POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Automazione del processo di collaudo di valvole oleodinamiche: Ottimizzazione e Start Of Production (SOP)

Relatore
Prof. Massimo Sorli

Candidato
Giorgio Parrinello

Relatore Aziendale
Ing. Andrea Bellesi

Dicembre 2018

Ringraziamenti

A conclusione di questo lavoro, desidero dedicare alcune righe di ringraziamento a tutti coloro che mi hanno accompagnato al raggiungimento di questo traguardo.
Ringrazio innanzitutto il Professore Massimo Sorli per il contributo fornito nella stesura di questo lavoro.

Desidero ringraziare tutti i miei colleghi della Bosch Rexroth di Nonantola che nel loro piccolo mi hanno aiutato nell'integrazione in questa grande realtà. Un pensiero particolare lo rivolgo ad Andrea Bellesi e Mario Garofalo, persone di grandissimo spessore umano e figure professionali da ammirare.

Un ringraziamento speciale lo dedico agli affetti più cari.
Grazie Mamma e Papà per avermi dato la possibilità di raggiungere questo importante traguardo. È grazie ai vostri sacrifici e al vostro amore che tutto ciò è stato possibile.
Grazie Manu, per tutti i consigli e gli incoraggiamenti. Sei sempre stato la migliore guida per me.
Grazie Ilaria, per avere condiviso insieme a me tutti i momenti belli e brutti vissuti in questi anni. Grazie per avermi sopportato e supportato, la tua vicinanza e il tuo amore sono stati forza per affrontare i peggiori momenti.

Ringrazio i miei zii, i miei cugini e miei nonni, perché nonostante la lontananza mi sono sempre stati vicini.

Un ultimo ringraziamento lo dedico a tutti gli amici, quelli di Marsala e quelli conosciuti in questi anni per i momenti di divertimento trascorsi insieme.

Sommario

In questo elaborato di tesi è stato approfondito il processo di collaudo di valvole oleodinamiche, chiamate *Parts in Body*, impiegate in macchine operatrici mobili, le quali svolgono funzioni di sicurezza e di controllo della velocità dei bracci di sollevamento. In un'ottica di miglioramento continuo del processo produttivo, l'obiettivo centrale della tesi è stato l'ottimizzazione del processo di collaudo funzionale, mediante l'automazione di un banco di collaudo manuale. Presentato lo studio del funzionamento delle valvole in esame e le modalità di esecuzione del processo di collaudo manuale, è stato definito il metodo seguito per la gestione dell'intero progetto. Tale metodo, denominato metodo *PDCA* (*ciclo di Deming*), è dato dalla successione di quattro fasi: Plan, Do, Check e Act. In ciascuna delle seguenti fasi sono state descritte le attività svolte, focalizzando l'attenzione nel circuito idraulico del nuovo banco e sulla programmazione delle fasi di collaudo automatiche eseguite per le tipologie di valvole studiate VBCN, VBC e VBSO. Tale progetto ha permesso di ottenere risultati produttivi in linea con quelli previsti in fase di pianificazione e di effettuare un ulteriore passo verso le esigenze dell'*Industry 4.0*.

Indice

Ringraziamenti II

Sommario III

Introduzione **1**

1 Bosch Rexroth Oil Control **3**
1.1 Gruppo Bosch 3
1.2 Industrial Technology - Bosch Rexroth 4
1.2.1 Drive Control - Compact Hydraulic 4
1.3 I prodotti 5

2 Principi generali dell'oleodinamica **7**
2.1 Equazioni di Navier-Stokes 7
2.2 Equazione di Bernoulli 9
2.3 Principio di Pascal 10
2.4 I Fluidi idraulici 12
2.5 Gli impianti oleodinamici 13

3 Valvole Parts in Body **14**
3.1 Classificazione 14
3.2 Check and Metering Valves 14
3.3 Counterbalance Valves 20

4 Collaudo manuale e tecnologia **25**
4.1 Centralina di collaudo manuale 25
4.1.1 Collaudo in morsa 26
4.1.2 Collaudo in colonnetta 26
4.1.3 Collaudo in piastra 27
4.2 Le fasi di collaudo manuale 28
4.2.1 Taratura 28
4.2.2 Pilotaggio 29

4.2.3 Tenuta 30
4.2.4 Inizio apertura 30
4.2.5 Serraggio 31

5 Ottimizzazione del processo di collaudo PiB: PDCA method 32
5.1 IL metodo PDCA: storia e utilizzo 32
5.2 Plan: Definizione obiettivi e pianificazione 34
5.3 Do: La fase di esecuzione 38
5.3.1 Circuito Idraulico 38
5.3.2 Verifica del funzionamento idraulico 50
5.3.3 HMI per il collaudo automatico 53
5.3.4 Tecniche di controllo della pressione 56
5.3.5 Fasi di collaudo VBCN 59
5.3.6 Fasi di collaudo VBC 74
5.3.7 Fasi di collaudo VBSO 78
5.4 Check: La fase di verifica 82
5.5 Act:La fase di correzione 86

6 Risultati 90

Conclusioni 92
Bibliografia 95

Introduzione

Il progetto di tesi descritto in questo elaborato si è svolto presso la Bosch Rexroth Oil Control di Nonantola (MO), uno tra i principali produttori mondiali nel settore dell'idraulica compatta per applicazioni mobili, all'interno dell'ente *Manufacturing Engineering* (MFE). L'elaborato ottenuto è il risultato dello studio e dell'ottimizzazione del processo di collaudo funzionale di una categoria specifica di valvole oleodinamiche (*Parts in Body*), attraverso la trasformazione e l'automazione di un banco di collaudo manuale.

In un contesto produttivo, permeato dalle logiche dell'*industry 4.0*, l'introduzione di nuove tecnologie contribuisce al miglioramento e all'innovazione dei processi, consentendo la riduzione del tempo ciclo delle operazioni e del numero di risorse impiegate, il miglioramento della qualità del prodotto delle operazione e l'aumento del livello di servizio al cliente tramite salvataggio su database dei risultati di produzione ed alla loro disponibilità in real time. In quest'ottica, si è deciso di ottimizzare un processo molto importante, quello del collaudo funzionale, che risulta essere particolarmente delicato, in quanto dalla sua corretta esecuzione dipende direttamente la qualità dei prodotti finiti e quindi il grado di soddisfazione del cliente. La metodologia di cui ci si è serviti per portare avanti l'analisi e la definizione delle azioni principali del progetto, ha previsto: lo studio tecnico del funzionamento di ogni tipologia di valvola considerata e l'analisi delle singole fasi che costituiscono il processo di collaudo funzionale, supportate da osservazioni dirette presso il reparto produttivo dello stabilimento. L'acquisizione di tutte queste informazioni ha permesso di delineare i punti principali sui quali agire per garantire un corretto processo di ottimizzazione delle operazioni di collaudo funzionale, ottenuto seguendo un metodo di gestione iterativo utilizzato in ambito industriale per il controllo e il miglioramento continuo dei processi, denominato ciclo di *Deming* o ciclo *PDCA*.

Per chiarire la logica sequenziale che ha guidato la stesura del lavoro e dare, inoltre, un'idea sintetica di ciò che il lettore potrà trovare in ciascuno dei capitoli costituenti l'elaborato, si riporta brevemente il contenuto di ognuno di essi.
Il primo capitolo fornisce un excursus sulla realtà aziendale e una panoramica delle

diverse aree di business, nelle quali l'azienda è leader mondiale, ponendo l'attenzione sul settore *Drive Control - Compact Hydraulic*. Successivamente segue una sintetica descrizione dei prodotti realizzati nello stabilimento Bosch Rexroth Oil Control di Nonanatola (Mo).
Nel secondo capitolo dell'elaborato si presentano le nozioni teoriche che servono a collocare il seguente lavoro nel contesto disciplinare di riferimento. Vengono definite le equazioni che governano il moto dei fluidi ed alcuni principi, da essi ricavabili, che caratterizzano il funzionamento degli impianti oleodinamici. Sono poi descritti tali impianti e i fluidi idraulici che in essi svolgono la funzione di vettori energetici, con le loro proprietà distintive.
Il terzo capitolo fornisce una descrizione dettagliata del funzionamento di alcune tipologie di valvole oleodinamiche *Parts in Body* analizzate durante il progetto, in particolare *check and metering valves* e *counterbalance valves*, fornendo una distinzione nel loro funzionamento e sulle principali applicazioni.
Il capitolo quarto descrive il processo di collaudo manuale, a partire dal banco di collaudo fino all'individuazione di cinque principali fasi svolte dagli operatori: taratura, pilotaggio, preapertura, tenuta e serraggio.
Il quinto capitolo rappresenta il cuore del progetto, in cui dopo una breve descrizione della metodologia PDCA, vengono definite tutte le azioni principali eseguite nelle singole fasi del metodo (Plan, Do, Check, Act). Nella fase Plan sono stati definiti gli obiettivi ed è stata effettuata una pianificazione sulle attività da svolgere. La fase Do, presenta le principali attività svolte in questo progetto, focalizzando l'attenzione sul circuito idraulico del nuovo banco e sulla programmazione delle fasi di collaudo automatiche eseguite per le tipologie di valvole studiate VBCN, VBC e VBSO. Nelle due ultime fasi del metodo PDCA, Check e Act, si è verificato il raggiungimento degli obiettivi attesi e sono state effettuate scelte per ottenere una maggiore produttività ed efficienza del processo.
Infine, negli ultimi due capitoli vengono presentati i risultati ottenuti con l'ottimizzazione del processo di collaudo e i possibili sviluppi futuri.

Capitolo 1

Bosch Rexroth Oil Control

L'elaborato di tesi è stato svolto durante uno stage dalla durata di sei mesi all'interno dell'ente *manufacturing engineering* dell'azienda Bosch Rexroth Oil Control appartenente al Gruppo Bosch. Di seguito una breve descrizione della struttura del gruppo Bosch e dei prodotti dell'azienda Bosch Rexroth Oil Control.

1.1 Gruppo Bosch

La Robert Bosch GmbH è un'azienda multinazionale tedesca, fondata a Stoccarda nel 1886 da Robert Bosch (1861-1942), come "*Officina di meccanica di precisione ed elettrotecnica*". Oggi l'azienda è fornitore leader e globale in quattro settori di Business quali:

- *Mobility solution* è uno dei principali fornitori automotive a livello mondiale e genera circa il 60% del fatturato totale. Questo settore di Business si occupa principalmente di sistemi di iniezione per motori a combustione interna, mobilità e soluzione legate alla propulsione elettrica, sistemi di assistenza alla guida e sicurezza, guida autonoma, tecnologie per informazione e comunicazione fra veicoli e infrastrutture, concept e servizi per l'aftermarket. In questo settore confluiscono competenze in tre ambiti della mobilità quali: automazione, elettrificazione e connettività.

- *Industrial Technology* ha generato circa il 9% del fatturato totale nell'anno 2017. Questo settore include la divisione *Drive and Control Technology*, specializzata nelle tecnologie per l'azionamento e il controllo, che vanta una posizione di leadership a livello mondiale.

- *Consumer Goods* è il secondo settore di business per fatturato, generando circa il 24+% del fatturato totale. Tale settore comprende la divisione Elettroutensili, leader nella fornitura a livello mondiale di elettroutensili e accessori, oltre

che di strumenti di misura e utensili per il giardinaggio. Inoltre, è leader mondiale anche nella produzione di elettrodomestici ad alta efficienza energetica, sempre più connessi: da quelli più grandi come lavatrici, frigoriferi, a quelli più piccoli quali macchine per caffè e robot da cucina.

- *Energy and Building Technology* è l'ultimo settore di business per fatturato, con il 7% del fatturato totale. La divisione *Security Systems* offre prodotti e soluzioni innovativi nel campo degli impianti di videosorveglianza, rilevamento anti-intrusione, antincendio e allarme vocale e dei sistemi di controllo degli accessi e di gestione degli edifici. Inoltre, offre soluzione e servizi per l'efficienza energetica e la sicurezza e l'automazione degli edifici. Con la divisione Termotecnica, Bosch è leader in Europa nella produzione di prodotti per il riscaldamento ad alta efficienza energetica e di soluzioni per la produzione di acqua calda.

La rete Bosch a livello internazionale conta circa 440 filiali, ed è presente in 60 Paesi con più di 400 mila dipendenti nel mondo, con una rete di vendita distribuita in 80 paesi ed un fatturato superiore a 78 miliardi di euro nel 2017, di cui 7 miliardi investiti in Ricerca e Sviluppo. In Italia, il gruppo è rappresentato da 19 aziende, più di 10 siti produttivi e 3 centri di Ricerca e Sviluppo. I collaboratori Bosch in Italia sono oggi oltre 5800.

1.2 Industrial Technology - Bosch Rexroth

Il Settore *Industrial Technology* è ben rappresentato dalla controllata Bosch Rexroth, uno dei principali fornitori sul mercato mondiale. Questo settore include la divisione *Drive and Control Technology*, specializzata nelle tecnologie per l'azionamento e il controllo e la divisione *Packaging Technology*, che è uno dei maggiori fornitori di soluzioni per l'ottimizzazione dei processi produttivi e per l'imballaggio e il confezionamento per l'industria farmaceutica, alimentare e dolciaria.

1.2.1 Drive Control - Compact Hydraulic

La divisione Drive Control Compact Hydraulic (DC-CH), di cui fa parte la Bosch Rexroth Oil Control, si occupa di componenti per l'impiego di circuiti idraulici in spazi ristretti ampiamente impiegati nei veicoli commerciali e nelle macchine operatrici mobili. Il knowhow si riflette anche nella progettazione e montaggio di blocchi di comando compatti ed economici, infatti le tendenze di sviluppo nell'idraulica compatta sono caratterizzate dall'esigenza di ottenere pressioni di lavoro sempre più elevate con ingombri sempre più ridotti: i prodotti Rexroth Oil Control S.p.A sono integrabili fino a formare un sistema modulare completo.

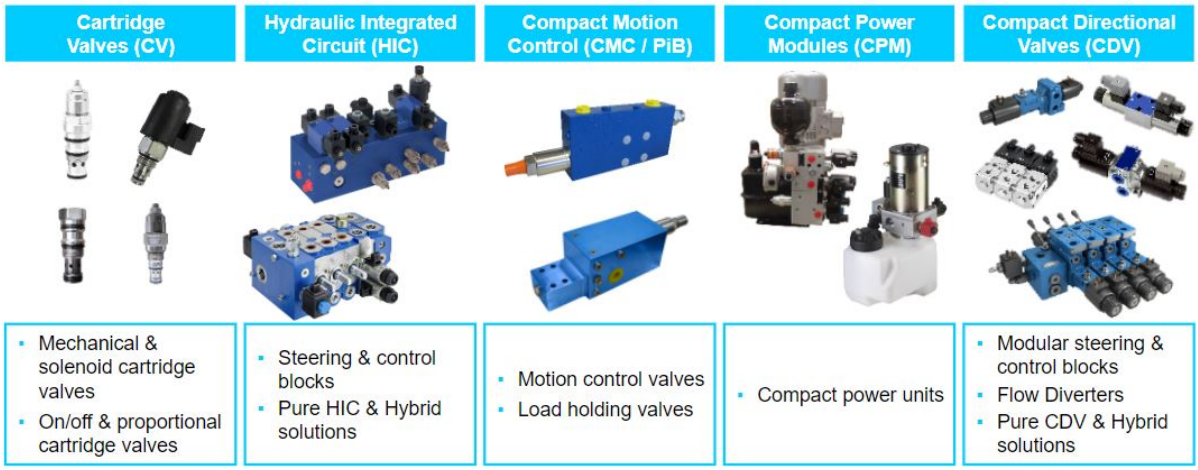

Figura 1.1. I prodotti DC-CH

In Italia si hanno tre Business Unit: Pavullo, Vezzano e Nonantola. Quest'ultimo è il plant produttivo in cui ho svolto il lavoro di tesi e attualmente è l'head quartier della divisione Drive and Control – Compact Hydraulic (DC-CH) del gruppo Bosch e conta circa 750 collaboratori su un'area totale di 30208 m2.

