobilistiche, i cobot sono progettati per svolgere diverse funzioni cruciali, tra cui l'inserimento di componenti, la fissazione di viti, operazioni di saldatura e valutazioni del controllo qualità. La loro stretta collaborazione con gli operatori umani rappresenta un sostegno fondamentale per attività di assemblaggio ripetitive e precise, contribuendo così a migliorare l'efficienza, ridurre gli errori e incrementare complessivamente la sicurezza dei lavoratori. Inoltre, i cobot rivestono un ruolo essenziale in operazioni come l'assemblaggio del motore, la composizione di componenti interni ed esterni, e l'installazione di sistemi elettrici. Pertanto, ci si attende che la crescente richiesta di cobot in varie applicazioni dell'industria automobilistica determinerà una notevole crescita dei ricavi in questo segmento.

5.2.3 Area Geografica

È previsto che l'Europa giochi un ruolo dominante nel mercato dei robot collaborativi nel periodo di previsione. Negli ultimi anni l'industria europea ha sperimentato un notevole aumento dell'integrazione di robot collaborativi (cobot) in diversi settori, tra cui automotive, elettronica, manifatturiero, sanitario e logistico, contribuendo così all'espansione del mercato.

L'Europa, con nazioni chiave come Francia, Italia, Germania e Regno Unito, possiede settori manifatturieri molto sviluppati, con una particolare attenzione all'adozione anticipata dei cobot nell'industria automobilistica.

La presenza di una solida base industriale e un impegno costante per l'innovazione hanno favorito l'adozione e l'espansione dei cobot nella regione.

In Europa inoltre, l'attenzione prioritaria agli standard di sicurezza è evidente ed i cobot, appositamente progettati per operare insieme ai dipendenti umani, contribuiscono a garantire un ambiente industriale sicuro e protetto rispettando tutte le recenti normative.

Si prevede anche che l'area Asia-Pacific (Giappone, Cina, India, Malesia, Indonesia, Corea del Sud), registrerà una crescita molto rapida nel periodo di previsione. Grazie agli sforzi dei governi regionali, i robot collaborativi hanno ottenuto un riconoscimento significativo per il loro ruolo nel guidare la crescita industriale e migliorare la competitività. Sono state adottate diverse iniziative, politiche e meccanismi di sostegno finanziario per promuovere l'adozione e lo sviluppo della robotica collaborativa, mirando a stimolare l'innovazione, rafforzare le capacità produttive e creare condizioni favorevoli per l'adozione delle tecnologie di automazione.

Ulteriori fattori, come l'aumento del costo del lavoro, l'invecchiamento della popolazione e il cambiamento demografico in paesi come Cina e Giappone, hanno contribuito a stimolare la domanda di soluzioni di automazione, con un'enfasi specifica sui robot collaborativi.

I cobot rappresentano un'alternativa economicamente vantaggiosa al lavoro manuale, consentendo alle aziende di migliorare l'efficienza operativa, ridurre la dipendenza da compiti ad alta intensità di manodopera e affrontare in modo efficace le sfide legate alla forza lavoro.

5.3 Attori del mercato

Il mercato è caratterizzato da una competizione robusta, con operatori consolidati che basano la propria crescita dei ricavi su tecnologie avanzate, prodotti di elevata qualità e una solida immagine del marchio. Queste aziende adottano diverse strategie, tra cui ricerca e sviluppo, fusioni e acquisizioni, e innovazioni tecnologiche per ampliare il loro assortimento di prodotti e mantenere un vantaggio competitivo nel mercato.

Tra i principali attori che operano a livello globale troviamo:

- ABB Group
- DENSO Robotics
- Energid Technologies Corporation
- EPSON Robots
- F&P Robotics AG
- FANUC
- KUKA AG
- MRK-Systeme GmbH
- Robert Bosch GmbH
- Universal Robots A/S
- Yaskawa Electric Corporation

5.4 Sviluppo prodotto – tendenze future

Le tecnologie e le soluzioni legate a una maggiore intelligenza, che includono intelligenza artificiale e visione artificiale, stanno guadagnando sempre più spazio tra i produttori di robot collaborativi e stanno gradualmente iniziando a influenzare le decisioni di acquisto dei clienti. I fornitori di robot collaborativi desiderano espandere ulteriormente gli scenari di applicazione e stanno cercando modi per aumentare le capacità percettive e la flessibilità delle loro macchine.

C'è una crescente richiesta di ampliare le linee di prodotti dei robot collaborativi per gestire una maggiore capacità di carico, in parte dalle esigenze di applicazioni reali come pallettizzazione o saldatura, e anche al fine di trovare spazio incrementale di crescita nel mercato. Di fronte alla competizione inevitabile da parte dei robot SCARA (acronimo di Selective Compliance Assembly Robot Arm, sono robot che lavorano su 4 assi e 4 gradi di libertà, noti per la loro velocità e ripetibilità e particolarmente indicati per montaggi in serie e pick and place) e dei piccoli robot a sei assi ad alta velocità nel settore delle piccole capacità di carico, molti fornitori di cobot hanno iniziato a sfruttare la

facile implementazione, la leggerezza e l'alta convenienza per sviluppare modelli con capacità di carico superiore a 10 kg.

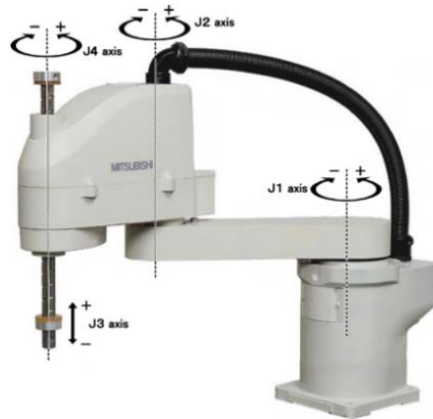
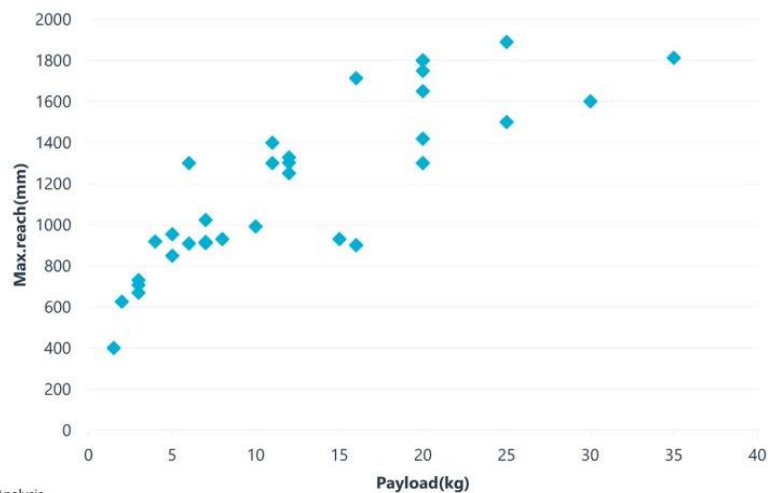


Figura 5.3: esempio di robot SCARA, con rappresentazione degli assi.

Il grafico sottostante, realizzato dagli analisti di Interact Analysis (sito specializzato in ricerca ed analisi di mercato, con particolare focus sulle nuove tecnologie), presenta la capacità di carico e la lunghezza del braccio dei modelli di robot collaborativo lanciati dal 2022 al 2023, ed evidenzia la chiara tendenza verso una maggiore capacità di carico e una maggiore lunghezza del braccio.



Source: Interact Analysis

© Interact Analysis 2023

Figura 5.4: Analisi dei parametri di capacità di carico ed lunghezza del braccio, nei cobot sviluppati nel periodo 2022-2023

Tra le esigenze del mercato, è importante menzionare la necessità dei clienti di poter condurre uno sviluppo software e hardware secondario, per poter implementare soluzioni personalizzate ed efficaci

all'interno delle proprie catene produttive, che si possano integrare in modo intelligente con i processi e gli strumenti già in uso. A tal proposito la maggior parte dei principali produttori di robot collaborativi fornisce e investe molte risorse nei Robot Development Kit (RDK), avanzate piattaforme di programmazione con interfaccia intuitiva e facilmente utilizzabile, per consentire agli integratori di sistema o ai clienti stessi di poter modificare in base alle proprie esigenze le funzionalità del cobot.



Figura 5.5: Un operatore direttamente coinvolto nell'attività di programmazione del cobot

5.5 Conclusioni dell'analisi di mercato

In sintesi, il mercato globale dei robot collaborativi sta attraversando una fase di cambiamento e crescita, evidenziando una prospettiva positiva per il futuro.

Si prevede che la crescita nelle vendite si manterrà costante nei prossimi anni, con una evoluzione di prodotto mirata ad ottenere cobot più intelligenti e capaci di gestire carichi più pesanti.

Mentre le applicazioni logistiche guidano attualmente il mercato, si anticipa una crescita significativa in settori non industriali e in ambiti come la saldatura.

Guardando al futuro, i produttori di cobot dovranno rimanere attenti alle esigenze dei clienti, sviluppando nuovi scenari di applicazione e collaborando con i distributori per estendere le reti di vendita.

Rispetto alle proiezioni finanziarie, si prevede che il mercato raggiungerà un valore di 2.135,07 milioni di dollari entro il 2024, con una crescita stimata fino a 20.258,74 milioni di dollari entro il 2032. Queste previsioni indicano un notevole potenziale di espansione e opportunità nel settore dei robot collaborativi nei prossimi anni.

CAPITOLO 6 - FOCUS SULL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE APPLICATA ALLA PRODUZIONE

L'Intelligenza Artificiale (AI) non è una novità nel mondo tecnologico, bensì un concetto discusso da decenni, con prospettive ottimistiche ma allo stesso tempo distopiche. Tuttavia, con l'avvento di tecnologie come ChatGPT, il futuro dell'AI sembra essere diventato una realtà palpabile, suscitando un interesse senza precedenti.

L'accelerazione dell'elaborazione informatica negli ultimi anni ha fornito la potenza di calcolo necessaria per gestire vasti quantitativi di dati, aprendo la strada a una rivoluzione nell'ambito dell'AI. Un esempio tangibile è rappresentato da ChatGPT, un chatbot all'avanguardia che sta trasformando il modo in cui comunichiamo e otteniamo informazioni su Internet.

Questo progresso tecnologico ha un impatto significativo non solo nei settori dell'informazione e della comunicazione ma anche nell'automazione industriale. L'AI sta già influenzando la produzione in modi innovativi, facilitando l'automazione di compiti complessi anche in ambienti non strutturati.

Di seguito, esaminiamo quattro esempi concreti di come l'AI sta contribuendo all'automazione industriale:

Percezione simile a quella umana:

La tecnologia '4D Vision' di Apera AI offre ai robot collaborativi una "percezione simile a quella umana". Utilizzando scanner e telecamere, questa tecnologia identifica gli oggetti manipolabili, consentendo ai robot di pianificare percorsi efficienti e sicuri.

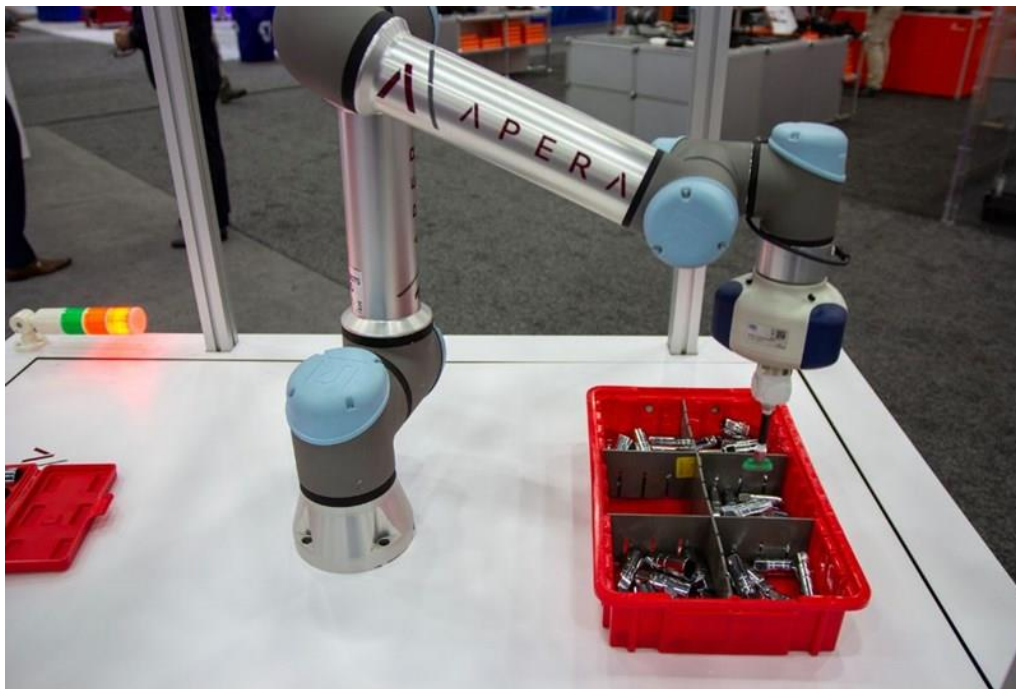


Figura 6.1: Cobot della Universal Robots integrato con il sistema '4D Vision' di Apera AI per il riconoscimento e la manipolazione di oggetti

Gestione delle variazioni senza insegnamenti preliminari:

Il kit *robobrain.vision* di Robominds, basato su telecamere e AI, consente ai robot di raccogliere oggetti diversi senza richiedere insegnamenti o programmazioni preliminari, garantendo maggiore flessibilità.

Movimentazione precisa delle parti:

Tecnologie come MIRAI di Micropsi Industries e Inbrain di Inbolt utilizzano l'AI per gestire variazioni nella posizione, forma o movimento delle parti, permettendo ai robot di eseguire attività complesse come assemblaggio, presa, avvitamento e test.