1.3 I prodotti

I *value stream* dello stabilimento di Nonantola sono rappresentati da quattro categorie di prodotto:

- Valvole a cartuccia meccanica (mCV) e valvole a cartuccia elettrica (eCV), le quali svolgono una funzione singola, diversa per ogni famiglia. Sono di dimensioni ridotte, e vanno inserite a tenuta in corpi individuali o collettivi detti $manifold$. Queste valvole vengono principalmente utilizzate per costruire circuiti oleodinamici ad elevato numero di funzioni.

Figura 1.2. Valvole a catuccia meccanica ed elettrica

- Parts in Body (PiB): questi prodotti servono ad assolvere un'unica funzione, ma sono realizzati assemblando più componenti nello stesso corpo. Tali componenti possono essere gli stessi con i quali sono assemblate le valvole a cartuccia, ma anche componenti aggiuntivi, come strozzatori o filtri, per migliorare le prestazioni ottenibili con una semplice valvola. Nonostante il maggiore ingombro rispetto alle mCV ed eCV, questi prodotti richiedono uno sforzo di inserimento nel circuito ridotto, infatti, non necessitano di cavità di alloggiamento, essendo predisposti per l'inserimento diretto in un circuito, con un condotto di entrata ed uno di uscita del fluido.

Figura 1.3. Parts in Body

- Gruppi Integrati (HIC): sono pensati per riassumere una serie di funzioni in uno spazio contenuto. Consistono in una serie di valvole alloggiate in un unico blocco, che prevede quindi tutte le cavità necessarie per l'inserimento delle stesse ma anche tutti i condotti di collegamento interni. Le prestazioni dei gruppi integrati sono quindi vincolate a quelle delle valvole al loro interno.

Figura 1.4. Gruppi idraulici integrati

Capitolo 2

Principi generali dell'oleodinamica

2.1 Equazioni di Navier-Stokes

Per completezza degli argomenti affrontati in questo elaborato si riportano alcuni concetti di fluidodinamica e di oleodinamica che descrivono il comportamento del fluido idraulico nelle applicazioni in oggetto. In fluidodinamica il comportamento di un fluido è descritto dalle equazioni di Navier-Stokes.
L'idea di base su cui poggia la descrizione classica del moto di un fluido è quella di un mezzo continuo suddiviso in un numero infinito di elementi fluidi infinitesimi, ognuno dei quali evolve nel tempo secondo la propria traiettoria. La descrizione di un fluido presuppone che si conosca la posizione nello spazio (x, y, z) di ogni elemento fluido in ogni istante t. In questo modo si assume implicitamente che la stessa posizione spaziale (x, y, z) non possa essere occupata da due diversi elementi di fluido allo stesso istante t (*Ipotesi di Localizzazione*).
Si può definire il campo di velocità **u** (x, y, z, t) come la velocità istantanea dell'elemento fluido infinitesimo che occupa la posizione (x, y, z) al tempo t. Lo stato termodinamico dell'elemento di fluido infinitesimo può essere descritto abbastanza facilmente se esso si trova in uno stato di equilibrio stabile.
La seconda ipotesi, detta Ipotesi di Equilibrio Locale, è ragionevole se l'evoluzione di questo infinitesimo sistema termodinamico è sufficientemente lenta da consentire un equilibrio termico istantaneo dell'elemento fluido. Questa ipotesi implica che, a un istante di tempo t, l'elemento di fluido infinitesimo sia caratterizzato da una temperatura T, una densità ρ, e una pressione p. In questo modo si può definire un campo di temperatura, T (x, y, z, t), come la temperatura T dell'elemento di fluido infinitesimo che occupa la posizione (x, y, z) al tempo t. Inoltre, si può definire un campo di densità ρ (x, y, z, t), come la densità ρ dell'elemento di fluido infinitesimo che occupa la posizione (x, y, z) al tempo t. Infine, si può definire un campo di pressione, p (x, y, z, t), come la pressione p dell'elemento di fluido infinitesimo che

occupa la posizione (x, y, z) al tempo t.

Per studiare il moto di un fluido in una regione di spazio R, è conveniente considerare gli spostamenti subiti, in un dato intervallo di tempo, da un elemento fluido, ad esempio da una porzione di fluido limitata da una superficie ideale impermeabile. Questa definizione implica che l'elemento fluido sia un sistema termodinamico chiuso.

La relazione che permette di studiare questi spostamenti è l'*equazione del trasporto di Reynolds*, riferita a una qualsiasi proprietà estensiva Ψ:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \int_R \left[\frac{\partial(\rho\Psi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\psi\mathbf{u}) \right] dV \tag{2.1}$$

dove:
R= regione di spazio occupata dall'elemento di fluido al tempo t.
ψ= proprietà specifica corrispondente alla proprietà estensiva Ψ.

La prima e più semplice applicazione del *teorema del trasporto di Reynolds* è la determinazione dell'equazione di bilancio locale della massa. Si assume come proprietà estensiva Ψ la massa m dell'elemento fluido. Poiché l'elemento fluido è un sistema termodinamico chiuso, m non cambia nel tempo, quindi il termine a sinistra dell'Equazione precedente è zero. La proprietà specifica ψ corrispondente alla proprietà estensiva Ψ è data dal rapporto tra Ψ e la massa ed in questo caso si traduce in Ψ=1. Di conseguenza, l'equazione 2.1 diventa:

$$\int_R \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) \right] dV \tag{2.2}$$

La 2.2 deve valere per ogni possibile scelta dell'elemento fluido, quindi per ogni regione di spazio R, l'integrando deve essere identicamente nullo e si ottiene:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0 \tag{2.3}$$

L'Equazione ottenuta è l'*equazione di bilancio locale della massa*, anche nota come *equazione di continuità*. Si può facilmente concludere che, se il campo di densità $\rho(x, y, z, t)$ può essere considerato come indipendente dal tempo ed uniforme, ad esempio per un fluido incomprimibile, l'equazione di continuità si riduce a $\nabla \cdot \mathbf{u}$=0.

Si assuma ora che la proprietà estensiva Ψ sia l'i-esima componente della quantità di moto, Π_i. Dalla definizione della quantità di moto, cioè massa per velocità

$(m \cdot \mathbf{u})$, di un oggetto puntiforme, si può facilmente concludere che la proprietà specifica corrispondente ψ, è l'iesima componente del campo di velocità u_i, dove il pedice i denota uno dei tre assi, x, y o z. Per un fluido Newtoniano, l'applicazione del teorema di Reynolds alla quantità di moto fornisce l'Eq. 2.4, ovvero l'*equazione di bilancio locale della quantità di moto*:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \left[\nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \nabla \left(\nabla \cdot \mathbf{u} \right) \right] \tag{2.4}$$

Il termine a sinistra dell'uguale sfrutta la definizione di derivata sostanziale,

$$\frac{D\psi}{Dt} \equiv \frac{\partial \psi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \psi, \tag{2.5}$$

e rappresenta l'accelerazione subita dal fluido sottoposto alle diverse forze, volumetriche e superficiali, espresse dai termini riportati a destra dell'uguale. Il primo di questi, $\rho \mathbf{g}$, è dovuto alle forze volumetriche agenti sull'elemento fluido, che si considerano costituite dalla sola forza gravitazionale, con $\mathbf{g}$ che esprime l'accelerazione di gravità. Il secondo termine esprime l'accelerazione che subisce il fluido in seguito ad una variazione di pressione all'interno della regione di spazio che occupa, mentre l'ultimo termine esprime il rallentamento che subisce il fluido a causa della dissipazione viscosa. Nel seguito si vedrà cosa rappresenta il termine μ.

L'ultima delle equazioni che fanno parte del sistema di Navier-Stokes, è l'*equazione di bilancio locale dell'energia* interna del sistema, ovvero:

$$\rho \left(\frac{D\varepsilon}{Dt} \right) = -\nabla \cdot \mathbf{q} + q_g + D : \tau - p \nabla \cdot \mathbf{u} \tag{2.6}$$

Il termine a sinistra dell'equazione rappresenta la variazione dell'energia interna al sistema, mentre a destra si trovano tutti i termini riferiti all'unità di tempo e di volume, che contribuiscono alla sua variazione. In ordine, compaiono il termine legato al flusso di calore, quello dovuto ad un'eventuale sorgente interna di calore, il termine di dissipazione meccanica e termica, ed infine il lavoro netto compiuto dalla pressione.

2.2 Equazione di Bernoulli

Considerando l'ipotesi di fluido con viscosità trascurabile, dalle precedenti *equazioni di Navier-Stokes* 2.3, 2.4 e 2.6 si ottengono le *equazioni di Eulero*. Tali equazioni, integrate lungo una linea di flusso in caso di flusso incomprimibile ($\nabla \cdot \mathbf{u}$=0) e

stazionario, ovvero flusso non dipendente dal tempo, conducono all'*equazione di Bernoulli* nella forma:

$$p + \rho g h + \rho \frac{u^2}{2} = costante \tag{2.7}$$

Questa equazione ci indica che in ogni sezione di un tubo di flusso, sotto l'ipotesi di fluido ideale, è costante la somma della pressione statica, idrostatica e dinamica e ciò è una diretta conseguenza del principio di conservazione dell'energia. Nella realtà un fluido che percorre un tubo di flusso non è incomprimibile ed è soggetto ad attriti interni e sulle pareti. La presenza degli attriti determina dissipazione di energia sotto forma di calore e di perdite di pressione, comunemente dette *perdite di carico*. Di conseguenza, un liquido reale che percorre un circuito costituito da tubi, curve, raccordi e strozzamenti interni ai componenti oleodinamici, subisce una perdita di carico dovuta a resistenze distribuite e localizzate.

2.3 Principio di Pascal

Per comprendere il comportamento fisico dei fluidi idraulici si considera inoltre il *Principio di Pascal*, detto anche "*della trasmissibilità della pressione*". Esso afferma che "*in un liquido incomprimibile in equilibrio la pressione si trasmette ugualmente in ogni direzione, esercita forze uguali su aree uguali, è indipendente dalla natura del liquido e dalla forma del recipiente*". Un esempio di applicazione del Principio di Pascal è il torchio idraulico, un sistema utilizzato per equilibrare una forza intensa applicandone una piccola. Utilizzando la definizione di pressione, osservando la Figura 2.1, applicando una piccola forza F_1 se ne ottiene una maggiore F_2 grazie al rapporto delle diverse aree sulle quali agisce la pressione.
Essendo P_1=P_2 si ha che $F_1 \cdot S_2$=$F_2 \cdot S_1$ e quindi si ottiene:

$$F_2 = F_1 \cdot \left(\frac{S_2}{S_1}\right) = F_1 \cdot K \tag{2.8}$$

K prende il nome di *fattore di moltiplicazione della forza*.

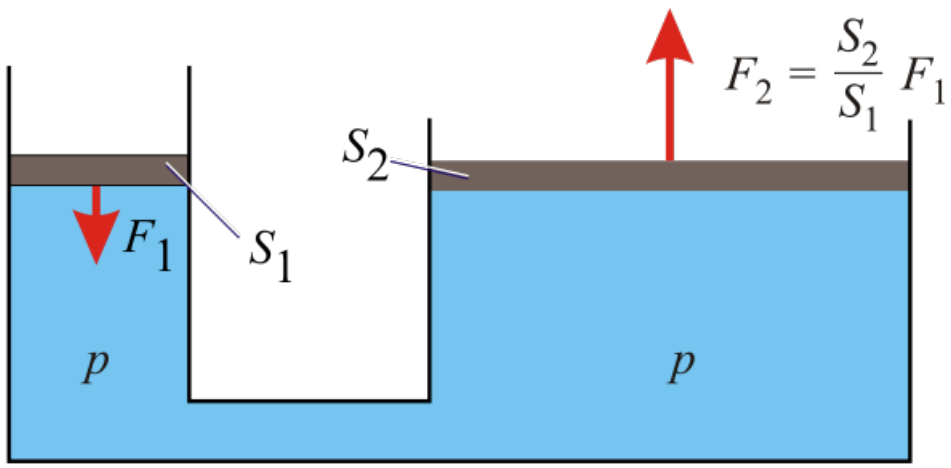

Figura 2.1. Rappresentazione grafica del Principio di Pascal

Nello studio di valvole meccaniche questo comportamento acquista un'importanza notevole, data la piccola forza necessaria a regolare portate, quindi carichi, anche molto elevati.

Si osserva però che, sul pistone 1 si ottiene una moltiplicazione di corsa secondo il fattore K, infatti per la legge di conservazione dell'energia, l'energia immessa nel pistone 1 è uguale all'energia restituita sul pistone 2:

$$F_1 \cdot h_1 = F_2 \cdot h_2 \tag{2.9}$$

Si ricava che gli spostamenti sono inversamente proporzionali alle forze e quindi la corsa lungo il quale bisogna applicare la forza F_1 è molto più lunga della corsa necessaria a sollevare il carico.

2.4 I Fluidi idraulici

In un sistema oleodinamico il fluido idraulico è il mezzo (quasi) incomprimibile in grado di trasmettere l'energia erogata dalla pompa all'utenza lineare o rotativa sotto forma di forza o di coppia e di velocità lineare o angolare. Grazie al buon potere lubrificante ed all'elevata protezione contro la corrosione si è affermato come fluido idraulico l'olio minerale. Nelle applicazioni reali i circuiti oleodinamici impiegano quasi sempre oli minerali additivati, per migliorarne le proprietà di antiusura, antischiuma, antiruggine e di resistenza all'ossidazione. Una caratteristica importante del fluido idraulico è la sua viscosità, che può essere distinta in viscosità dinamica e cinematica. Per descrivere la viscosità dinamica si consideri un fluido confinato tra due lastre parallele di area A e distanti tra loro z, mantenendo ferma la lastra inferiore si fa scorrere quella superiore con una velocità costante **u** applicandovi una forza T. Il modulo della forza T necessaria a muovere la piastra risulta direttamente proporzionale a u e ad A ed inversamente proporzionale alla distanza z tra le lastre attraverso un coefficiente di proporzionalità μ detto coefficiente di viscosità dinamica:

$$T = \eta \cdot \frac{u \cdot A}{z} \tag{2.10}$$

La viscosità dinamica η si misura nel sistema internazionale in N $\cdot$ s $\cdot$ m^{-2} e indica la forza tangenziale che occorre applicare su una superficie di 1 m^2 per farla scorrere alla velocità di 1 m $\cdot$ s^{-1} rispetto a una superficie di 1 m^2 distante 1 m dalla prima. La viscosità è l'effetto macroscopico delle relazioni intermolecolari, ed è quindi espressione dell'attrito interno di un fluido.