Figura 6.2: tecnologia MIRAI implementata su cobot UR, in una applicazione di pick&place con riconoscimento dei componenti

Miglioramento continuo:

Un vantaggio cruciale dell'AI nell'automazione industriale è il suo continuo miglioramento automatico. Con il tempo, l'algoritmo sottostante ottimizza le prestazioni del robot in base ai dati raccolti durante l'utilizzo, offrendo un livello di apprendimento automatico che continua a perfezionare la soluzione di automazione.

In conclusione, l'AI sta già rivoluzionando l'automazione industriale, offrendo flessibilità, semplicità, miglioramento continuo e impatti positivi sulla qualità e l'affidabilità. Mentre sperimentiamo gli attuali sviluppi, il potenziale completo dell'AI nel settore industriale è ancora da scoprire, promettendo un futuro ancor più innovativo.

CAPITOLO 7 - IL RUOLO DEI COBOT A FAVORE DELLA SOSTENIBILITÀ

7.1 Agenda ONU 2030

L'Agenda 2030 dell'ONU, adottata il 25 settembre 2015 da 193 paesi, tra cui l'Italia, rappresenta un piano d'azione ambizioso volto a promuovere lo sviluppo sostenibile per le persone, il pianeta e la prosperità. Definendo 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs – Sustainable Development Goals) e 169 Target, l'Agenda offre una guida chiara per orientare l'Italia e il mondo verso un futuro sostenibile entro il 2030. Al centro di questo approccio è l'idea innovativa di valutare il progresso attraverso oltre 240 indicatori, monitorando attentamente il cambiamento del modello di sviluppo nei settori ambientale, economico e sociale.



Figura 7.1: elenco dei 17 obiettivi fissati dall'Agenda 2030 ONU

Un elemento distintivo dell'Agenda 2030 è il riconoscimento dell'insostenibilità dell'attuale modello di sviluppo su più fronti, non limitandosi solo all'ambiente, ma estendendosi anche agli aspetti economici e sociali. Questo segna una svolta fondamentale, abbracciando una visione integrata dello sviluppo che supera l'idea convenzionale della sostenibilità come questione puramente ambientale.

L'Agenda 2030 si basa su cinque principi fondamentali noti come le "cinque P" dello sviluppo sostenibile. In primo luogo, si concentra sulle Persone, mirando a eliminare fame e povertà in tutte le sue forme, garantendo dignità e uguaglianza. In secondo luogo, cerca di promuovere la Prosperità, cercando di garantire vite prospere e appaganti in armonia con la natura. Il terzo principio riguarda la

Pace, con l'obiettivo di promuovere società pacifiche, giuste e inclusive. La quarta "P" sottolinea l'importanza della Partnership, incoraggiando solide collaborazioni per implementare l'Agenda. Infine, la quinta "P" è dedicata al Pianeta, evidenziando la necessità di proteggere le risorse naturali e il clima per le generazioni future. In sintesi, l'Agenda 2030 rappresenta un impegno globale per un cambiamento significativo, spostando l'attenzione su un approccio integrato per uno sviluppo sostenibile e armonioso.

7.1.2 Contributo dei cobot all'Agenda 2030

L'impegno per raggiungere gli ambiziosi obiettivi dell'Agenda 2030 richiede la collaborazione e lo sforzo congiunto di tutti. In questo contesto, la robotica collaborativa emerge come una forza attiva che contribuisce in modo significativo a percorrere questa strada verso la sostenibilità. Esploriamo di seguito i contributi specifici che la robotica collaborativa apporta a questo impegno, focalizzandoci sugli obiettivi direttamente coinvolti in questa evoluzione.

7.1.2.1 Cobot per la sanità – SDG3

Il settore sanitario, pur essendo stato riconosciuto come promettente per l'automazione robotica già da circa cinquant'anni, ha sperimentato una lenta adozione di robot in ambienti ospedalieri e centri medici. Nonostante la chirurgia continui a rappresentare un ambito di notevole interesse, i robot collaborativi, stanno manifestando le loro potenzialità in diverse applicazioni mediche e assistenziali. Questo contributo non può essere sottovalutato, soprattutto considerando come tali dispositivi giochino un ruolo fondamentale nel perseguimento dell'Obiettivo 3 dell'Agenda ONU 2030: Salute e benessere.

Il settore medico si presenta come un terreno fertile per l'implementazione della robotica collaborativa, che affiancata dall'intelligenza artificiale riesce a dare un importantissimo valore aggiunto.

Le applicazioni dei cobot nel campo della medicina sono variegata e avanzate, spaziando dalla chirurgia al monitoraggio delle condizioni dermatologiche e alla fisioterapia. La presenza di questi robot non solo agevola il recupero da infortuni, ma monitora attentamente l'evoluzione dei pazienti nel tempo.

Al di là delle aspettative comuni, già esistono robot in grado di eseguire prelievi del sangue con estrema delicatezza, sfruttando sensori e laser di precisione. Inoltre, l'innovazione si estende anche ai carrelli degli infermieri autonomi, capaci di muoversi autonomamente nei corridoi per trasportare materiali sanitari quando richiesto.

Queste applicazioni, seppur possano apparire futuristiche, sono già una realtà, dimostrando come i cobot non solo migliorino processi e procedure mediche esistenti, ma contribuiscano in modo concreto al progresso nel campo della salute e del benessere.

Universal Robots, ha trovato applicazioni significative nel settore medico-industriale. Presso Tegra Medical, tre cobot UR sono stati impiegati per sostituire operatori umani nel delicato compito di caricare macchine produttrici di sistemi vascolari, dimostrando efficacia nell'asservimento macchine.

Ad Aurolab, importante azienda indiana del settore medicale, i bracci antropomorfi UR sono stati adottati per la manipolazione di componenti essenziali nei kit per operazioni alle cataratte, evidenziando la versatilità dei robot collaborativi.

Anche in Italia, l'Istituto di BioRobotica della Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa ha fatto un passo avanti nell'innovazione sanitaria integrando un cobot UR5. Utilizzato per test di funzionamento su sonde ecografiche prodotte da ESAOTE, importante azienda nel settore biomedicale, il cobot ha mostrato precisione e affidabilità notevolmente superiori rispetto all'applicazione manuale, accelerando i processi di controllo qualità.

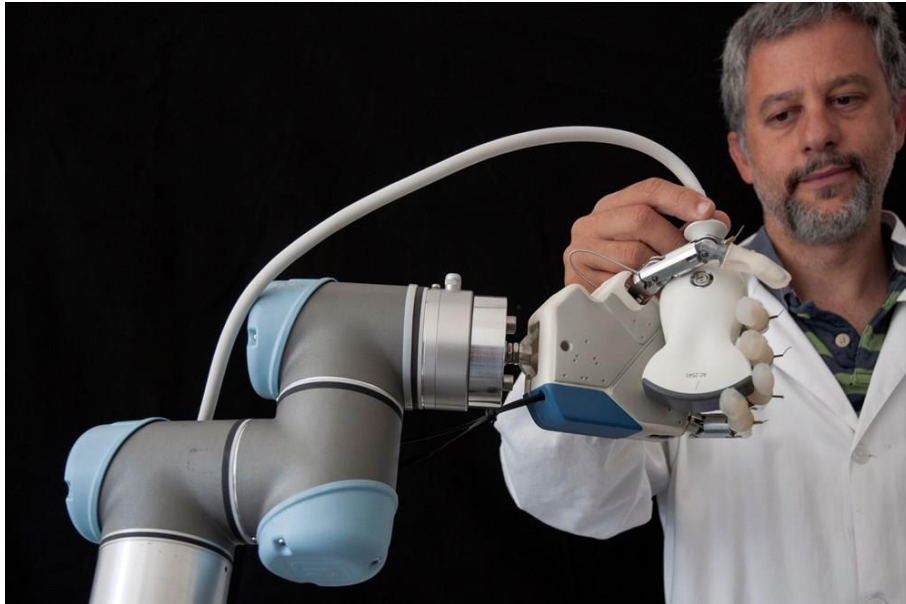


Figura 7.2: Cobot UR5 durante il controllo qualità su una sonda ecografica di ESAOTE

Anche i robot a guida autonoma stanno facendo il loro ingresso nel settore sanitario. Presso l'Argon Medical Device negli Stati Uniti, un MiR200 ha ottimizzato il trasporto di materiali nelle camere bianche ISO 8, riducendo notevolmente i tempi impiegati dai medici nell'indossare e togliere dispositivi di protezione e contribuendo a un risparmio tangibile.

In Danimarca, l'Ospedale universitario Zealand ha adottato un approccio innovativo all'automazione della logistica interna, integrando un MiR100 per il trasporto di strumenti sterilizzati, transitando per i corridoi a fianco del personale ospedaliero. Questa implementazione ha consentito di eliminare inefficienze, code e accumuli nei processi di movimentazione, dimostrando come i robot collaborativi possano diventare parte integrante dell'ambiente di lavoro.

I robot collaborativi stanno rivoluzionando il settore sanitario, offrendo soluzioni innovative che vanno oltre la chirurgia e coinvolgono anche la logistica interna negli ospedali. La loro adozione sta contribuendo a migliorare l'efficienza complessiva e a consentire al personale di dedicarsi a compiti più cruciali, promuovendo un ambiente sanitario più avanzato e centrato sul paziente.

7.1.2.2 Cobot e lavoro sostenibile – SDG 8

I robot collaborativi si pongono come fondamentali attori nella realizzazione dell'Obiettivo 8 dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite, incentrato su "una crescita economica duratura, inclusiva e sostenibile, un'occupazione piena e produttiva ed un lavoro dignitoso per tutti". Attraverso l'applicazione di tecnologie avanzate, come l'intelligenza artificiale coadiuvata da sensoristica smart, i cobot favoriscono il raggiungimento del Target 8.8, orientato a "proteggere il diritto al lavoro e promuovere un ambiente lavorativo sano e sicuro per tutti i lavoratori".

La loro presenza in operazioni rischiose, usuranti e altamente ripetitive rappresenta una risposta efficace alle sfide legate alla sicurezza sul lavoro. In contesti come catene di montaggio o produzione, i cobot semplificano il lavoro umano, gestendo attività ripetitive e usuranti come la palletizzazione e la movimentazione di materiali pesanti. Nei settori come l'elettronica di precisione, i cobot eseguono microsaldature con precisione, alleviando gli operatori umani da compiti che richiedono estrema precisione e forza fisica.

Oltre a migliorare la sicurezza, i cobot contribuiscono a creare posti di lavoro più sostenibili e inclusivi. A differenza delle precedenti ondate di automazione che sacrificavano posti di lavoro, i cobot sono progettati per supportare l'uomo anziché sostituirlo. La flessibilità e la facilità d'uso dei cobot li rendono strumenti versatili, adattabili a diverse applicazioni e settori industriali, favorendo la creazione di posti di lavoro in armonia con gli obiettivi chiave dell'Agenda 2030.



Figura 7.3: Cobot impiegato in attività di fisioterapia, per il trattamento diretto sul paziente

Un aspetto cruciale è infatti la capacità dei cobot di migliorare le condizioni di lavoro degli addetti, rendendo i processi più ergonomici, sicuri e meno faticosi. Gli operatori delle aziende robotizzate con i cobot sviluppano competenze di programmazione e gestione delle automazioni, trasformando le loro condizioni lavorative e aprendo opportunità per lavorazioni a più elevato valore aggiunto. I cobot, quindi, emergono come veicoli di sostenibilità culturale, inserendo nuove conoscenze nei luoghi di produzione e contribuendo al miglioramento complessivo delle condizioni lavorative.

Secondo quanto dichiarato sul proprio sito web, l'azienda Universal Robots ha evidenziato che l'adozione dei cobot non solo favorisce un aumento della produttività e nuove assunzioni dirette, ma ha anche un impatto positivo su tutto l'indotto. La collaborazione con oltre 400 aziende nella distribuzione dei cobot, come riportato da UR, ha generato migliaia di nuovi posti di lavoro e ha contribuito a consolidare competenze preziose all'interno del settore.

7.1.2.3 Cobot per infrastrutture resilienti ed innovative – SDG 9

La direzione intrapresa dai produttori di cobot è quella verso un futuro sempre più digitalizzato ed accessibile, mirando a sviluppare tecnologie sempre più adatte a contesti di produzione diversificati, dai settori dell'elettronica e dell'automotive alla logistica, all'assistenza sanitaria e alla vendita al dettaglio.

L'Agenda 2030 sottolinea la necessità di costruire un'infrastruttura resiliente, promuovere l'innovazione e raggiungere un'industrializzazione equa e sostenibile (Obiettivo 9). I cobot si inseriscono in questo contesto, favorendo investimenti in infrastrutture e tecnologie, contribuendo così allo sviluppo economico e alla creazione di nuove opportunità di lavoro.

L'approccio verso le tecnologie come i cobot deve essere guidato dalla consapevolezza che la trasformazione digitale può migliorare le condizioni umane. Anche in paesi come Giappone e Corea del Sud, la collaborazione tra esseri umani e robot diventa cruciale a causa dell'invecchiamento della popolazione e della carenza di manodopera. In questo contesto, l'adozione di tecnologie come i cobot può essere vista come un passo avanti per migliorare le condizioni lavorative e affrontare le sfide demografiche.

La sostenibilità digitale quindi non è solo uno strumento, ma diventa parte integrante del sistema, generando un impatto sistemico positivo sull'ambiente, sull'economia e sulla società. I cobot emergono come attori chiave per contribuire a un futuro sostenibile, con una visione che abbraccia la sicurezza sul lavoro, la flessibilità industriale e l'innovazione tecnologica.

7.1.2.4 Produzione sostenibile e sostenibilità ambientale – SDG12 e SDG13

L'ampio impiego dei robot collaborativi (cobot) costituisce una svolta cruciale verso la sostenibilità, contribuendo in modo significativo al raggiungimento degli Obiettivi 12 e 13 dell'Agenda ONU 2030. La notevole efficienza energetica dei cobot emerge come elemento chiave nella riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di CO₂, allineandosi con l'Obiettivo 12 che promuove modelli di produzione e consumo sostenibili.

La capacità dei cobot di operare in maniera efficiente, soprattutto quando associati a fonti di energia rinnovabile, si traduce in una riduzione tangibile dell'impatto ambientale, consolidando così il loro ruolo nella lotta contro il cambiamento climatico, Obiettivo 13 dell'Agenda 2030.

Nel contesto industriale, l'elevata precisione dei cobot si rivela particolarmente vantaggiosa in operazioni delicate come la saldatura e nell'ambito dell'elettronica. Questa straordinaria precisione non solo contribuisce a ridurre gli sprechi, ottimizzando l'utilizzo delle risorse disponibili, ma favorisce anche una produzione più efficiente e sostenibile.

I cobot introducono una maggiore costanza, qualità e ripetibilità nelle lavorazioni, garantendo standard di prodotto uniformi e riducendo significativamente la produzione di pezzi difettosi, con conseguente diminuzione degli scarti e un impatto positivo sull'ecosistema produttivo complessivo.

Nel settore agricolo, l'impiego dei cobot e della robotica in generale, consente l'eliminazione di prodotti nocivi per l'ambiente, come disinfestanti ed erbicidi, sostituendoli con azioni mirate e sostenibili. Questa transizione non solo preserva l'ecosistema, ma promuove anche un'agricoltura più responsabile e rispettosa dell'ambiente.

Inoltre, l'automazione fornita dai cobot riduce la dipendenza da manodopera per attività ripetitive, facilitando la localizzazione di tali attività vicino ai centri di consumo. Questo permette di accorciare le filiere produttive, diminuendo la necessità di trasporti su lunghe distanze e, di conseguenza, riducendo il consumo di carburanti e le emissioni associate.

7.2 Focus su automazione del packaging e sostenibilità ambientale

7.2.1 Che cos'è il packaging e perché è importante per le aziende

Il packaging rappresenta una componente fondamentale per le aziende in diversi settori, svolgendo un ruolo cruciale nel successo di un prodotto. Oltre alla sua funzione primaria di confezione esterna per contenere e proteggere un articolo, il packaging assume una rilevanza strategica come strumento di marketing, comunicazione del marchio e veicolo di informazioni dettagliate sul prodotto. Inoltre, la sua progettazione accurata contribuisce alla praticità per i consumatori, all'esperienza utente, e, sempre più importante, all'adesione a pratiche sostenibili.

7.2.2 Ruolo del packaging

Protezione del prodotto: Il packaging ben progettato e resistente è fondamentale per prevenire danni durante il trasporto e la distribuzione, garantendo che il prodotto raggiunga i consumatori in condizioni ottimali.

Praticità per i consumatori: Un packaging studiato attentamente facilita l'apertura e l'utilizzo del prodotto, contribuendo all'esperienza positiva del consumatore e influenzando le decisioni d'acquisto.

Comunicazione del marchio: Il design, i colori e i materiali utilizzati trasmettono un messaggio specifico, creando un'immagine di marca riconoscibile e costruendo un legame emotivo con i consumatori.

Fornitura di informazioni: Il packaging fornisce informazioni dettagliate sul prodotto, come ingredienti, istruzioni per l'uso e avvertenze, influenzando la fiducia del consumatore e la percezione della qualità.

Sostenibilità: L'attenzione alla sostenibilità attraverso l'uso di materiali riciclabili, riduzione degli imballaggi e soluzioni eco-friendly è diventata un elemento distintivo per le aziende.

7.2.3 Limitazioni del packaging manuale

L'esecuzione manuale delle operazioni di packaging presenta diverse limitazioni e problemi che possono influire sulla qualità del processo e sulle prestazioni complessive dell'azienda, tra cui:

Inefficienza: L'esecuzione manuale richiede tempo e risorse umane significative, con compiti ripetitivi e potenziali errori umani che portano a ritardi nella produzione.

Costi elevati: Gli elevati costi associati all'utilizzo di manodopera manuale, inclusi formazione, attrezzature e gestione dei rifiuti, incidono negativamente sulla redditività.

Inconsistenze nella qualità: Errori umani possono causare inconsistenze nella qualità del prodotto finale, influenzando presentazione e integrità durante distribuzione e trasporto.

Limitata scalabilità: L'esecuzione manuale può essere limitata nella sua capacità di scalare la produzione in base alla domanda, portando a problemi di gestione delle risorse umane e complessità operativa.

Sicurezza e salute dei lavoratori: Il lavoro manuale comporta rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori, richiedendo adeguate misure di sicurezza e formazione.



Figura 7.4: Operai durante le attività di inscatolamento manuale

7.2.4 Automazione del packaging con i cobot

L'automazione del packaging con i cobot offre una serie di vantaggi significativi per le aziende, superando le limitazioni associate all'esecuzione manuale. Di seguito ne sono elencati i principali.

Aumento dell'efficienza e della produttività: I cobot eseguono attività di packaging più rapidamente ed efficientemente rispetto all'esecuzione manuale, lavorando 24 ore su 24 e riducendo i tempi di consegna.

Riduzione degli errori e miglioramento della qualità: I cobot eseguono attività in modo accurato e coerente, riducendo errori umani e migliorando la qualità dei prodotti.

Sicurezza dei lavoratori: Dotati di avanzati sistemi di sicurezza, i cobot offrono un ambiente di lavoro sicuro, rilevando la presenza umana e riducendo il rischio di collisioni o lesioni.

Flessibilità e adattabilità: I cobot possono essere facilmente programmati per svolgere diverse attività di packaging, adattandosi a diversi formati di prodotti e confezioni.

Riduzione dei costi: L'investimento iniziale è più contenuto rispetto alle soluzioni tradizionali, con un rapido ritorno dell'investimento e riduzione dei costi operativi a lungo termine.

Miglioramento dell'immagine aziendale: L'adozione di tecnologie innovative dimostra l'impegno per l'efficienza, la qualità e la sostenibilità, migliorando l'immagine aziendale e creando un vantaggio competitivo.



Figura7.5: Collaborazione tra operatore e 3 cobot, per attività di etichettatura e inscatolamento nel settore alimentare

7.2.5 Tipologie di cobot impiegati nel packaging

Nel settore del packaging, diverse tipologie di cobot possono essere impiegate per automatizzare le attività di imballaggio. La selezione del giusto cobot dipende dalle esigenze specifiche dell'azienda, dal tipo di prodotto da imballare e dai requisiti del processo di packaging.

Robot a braccio singolo: Versatili, adatti per aziende che richiedono flessibilità nel packaging di prodotti diversi.

Robot a doppio braccio: Ideali per operazioni complesse che richiedono manipolazione precisa e coordinata, come l'assemblaggio di prodotti o la confezionatura personalizzata.

Robot mobili: Dotati di movimentazione autonoma, offrono flessibilità nel movimento dei prodotti all'interno dell'area di confezionamento.

Robot con sensori di forza/coppia: Dotati di sensori per interagire con oggetti e operatori in modo sicuro, ideali per operazioni di imballaggio che richiedono delicatezza o precisione.

7.2.6 Fattori di selezione del cobot

Carico di lavoro: Valutare la capacità di carico del cobot in relazione al peso e alle dimensioni dei prodotti da imballare.

Spazio di lavoro: Considerare le dimensioni dell'area di lavoro e la portata del braccio del robot.

Sicurezza: Assicurarsi che il cobot abbia sistemi di sicurezza adeguati, come sensori di collisione, per garantire la sicurezza degli operatori.

Programmazione e facilità d'uso: Valutare la facilità di programmazione e l'interfaccia utente del cobot per ridurre tempi di configurazione e formazione.

Flessibilità e adattabilità: Verificare la flessibilità del cobot nell'adattarsi a diversi prodotti, formati e attività di imballaggio.

Supporto e assistenza: Considerare la disponibilità di supporto tecnico e assistenza post-vendita da parte del fornitore del cobot.

7.2.7 Implementazione dei cobot nel packaging: aspetti da considerare

L'implementazione dei cobot nel packaging offre notevoli vantaggi, ma richiede una pianificazione accurata e la considerazione di diversi aspetti.

Analisi dei processi: Prima dell'implementazione, analizzare i processi di imballaggio esistenti per identificare aree di miglioramento e dove l'automazione può apportare il maggior valore.

Scelta dei cobot adatti: Selezionare i cobot più adatti alle esigenze specifiche, considerando dimensioni dei prodotti, capacità di carico, velocità di esecuzione, flessibilità e sicurezza.

Sicurezza: Valutare i rischi e implementare misure di sicurezza appropriate, come barriere fisiche o sensori di collisione, per garantire la sicurezza degli operatori.

Integrazione con l'infrastruttura esistente: Verificare la compatibilità dei cobot con l'infrastruttura esistente, assicurandosi che possano lavorare in sinergia con altri componenti dell'ecosistema di produzione.

Monitoraggio e manutenzione: Implementare un sistema di monitoraggio per raccogliere dati sull'utilizzo dei cobot e pianificare regolari attività di manutenzione per garantire prestazioni ottimali.

7.2.8 Esempi di automazione del packaging con i cobot nel settore alimentare

La robotica collaborativa si sta dimostrando particolarmente efficace nel settore alimentare, rendendo i processi più snelli, efficienti e sostenibili.

Tra le principali applicazioni dei cobot in questo settore vi sono:

Conveyor Tracking: Integrazione con nastri trasportatori per il movimento efficiente dei prodotti in fase di confezionamento.

Pallettizzazione: Impiego dei cobot per la formazione di pallet, aumentando l'efficienza nella fase finale del packaging.

Tracciamento: Utilizzo di cobot per monitorare e registrare informazioni cruciali sui lotti in produzione, garantendo la tracciabilità.

Controllo Qualità: Applicazione di cobot per eseguire controlli qualità sui prodotti, riducendo errori e migliorando la coerenza.

7.2.9 Vantaggi nella produzione alimentare:

Di seguito sono elencati i principali vantaggi riscontrati nell'adozione di sistemi di robotica collaborativa nel settore della produzione alimentare, ma che sono altrettanto validi per la maggioranza dei settori produttivi.

Riduzione degli scarti: Grazie alla loro elevatissima precisione e ripetibilità, garantiscono una produzione efficiente che permette di ridurre al minimo gli scarti prodotti, andando ad eliminare la componente di errori umani

Semplicità e rapida integrazione: I cobot possono essere integrati con facilità nei processi esistenti, migliorando immediatamente l'efficienza.

Ingombro minimo del layout: La compattezza dei cobot consente un utilizzo efficiente dello spazio di lavoro.

Rapido ritorno d'investimento: L'investimento iniziale è contenuto, con un ritorno d'investimento veloce, che nella maggior parte dei casi è di appena un anno o poco più.

Flessibilità di riallestimento: I cobot possono essere rapidamente riprogrammati per adattarsi a diversi codici prodotto e configurazioni.

Sicurezza intrinseca: La sicurezza integrata riduce la necessità di barriere di recinzione, semplificando l'implementazione.

L'automazione del packaging con i cobot rappresenta una soluzione moderna e vantaggiosa per le aziende che cercano di migliorare l'efficienza, ridurre i costi e adottare pratiche sostenibili nel processo di imballaggio. L'impiego di cobot offre una flessibilità senza precedenti, consentendo alle aziende di affrontare le sfide del packaging in modo innovativo e competitivo.

7.3 Applicazioni sostenibili di successo della robotica collaborativa

Di seguito sono riportati due esempi di integrazione di successo della robotica collaborativa all'interno di due grandi aziende del settore alimentare, con i vantaggi ottenuti in termini di sostenibilità ed efficienza.

7.3.1 Case History: Atria Scandinavia

Atria Scandinavia, un'azienda alimentare svedese specializzata nella produzione di preparati gastronomici, si è trovata di fronte alla sfida di confezionare, etichettare e pallettizzare una vasta gamma di prodotti, tra cui olive, carciofini, pomodori secchi e aglio marinato. L'obiettivo principale era ridurre i tempi di produzione per garantire la freschezza dei prodotti e mantenere prezzi competitivi.

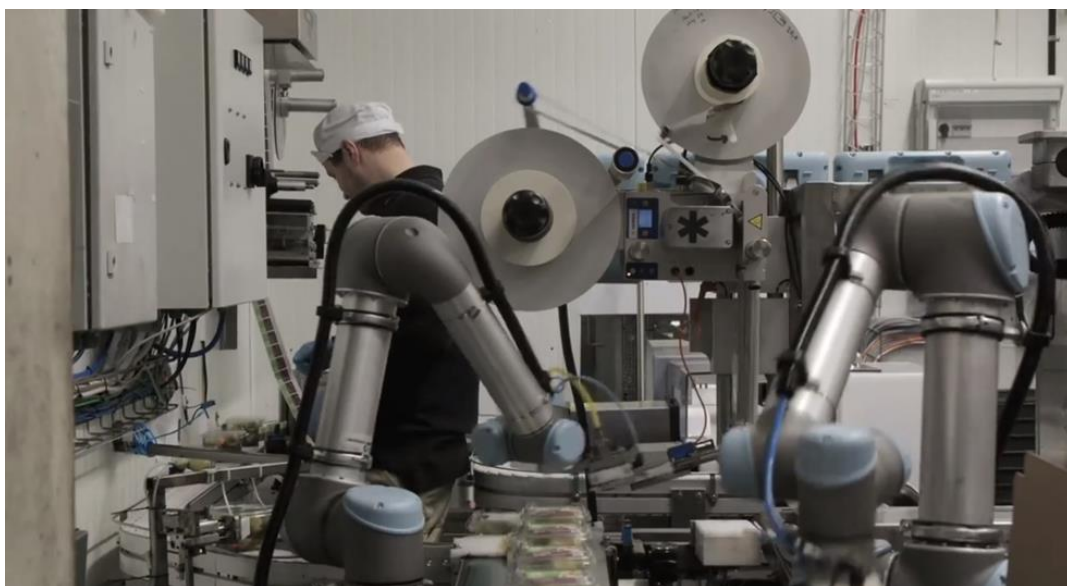


Figura7.4: Due cobot della Universal Robots, durante le attività di confezionamento e etichettatura presso la sede di Atria Scandinavia.