La viscosità cinematica misurata in $m^2 \cdot s^{-1}$ è il rapporto tra la viscosità dinamica η e la densità ρ del liquido:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \tag{2.11}$$

La viscosità del fluido si deve trovare all'interno di un intervallo di buon funzionamento in quanto quanto più un fluido è viscoso, tanto più oppone resistenza al moto di scorrimento di due pareti piane fra le quali lo stesso fluido è interposto determinando elevate perdite di carico per riscaldamento dell'olio. Un fluido poco viscoso provoca perdite di carico minori ma comporta eccessivi trafilamenti ed un aumento dell'usura. Bisogna anche considerare che la temperatura determina forti mutamenti della viscosità. In particolare quando la temperatura diminuisce la viscosità aumenta, mentre se la temperatura aumenta, la viscosità diminuisce. Esistono tabelle che mostrano, per differenti fluidi idraulici a base di olio minerale, il valore della viscosità per diversi valori di temperatura. Il fluido dovrebbe quindi essere scelto con l'obiettivo di raggiungere una viscosità operativa appropriata alla temperatura di esercizio prevista. La viscosità cinematica, che è quella ormai riportata nei cataloghi, in assenza di esigenze particolari, dovrebbe essere compresa tra i

3 e i 400 cSt (centi-Stokes o $mm^2 \cdot s^{-1}$). Il principale svantaggio degli oli minerali è quello di essere infiammabili, ragione per cui, in prossimità di fiamme oppure in aree o zone ad elevata temperatura, devono essere impiegati fluidi alternativi difficilmente infiammabili. Un altro parametro fondamentale da tenere monitorato è il grado di contaminazione dell'olio, in quanto le particelle contaminanti presenti nel fluido, oltre a rappresentare un rischio per l'usura dei componenti meccanici del sistema idraulico, rischiano di compromettere la precisione degli accoppiamenti tra i componenti stessi, causando perdite indesiderate e una riduzione dell'efficienza del sistema.

2.5 Gli impianti oleodinamici

Gli impianti oleodinamici sono sistemi di trasmissione dell'energia nei quali il fluido vettore, posto in pressione da uno o più gruppi di generazione, è un fluido idealmente incomprimibile, la cui funzione consiste nel trasferire energia dal generatore (pompa) all'attuatore (cilindro).
Gli usi ai quali un impianto oleodinamico si addice sono molteplici, tra i quali:

- Trasmissione di grandi forze con piccoli ingombri.
- Variazione continua e facile dei parametri del moto; grazie alla scarsa comprimibilità dell'olio, è facile intuire la rapidità di risposta di un sistema oleodinamico in seguito ad un comando, e ciò permette di eseguire e di controllare cicli di movimenti che si susseguano in rapida successione, ma anche estremamente lenti.
- Possibilità di partenze a pieno carico.
- Facilità di protezione contro i sovraccarichi; estremamente importante è infatti la possibilità di proteggere gli impianti oleodinamici dai sovraccarichi, e tramite una o più valvole di massima pressione ci si assicura che le pressioni siano al di sotto di limiti pericolosi.
- Possibilità di accumulare energia in un gas compresso; l'uso di un accumulatore idraulico permette di immagazzinare energia di pressione, che può essere utilizzata o negli istanti in cui si devono fronteggiare picchi di potenza richiesta, oppure per completare delle operazioni in caso di avaria all'impianto.
- Controllo dell'energia; agendo sui parametri di portata e pressione, grazie a valvole di comando e regolazione e a pompe a cilindrata variabile, si riesce a controllare la potenza trasmessa.

Capitolo 3

Valvole Parts in Body

3.1 Classificazione

Descritti i principi base necessari a capire il funzionamento di alcuni componenti oleodinamici, si vuole descrivere in modo più dettagliato il funzionamento di alcune tipologie di valvole *Parts in Body* (PiB).
Il primo periodo dello stage svolto, ha avuto proprio come obiettivo lo studio del funzionamento di questa tipologia di valvole, necessario e fondamentale per il proseguo delle attività descritte nei capitoli successivi. Tra le diverse tipologie di valvole PiB studiate, sono state approfondite principalmente 2 diverse tipologie di valvola che possono essere classificate in base alla funzione svolta:

- *Check and Metering Valves*
- *Counterbalance Valves*

3.2 Check and Metering Valves

Le *Check and Metering Valves*, dette anche valvole di controllo e mantenimento del carico, svolgono principalmente funzioni di sicurezza in accordo con la norma tecnica UNI ISO 8643:2017. La norma stabilisce requisiti omogenei e procedure di prova per i dispositivi di controllo dell'abbassamento, montati sui cilindri idraulici dei bracci di sollevamento di macchine movimento terra, al fine di controllare la velocità di caduta in caso di cedimento o rottura di una linea idraulica.
Tali valvole sono ottenute assemblando diversi componenti idraulici in un medesimo corpo. Osservando lo schema di Figura 3.1, si possono distinguere gli elementi principali che costituiscono la valvola. Con 1, vi è indicato il corpo centrale pilotato normalmente chiuso, considerando la direzione del flusso C2-V2, mentre con 2 è indicata la valvola di massima pressione. Oltre a questi due elementi principali si

possono individuare altri elementi idraulici come strozzatori e valvole unidirezionali. La valvola è poi costituita dalla linea di carico C2, dalla linea di alimentazione o di scarico V2, dalla linea di scarico a serbatoio T e dalla linea di pilotaggio Pil.

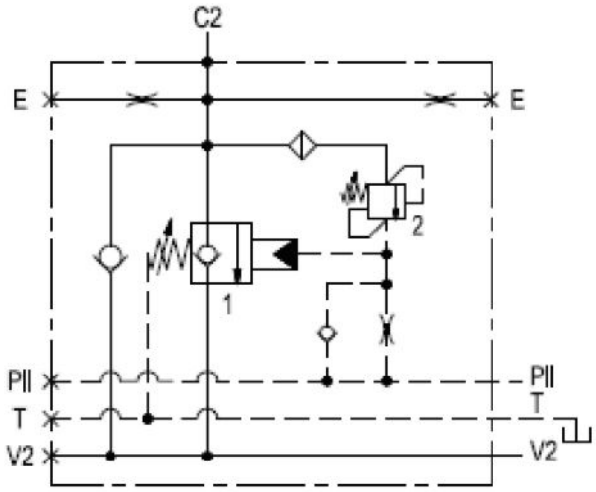

Figura 3.1. Schema Check and metering valve (VBC)

Di seguito, vengono descritte alcune condizioni di funzionamento in cui la valvola svolge la propria funzione. La valvola viene interposta tra il distributore e il cilindro idraulico di un braccio, per esempio, di un escavatore.
Se si considera la condizione di funzionamento in cui si ha il sollevamento del braccio, Figura 3.2, l'olio che fluisce dal distributore DCV raggiunge la bocca della linea di ingresso V2 e attraversando le valvole unidirezionali, raggiunge la camera del cilindro attraverso la bocca di carico C2. In questa condizione di funzionamento, la valvola si comporta come una semplice valvola unidirezionale.

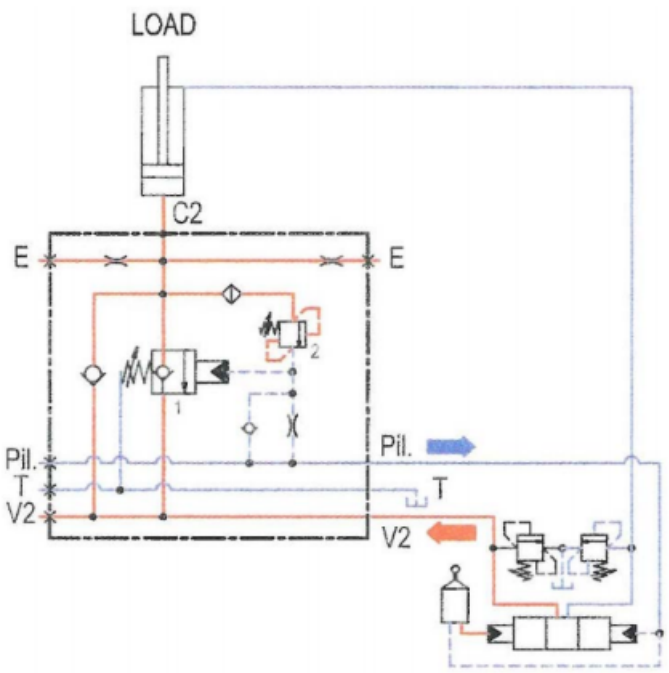

Figura 3.2. Condizione di sollevamento braccio

In condizione di distributore DCV in posizione neutrale, l'obiettivo è quello di mantenere il braccio in posizione fissa. Come si può intuire dallo schema di Figura 3.3, non si ha portata in ingresso nelle camere del cilindro e la pressione indotta dal carico attraverso la bocca C2 è tale da spingere l'otturatore della valvola unidirezionale contro la sede, impedendone il passaggio di flusso C2-V2. Allo stesso modo, il pistone del corpo centrale si trova in posizione di tenuta impedendone il passaggio di portata. Tale condizione garantisce il mantenimento del braccio in posizione sollevata, anche in caso di guasto del tubo che collega il distributore al cilindro.

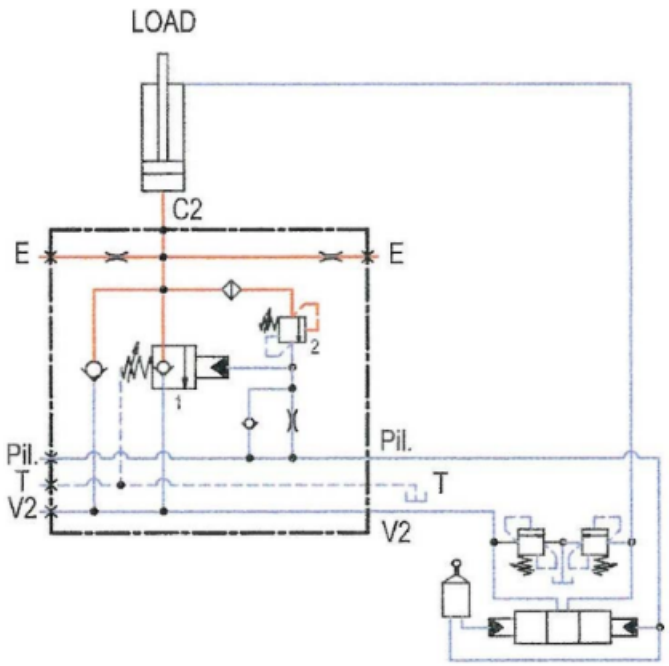

Figura 3.3. Condizione di mantenimento del braccio

La condizione di discesa del braccio viene determinata, invece, quando attraverso il joystick si fornisce una pressione di pilotaggio tale da comandare il distributore DCV in modo che V2 sia a scarico e la linea di collegamento con la camera anteriore del cilindro sia collegata con l'alimentazione. Inoltre, la pressione di pilotaggio è tale da spingere la spola del corpo principale lontano dalla sede di tenuta consentendo il passaggio di flusso da C2 a V2, come mostrato in Figura 3.4. La pressione di pilotaggio necessaria a muovere la spola è indipendente sia dalla pressione di carico che dalle contro-pressioni attraverso V2, poiché la camera della molla è collegata allo scarico. In questa condizione di funzionamento si può quindi notare che la presenza di questa valvola è necessaria a controllare l'abbassamento del braccio, soprattutto in presenza di improvvisa rottura del tubo.

L'ultima condizione di funzionamento è rappresentata dal caso in cui si ha la presenza di sovraccarichi, in cui la pressione all'interno della camera posteriore del cilindro cresce rapidamente. In presenza di tale situazione, quando la pressione nella camera raggiunge la pressione di taratura della valvola di massima, si determina l'apertura limitando la pressione della camera del cilindro a quella di taratura della valvola stessa. Quest'ultima condizione di funzionamento è rappresentata nello schema di Figura 3.5.

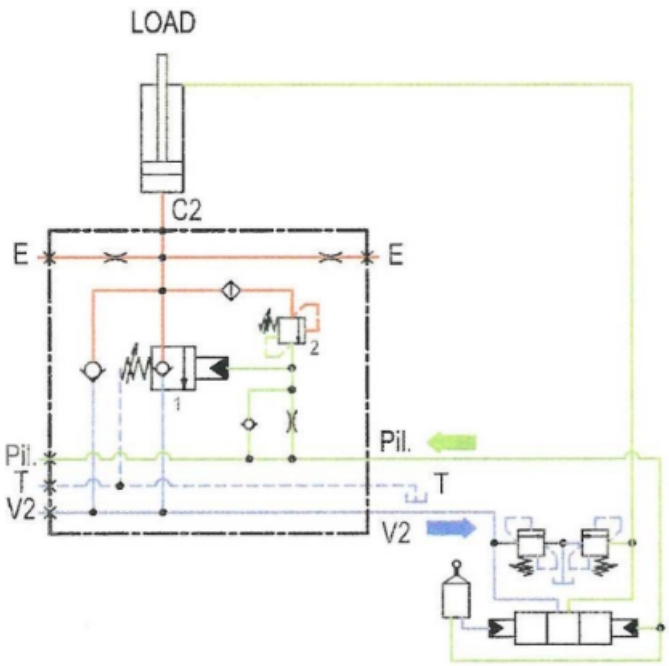

Figura 3.4. Condizione di discesa del braccio

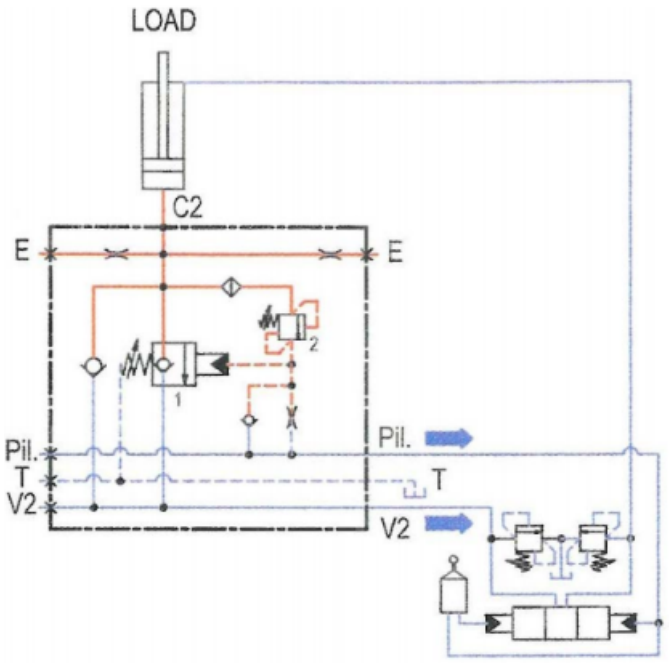

Figura 3.5. Condizione di sovraccarico

Nei capitoli successivi si farà riferimento in particolare a due differenti tipologie di valvole, in grado di compiere queste funzioni e denominate VBCN e VBC. Gli schemi riportati precedentemente fanno riferimento ad una valvola VBC. La valvola VBCN, invece, è caratterizzata da una spola di forma differente che consente di generare una variazione della luce di passaggio in modo continuo, così da ottenere un controllo più fine della portata e quindi della velocità di discesa del braccio.

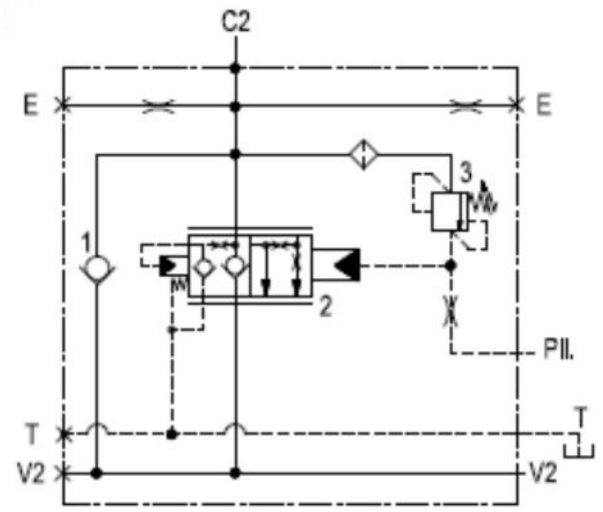

Figura 3.6. Schema valvola VBCN

3.3 Counterbalance Valves

Le valvole di controbilanciamento VBSO sono state sviluppate per il controllo statico e dinamico di carichi sospesi. Esse consentono di bloccare l'attuatore istantaneamente, ed impediscono la fuoriuscita o la perdita d'olio fin quando non ricevono un segnale di pressione in seguito ad una manovra intenzionale dell'operatore. I principali settori di applicazione di tali valvole sono: macchine movimento terra, gru caricatrici, carrelli elevatori, trivelle, mezzi di sollevamento in generale. Adesso vengono descritte alcune condizioni di funzionamento in cui la valvola svolge la propria funzione. La valvola viene interposta tra il distributore e il cilindro idraulico di un braccio, per esempio, di un escavatore.
Nella condizione di funzionamento in cui si ha il sollevamento del braccio, l'olio raggiunge la camera posteriore dell'attuatore attraversando la valvola unidirezionale, come mostrato in Figura 3.7.

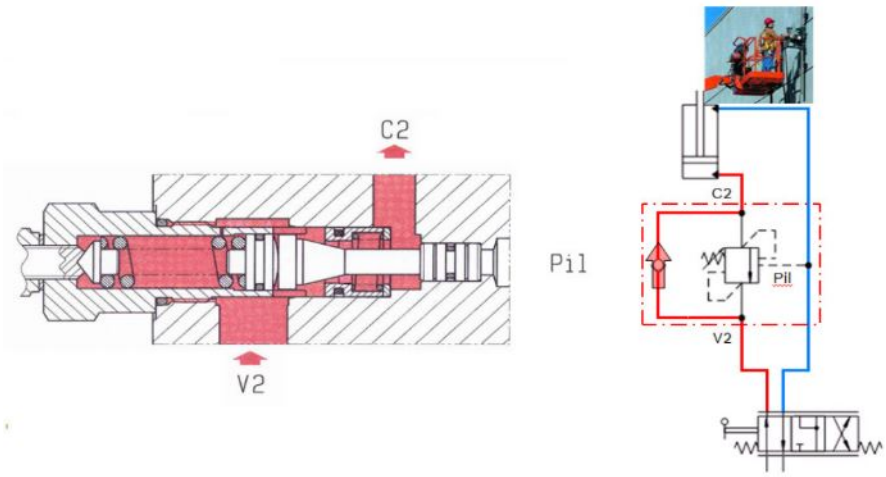

Figura 3.7. Funzione di sollevamento del carico

Nella condizione in cui il distributore di comando non è azionato o quando la pompa è ferma e non eroga portata, è richiesto il mantenimento in posizione fissa del braccio. Come mostrato dallo schema di Figura 3.8, la pressione indotta dal carico attraverso la bocca C2 è tale da spingere l'otturatore della valvola unidirezionale e del corpo centrale contro la sede, impedendone il passaggio di flusso C2-V2. In questo modo si garantisce il mantenimento del braccio in posizione sollevata, anche in caso di guasto del tubo che collega il distributore al cilindro. Inoltre, la valvola deve essere in grado di garantire la limitazione della pressione massima nell'attuatore, aprendosi e mettendo a scarico l'olio quando viene superata la pressione di taratura della stessa.

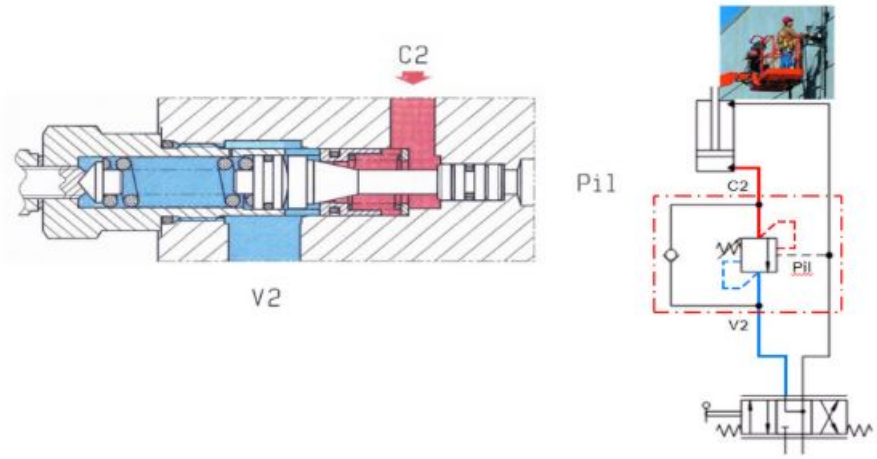

Figura 3.8. Funzione di mantenimento e di valvola di massima per sovraccarichi

Infine, l'ultima funzione svolta è quella di abbassamento del carico sotto il controllo diretto della pressione di pilotaggio. Quando quest'ultima, assieme alla pressione del carico, è tale da vincere la forza esercitata dalla molla in chiusura, si ha lo scorrimento della spola permettendo il collegamento C2-V2 e consentendo il controllo della velocità di discesa in funzione della pressione di pilotaggio (Figura 3.9).

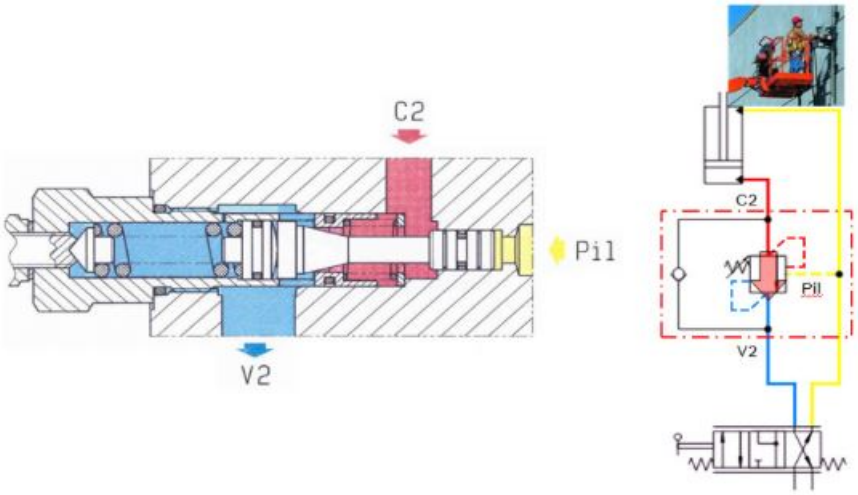

Figura 3.9. Pilotaggio per l'abbassamento controllato del carico

Per svolgere queste funzioni, le valvole di bilanciamento sono formate da 3 sottogruppi principali: una valvola unidirezionale, una valvola di massima ed un pistoncino di pilotaggio. La valvola unidirezionale consente il flusso libero per il sollevamento

del carico. La valvola di massima generalmente ha un otturatore ad area differenziale, o anulare, spinto in chiusura da una molla il cui precarico stabilisce la pressione di taratura della valvola stessa. La pressione di taratura è data quindi da:
$p_s = \frac{F_m}{A_r}$ dove F_m forza della molla e A_r area efficace dell'otturatore.
La pressione di pilotaggio agisce su un pistone di area A_p che spinge meccanicamente l'otturatore della valvola di massima verso l'apertura. Il parametro che caratterizza questa azione è il Rapporto di Pilotaggio R, che è un rapporto geometrico di aree, definito come:

$$R = \frac{A_p}{A_r} \tag{3.1}$$

Se si considera l'equilibrio sull'otturatore della valvola di massima, si ottiene la seguente espressione:

$$p_{pil} \cdot A_{pil} + p_c \cdot A_r = p_s \cdot A_r \tag{3.2}$$

dove p_c è la pressione esercitata dal carico in apertura. Dividendo l'equazione 3.2 per A_{pil} si ricava la pressione di pilotaggio p_{pil}:

$$p_{pil} = \frac{p_s - p_c}{R} \tag{3.3}$$

La formula sopra riportata è ricavata trascurando le forze d'attrito che si oppongono all'apertura della valvola e considerando delle valvole di controbilanciamento compensate alla contropressione.

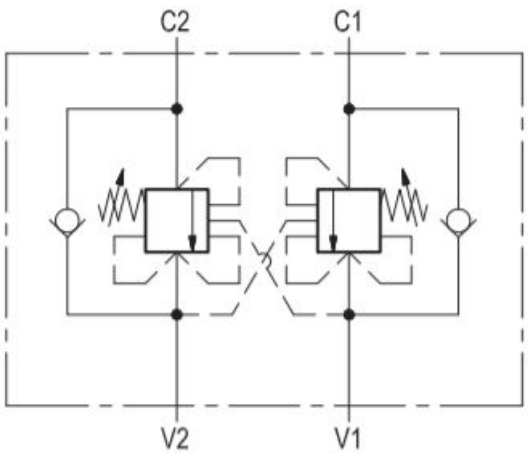

Figura 3.10. Schema VBSO compensata

Una caratteristica importante delle valvole di controbilanciamento riguarda proprio la presenza di una contropressione sullo scarico. In generale si cerca di evitarla in

quanto ha l'effetto di creare una forza che agisce nella direzione di chiusura dell'otturatore aumentando la taratura della valvola stessa. Servendosi dello schema riportato in Figura 3.11, si ricava il valore di taratura della valvola di massima, modificato dalla presenza di una contropressione p_{back} allo scarico.

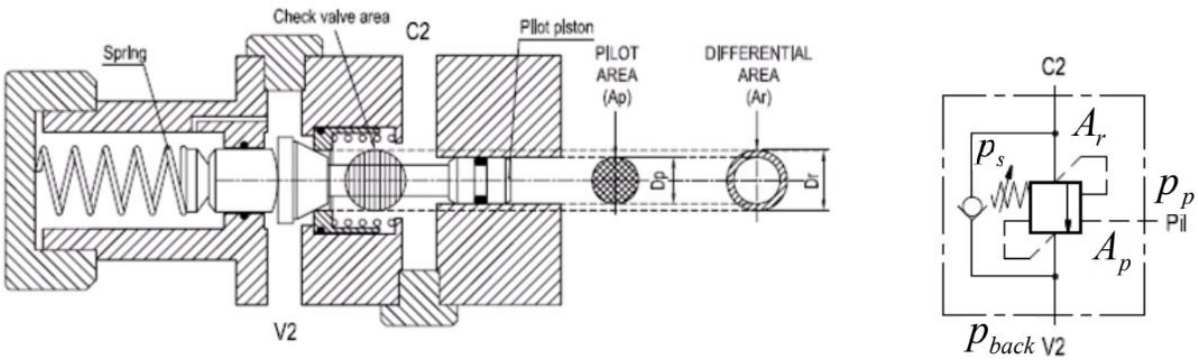

Figura 3.11. Superfici di spinta in presenza di contropressione

La contropressione in V2 agisce nella stessa direzione della molla, determinando un aumento della pressione necessaria all'apertura; essa spinge su di una superficie identica a quella di tenuta della boccola VU, quindi pari a:

$$A_{back} = A_{pil} + A_r \tag{3.4}$$

La spinta dovuta alla contropressione è uguale a:

$$F_{back} = p_{back} \cdot (A_{pil} + A_r) \tag{3.5}$$

Considerando l'equilibrio sull'otturatore della valvola di massima in presenza della contropressione si ottiene:

$$p_{pil} \cdot A_{pil} + p_c \cdot A_r = p_s \cdot A_r + p_{back} \cdot (A_{pil} + A_r) \tag{3.6}$$

Da cui, dividendo entrambi i membri per A_{pil} si ottiene:

$$p_{pil} = \frac{p_s - p_c}{R} + p_{back} \cdot \frac{R+1}{R} \tag{3.7}$$

Quest'equazione, mostra che in presenza di contropressione allo scarico (p_{back}), si ha un aumento della pressione di pilotaggio per determinare l'apertura della valvola. Gli effetti sopra descritti possono essere eliminati utilizzando valvole di controbilanciamento compensate alla contropressione.

Per tali valvole sono disponibili diversi rapporti di pilotaggio, ma in generale un alto rapporto di pilotaggio ($R \geq 7:1$) consente l'abbassamento del carico con una pressione di pilotaggio ridotta, velocizza le manovre e realizza un risparmio energetico. Può essere impiegato nei casi in cui il cinematismo della struttura fa si che la pressione indotta dal carico rimanga abbastanza costante durante il moto.
Al contrario, un basso rapporto di pilotaggio ($R \geq 5:1$) richiede una maggiore pressione di pilotaggio per l'abbassamento del carico, determinando un maggior consumo energetico, ma consente un migliore controllo ed una maggiore stabilità del movimento. Viene preferito quando la pressione indotta dal carico varia sensibilmente durante il movimento.

Capitolo 4

Collaudo manuale e tecnologia

4.1 Centralina di collaudo manuale

Dopo aver descritto le principali funzioni svolte dalle valvole oggetto di studio, l'attenzione è stata rivolta al processo di collaudo funzionale di tali prodotti. Tutte le valvole al termine del montaggio richiedono un collaudo idraulico per verificare il corretto funzionamento e garantire la qualità del prodotto al cliente. Il processo di collaudo è costituito da una combinazione di diverse operazioni che simulano le reali condizioni di lavoro in cui la valvola svolge le proprie funzionalità. Tutte queste operazioni sono eseguite, ad oggi, manualmente dall'operatore su un banco di collaudo *Bimal*, la cui foto è riportata in Figura 4.1.