7.3.1.1 La sfida

Confezionare, etichettare e pallettizzare una varietà di prodotti alimentari ogni giorno.

Ridurre i tempi di produzione per garantire la freschezza dei prodotti.

7.3.1.2 La soluzione

Atria ha optato per l'implementazione di due cobot UR5 e un cobot UR10 in applicazioni collaborative.

Questi cobot lavorano fianco a fianco con gli operatori nella linea di packaging, gestendo una media di 228 unità prodotto per ora.

La scelta dei cobot Universal Robots ha reso la collaborazione tra operatori e robot sorprendentemente semplice.

7.3.1.3 I vantaggi

Ammortamento rapido: Il costo dei cobot è stato ammortizzato in meno di un anno, dimostrando la convenienza economica dell'investimento.

Riduzione degli sprechi: L'implementazione dei cobot ha portato a una riduzione del 25% degli sprechi di materiale nelle operazioni di imballaggio.

Maggiore produttività: La maggiore produttività ottenuta con l'uso dei cobot ha convinto il management a sostituire le automazioni tradizionali con i robot collaborativi Universal Robots.

L'automazione del packaging con i cobot ha consentito ad Atria Scandinavia di affrontare con successo le sfide della produzione alimentare, migliorando l'efficienza e la sostenibilità, riducendo gli sprechi e mantenendo la freschezza dei prodotti. La collaborazione tra operatori umani e cobot ha dimostrato di essere una soluzione vincente per ottimizzare i processi di imballaggio e garantire la competitività sul mercato globale.

7.3.2 Case History: Cascina Italia

Cascina Italia è un'azienda di rilievo nel settore alimentare, impegnato quotidianamente nella gestione di milioni di uova. La natura altamente competitiva del settore richiede una pronta capacità di risposta alle dinamiche del mercato. Per affrontare efficacemente questa sfida, è essenziale per Cascina Italia ottimizzare i propri processi interni al fine di liberare risorse umane.

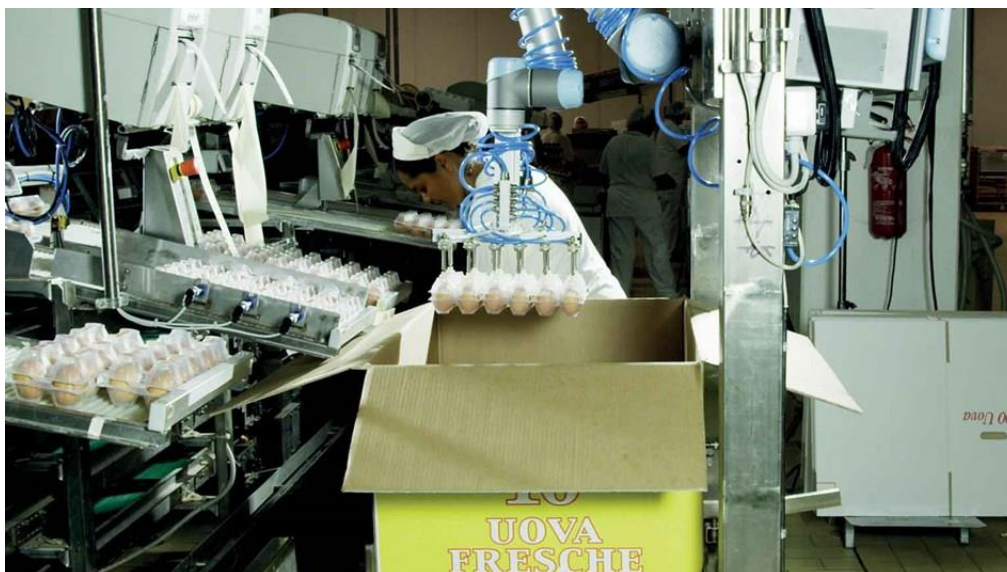


Figura 7.5: Il cobot UR5 durante l'attività di inscatolamento

7.3.2.1 I limiti delle soluzioni tradizionali

Le tradizionali soluzioni basate su robot industriali sono spesso onerose e richiedono ripetuti interventi da parte di programmatori e specialisti esterni per essere integrate in ambito produttivo. Inoltre, queste soluzioni richiedono spazi ampi e l'implementazione di misure di sicurezza, come barriere e protezioni, che possono impattare sul layout degli stabilimenti produttivi. Con uno spazio limitato per nuove attrezzature e la necessità di installare qualsiasi soluzione in prossimità del personale, Cascina Italia si trovava di fronte a una sfida significativa.

7.3.2.2 La soluzione collaborativa con Alumotion

Per superare tali sfide, Cascina Italia ha collaborato attivamente con Alumotion, azienda milanese specializzata nell'automazione industriale e non, per progettare una soluzione che prevedesse la robotica collaborativa da dedicare alla preparazione delle scatole nella linea produttiva destinata all'impianto di confezionamento. Un cobot UR5 della Universal Robots, con capacità di carico di 5 kg e raggio di lavoro di 850 mm, è stato installato con successo in una delle 24 unità produttive in uscita, gestendo una media di 1,5 milioni di uova al giorno.

Il ruolo dell'UR5 è quello di preparare le scatole contenenti 144 cartoni da 10 uova, sgravando gli operatori da un processo impegnativo e ripetitivo mediante l'applicazione di tecniche di Pick and Place, che sfruttano un intelligente sistema di ventose realizzato su misura per questo compito.

La dimensione compatta del robot ha consentito l'installazione diretta nella linea produttiva, senza la necessità di occupare nuovi spazi o di creare barriere di sicurezza costose, dopo un'attenta valutazione del rischio. Il robot opera quindi a stretto contatto con il personale aziendale, potenziando così la collaborazione uomo-macchina.

7.3.2.3 Risultati e vantaggi

L'integrazione dei bracci robotici di Universal Robots ha immediatamente fornito vantaggi tangibili a Cascina Italia. Le dimensioni compatte hanno evitato costose modifiche di layout, consentendo un utilizzo efficiente dello spazio. La liberazione di risorse umane da compiti ripetitivi ha permesso di impiegarle in mansioni più strategiche, contribuendo a una maggiore flessibilità e efficienza operativa complessiva. L'implementazione del robot UR5 ha infine portato a un significativo aumento della produttività e dell'operatività aziendale, e il tutto con consumi energetici molto bassi, considerando che la potenza assorbita durante le operazioni svolte varia tra i 150 e i 200 Watt, l'equivalente di un televisore a LED domestico di medie dimensioni.

SECONDA PARTE

INTRODUZIONE AGLI ESPERIMENTI

In ottica di fornire un contributo all'efficientamento dell'utilizzo dei robot collaborativi, ho condotto, presso il laboratorio Mind4Lab del Politecnico di Torino, due esperimenti mirati a valutare il consumo energetico di un cobot in diverse condizioni operative.

Ne esploreremo approfonditamente i risultati in questa sezione.

Il cobot impiegato in entrambi gli esperimenti è l'UR3 e-series, prodotto dalla Universal Robot. L'obiettivo principale è stato acquisire una comprensione dettagliata delle variabili chiave che influenzano il consumo energetico, focalizzandoci su posizioni di riposo, carichi applicati, accelerazioni e modalità di lavoro.

Nel primo esperimento, ho cercato una posizione di "riposo" ottimale per il cobot durante i periodi di attesa prolungati. Ho analizzato il consumo elettrico in diverse posizioni, sia a massima che a minima estensione, considerando vari carichi applicati. Le modalità di lavoro esaminate includono il periodo di attesa in modalità "idle" (con freni attivati e in stand by) e in modalità operativa, quando il cobot è pronto all'uso.

Nel secondo esperimento, ho esaminato attentamente l'incidenza di tre variabili chiave sul consumo energetico del cobot: accelerazione, carico applicato e modalità di lavoro. Le accelerazioni sono state esplorate in dettaglio, per verificare in particolare il trade-off tra il vantaggio portato da un minor tempo impiegato per l'esecuzione del programma all'aumentare di questa variabile e il maggiore sforzo richiesto in termini energetici. Ho valutato l'impatto dei carichi applicati in diverse configurazioni per comprendere meglio la relazione tra peso e consumo energetico. Infine, ho esaminato le differenze nei consumi tra le modalità di lavoro "move J" (movimenti arrotondati efficientati dal cobot) e "move L" (movimenti in linea retta), cercando di identificare le dinamiche operative che influenzano i consumi.

Per garantire la validità e l'affidabilità dei risultati, ho implementato una progettazione sperimentale accurata, regolando tutte le variabili in modo controllato. La metodologia utilizzata ha incluso la raccolta sistematica di dati in condizioni simili, il monitoraggio costante del cobot durante le diverse fasi degli esperimenti e l'uso di strumenti di misurazione avanzati per acquisire dati precisi. L'analisi dati è stata potenziata attraverso l'utilizzo di metodologie Design of Experiments (DOE) e del linguaggio di programmazione Python che fornisce strumenti come PyDOE e librerie specializzate come Pandas, Matplotlib, Seaborn, SciPy e Statsmodels.

CAPITOLO 1 - ESPERIMENTO 1

Come anticipato nell'introduzione, questo primo esperimento ha l'obiettivo di verificare quanto impattano sul consumo di energia elettrica le posizioni in cui il cobot viene lasciato in attesa tra una task e l'altra, per capire se ci sia una posizione ottimale che consente un maggior risparmio, in relazione al carico applicato.

1.1 Raccolta dati

I fattori considerati per questo esperimento sono:

- Peso applicato (0,1,2,3)
- Posizione (0,1)
- Modalità (0,1)

Nelle seguenti tabelle è indicato a cosa si riferiscono i vari livelli.

Peso applicato - livello	Kg
0	0
1	1
2	2
3	3

Posizione - livello	Estensione
1	Minima
2	Massima

Modalità - livello	
1	Idle - robot active (acceso ma freni non rilasciati)
2	Robot Operativo

L'output desiderato del nostro esperimento è rappresentato dal consumo energetico espresso in watt, di cui ho potuto ricavare i valori nelle varie prove direttamente dal teach pendant, che fornisce informazioni dettagliate sul consumo istantaneo del cobot.

Durante ciascuna prova, ho registrato sistematicamente i valori di consumo elettrico in watt in corrispondenza delle posizioni specifiche, sia a massima che a minima estensione, e nei diversi scenari di carico, oltre che nelle due modalità elencate sopra.



Figura 1.1: Cobot in posizione statica di minima estensione con carico applicato

L'uso del teach pendant come strumento primario di raccolta dati ha garantito una registrazione accurata e in tempo reale del consumo energetico. La strumentazione utilizzata è stata attentamente tarata per garantire la precisione delle misurazioni, consentendo una valutazione affidabile delle variazioni nei consumi in relazione alle diverse posizioni di riposo del cobot.

La procedura sperimentale è stata progettata con attenzione per garantire la ripetibilità e la coerenza dei risultati. Ogni prova è stata eseguita in condizioni controllate, regolando accuratamente i fattori chiave

come la posizione del cobot, i carichi applicati e le modalità operative. Questo approccio metodologico mira a isolare l'effetto specifico di ciascuna variabile sulla dinamica del consumo energetico.

Attraverso questa raccolta dati, ho cercato di fornire una base solida per l'analisi successiva, esplorando dettagliatamente come il cobot risponde ai periodi di attesa e come il consumo energetico varia in risposta a differenti configurazioni operative.

Prova n°	Posizione	Peso	Modalità	Output (W)
1	1	0	1	30
2	1	1	1	30
3	1	2	1	30,5
4	1	3	1	31
5	2	0	1	30
6	2	1	1	31
7	2	2	1	31
8	2	3	1	31,5
9	1	0	2	35
10	1	1	2	36
11	1	2	2	37
12	1	3	2	37,5
13	2	0	2	41
14	2	1	2	51
15	2	2	2	66
16	2	3	2	108

Tabella 1.1: dati di Output raccolti per l'esperimento 1, al variare di Modalità, Peso, Posizione.

Nei due grafici mostrati di seguito, è possibile osservare l'impatto del peso sul consumo energetico del cobot in due posizioni chiave: la posizione 1, corrispondente all'estensione minima del braccio robotico, e la posizione 2, rappresentante la massima estensione.

Nel primo grafico, relativo alla posizione 1, ho focalizzato l'attenzione su due modalità del cobot distinte: la modalità idle (in rosso), in cui il cobot è in uno stato di riposo con i motori "frenati" e la modalità operativa (in blu), in cui il cobot è pronto all'uso. In modalità idle, come previsto, il consumo varia in modo trascurabile al variare del peso applicato, poiché i motori sono essenzialmente fermi. Tuttavia, nella modalità operativa, si osserva chiaramente un aumento lineare del consumo all'aumentare del peso, rivelando un'immediata correlazione tra la massa applicata e l'energia consumata.

Nel secondo grafico, corrispondente alla posizione 2, ho ripetuto l'analisi, approfondendo ulteriormente l'effetto dell'estensione massima del braccio robotico. Anche in questa configurazione, la modalità idle (in rosso) mostra una lieve crescita del consumo con l'aumentare del carico, indicando una resistenza al movimento anche durante la fase di attesa. In modalità operativa (in blu), tuttavia, emerge in modo più evidente un aumento con andamento esponenziale del consumo energetico al crescere del peso, sottolineando l'importanza dell'effetto leva in questa posizione. Questi risultati delineano chiaramente l'interconnessione tra la geometria del cobot, il peso applicato e l'efficienza energetica, fornendo spunti significativi per ottimizzare i consumi durante le fasi di attesa tra le diverse attività del cobot.

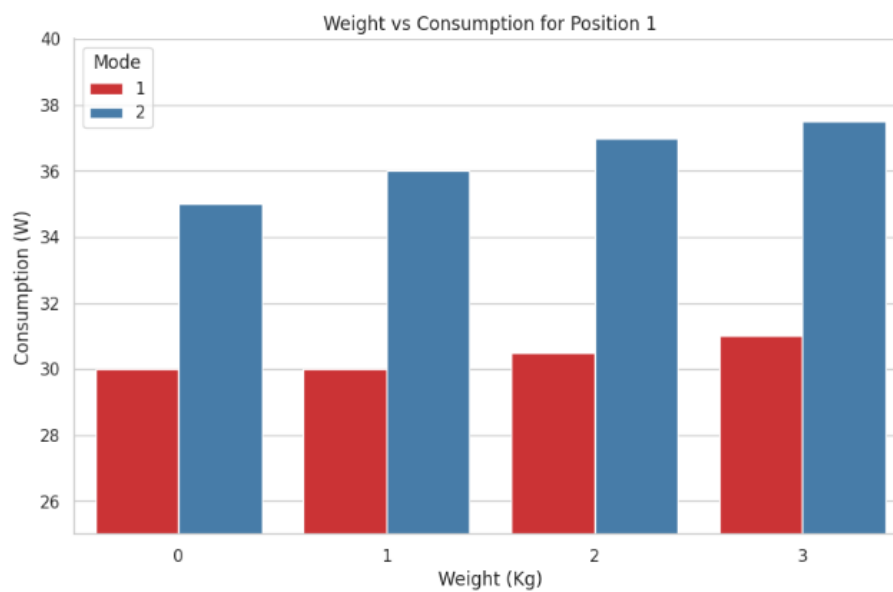


Figura 1.2: Impatto del peso sui consumi, nella posizione 1 (estensione minima).

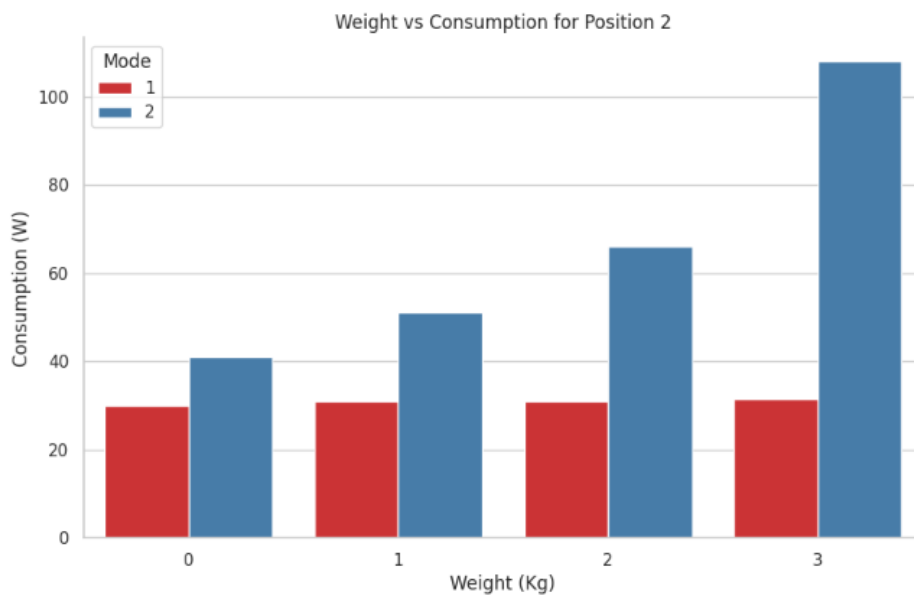


Figura 1.3: Impatto del peso sui consumi, nella posizione 2 (estensione massima)

Nel grafico sottostante, ho condotto un confronto dettagliato tra il consumo energetico registrato nella posizione 1 (con estensione minima, rappresentata in rosso) e nella posizione 2 (con estensione massima, rappresentata in blu) al variare dei carichi applicati, in modalità operativa (Mode 1). Da questa analisi emerge in modo inequivocabile l'impatto significativo della posizione sull'aumento del consumo energetico. È evidente che all'aumentare del carico applicato, la differenza nei consumi energetici tra le due posizioni si amplifica in modo sempre più pronunciato, e si osserva chiaramente il trend esponenziale nella posizione 2, attribuibile all'effetto leva.

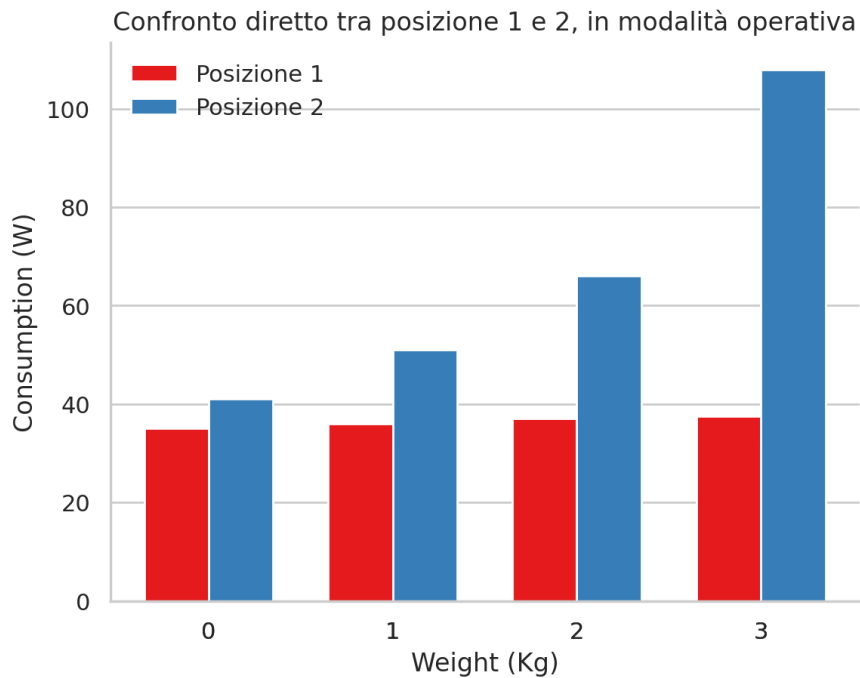


Figura 1.4: confronto tra posizione 1 e 2 in modalità operativa

1.2 Analisi dati

1.2.1 Strumenti per l'analisi dati

L'analisi dei dati riveste un ruolo cruciale nell'identificare relazioni e tendenze significative. Per affrontare questa fase, ho adottato il linguaggio di programmazione Python, noto per essere user-friendly e per la sua versatilità, sfruttando un insieme di librerie specializzate che ne hanno ampliato le capacità analitiche.

La libreria Pandas è stata una risorsa fondamentale nella manipolazione dei dati, semplificando operazioni di filtraggio e aggregazione. Grazie a questa libreria, ho potuto organizzare agevolmente le informazioni raccolte, agevolando l'individuazione di trend e pattern rilevanti.

Matplotlib, rinomata per la sua potenza nel trattare dati, è stata impiegata per la creazione di visualizzazioni grafiche di alta qualità, consentendo la generazione di grafici personalizzati che enfatizzano i dettagli più rilevanti.

L'integrazione di Seaborn, costruita su Matplotlib, ha aggiunto stile e precisione alle rappresentazioni visive, migliorando ulteriormente la comprensione dei dati attraverso una presentazione più accattivante.

La libreria SciPy è stata sfruttata per analisi statistiche avanzate e per l'esecuzione di test di significatività. Questo strumento ha contribuito a ottenere valutazioni quantitative più approfondite, fornendo una base solida per le decisioni derivate dai dati.

Inoltre, per pianificare e condurre gli esperimenti, ho fatto uso della libreria PyDOE, specializzata in Design of Experiments (DOE).

PyDOE ha permesso la creazione di disegni sperimentali efficienti, ottimizzando la raccolta di dati per una più robusta analisi.

Complessivamente, l'impiego congiunto di Python, Pandas, Matplotlib, Seaborn, SciPy e PyDOE, ha fornito un set completo di strumenti per un'analisi dati precisa, permettendo un'esplorazione dettagliata delle relazioni nei dati e una comunicazione chiara e accurata dei risultati ottenuti negli esperimenti.

1.2.2 Analisi multifattoriale

Procediamo ora all'Analisi multifattoriale utilizzando le metodologie del Design of Experiments (DOE). Per implementare in modo efficiente quest'analisi, sfruttiamo in particolar modo PyDOE, una libreria Python specializzata nella progettazione e analisi di esperimenti, oltre che le altre librerie citate precedentemente, tra cui Pandas, Matplotlib e SciPy.

PyDOE consente di creare in modo sistematico un set di condizioni sperimentali, noto come matrice dei piani sperimentali, che copre l'intera gamma delle variabili di interesse. Questo approccio strutturato offre un quadro dettagliato delle interazioni tra le variabili, consentendo una comprensione approfondita dei fattori che influenzano il consumo energetico.

In questo contesto, l'utilizzo sinergico di queste librerie specializzate si traduce in un approccio analitico completo, che va oltre la semplice descrizione dei dati e si spinge nell'identificazione di relazioni sottili tra i fattori considerati. Proseguiamo ora con l'analisi ANOVA e la Regressione lineare con metodo dei minimi quadrati per esplorare ulteriormente le dinamiche sottostanti ai consumi energetici in diverse condizioni sperimentali.

1.2.3 ANOVA

L'Analisi della Varianza (ANOVA) è uno strumento potente per esplorare le relazioni tra le variabili indipendenti (carico e modalità) e la variabile dipendente (consumo energetico). Questo ci consente di identificare influenze significative, verificare l'effetto delle diverse condizioni e comprendere meglio la complessità delle relazioni in gioco.

Quelli seguenti sono i risultati relativi all'ANOVA ottenuti tramite Python.

```
ANOVA per Posizione:
      sum_sq    df      F    PR(>F)
C(pos)  937.890625  1.0  2.511161  0.135365
Residual 5228.843750 14.0      NaN      NaN

ANOVA per Peso:
      sum_sq    df      F    PR(>F)
C(weight) 744.046875  3.0  0.54884  0.658394
Residual 5422.687500 12.0      NaN      NaN

ANOVA per Modalità:
      sum_sq    df      F    PR(>F)
C(mode) 1732.640625  1.0  5.470558  0.034688
Residual 4434.093750 14.0      NaN      NaN
```

Figura 1.5: Output dell'ANOVA ottenuto su Python

Questi risultati rappresentano l'analisi della varianza (ANOVA) per ciascun fattore (Posizione, Peso, Modalità) rispetto alla variabile dipendente (Consumi).

ANOVA per Posizione:

La variabile "Posizione" non mostra una significativa influenza sui consumi poiché il valore p (PR(>F)) è maggiore del livello di significatività comune del 5%. Non possiamo respingere l'ipotesi nulla che afferma l'uguaglianza delle medie dei consumi tra le diverse posizioni.

ANOVA per Peso:

La variabile "Peso" non mostra una significativa influenza sui consumi poiché il valore p è maggiore del livello di significatività del 5%.

ANOVA per Modalità:

La variabile "Modalità" mostra un'influenza significativa sui consumi poiché il valore p è inferiore al livello di significatività del 5%. Possiamo respingere l'ipotesi nulla e concludere che la modalità ha un impatto significativo sui consumi.

In sintesi, tra i fattori esaminati, solo la "Modalità" sembra influenzare in modo significativo i consumi, mentre "Posizione" e "Peso" non mostrano un impatto significativo.

Tuttavia, è importante notare che l'assenza di significatività non implica necessariamente l'assenza di effetto. Potrebbe essere il caso che la dimensione del campione o la variabilità intrinseca influenzino i risultati.

1.2.4 Regressione Lineare con OLS

Nel corso dell'analisi dei dati, è stata impiegata la regressione lineare come strumento per esplorare e quantificare le relazioni tra le variabili coinvolte nel consumo energetico del cobot. In particolare, abbiamo adottato il metodo dei Minimi Quadrati Ordinari (OLS), una tecnica ampiamente utilizzata nella statistica per adattare un modello lineare ai dati empirici.

Il modello di regressione lineare OLS cerca di identificare la relazione lineare tra una variabile dipendente, nel nostro caso il consumo energetico del cobot, e un insieme di variabili indipendenti, come il peso applicato, la posizione e la modalità operativa. L'obiettivo principale è stimare i coefficienti che minimizzano la somma dei quadrati dei residui, rappresentando la differenza tra i valori osservati e quelli previsti dal modello.

Ogni coefficiente nel modello fornisce informazioni sulla forza e sulla direzione dell'effetto di una variabile indipendente sul consumo energetico. Ad esempio, il coefficiente associato al peso indica di quanto varia il consumo energetico per un'unità di cambiamento nel peso, mantenendo costanti le altre variabili.

L'output del modello OLS, presentato di seguito, offre una panoramica dettagliata dei risultati, inclusi i coefficienti stimati, i relativi errori standard, le statistiche di test (t-statistic e p-value) e il valore dell'R-squared.

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	cons		R-squared:	0.543		
Model:	OLS		Adj. R-squared:	0.428		
Method:	Least Squares		F-statistic:	4.746		
Date:	Wed, 07 Feb 2024		Prob (F-statistic):	0.0209		
Time:	11:26:21		Log-Likelihood:	-64.080		
No. Observations:	16		AIC:	136.2		
Df Residuals:	12		BIC:	139.2		
Df Model:	3					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-21.8750	17.480	-1.251	0.235	-59.961	16.211
weight	5.8125	3.428	1.696	0.116	-1.657	13.282
pos	15.3125	7.666	1.998	0.069	-1.389	32.014
mode	20.8125	7.666	2.715	0.019	4.111	37.514
Omnibus:		14.386	Durbin-Watson:		1.850	
Prob(Omnibus):		0.001	Jarque-Bera (JB):		11.525	
Skew:		1.595	Prob(JB):		0.00314	
Kurtosis:		5.667	Cond. No.		14.2	

Figura 1.6: Output del modello OLS ottenuto con Python

R-squared: L'R-squared misura la proporzione di varianza nella variabile dipendente (cons) che è spiegata dalle variabili indipendenti (weight, pos, mode). In questo caso, l'R-squared è circa 54.3%, indicando che il modello spiega circa il 54% della variazione osservata nei consumi.