Figura 4.1. Centralina di collaudo manuale

L'operatore, durante il collaudo, agisce su alcune valvole di regolazione della pressione e su alcune leve presenti sul pannello del banco che ne consentono l'eccitazione di valvole a due vie On/Off. Inoltre, è presente un panel pc touchscreen, attraverso il quale l'operatore si serve per inserire i valori di pressione di alcune valvole limitatrici, per eccitare alcune elettrovalvole e per avviare le pompe idrauliche. Tale banco è caratterizzato dalla possibilità di collaudare in tre diverse modalità in base alla tipologia di valvola e alle dimensioni della stessa. Si può distinguere il collaudo in morsa, in colonnetta e in piastra.

4.1.1 Collaudo in morsa

Il collaudo in morsa è il metodo che richiede minor tempo per l'attrezzaggio e tramite il quale si ha un tempo di caricamento/scaricamento del pezzo da collaudare minore. Si utilizza quindi per i codici con volumi di vendita annuali maggiori. Per collaudare una PiB in questo modo, risulta necessaria la realizzazione di un'apposita morsa che, sotto la spinta di tre cilindri idraulici azionati dall'operatore attraverso un pulsante presente nell'area di lavoro, serra il collettore della valvola tra un paio di moduli mobili appositi. Questi moduli sono opportunamente forati e consentono di realizzare il collegamento tra il circuito e le bocche di ingresso e uscita del collettore serrato. Nel caso di valvole che presentano ulteriori bocche di ingresso dell'olio, queste vengono alimentate tramite raccorderia idraulica standard per ricreare il circuito di collaudo necessario. I moduli della morsa sono quindi intercambiabili e vengono studiati per soddisfare i requisiti di collaudo di più codici in modo da essere polivalenti. Tuttavia, non tutti i tipi di collettori possono essere collaudati in questo modo, perché si è soggetti a limiti dovuti dalle dimensioni di alcuni collettori, avendo la morsa un'apertura limitata ed essendo presente una parte fissa superiore, detta castello, che crea ingombro. Per tale motivo bisogna prevedere tipologie di collaudo alternative.

4.1.2 Collaudo in colonnetta

Il collaudo in "colonnetta" è applicabile ad ogni tipo di collettore di piccole dimensioni. Questo tipo di collaudo consiste nel collegare la colonnetta, ossia un tubo idraulico rigido uscente dal pannello del banco, alla bocca di carico del collettore e nel realizzare gli altri collegamenti della valvola con il banco mediante l'utilizzo di componenti standard quali nippli, raccordi, curve, tubi idraulici. In questo tipo di

collaudo il tempo di setup risulta molto ampio a causa della complessità nella preparazione dei collegamenti e risulta, inoltre, molto variabile in base all'esperienza dell'operatore.

4.1.3 Collaudo in piastra

Prevede il collegamento della valvola con il banco attraverso una flangia, ovvero un supporto da collegare alla piastra, sulla quale fissare la valvola tramite apposite viti. La piastra, forata e collegata con banco, permette il collegamento diretto con una bocca della valvola. Queste flange vengono progettate appositamente per famiglie di PiB specifiche quindi sono ottimizzate per velocizzare il tempo di setup della centralina che rimane comunque superiore rispetto a quello del collaudo in morsa. Anche in questo caso come il collaudo in colonnetta il collegamento del banco con gli altri ingressi della valvola avviene mediante l'utilizzo di componenti standard quali nippli, raccordi, curve, tubi idraulici.

4.2 Le fasi di collaudo manuale

Il primo periodo svolto presso il reparto produttivo dello stabilimento, ha previsto oltre allo studio delle caratteristiche e delle funzioni delle valvole PiB anche l'osservazione diretta del collaudo manuale svolto dagli operatori. Ciò ha consentito di conoscere nel dettaglio le fasi di questo processo e sotto quali condizioni il prodotto può essere considerato perfettamente funzionante e di conseguenza idoneo alla consegna al cliente. Questo ha consentito successivamente di capire quali fasi di collaudo è possibile automatizzare. Ogni famiglia di valvola, in base alla funzione svolta, è caratterizzata da specifiche fasi di collaudo, atte a garantire il corretto funzionamento. Tra le le diverse fasi di collaudo se ne possono individuare 5 principali che si differenziano in base alla funzione svolta: Taratura, Pilotaggio, Tenuta, Inizio Apertura e Serraggio. Si riporta una descrizione di tali fasi e delle operazioni manuali svolte dagli operatori.

4.2.1 Taratura

La taratura in genere è una delle prime fasi eseguite dopo l'installazione della valvola in centralina. L'obiettivo è quello di garantire che ad una determinata pressione, detta *pressione di taratura*, la valvola consenta il passaggio di una portata di olio pari a 5 lt/min. Questo risultato è ottenuto dall'operatore che agisce, tramite una brugola, sulla vite di taratura della valvola. Inizialmente si procede azionando la mandata dell'olio nella centralina, per fornire una portata d'olio pari a 5 lt/min attraverso la selezione di un tasto dedicato presente sul touch screen di un terminale esterno di controllo. Successivamente si passa alla taratura della molla della valvola, poiché in fase di assemblaggio tutte le valvole sono caratterizzate da un precarico nullo della molla. Di conseguenza a inizio collaudo sarà sufficiente una pressione dell'olio molto ridotta, dal lato molla, per comprimerla, spostare l'elemento guida molla dal pistone e permettere quindi all'olio di attraversare la valvola. Per ottenere il precarico desiderato, l'operatore avvita parzialmente la vite di regolazione; in questo modo la molla opporrà una resistenza maggiore alla pressione dovuta al passaggio dell'olio. La taratura viene verificata dall'operatore osservando il valore di pressione raggiunto tramite il manometro installato in centralina. Come accennato in precedenza, la taratura della molla avviene con la portata costante di 5 lt/min di olio attraverso la valvola, e di conseguenza in questa fase il pistone rimane sempre in "posizione di spinta" della molla. Durante la fase di collaudo si cerca di simulare

il più possibile il funzionamento su di un impianto reale, in cui risulta molto importante garantire e verificare la corretta scorrevolezza del pistone. Tale condizione si ottiene in seguito ad una disattivazione e conseguente riattivazione della portata di olio in ingresso nella quale la valvola deve lavorare alla stessa pressione di taratura raggiunta alla fine del precedente passaggio verificando la corretta ripetibilità. Questa situazione è ricreata dall'operatore mediante l'attivazione di uno o più impulsi di pressione, definiti da interruzioni e riprese del flusso d'olio. La funzione di questa operazione è duplice: infatti se da un lato simula una possibile condizione di lavoro, dall'altro gli impulsi effettuati durante la taratura hanno anche il compito di far scorrere l'elemento mobile riducendo notevolmente la rugosità superficiale del corpo. Tale aspetto se presente in misura elevata, rappresenta motivo di maggiore attrito, quindi di mancato scorrimento tra i diversi componenti che potrebbero causare il fenomeno dello "*stick slip*", ovvero fenomeni di incollamento seguiti da improvvise accelerazioni per effetto della diminuzione dell'attrito tra i corpi in contatto. La riduzione della rugosità consente un miglioramento delle prestazioni della valvola, in termini di velocità di risposta e continuità di movimento.

4.2.2 Pilotaggio

Il pilotaggio, serve a permettere l'apertura della valvola quando la pressione di carico è inferiore a quella di taratura, ad esempio nelle valvole VBSO. Ma non solo, nelle valvole in cui l'apertura non è influenzata dal carico, come nel caso delle VBCN e VBC, la pressione di pilotaggio è necessaria all'apertura della valvola stessa. Per verificare il funzionamento del pilotaggio nelle VBSO, bisogna innanzitutto porre la valvola nella condizione normalmente chiusa, realizzata attraverso l'applicazione di una pressione di ingresso, detta "*pressione di tenuta*", inferiore rispetto a quella di taratura della valvola stessa. A livello pratico l'operatore procede all'applicazione della pressione di tenuta desiderata, normalmente inferiore di qualche decine di bar rispetto a quella di taratura, tramite specifico pulsante presente sul touch screen di comando. Il valore della pressione di tenuta viene impostato durante il setup del collaudo da parte dell'attrezzista, tramite un potenziometro che agisce su di un'elettrovalvola proporzionale inserita nel ramo di mandata dell'olio. Successivamente l'operatore preme uno specifico pulsante presente sul touch screen, in modo da abilitare il transito di una portata di olio sul canale della centralina che alimenta la sezione di ingresso del canale di pilotaggio della valvola. Sotto l'effetto di questa portata, il pistoncino di pilotaggio permette l'apertura della valvola. Per impostare il valore della pressione di pilotaggio, l'operatore agisce su un potenziometro analogo

a quello usato per impostare la pressione di tenuta, e aumenta gradualmente il valore di pressione finché non vede l'apertura completa della valvola con fuoriuscita di olio dallo scarico della valvola stessa. La stessa procedura viene eseguita per VBCN e VBC in cui si ha un incremento graduale della pressione tramite potenziometro. Prima di dichiarare terminata questa fase e poter quindi passare alla successiva, l'azione di attivazione e disattivazione della pressione di pilotaggio viene ripetuta diverse volte per migliorare la scorrevolezza degli organi in movimento relativo nel corpo valvola. Infatti, così come nella fase di taratura, anche le ripetute attivazioni del pilotaggio hanno come effetto diretto la riduzione della rugosità superficiale delle superfici a contatto.

4.2.3 Tenuta

Con la fase di tenuta l'obiettivo è quello di verificare che un determinato componente idraulico ad un certo valore di pressione garantisca la tenuta senza trafilamento di olio. Ad esempio si vuole verificare che, ad una pressione inferiore a quella di taratura, la valvola resti chiusa, impedendo il passaggio dell'olio. L'operatore durante la prova, osserva la completa assenza di passaggio di olio attraverso un visualizzatore dedicato e installato in centralina. Tale fase risulta di estrema delicatezza, in quanto un eventuale trafilamento di olio da parte della valvola, può compromettere il corretto funzionamento di quest'ultima.

4.2.4 Inizio apertura

La fase di inizio apertura vuole verificare l'apertura della valvola ad una pressione (detta "*pressione di inizio apertura*"), alla quale si determina un inizio di passaggio di portata d'olio. Diversamente dalla fase di taratura descritta inizialmente, con questa operazione non si vuole più verificare il passaggio dell'intera portata di 5 l/min, caratterizzata da una pressione maggiore, ma una portata, ritenuta significativa, di 0,2 l/min. Per il completamento di questa fase, l'operatore ha a disposizione un potenziometro, ed un visore collegato alla sezione di uscita della valvola. Attraverso il potenziometro, l'operatore aumenta gradualmente il valore della pressione in ingresso, e dal visore osserva la graduale comparsa di gocce di olio quando quest'ultimo inizia a trafilare attraverso la valvola. La frequenza di distacco di tali goccioline diventa sempre più elevata, fino a formare un filo d'olio continuo. Convenzionalmente si attribuisce la definizione operativa di "*pressione di preapertura*" a quel valore di pressione tale per cui l'operatore osserva un rapido incremento della sezione del filo

continuo. Se la valvola apre ad una pressione diversa da quella richiesta, l'operatore interviene sulla vite di taratura, regolando il precarico della molla.

4.2.5 Serraggio

La fase di serraggio si presenta come un'operazione delicata per la qualità del prodotto finito, andando ad agire direttamente su tutti i componenti della valvola che garantiscono la corretta tenuta. Durante tale fase infatti l'operatore si occupa di serrare il dado che ferma in posizione la vite di taratura, attraverso l'ausilio di una specifica chiave dinamometrica opportunamente tarata al valore di coppia specifico. L'esecuzione di tale fase viene collocata generalmente sulla parte finale di un intero ciclo di collaudo, successivamente alla taratura, pilotaggio e tenuta, in modo da permettere che eventuali malfunzionamenti della valvola possano essere identificati precedentemente al completo serraggio del pezzo.

Capitolo 5

Ottimizzazione del processo di collaudo PiB: PDCA method

Il processo di collaudo è un processo standardizzato caratterizzato dalla combinazione delle fasi precedentemente descritte, in base al codice valvola specifico. Nell'ottica del miglioramento continuo dei servizi e dei processi di produzione, alla base della filosofia *Kaizen*, si è definito un progetto di ottimizzazione del processo di collaudo attraverso l'automatizzazione di un banco di collaudo manuale. Tale progetto di ottimizzazione è stato condotto seguendo un metodo di gestione iterativo utilizzato in ambito industriale e denominato *ciclo di Deming* o *ciclo PDCA*. Di seguito, dopo una breve descrizione del metodo PDCA, sono riportate in modo dettagliato le attività svolte, divise secondo le fasi del ciclo di Deming.

5.1 IL metodo PDCA: storia e utilizzo

Il metodo PDCA o ruota di Deming è la rappresentazione visiva di un ciclo "virtuoso" di miglioramento continuo per i prodotti, processi e problemi specifici. É una metodologia di validità universale in quanto consente di affrontare in maniera rigorosa e sistematica qualsiasi attività.

Il metodo era stato introdotto nel 1920 da W.A. Shewhart, un brillante ricercatore statistico dei Bell Laboratory, ma fu ripreso e diffuso ampiamente verso il 1950 da W.E. Deming, diffondendo in modo significativo la cultura della qualità in Giappone. In un'organizzazione orientata al miglioramento continuo, Deming proponeva un frequente riciclo del metodo, da cui anche il nome di "Ruota di Deming" o PDCA.

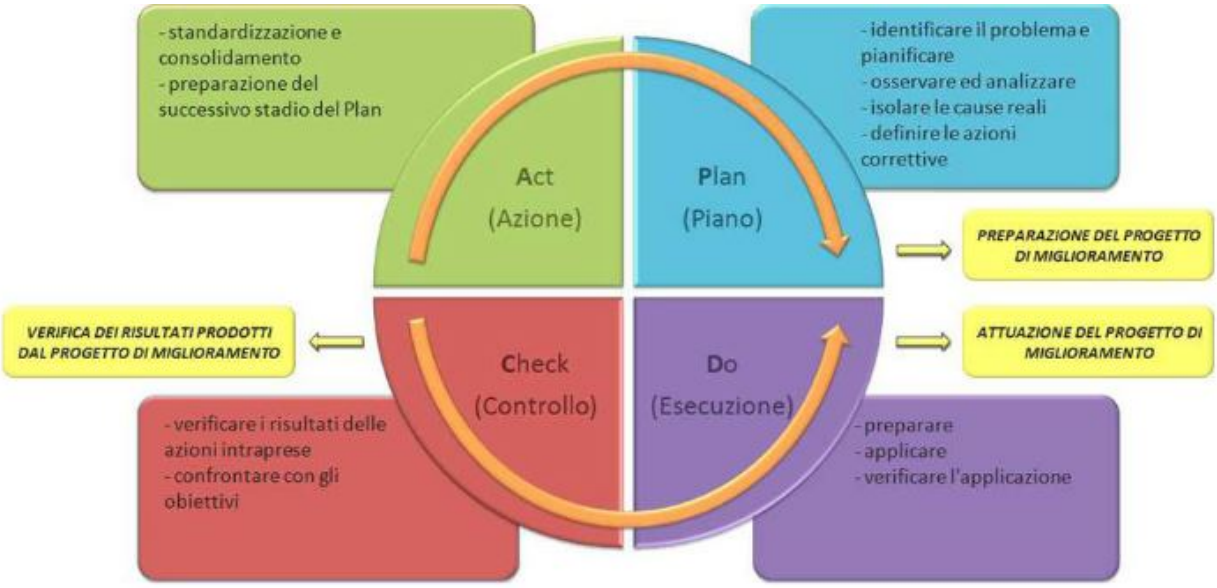

Figura 5.1. Il ciclo PDCA o ruota di Deming

L'acronimo PDCA sta ad identificare la successione di fasi che costituiscono tale metodologia:

1. Plan (Pianificazione): in questa macro-fase l'obiettivo è quello di sviluppare un piano d'azione dettagliato per risolvere un problema o migliorare un processo. Le principali attività previste sono la raccolta dei dati relativi al problema o al processo, la precisazione degli obiettivi del miglioramento da attuare e la pianificazione delle azioni da svolgere.