P>|t| (Valori p): I valori p associati a ciascuna variabile indicano se quella variabile è statisticamente significativa per predire l'outcome (cons). Nel tuo modello, weight ha un valore p di circa 0.116, pos ha un valore p di circa 0.069 e mode ha un valore p di circa 0.019.

Per weight, il valore p è superiore al livello di significatività comune del 0.05, indicando che il peso potrebbe non essere statisticamente significativo.

Per pos, il valore p è leggermente superiore al 0.05, suggerendo che pos potrebbe non essere statisticamente significativo.

Per mode, il valore p è inferiore al 0.05, indicando che mode è probabilmente statisticamente significativo.

Coefficienti: I coefficienti associati a ciascuna variabile indicano quanto la variabile contribuisce all'outcome. Ad esempio, il coefficiente per mode è 20.8125, indicando che, mantenendo costanti weight e pos, un aumento di una unità in mode è associato a un aumento di circa 20.81 nell'outcome (cons).

F-statistic: L'F-statistic testa se almeno una delle variabili indipendenti ha un effetto significativo sull'outcome. In questo caso, l'F-statistic è circa 4.746 con un p-value di 0.0209, indicando che il modello nel complesso è statisticamente significativo.

Durbin-Watson: Il valore di Durbin-Watson è circa 1.85. Questa statistica testa l'autocorrelazione dei residui. Un valore compreso tra 1 e 3 suggerisce che non c'è una forte autocorrelazione residua.

1.2.5 Considerazioni sulla significatività statistica:

I risultati ottenuti dall'ANOVA e dalla regressione lineare offrono una prospettiva delle relazioni tra le variabili nei consumi energetici del cobot. Tuttavia, è essenziale notare alcune considerazioni che possono influenzare l'interpretazione:

- **Numerosità del campione:** La dimensione potrebbe non essere ottimale per rivelare differenze significative. Un campione più ampio potrebbe aumentare la robustezza delle conclusioni.
- **Variabilità dei dati:** L'ampia dispersione potrebbe contribuire a p-value più alti, specie con campioni più piccoli. Un'analisi più approfondita sulla varianza potrebbe offrire ulteriori insights.
- **Distribuzione dei dati:** Nonostante il trend visibile, è essenziale considerare la distribuzione effettiva dei dati. Deviazioni dalla normalità potrebbero influire sui risultati.
- **Sensibilità dell'ANOVA:** L'adeguatezza delle assunzioni dell'ANOVA può influenzare la sensibilità del test. Approcci alternativi, come test non parametrici, potrebbero confermare i risultati.

Di seguito è presentato il test non parametrico di Kruskal-Wallis per valutare ulteriormente la significatività delle relazioni osservate.

1.2.6 Test di significatività con Kruskal-Wallis

La scelta di optare per questo test è motivata dal fatto che il numero delle misurazioni non è elevato, e pertanto non possiamo presupporre la normalità nella distribuzione dei dati.

Il test di Kruskal-Wallis è particolarmente adatto in situazioni in cui le condizioni di normalità non sono soddisfatte o quando si lavora con campioni di dimensioni limitate. Inoltre, essendo un test non parametrico, non richiede l'assunzione di omogeneità delle varianze nei gruppi in analisi, rendendolo versatile per esplorare differenze significative nei dati.

L'analisi si basa sull'ipotesi nulla che sostiene l'assenza di differenze significative tra i gruppi considerati, mentre l'ipotesi alternativa suggerisce la presenza di almeno una differenza significativa. Il p-value associato al test fornisce una misura della significatività statistica: valori più bassi indicano una maggiore evidenza contro l'ipotesi nulla e, di conseguenza, rafforzano l'ipotesi alternativa. Pertanto, durante l'interpretazione dei risultati, un p-value ridotto suggerisce una maggiore rilevanza delle differenze nei consumi tra i diversi valori di peso, posizione e modalità operative.

Il test è stato svolto anche in questo caso tramite Python, sfruttando la libreria SciPy.

```
Kruskal-Wallis Test - Weight: Statistic = 23.53586654309547, p-value = 1.226067435218086e-06
Kruskal-Wallis Test - Position: Statistic = 24.107841275868626, p-value = 9.108863031776164e-07
Kruskal-Wallis Test - Mode: Statistic = 24.107841275868626, p-value = 9.108863031776164e-07
```

Figura 1.7: Risultati del test di significatività Kruskal-Wallis

I risultati ottenuti attraverso il test di Kruskal-Wallis evidenziano p-value estremamente bassi per ciascuna delle tre categorie considerate: peso, posizione e modalità operativa. Questi p-value sono, rispettivamente, $1.226 \cdot 10^{-6}$, $9.109 \cdot 10^{-7}$ e $9.109 \cdot 10^{-7}$.

La bassissima probabilità associata a ciascun p-value suggerisce fortemente il rifiuto dell'ipotesi nulla, che postula l'assenza di differenze significative nei consumi energetici tra i diversi livelli di peso, posizione e modalità operativa. In altre parole, esiste una chiara evidenza statistica a favore dell'ipotesi alternativa, indicando che almeno uno dei gruppi presenta una differenza significativa nei consumi rispetto agli altri.

Questi risultati sostengono in modo robusto che le variazioni nei pesi, nelle posizioni e nelle modalità operative influenzano significativamente i consumi energetici del cobot durante le fasi di attesa tra una task e l'altra. La rilevanza statistica di queste differenze offre una base solida per comprendere l'impatto di tali fattori sul consumo energetico complessivo del sistema.

1.3 Conclusioni primo esperimento

Dalle analisi condotte emerge una chiara correlazione tra le posizioni in cui il cobot viene lasciato in attesa tra una “task” e l'altra e i consumi energetici. L'obiettivo di individuare posizioni ottimali per minimizzare il consumo energetico durante le fasi di inattività ha portato a risultati significativi.

Nei grafici relativi alle due posizioni chiave, estensione minima (Posizione 1) ed estensione massima (Posizione 2), risalta subito la differenza tra le due modalità, operativa e idle, nei consumi. Risulta evidente che il consumo è decisamente inferiore nella modalità idle, con una differenza che cresce costantemente all'aumentare del peso applicato.

La modalità operativa rivela infatti un aumento lineare e, in alcuni casi, esponenziale del consumo all'aumentare del peso, evidenziando una stretta correlazione tra la massa applicata e l'energia consumata.

Il confronto diretto tra le posizioni 1 e 2, in modalità operativa, rafforza l'importanza della scelta della posizione nella gestione dei consumi. All'aumentare del carico applicato, la differenza nei consumi tra le due posizioni diventa sempre più marcata, evidenziando l'effetto leva significativo nella posizione 2.

Sebbene "Posizione" e "Peso" non siano risultati significativi nei test tradizionali, il robusto test di Kruskal-Wallis supporta l'importanza di questi fattori.

In conclusione, le posizioni di riposo del cobot si rivelano essere un elemento critico nella gestione dell'efficienza energetica. Un approccio ponderato nella scelta di queste posizioni, tenendo conto del peso applicato, può offrire un contributo significativo all'ottimizzazione dei consumi durante le fasi di attesa.

Un interessante sviluppo futuro per i cobot potrebbe consistere nell'integrare tra le funzionalità di programmazione una modalità "stand by", garantendo un notevole risparmio energetico. Attualmente, questa funzione non è disponibile senza l'intervento manuale dell'operatore sul teach pendant, che consisterebbe nel mettere in pausa il programma e riavviarlo successivamente, andando indubbiamente a ridurre i benefici complessivi che si otterrebbero dal risparmio energetico.

CAPITOLO 2 - ESPERIMENTO 2

In continuità con l'indagine sui consumi energetici del cobot, il secondo esperimento si è focalizzato sull'analisi degli effetti di accelerazioni, carichi applicati e modalità di lavoro sulla sua efficienza energetica. L'obiettivo principale era comprendere come queste variabili influenzassero i consumi e identificare eventuali tendenze o correlazioni.

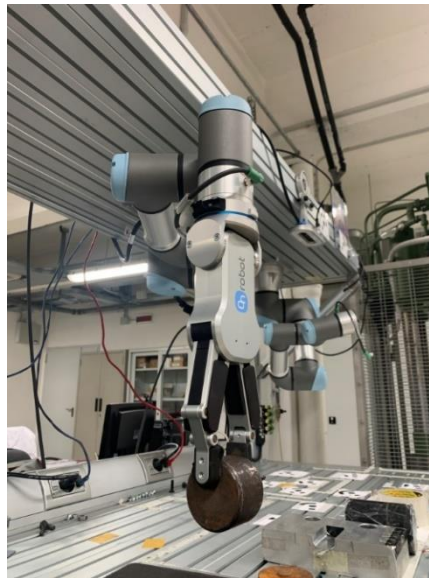


Figura 2.1: cobot durante l'esecuzione del programma dell'esperimento 2 al laboratorio Mind4Lab

2.1 Raccolta dati

Progettazione Sperimentale:

Il test è stato progettato considerando tre fattori principali:

Accelerazioni: Studio dei consumi energetici al variare delle accelerazioni applicate durante i movimenti del cobot.

Carichi Applicati: Esplorazione degli effetti di diversi carichi sul consumo energetico.

Modalità di Lavoro: Confronto tra la modalità di movimento “arrotondato” (Move J) e la modalità di movimento in linea retta (Move L).

Variabili Dipendenti:

L'output di interesse è stato, ancora una volta, il consumo energetico del cobot, misurato in watt. La raccolta di dati è stata effettuata attraverso un software sviluppato dai ricercatori del laboratorio Mind4Lab del Politecnico di Torino. Questo software ha consentito di raccogliere i valori di consumo istantaneo del cobot (12 misurazioni al secondo), fornendo informazioni dettagliate per determinare con precisione il consumo totale per ogni prova effettuata.

Procedure Esecutive:

Per ogni combinazione di accelerazione, carico e modalità di lavoro, è stato fatto eseguire dal cobot il programma impostato, che prevedeva un percorso predefinito, ripetuto ciclicamente per quattro volte per ottenere una raccolta dati più precisa.

Durante ciascun esperimento, sono stati registrati i consumi istantanei, consentendo una valutazione dettagliata delle variazioni in relazione alle diverse condizioni.

Al fine di rendere più comprensibili e confrontabili i dati raccolti, sono state eseguite elaborazioni mirate. Per ciascun esperimento, è stata calcolata la media delle misurazioni di consumo durante l'esecuzione del ciclo programmato. Questa media è stata quindi moltiplicata per la durata totale del percorso in secondi. Il risultato di questa operazione è rappresentato in watt-secondi, fornendo un parametro quantitativo direttamente confrontabile tra le diverse condizioni esaminate.

I fattori considerati per questo esperimento sono:

- Peso applicato (0,1,2)
- Accelerazione dei giunti (0,1,2)
- Modalità di movimento : MOVE J, MOVE L

Nelle seguenti tabelle è indicato a cosa corrispondono i vari livelli.

Peso applicato	Kg
0	0
1	0,5
2	1

Accelerazione giunti	%s ²
0	100
1	200
2	300

Nelle due tabelle successive, sono mostrate le tabelle Excel contenenti i dati raccolti nell'esecuzione delle varie prove, in modalità Move J e Move L.

Prova	Accelerazione	Peso	media Ah assorbiti	Consumo medio(Watt)	Tempo impiegato (sec)	Consumo tot (watt sec)
1	0	0	0,87354	41,92968	15,16	635,654
2	1	0	1,09868	52,736784	9,08	478,850
3	2	0	1,15039	55,21848	7,40	408,617
4	0	1	0,92885	44,584656	15,16	675,903
5	1	1	1,10605	53,090496	9,08	482,062
6	2	1	1,20696	57,934128	7,40	428,713
7	0	2	1,08441	52,051728	15,16	789,104
8	1	2	1,15320	55,353408	9,08	502,609
9	2	2	1,25503	60,241584	7,40	445,788

Tabella 2.1: Dati raccolti per la modalità Move J

Prova	Accelerazione	Peso	media Ah assorbiti	Consumo medio(W)	Tempo impegnato (sec)	Consumo tot (watt sec)
1	0	0	0,88347	42,40677	41,17	1745,887
2	1	0	0,94003	45,12154	30,08	1357,256
3	2	0	0,95683	45,92769	27,64	1269,441
4	0	1	0,94199	45,21530	41,17	1861,514
5	1	1	0,98163	47,11808	30,08	1417,312
6	2	1	1,00640	48,30701	27,64	1335,206
7	0	2	0,98453	47,25754	41,17	1945,593
8	1	2	1,01366	48,65563	30,08	1463,561
9	2	2	1,02776	49,33229	27,64	1363,544

Tabella 2.2: Dati raccolti per la modalità Move L

Nella figura seguente, si possono notare gli impatti di peso e accelerazione sui consumi totale, per entrambe le modalità (a sinistra Move J e a destra Move L).

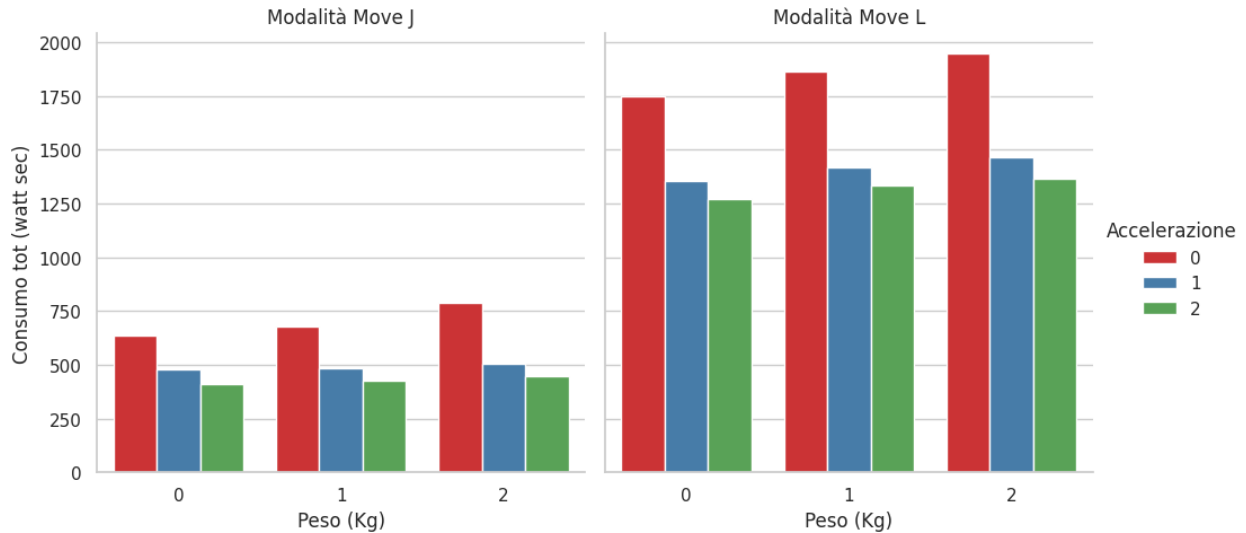


Figura 2.2: rappresentazione grafica dei dati di consumo totale, al variare di peso e accelerazione, per entrambe le modalità (Move J e Move L)

2.2 Analisi dati

2.2.1 Strumenti per l'analisi dati

Anche per quanto riguarda l'analisi dati del secondo esperimento ho impiegato il linguaggio di programmazione Python, sfruttando ancora una volta le sue librerie specializzate.

La libreria Pandas è stata cruciale per semplificare la manipolazione e l'analisi dei dati, identificando chiaramente le tendenze rilevanti. Matplotlib ha permesso la creazione di visualizzazioni grafiche di alta qualità, mentre l'integrazione di Seaborn ha aggiunto stile e precisione.

Nell'ambito delle analisi statistiche avanzate, ho integrato pyDOE, una libreria specializzata per la progettazione di esperimenti. PyDOE ha fornito strumenti per la creazione di design sperimentali multifattoriali, arricchendo così l'analisi dei dati.

L'uso di SciPy è proseguito per analisi statistiche avanzate, ampliando la portata delle valutazioni quantitative. Complessivamente, Python con PyDOE, Pandas, Matplotlib, Seaborn e SciPy ha fornito

uno strumentario completo per un'analisi dati efficace, permettendo un'approfondita esplorazione delle relazioni nei dati e una comunicazione chiara dei risultati ottenuti nel secondo esperimento.

2.2.2 Modalità di movimento: Move J vs. Move L

Per analizzare l'impatto delle diverse modalità di movimento, Move J (movimenti arrotondati ed efficientati) e Move L (movimenti lineari), è stato eseguito un confronto dettagliato dei consumi del cobot al variare dei carichi applicati e dei livelli di accelerazione dei giunti.

Dai grafici mostrati in Figura 2 risulta evidente la grande differenza nei consumi totali tra le due modalità di movimento. Nel dettaglio i consumi elettrici nella modalità Move L risultano quasi triplicati rispetto a quelli nella modalità più efficiente, Move J.

E' interessante però notare che, i consumi istantanei tra le due modalità siano comparabili e addirittura inferiori in Move L (come si può notare facilmente confrontando i valori di consumo medio in Watt nelle due tabelle soprastanti contenenti i dati raccolti). Il fattore determinante in questo caso risulta essere la durata.

Questa differenza significativa nella durata tra le due modalità si traduce in un impatto diretto sui consumi totali. L'aumento del tempo di esecuzione in Move L comporta una maggiore richiesta di energia nel complesso, poiché il cobot deve lavorare per un periodo più prolungato. In termini pratici, ciò è spiegato dalla necessità di muovere un maggior numero di giunti per mantenere una traiettoria lineare, rispetto ai movimenti più fluidi e arrotondati tipici di Move J.

Questi risultati evidenziano come la scelta della modalità di movimento non debba essere valutata esclusivamente in base ai consumi istantanei, ma deve tener conto della durata complessiva dell'operazione, con riflessi diretti sull'efficienza energetica complessiva del sistema.

I trend dei consumi totali, analizzati in relazione ai valori del carico applicato e dell'accelerazione, mantengono una coerenza significativa in entrambe le modalità operative. In particolare, sia per Move J che per Move L, si osserva un lieve incremento dei consumi all'aumentare del carico applicato, mentre si registra una diminuzione dei consumi all'aumentare dell'accelerazione. Quest'ultima tendenza è il risultato di un minore tempo impiegato nell'esecuzione del programma, il quale compensa ampiamente l'incremento istantaneo dei consumi dovuto alla maggiore forza richiesta per ottenere una accelerazione superiore.

Successivamente, verranno approfonditi in modo più dettagliato questi aspetti, con delle analisi mirate.

2.2.2.1 Test di significatività di Wilcoxon sulla modalità di movimento

Per valutare la significatività delle differenze nei consumi energetici tra le modalità di movimento Move J e Move L, ho adottato il test di Wilcoxon, un'opzione appropriata quando i dati non seguono una distribuzione normale o quando i parametri della distribuzione sono sconosciuti.

Questo test, non parametrico, confronta due campioni indipendenti assegnando punteggi in base all'ordinamento dei dati, successivamente somma questi punteggi per ciascun campione e valuta la differenza tra le somme. L'utilizzo del test di Wilcoxon fornisce una valutazione affidabile delle disparità nei consumi energetici tra le due modalità di movimento, garantendo una robusta analisi delle differenze senza presunzioni sulla distribuzione dei dati.

Questo test è stato fatto tramite Python, sfruttando il modello "wilcoxon" integrato nella libreria "scipy.stats".

```
Wilcoxon Statistic: 0.0  
P-value: 0.00390625  
The difference is statistically significant.
```

Figura 2.3: Risultati del test di significatività di Wilcoxon, compreso nella libreria scipy.stats

Il risultato del test di Wilcoxon evidenzia una significativa differenza nei consumi energetici tra le modalità di movimento Move J e Move L. La bassa Wilcoxon Statistic (0.0) accompagnata da un P-value di 0.0039 indica chiaramente che la differenza osservata è statisticamente significativa. Questo risultato rafforza l'evidenza che le due modalità hanno un impatto notevole sui consumi energetici, sottolineando l'importanza di considerare attentamente la modalità di movimento nella gestione e nell'ottimizzazione dell'efficienza energetica del sistema.

2.2.3 Focus sulla modalità Move J

Questo paragrafo si propone di approfondire ulteriormente l'analisi dei consumi energetici, focalizzandosi in particolare sulla modalità 'Move J'. Questa scelta è motivata dalla sua ampia diffusione nell'utilizzo quotidiano dei cobot, data la sua maggiore efficienza.

2.2.3.1 Test di significatività Kruskal-Wallis

Il test di Kruskal-Wallis è stato scelto per l'analisi dei dati dell'esperimento 2, data la limitata numerosità del campione e l'assenza di normalità nella distribuzione dei dati. Questo test non parametrico è versatile e adatto a situazioni in cui la normalità e l'omogeneità delle varianze non sono garantite. L'ipotesi nulla presume l'assenza di differenze significative tra i gruppi, mentre l'ipotesi alternativa suggerisce almeno una differenza significativa. Il p-value associato fornisce una misura della significatività statistica, con valori più bassi che indicano una maggiore evidenza contro l'ipotesi nulla, sottolineando la rilevanza delle differenze nei consumi tra i vari livelli delle variabili considerate.

I risultati del test di Kruskal-Wallis ottenuti con Python indicano quanto segue:

1. Test di Kruskal-Wallis per Accelerazione:

- Statistiche del test: 7.2
- Valore p del test: 0.0273

2. Test di Kruskal-Wallis per Peso:

- Statistiche del test: 0.8
- Valore p del test: 0.6703

Interpretazione:

- Per il test di Kruskal-Wallis sulla variabile "Accelerazione", il valore p è inferiore al livello di significatività comunemente scelto del 0.05 ($0.0273 < 0.05$). Quindi, possiamo respingere l'ipotesi nulla di uguaglianza delle distribuzioni nei gruppi di accelerazione. Ciò suggerisce che c'è una differenza significativa nei consumi tra almeno due livelli di accelerazione.
- Per il test di Kruskal-Wallis sulla variabile "Peso", il valore p è superiore al livello di significatività del 0.05 ($0.6703 > 0.05$). Quindi, non abbiamo sufficiente evidenza per respingere l'ipotesi nulla per la variabile Peso. Ciò suggerisce che non ci sono differenze significative nei consumi tra i diversi livelli di peso.

In sintesi, sembra che ci siano differenze significative nei consumi in base alla variabile "Accelerazione", mentre la variabile "Peso" potrebbe non avere un impatto significativo sui consumi.

2.2.3.2 Analisi multifattoriale sulla modalità Move J

L'analisi multifattoriale è una metodologia avanzata che consente di esplorare e comprendere le interazioni complesse tra diverse variabili indipendenti, come in questo caso peso e accelerazione, e la variabile dipendente, ovvero i consumi energetici. Per condurre tale analisi, ho adottato la metodologia Design of Experiments (DOE), che offre un quadro strutturato per la pianificazione e l'esecuzione degli esperimenti.

In particolare, ci concentreremo sull'Analisi della Varianza (ANOVA), una tecnica statistica che ci consentirà di valutare in modo dettagliato l'impatto delle variabili indipendenti sui consumi energetici. Attraverso l'ANOVA, saremo in grado di identificare se le differenze osservate nei consumi sono statisticamente significative e, in caso affermativo, comprendere quale variabile o combinazione di variabili ha un impatto maggiore.

In questo contesto, l'ANOVA sarà uno strumento chiave per quantificare e interpretare le influenze dei diversi fattori sulla variazione dei consumi energetici, fornendo una prospettiva approfondita sulla dinamica che caratterizza il funzionamento del cobot in modalità 'Move J'.

2.2.3.3 ANOVA

Di seguito sono riportati i risultati dell'Analisi della Varianza, ottenuti anche in questo caso grazie a Python e alle sue librerie dedicate.

	sum_sq	df	F	PR(>F)
Accelerazione	122985.464318	2.0	43.905590	0.001898
Peso	8082.872664	2.0	2.885571	0.167583
Residual	5602.269075	4.0	NaN	NaN

Figura 2.4: Risultati dell'ANOVA ottenuti con Python

I risultati dell'ANOVA mostrano che c'è una significativa differenza nei consumi totali in base alla variabile "Accelerazione" (p-value = 0.0019 < 0.05), ma anche in questa analisi non c'è una differenza significativa in base alla variabile "Peso" (p-value = 0.168 > 0.05).

La variabile "Peso" potrebbe quindi non essere significativa nel contesto di questo esperimento, mentre "Accelerazione" sembra avere un impatto significativo sui consumi totali.

Anche in questo caso però, come per l'esperimento 1, vanno valutati con cautela i risultati dell'ANOVA, in quanto fattori come la scarsa numerosità del campione potrebbero influenzare significativamente la qualità dei risultati.

2.2.3.4 Test di Tukey

Dopo aver completato l'Analisi della Varianza (ANOVA) per valutare l'effetto di Peso e Accelerazione sui consumi energetici, procediamo ora con un'analisi più dettagliata per comprendere le differenze significative tra i livelli della variabile Accelerazione. Per eseguire questo tipo di confronto, uno degli strumenti statistici più ampiamente utilizzati è il test di Tukey.

Il test di Tukey è progettato per gestire confronti multipli tra medie di gruppi diversi, consentendo di identificare quali coppie di gruppi mostrano differenze statisticamente significative. Questo test ci aiuterà quindi a capire quali livelli di accelerazione conducono a consumi energetici significativamente diversi.

Per condurre il test di Tukey, ho impiegato ancora una volta Python, sfruttando il modulo 'pairwise_tukeyhsd' della libreria 'statsmodels'. Questo modulo esegue il test di Tukey, generando una tabella chiara e completa dei confronti tra i livelli di accelerazione, indicando se le differenze osservate sono statisticamente significative.

In definitiva, il test di Tukey si configura come uno strumento indispensabile per interpretare in modo accurato e dettagliato le differenze nei consumi energetici tra i diversi livelli di accelerazione, contribuendo a fornire una panoramica completa del comportamento del cobot in risposta alle variazioni di accelerazione.

```
Multiple Comparison of Means - Tukey HSD, FWER=0.05
=====
group1 group2 meandiff p-adj  lower  upper  reject
-----
0      1      -212.38 0.0038 -332.0258 -92.7342  True
0      2     -272.5143 0.001 -392.1602 -152.8685  True
1      2     -60.1343 0.3384 -179.7802  59.5115  False
-----
```

Figura 2.3: Output del test di Tukey ottenuto con Python

I risultati del test di Tukey indicano che ci sono differenze significative nei consumi totali tra i diversi livelli di "Accelerazione". Vediamo nel dettaglio:

Accelerazione 0 vs. Accelerazione 1:

Meandiff: La differenza media nei consumi tra Accelerazione 0 e Accelerazione 1 è di -212.38.

p-value adjusted: È 0.0038, inferiore al livello di significatività comune del 0.05.

Reject: L'ipotesi nulla viene rigettata, indicando che c'è una differenza significativa nei consumi tra Accelerazione 0 e Accelerazione 1.

Accelerazione 0 vs. Accelerazione 2:

Meandiff: La differenza media nei consumi tra Accelerazione 0 e Accelerazione 2 è di -272.5143.

p-value adjusted: È 0.001, inferiore al livello di significatività comune del 0.05.

Reject: L'ipotesi nulla viene rigettata, indicando che c'è una differenza significativa nei consumi tra Accelerazione 0 e Accelerazione 2.

Accelerazione 1 vs. Accelerazione 2:

Meandiff: La differenza media nei consumi tra Accelerazione 1 e Accelerazione 2 è di -60.1343.

p-value adjusted: È 0.3384, superiore al livello di significatività del 0.05.