2. Do (Eseguire): Rappresenta la fase operativa del ciclo di Deming in cui sono svolte tutte le attività pianificate per ottenere i risultati attesi. Inoltre, durante la fase Do è prevista anche una verifica dell'adeguatezza delle soluzioni adottate per il raggiungimento degli obiettivi previsti. Affinché in questa fase si realizzino tutte le operazioni nei tempi previsti è fondamentale aver eseguito un'accurata fase di pianificazione.

3. Check (Controllo): In questa macro-fase sono attivate tutte le necessarie valutazioni per verificare il raggiungimento dei risultati intermedi e finali attesi. Essendo opportuno verificare in corso d'opera il raggiungimento dei risultati intermedi, una buona parte di questa macro-fase si svolge durante la macro-fase Do.

4. Act (Agire): L'esito dei risultati delle valutazioni svolte nella fase di Check comporta differenti decisioni. In caso di risultati conformi alle aspettative è opportuno procedere alla standardizzazione e al consolidamento del processo di miglioramento ottenuto. Nel caso in cui, invece, i risultati raggiunti non siano conformi alle aspettative, bisogna prevedere interventi di azioni correttive atte ad eliminare le cause delle non conformità e attivare il riciclo del metodo ripartendo dalla macro-fase Plan.

5.2 Plan: Definizione obiettivi e pianificazione

Il primo passo da eseguire nella realizzazione di un progetto è un'accurata pianificazione degli interventi e delle attività da svolgere per il raggiungimento degli obiettivi prefissati. Gli obiettivi previsti attraverso il progetto di ottimizzazione del collaudo sono i seguenti:

- ridurre il numero di risorse al collaudo per ottenere un cost saving.
- migliorare la qualità del collaudo eliminando la soggettività dell'operatore.
- memorizzare i dati di collaudo per il cliente.

Questi obiettivi riguardano tutti i codici-prodotto definiti ad alta pressione, ossia con pressioni di esercizio superiori ai 400 bar, delle 3 famiglie di valvole PiB, descritte nel capitolo 3: VBCN, VBC e VBSO.
Dal layout riportato in Figura 5.2 si può notare la configurazione di una linea di lavoro di alta pressione del reparto produttivo PiB, denominata *Linea HP01* (*High Pressure*), costituita da due celle di lavoro, ciascuna composta da una postazione di montaggio e da un banco di collaudo manuale.

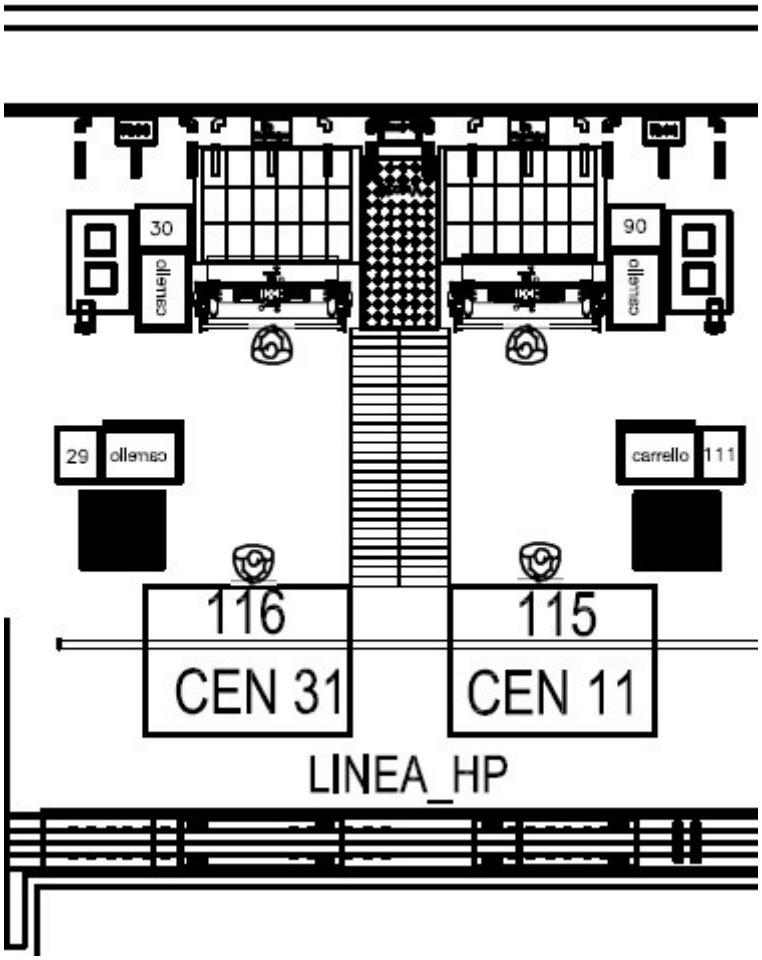

Figura 5.2. Layout della Linea HP01

Dal layout si può notare la presenza di un operatore al montaggio e di uno al collaudo. L'istogramma di Figura 5.3, mostra il confronto tra il tempo ciclo di montaggio e di collaudo. Il tempo ciclo di collaudo, in generale, facendo una media sui tempi cicli di tutti i codici VBCN, VBC e VBSO risulta maggiore rispetto a quello di montaggio. In questo caso il *takt time* della linea, ovvero il tempo necessario ad ottenere una valvola montata e collaudata, è definito dal tempo ciclo di collaudo essendo maggiore rispetto al montaggio.

L'obiettivo principale del progetto di ottimizzazione del processo di collaudo è , quindi, quello di ridurre il tempo ciclo di collaudo, così da ottenere una riduzione del takt time della linea, ed eliminare la presenza dell'operatore al collaudo.

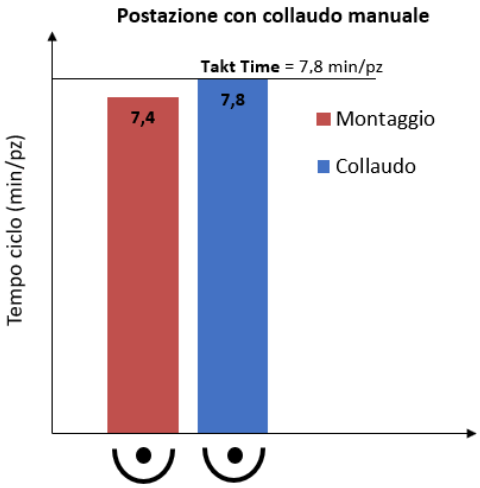

Figura 5.3. Takt time situazione iniziale

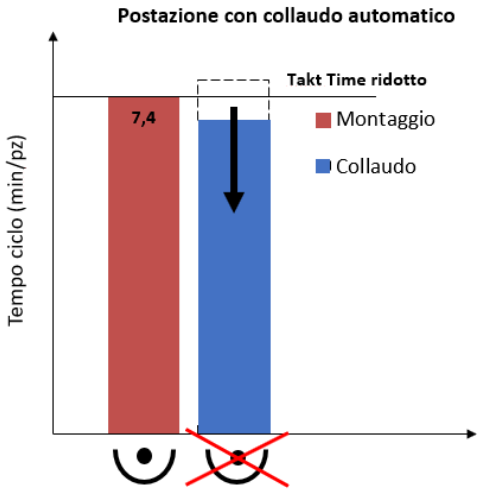

Figura 5.4. Takt time situazione obiettivo

Quanto descritto è realizzabile attraverso la trasformazione del banco di collaudo manuale in un banco in grado di lavorare in modo automatico e in tempo mascherato. La trasformazione del banco di collaudo manuale ha previsto innanzitutto modifiche al circuito idraulico per l'esecuzione delle fasi di collaudo manuali in automatico e per garantire una pressione di esercizio fino a 700 bar. Inoltre, sono anche stati definiti alcuni requisiti software che il banco deve possedere, quali:

- Esecuzione in modalità totalmente automatica dei passi di collaudo secondo il programma di collaudo caricato, con possibilità di avere passi di avanzamento

manuali con consenso da parte dell'operatore.

- Esecuzione di collaudi in modalità manuale per permettere agli operatori l'utilizzo del banco anche in assenza di programmi di collaudo per codici valvola nuovi, utilizzando un pannello touch screen attraverso il quale poter eccitare le valvole necessarie al collaudo e inserire i valori di pressione e portata richiesti.
- Per ogni passo di collaudo eseguito in modo automatico, deve essere inserito un numero massimo di tentativi di ripetizione di quel passo, in caso di risultato negativo. Falliti tutti i tentativi preimpostati è richiesto l'intervento dell'operatore per la riparazione della valvola.
- Registrazione di tutti i dati di collaudo eseguiti in modalità automatica in un database SQL dedicato su server aziendale.

5.3 Do: La fase di esecuzione

La fase Do è la fase operativa del Ciclo di Deming, che come già descritto in precedenza, segue la fase di pianificazione. Consiste nella progettazione e realizzazione pratica di tutte le attività previste per il raggiungimento dell'obiettivo definito nella fase *Plan*. Questa fase ha previsto la trasformazione del banco di collaudo manuale in automatico con la riprogettazione del circuito idraulico, elettrico e della parte software. Ciò, è stato svolto in partnership con un fornitore di comprovata esperienza nella costruzione di sistemi idraulici.

5.3.1 Circuito Idraulico

Si vuole adesso descrivere lo schema idraulico del banco di collaudo realizzato per poter meglio capire quali sono le caratteristiche che il banco possiede per garantire la corretta esecuzione di tutte le fasi di collaudo. Si tratta di un banco ad alta pressione in grado di collaudare valvole con pressione di taratura fino a 700 bar. Lo schema può essere suddiviso principalmente in quattro parti in base alla funzione svolta durante le fasi di collaudo: la linea principale di carico, la linea di pilotaggio, le linee di scarico U1 e U2.

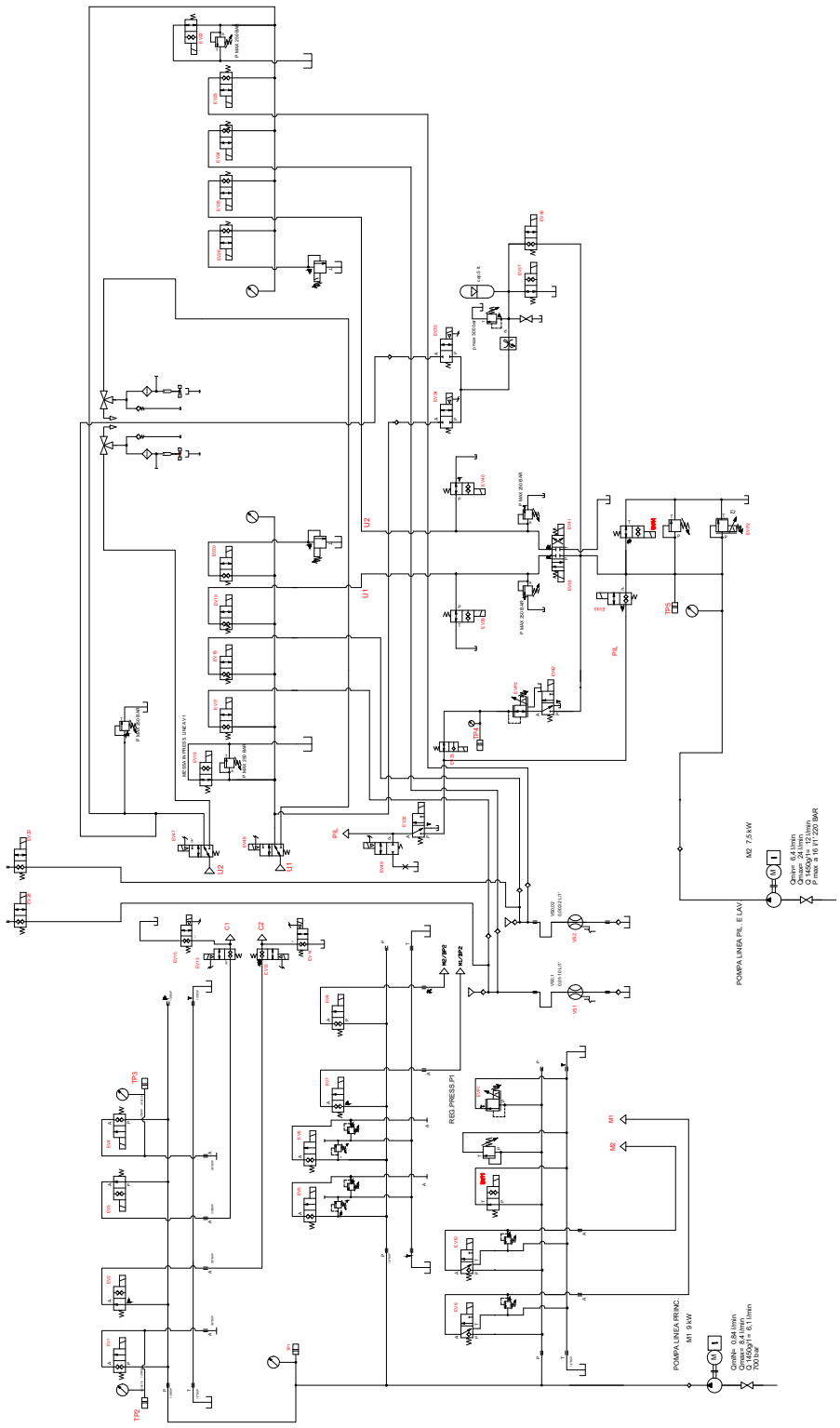

Figura 5.5. Schema idraulico bando di collaudo semiautomatico

La linea di pilotaggio è la parte del circuito del banco utilizzata per pilotare le valvole nelle diverse fasi di collaudo. È caratterizzata da una pompa a cilindrata fissa in grado di erogare una portata di 16 l/min a 220 bar di pressione massima. La portata erogata dalla pompa può essere regolata variando la velocità di rotazione del motore elettrico. La pompa, infatti, è azionata da un motore elettrico asincrono che, alimentato per mezzo di un inverter elettronico, consente la variazione della velocità di rotazione del motore, variando in modo coordinato la frequenza e la tensione di alimentazione. La variazione della velocità di rotazione del motore permette di regolare la portata erogata dalla pompa.

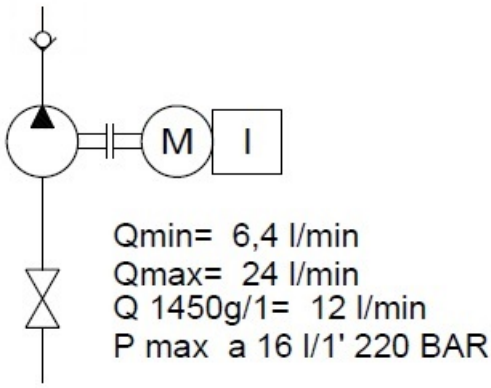

Figura 5.6. Pompa di pilotaggio

A valle della pompa è posta una valvola di non ritorno semplice, Figura 5.7, chiamata anche valvola di ritegno per permettere che il flusso avvenga nella direzione di mandata e impedire il reflusso; è inoltre necessaria per impedire lo svuotamento dell'impianto in caso di arresto della pompa.

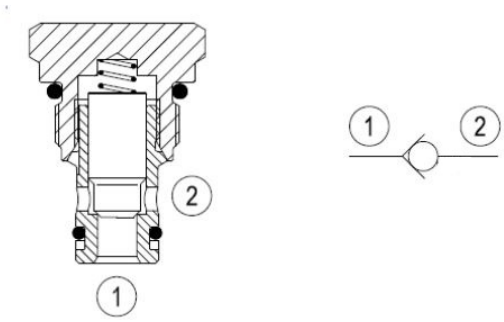

Figura 5.7. Sezione e schema idraulico di una valvola di non ritorno

La valvola unidirezionale è seguita da una valvola limitatrice di pressione proporzionale EVP2 inserita tra il ramo in pressione di mandata e il serbatoio. Al raggiungimento della pressione di taratura, imposta con continuità in funzione del segnale elettrico d'ingresso, la valvola limitatrice mette a scarico il ramo in cui è inserita, evitando che la pressione salga oltre il valore di taratura. Questa valvola ha la funzione di determinare una prima riduzione della pressione sul ramo di pilotaggio. La limitatrice proporzionale è seguita da una limitatrice meccanica che, a differenza della precedente, è costituita da un otturatore a sfera o a cono contrastato da una molla tarabile manualmente tramite volantino. Tale valvola tarata a 220 bar funge da valvola di sicurezza proteggendo il circuito contro danni derivanti da incontrollati aumenti di pressione. Parallelamente la presenza dell'elettrovalvola EV44 On/Off a due vie normalmente aperta consente di mettere a scarico l'olio. L'eccitazione di quest'ultima permette la messa in pressione della linea di pilotaggio e consente al fluido di seguire 4 possibili vie: il tratto di "*pilotaggio diretto*", il tratto di "*pilotaggio a pressione ridotta*", l'inserimento della linea di pilotaggio sull'uscita U1 e U2 e l'inserimento sulla linea di lavaggio.

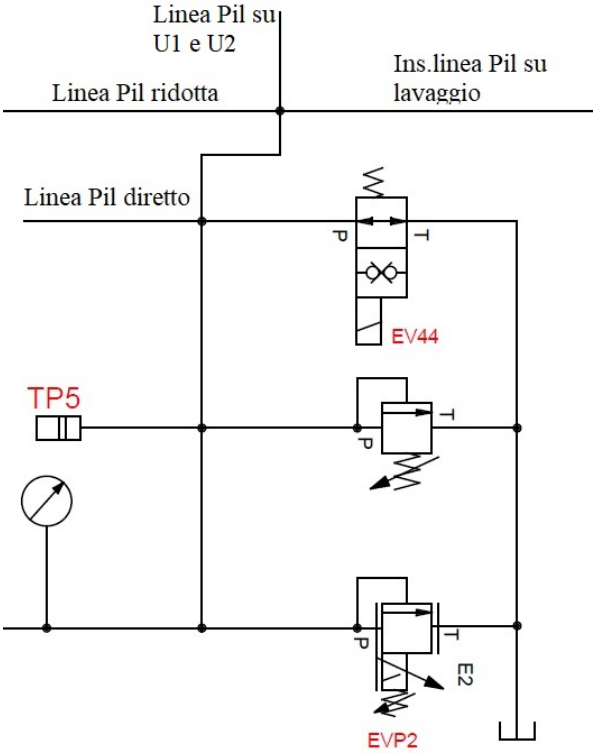

Figura 5.8. Blocco di pilotaggio

L'eccitazione dell'elettrovalvola EV43 On/Off a due vie normalmente chiusa determina il passaggio dell'olio attraverso il tratto di "*pilotaggio diretto*", senza possibilità di regolazione della pressione. In questo modo eccitando la EV32 On/Off a tre vie normalmente chiusa sulla bocca di uscita si ha una pressione imposta dalla limitatrice di pressione proporzionale descritta in precedenza.
Il tratto di "*pilotaggio a pressione ridotta*" è invece abilitato dall'elettrovalvola EV42 On/Off a tre vie normalmente chiusa, ed è caratterizzato dalla presenza di una valvola riduttrice di pressione proporzionale EVP3. La valvola genera una caduta di pressione variabile fra monte e valle attraverso lo spostamento della spola nella propria sede. La caduta di pressione è inversamente proporzionale in modo quadratico all'aumento dell'area di passaggio interno tra spola e sede. Sotto l'ipotesi di portata costante, aumentando l'area di passaggio, si ha una diminuzione della variazione di pressione. La legge che descrive questo comportamento è la seguente:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \tag{5.1}$$

In cui C_d è il coefficiente di efflusso, variabile per ogni tipologia di valvola, A è l'area di passaggio tra spola e sede, Δp è la differenza di pressione tra monte e valle della valvola e ρ è la densità del fluido. Inoltre, a differenza della valvola limitatrice, la valvola riduttrice non va mai collegata a scarico, bensì in linea fra due rami attivi.

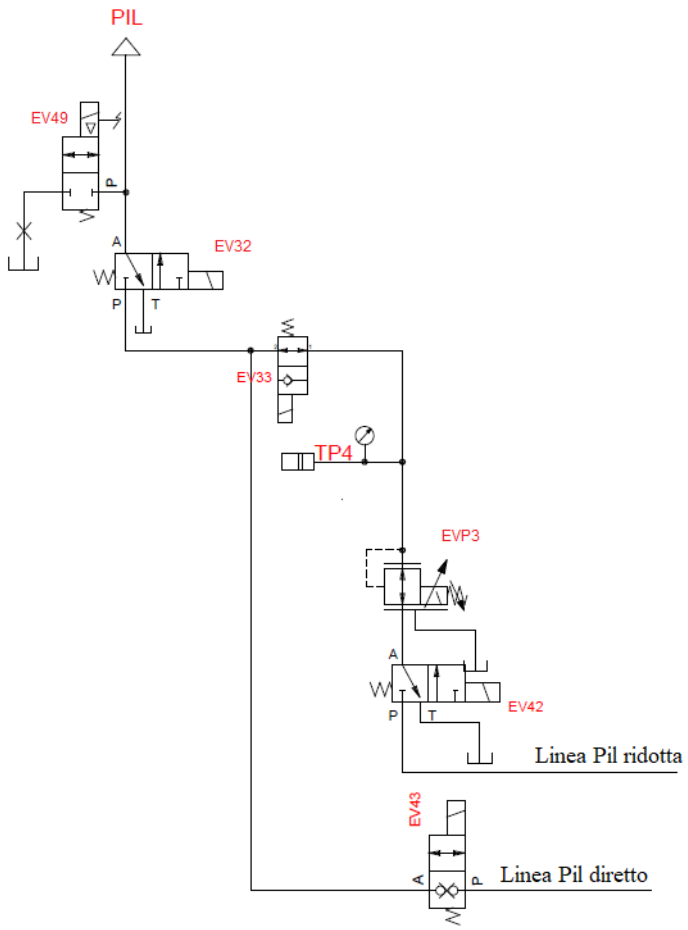

Figura 5.9. Linea di pilotaggio diretto e a pressione ridotta

L'inserimento della linea di pilotaggio sulle uscite U1 e U2 del banco avviene tramite la presenza di un distributore 4/3, con 4 bocche e 3 posizioni a centro chiuso. L'eccitazione dell'EV38 e dell'EV41 determina rispettivamente l'inserimento della linea di pilotaggio sull'uscita U1 e U2. Il distributore è poi seguito da una valvola limitatrice di pressione meccanica, tarata a 250 bar, su ciascuna linea che svolge una funzione di sicurezza. Il passaggio dell'olio attraverso l'uscita U1 è determinato dall'eccitazione dell'EV39 e dell'EV19, mentre per l'uscita U2 è necessaria l'eccitazione dell'EV40 e dell'EV25. Per semplicità di rappresentazione nello schema di Figura 5.10 sono state omesse le elettrovalvole EV19 ed EV25.

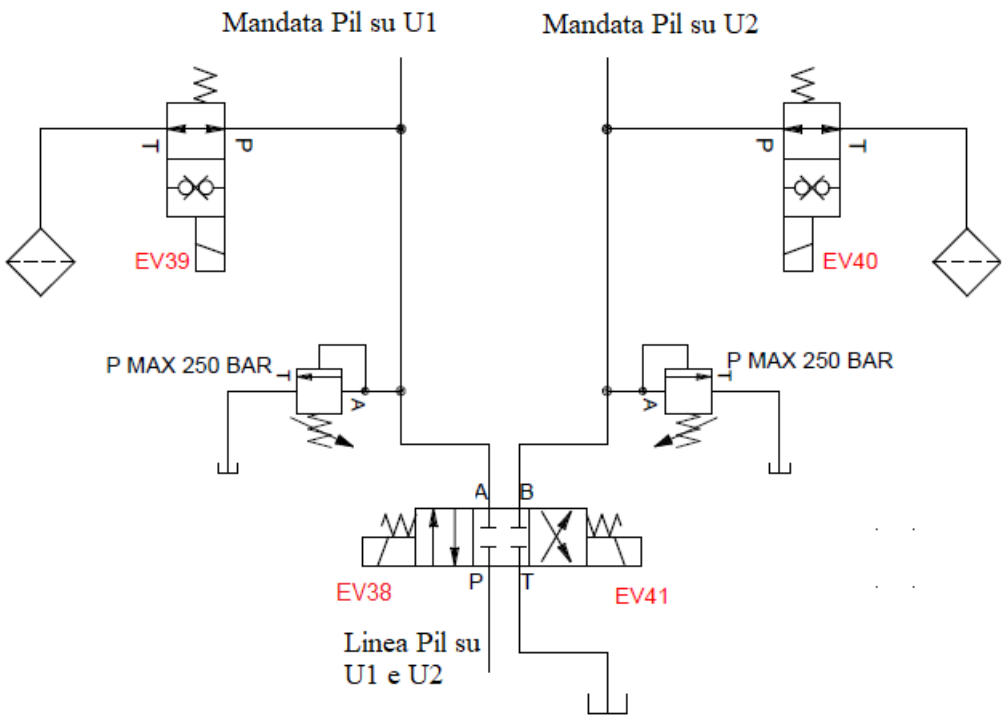

Figura 5.10. Inserimento linea di pilotaggio su U1 e U2

La linea di lavaggio è invece costituita dall'elettrovalvola EV36 a 2 vie normalmente chiusa, la cui eccitazione ne abilita il passaggio dell'olio sul tratto stesso. Successivamente vi è un accumulatore idraulico, un recipiente di liquido in grado di assorbire e successivamente restituire liquido in pressione al circuito in derivazione. Si tratta quindi di un accumulatore di energia in grado di moltiplicare la potenza e la portata rispetto ai valori della pompa. L'eccitazione dell'elettrovalvola EV37 normalmente aperta ne garantisce la messa in pressione del tratto di circuito e permette il caricamento dell'accumulatore. A valle dell'accumulatore è posta una valvola limitatrice, che svolge anche in questo caso una funzione di sicurezza. L'ultimo elemento del tratto è rappresentato da un regolatore di flusso compensato, che è una valvola regolatrice di portata, che permette la riduzione della portata in arrivo ad un valore inferiore e costante. Questa valvola è costituita da una strozzatura, la quale agisce come una resistenza in cui parte dell'energia idraulica viene trasformata in energia termica. Infine, la presenza delle elettrovalvole EV34 ed EV35, quando eccitate, abilitano l'inserimento della linea di lavaggio sulle uscite U1 e U2.

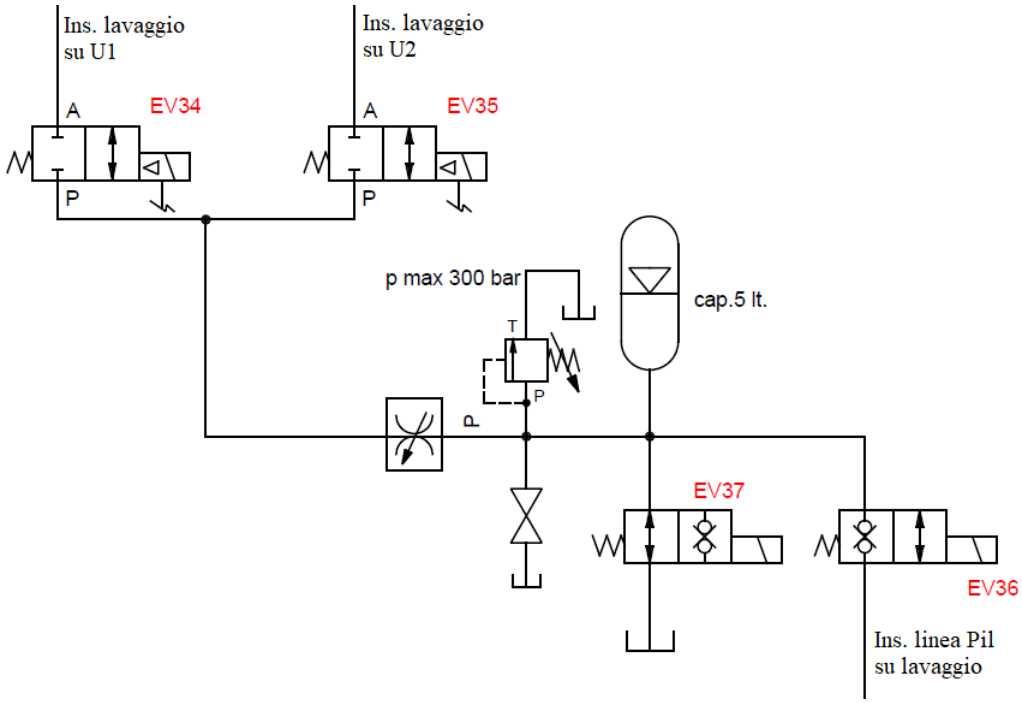

Figura 5.11. Inserimento lavaggio su U1 e U2

La linea principale di carico, è la parte di circuito che ha l'obiettivo di simulare, durante il collaudo, la pressione di carico che equivale alla pressione raggiunta nella camera del cilindro nelle applicazioni reali. Questo tratto è caratterizzato da una pompa a cilindrata fissa in grado di erogare una portata di 6,1 l/min a 700 bar di pressione massima. Anche in questo caso la portata erogata dalla pompa può essere regolata variando la velocità di rotazione del motore elettrico per mezzo di un inverter elettronico.
A valle della pompa è posta una valvola di non ritorno semplice impedendo il reflusso e lo svuotamento dell'impianto in caso di arresto della pompa.
La valvola di ritegno è seguita da un blocco in cui vi è una valvola limitatrice di pressione proporzionale EVP1 che, inserita tra il ramo in pressione di mandata e il serbatoio permette la regolazione della pressione in funzione del segnale elettrico di ingresso. In parallelo alla limitatrice proporzionale vi è una limitatrice meccanica tarata a 700 bar e l'elettrovalvola EV11 a due vie normalmente aperta che eccitata consente la messa in pressione del circuito. Le elettrovalvole EV12 ed EV13, a due vie normalmente chiuse, consentono rispettivamente l'inserimento in pressione della linea indicata con C1 e C2, mentre l'EV14 ed EV15 consentono la messa a scarico del

ramo. In questo tratto di circuito descritto, la regolazione della pressione avviene solamente tramite la limitatrice proporzionale. Infine, osservando il circuito di Figura 5.12, si può notare la presenza di altre quattro linee di uscita: M1, M2, M1/BP2 ed M2/BP2. In queste ultime linee è possibile una regolazione della pressione agendo manualmente su alcune valvole limitatrici di pressione meccaniche. Per tale motivo queste uscite non sono state utilizzate nella programmazione delle fasi di collaudo automatiche.