Reject: L'ipotesi nulla non viene rigettata, indicando che non c'è una differenza significativa nei consumi tra Accelerazione 1 e Accelerazione 2.

Secondo i risultati del test di Tukey, emerge chiaramente un impatto significativo dell'accelerazione sui consumi totali del cobot. L'analisi delle differenze medie ha rivelato che l'accelerazione 0 e l'accelerazione 1, così come l'accelerazione 0 e l'accelerazione 2, mostrano riduzioni statisticamente significative nei consumi. Questo suggerisce che, all'aumentare dell'accelerazione, si ottiene inizialmente una notevole diminuzione dei consumi.

Tuttavia, l'analisi ha anche rivelato che non c'è una differenza significativa nei consumi tra l'accelerazione 1 e l'accelerazione 2. Questo potrebbe indicare che, superata una certa soglia di accelerazione, l'effetto sulla riduzione dei consumi diventa meno pronunciato.

Nel grafico seguente, si può notare chiaramente la diminuzione dell'effetto di riduzione dei consumi all'aumentare dell'accelerazione.

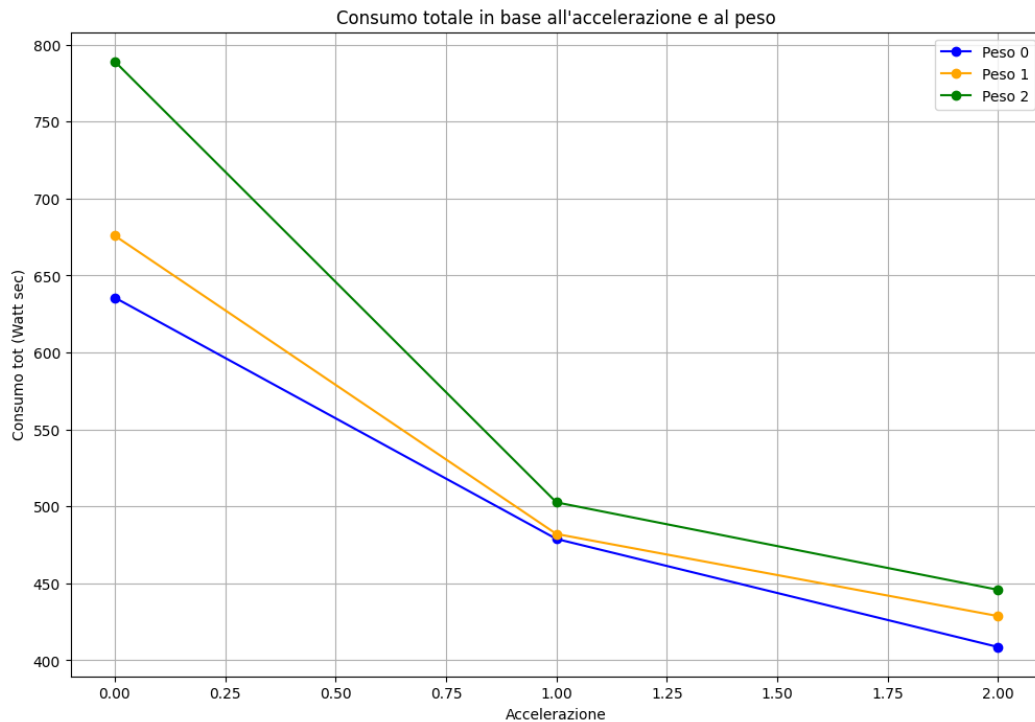


Figura 2.4: Consumo totale (Watt sec) al variare di Accelerazione e Peso

La spiegazione di ciò risiede nella riduzione del tempo impiegato nello svolgimento del programma all'aumentare dell'accelerazione. Inizialmente, questo contribuisce in modo significativo alla riduzione dei consumi, tuttavia, all'aumentare dell'accelerazione si raggiunge la velocità limite del cobot sempre prima, riducendo quindi l'efficacia nel risparmio di consumi.

Inoltre, come si può vedere dal grafico seguente si nota che all'aumentare dell'accelerazione aumentano i consumi energetici medi (dati dalla media dei consumi istantanei) a causa del maggior sforzo richiesto, che vanno a ridurre ulteriormente gli effetti positivi dati dal risparmio di tempo.

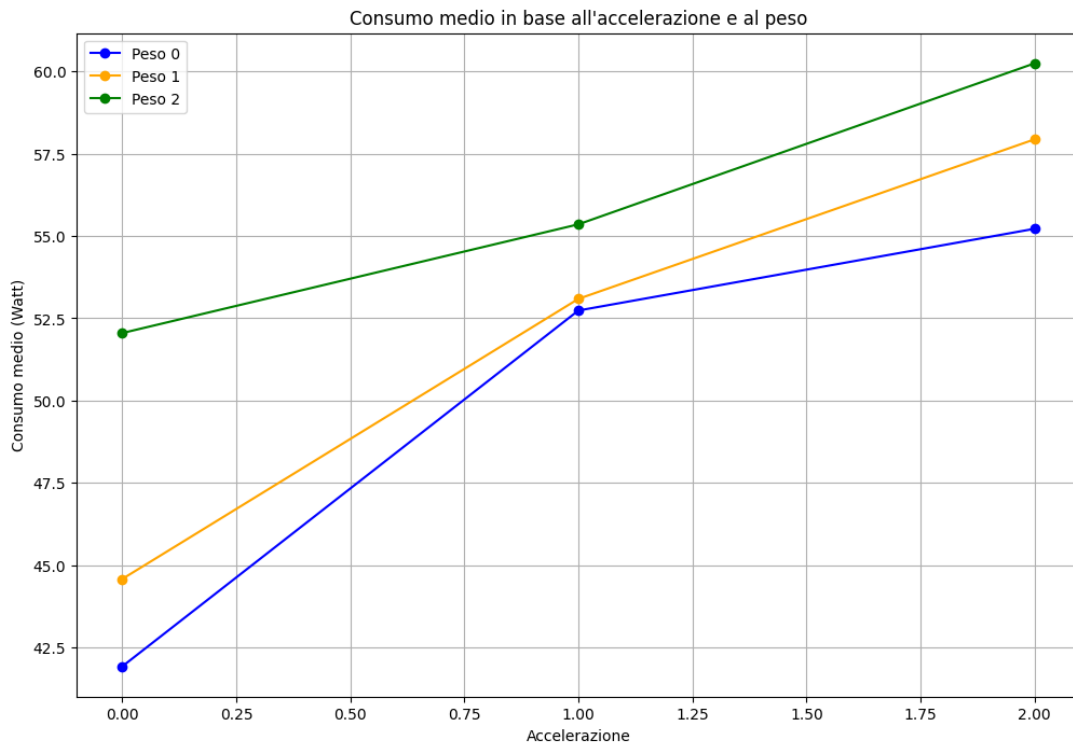


Figura 2.5: Consumo medio (Watt) al variare di Accelerazione e Peso

Questi risultati supportano quindi l'ipotesi che esiste un punto ottimale di accelerazione che massimizza i benefici nella riduzione dei consumi, mentre superare tale punto potrebbe comportare un beneficio meno significativo in termini di efficienza energetica del cobot, fino addirittura ad ottenere il risultato opposto, ovvero un maggior consumo totale.

Inoltre, non va trascurata la maggiore usura dei giunti e delle componenti del cobot sottoposte a sollecitazioni più intense, ancora più accentuate all'aumentare dai carichi applicati.

2.3 Conclusioni secondo esperimento

In conclusione al secondo esperimento, l'analisi delle diverse modalità di movimento, Move J e Move L, ha rivelato una notevole differenza nei consumi totali del cobot. Sebbene i consumi istantanei siano comparabili tra le due modalità, la durata prolungata delle operazioni in Move L ha portato a consumi totali quasi triplicati rispetto a Move J. Questo sottolinea l'importanza di considerare non solo i consumi istantanei, ma anche la durata complessiva dell'operazione per ottimizzare l'efficienza energetica.

Il test di Wilcoxon ha confermato in modo significativo le differenze nei consumi tra le due modalità, evidenziando l'importanza della scelta della modalità di movimento nell'ottimizzazione dei consumi. Approfondendo l'analisi su Move J, il test di Kruskal-Wallis ha indicato una significativa differenza nei consumi in base all'accelerazione, mentre il peso potrebbe non avere un impatto significativo.

L'analisi multifattoriale mediante ANOVA ha confermato l'effetto significativo dell'accelerazione sui consumi totali, suggerendo che esiste un punto ottimale di accelerazione per massimizzare i benefici nella riduzione dei consumi. Tuttavia, superare tale punto potrebbe comportare un beneficio meno significativo o addirittura un aumento dei consumi totali. Il test di Tukey ha approfondito ulteriormente le differenze tra i livelli di accelerazione, confermando che la scelta dell'accelerazione influisce in modo significativo sui consumi.

In conclusione, i risultati indicano che la modalità di movimento e l'accelerazione, giocano un ruolo cruciale nell'ottimizzazione dell'efficienza energetica del cobot. La considerazione attenta di questi fattori può portare a una gestione più efficiente dei consumi, con implicazioni non solo sull'efficienza energetica complessiva ma anche sull'usura delle componenti del cobot.

CONCLUSIONI

Attraverso le conclusioni emerse dai due esperimenti condotti, si delinea in maniera evidente l'importanza di una gestione ottimizzata delle posizioni di riposo, delle modalità di movimento e delle accelerazioni per efficientare i consumi energetici dei cobot.

L'analisi dei dati ottenuti rivela chiaramente come scelte ponderate nelle posizioni di riposo e nelle modalità operative possano avere un impatto significativo sulla riduzione dei consumi.

Questi risultati non solo forniscono indicazioni preziose per migliorare l'efficienza energetica dei cobot, ma aprono prospettive concrete per implementazioni pratiche che possano contribuire alla sostenibilità delle operazioni industriali.

La consapevolezza acquisita sulla correlazione tra scelte operative, posizioni di riposo e consumi energetici rappresenta un passo avanti fondamentale. Questo nuovo livello di comprensione non solo orienta verso una progettazione più mirata e ottimizzata dei cobot in ambienti industriali, ma si estende a una gamma più ampia di applicazioni.

Guardando al futuro, è evidente che l'innovazione tecnologica, specialmente attraverso l'integrazione dell'intelligenza artificiale, sarà la chiave per posizionare i cobot al centro della risposta alle crescenti esigenze di soluzioni automatizzate. Oltre a ciò, li vediamo consolidarsi come autentici alleati nella gestione efficiente delle risorse energetiche e nella promozione di pratiche sostenibili. Questa prospettiva non solo enfatizza il ruolo fondamentale dei cobot nel contesto industriale, ma li proietta come strumenti chiave in un futuro in cui efficienza e sostenibilità saranno i cardini delle operazioni industriali.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Bibliografia

M. Buttolo, A. Guarda, 2020, Cobot. L'affascinante mondo della robotica collaborativa, Sandit Libri

Douglas C.Montgomery, 2005, Progettazione e analisi degli esperimenti, McGraw-Hill Education

Sitografia

<https://www.universal-robots.com/it/informazioni-su-universal-robots/robot-collaborativi-vantaggi-dei-cobot/https://focus.namirial.it/cobot/>

<https://www.automazionenews.it/robot-end-effector-tipologie-e-innovazioni/>

<https://www.imbottigliamento.it/2020/11/27/universal-robot-fa-il-punto-tra-tecnologia-e-impatto-sociale/>

<https://www.universal-robots.com/it/blog/il-futuro-e-adesso-l-ai-sta-gia-rivoluzionando-la-produzione/>

<https://www.automazionenews.it/sostenibilita-il-contributo-dei-cobot-allagenda-2030/>

<https://interactanalysis.com/insight/can-the-collaborative-robot-market-experience-a-second-growth-surge-in-the-post-pandemic-era/>

<https://interactanalysis.com/insight/key-trends-takeaways-industrial-collaborative-robots/>

<https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/collaborative-robot-market>

RINGRAZIAMENTI

Desidero esprimere la mia sincera gratitudine a tutte le persone che hanno contribuito al mio percorso universitario e alla realizzazione di questa tesi.

Innanzitutto, voglio ringraziare la mia famiglia per il loro costante sostegno e per avermi sempre spronato a fare meglio. Senza di loro non avrei mai potuto raggiungere questo importante traguardo. Il vostro supporto è stato fondamentale per ogni passo del mio percorso accademico.

Un ringraziamento speciale va a Irene, che è stata sempre al mio fianco, sia nei momenti difficili che durante le celebrazioni dei successi. La tua presenza ha reso questi anni ancora più significativi e indimenticabili.

Un sentito ringraziamento va anche ai miei amici storici, sui quali so di poter sempre contare. La vostra amicizia e il vostro sostegno hanno reso più leggeri i momenti difficili e hanno reso le gioie ancora più intense.

Desidero ringraziare poi tutte le persone straordinarie che ho incontrato durante il mio percorso universitario. Molti di voi sono diventati ottimi amici con cui ho condiviso momenti indimenticabili. Ognuno di voi ha contribuito in modo unico alla mia crescita personale e professionale, e porterò sempre con me i ricordi di queste esperienze condivise.

Un ringraziamento particolare va anche agli amici che ho conosciuto durante la mia partecipazione al team Squadra Corse. L'esperienza con voi è stata unica e memorabile, e mi ha insegnato tanto sia sul piano tecnico che umano.

Infine, desidero ringraziare il Politecnico di Torino e tutti gli eccellenti professori che ho avuto il privilegio di incontrare durante il mio percorso accademico. La vostra dedizione e competenza hanno contribuito in modo significativo alla mia formazione, fornendomi le competenze e le conoscenze necessarie per potermi muovere con tranquillità nel mondo lavorativo. Grazie per avermi preparato ad affrontare le sfide professionali già intraprese e quelle che ancora mi attendono.

Grazie di cuore a tutti voi per aver reso questo viaggio così speciale e indimenticabile.

Enrico