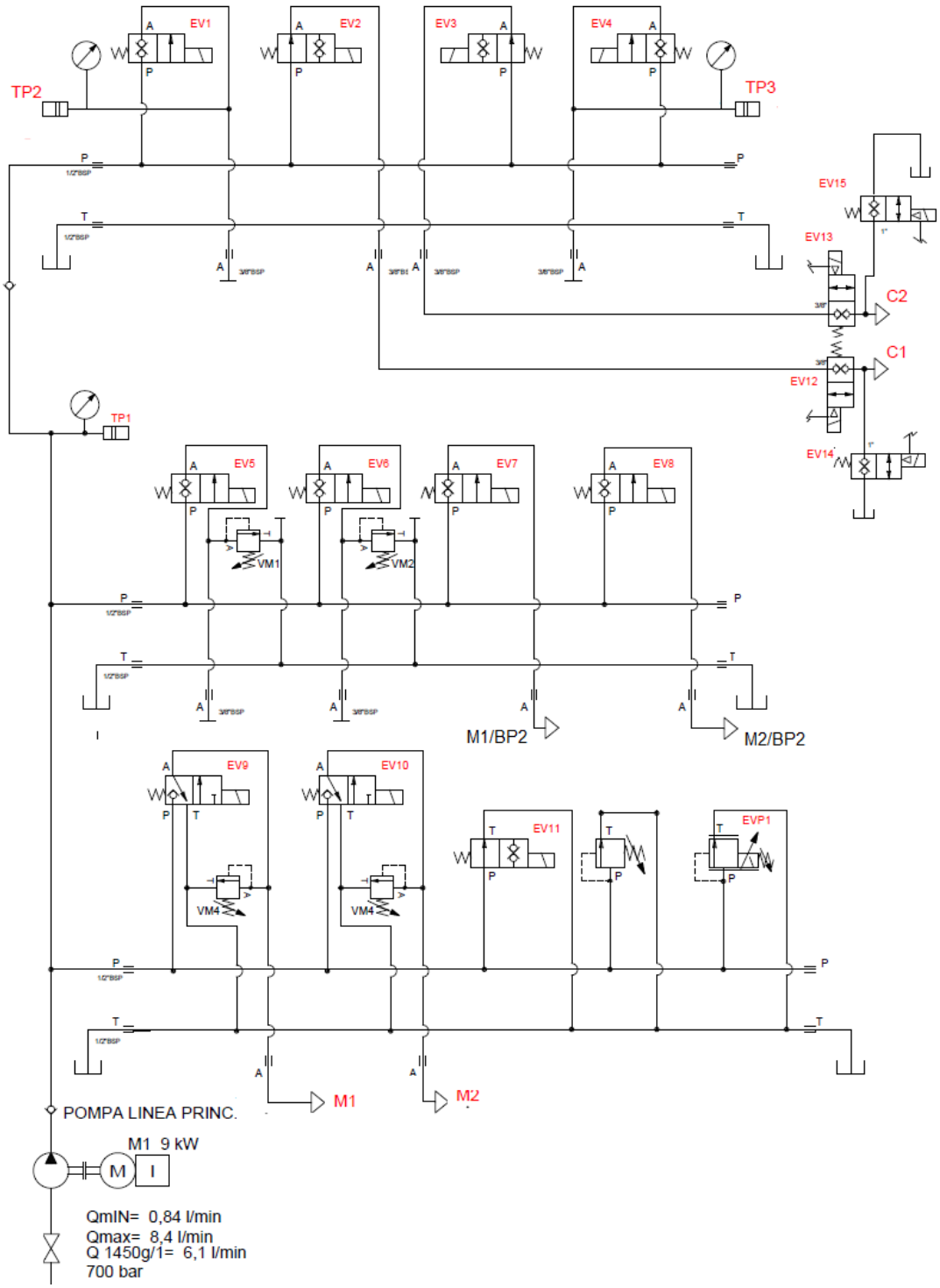

Figura 5.12. Linea principale di carico

La linea di scarico è la parte di circuito che, collegata tramite U1 o U2 alla valvola da collaudare, consente di scaricare l'olio a serbatoio quando si ha l'apertura della valvola stessa. Tale linea oltre allo scarico dell'olio viene utilizzata anche in altre fasi come linea di alimentazione collegata alla linea di pilotaggio. Si è scelto, per convenzione, di chiamarla linea di scarico, poiché viene principalmente utilizzata per lo scarico dell'olio tramite stillicidio o flussimetro. Sulla linea U1 è presente l'elettrovalvola EV48 a tre vie che, nella condizione di riposo, consente di inviare l'olio in un blocco costituito da 4 elettrovalvole (EV17, EV18, EV19, EV20) a 2 vie normalmente chiuse e da un elettrovalvola EV16 a 2 vie normalmente aperta. Nella condizione di riposo l'olio viene scaricato a serbatoio attraversando l'EV16. L'eccitazione dell'EV16 consente di mantenere in pressione la linea U1, e la presenza di una valvola limitatrice di pressione tarata a 250 bar ne garantisce la sicurezza del circuito. L'eccitazione dell'EV16 e dell'EV17 o EV18 consente di scaricare l'olio della linea U1 attraverso il tratto di circuito in cui sono presenti due flussimetri. Tali flussimetri, aventi fondo scala rispettivamente 10 l/min e 2 l/min, consentono la misura della portata. L'elettrovalvola EV19, presente nel blocco, consente il collegamento della linea di pilotaggio, descritta precedentemente, con la linea U1.

Nel caso in cui venga eccitata l'elettrovalvola EV48, l'olio va a scarico attraversando un blocco costituito da due piccoli condotti. In uno è presente una valvola di ritegno e nell'altro un gocciolatore in grado di generare lo stillicidio dell'olio. L'olio giungendo al blocco attraversa prima la via di minor resistenza, ossia quella in cui è presente il gocciolatore. Quest'ultimo rappresenta una piccola strizione in grado di generare una sovrapressione, tale da vincere la resistenza esercitata dalla molla della valvola di ritegno. In questo modo quando si ha una portata tale da saturare il gocciolatore, la portata in eccesso viene scaricata attraverso la valvola di ritegno. Nel tratto del gocciolatore, inoltre, è presente un lettore di gocce in grado di rilevarne il passaggio e permetterne il conteggio, utile per le prove di tenuta, descritte successivamente.

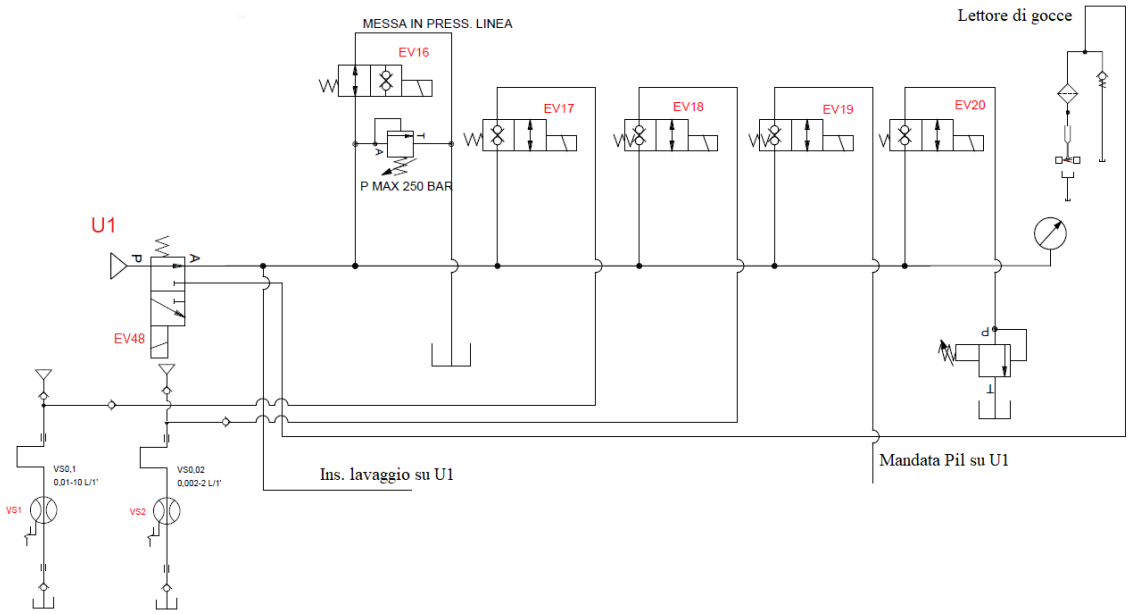

Figura 5.13. Linea di scarico U1

La linea di scarico U2, consente allo stesso modo della linea U1, lo scarico dell'olio tramite stillicidio o flussimetro e il collegamento con la linea di pilotaggio. L'elettrovalvola EV47 a tre vie, nella condizione di riposo consente di inviare l'olio in un blocco costituito da 4 elettrovalvole (EV23, EV24, EV25, EV26) a 2 vie normalmente chiuse e da un elettrovalvola EV22 a 2 vie normalmente aperta. Nella condizione di riposo l'olio viene scaricato a serbatoio attraversando l'EV22. L'eccitazione di quest'ultima consente di mantenere in pressione la linea U2, e anche in questo caso la presenza di una valvola limitatrice di pressione tarata a 250 bar ne garantisce la sicurezza del circuito. L'eccitazione dell'EV22 e dell'EV23 o EV24 consente di scaricare l'olio della linea U2 attraversando rispettivamente i flussimetri da 2 l/min e 10 l/min. L'elettrovalvola EV25, presente nel blocco, consente il collegamento della linea di pilotaggio con la linea U2. Infine, l'eccitazione dell'elettrovalvola EV47 consente lo scarico dell'olio attraverso il secondo gocciolatore.

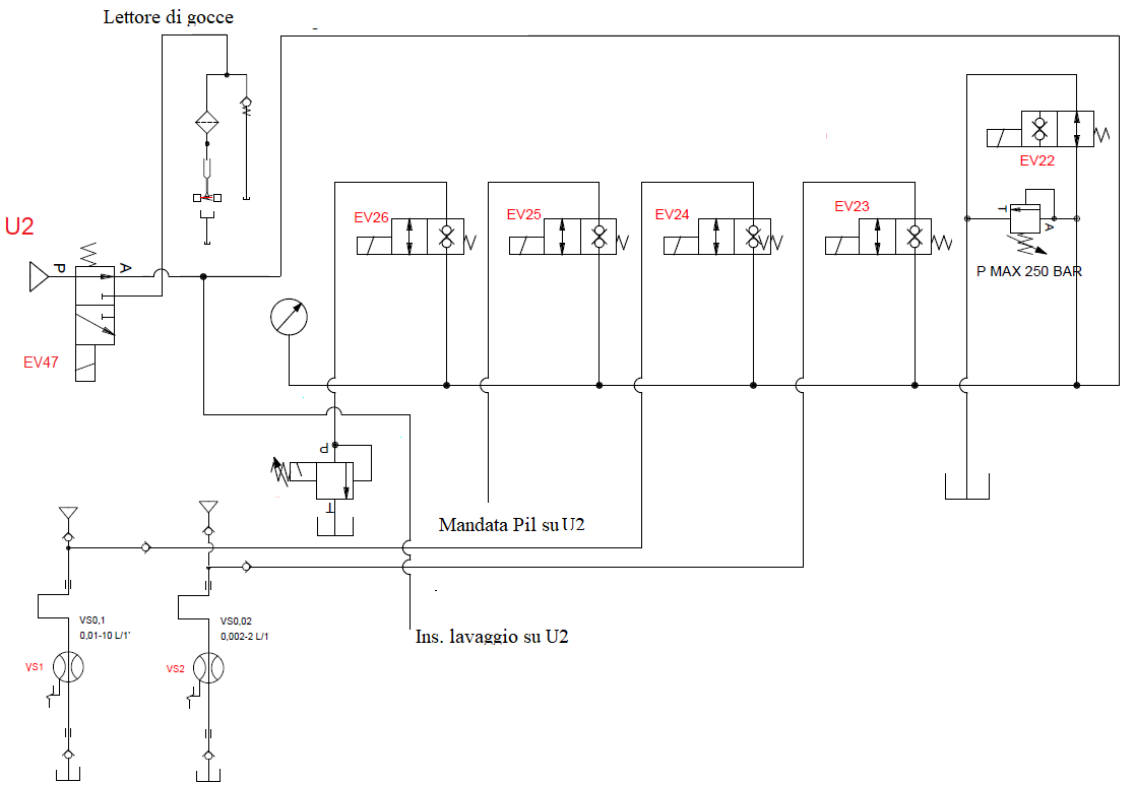

Figura 5.14. Linea di scarico U2

5.3.2 Verifica del funzionamento idraulico

All'interno della fase Do, è prevista una verifica delle scelte adottate in fase di progettazione e di costruzione del circuito idraulico del banco. Per tale motivo sono state eseguite una serie di prove idrauliche necessarie per la validazione del banco dal punto di vista oleodinamico. Le prove sono state condotte in modalità manuale, attraverso l'interfaccia grafica presente sul panel pc del banco, in cui vi è la possibilità di eccitare le elettrovalvole necessarie premendo i pulsanti ad essi associati ed aumentare la pressione attraverso i potenziometri associati a ciascuna valvola proporzionale.

L'obiettivo è stato quello di verificare principalmente il corretto comportamento della pressione sul ramo di pilotaggio, in cui è richiesta una variazione massima di $\pm$ 0.2 bar rispetto al set point. Le prime prove hanno mostrato oscillazioni di pressione al di fuori del range di accettabilità e una bassissima ripetibilità, ovvero a fronte di uno stesso valore di corrente in ingresso si sono ottenuti valori molto diversi di pressione. Ciò, ha condotto ad uno studio approfondito del ramo di pilotaggio

finalizzato all'individuazione della causa del problema. In particolare analizzando le caratteristiche tecniche di ciascun componente della linea di pilotaggio è emerso che la valvola riduttrice di pressione proporzionale pilotata, scelta, risultava poco adatta al tipo di applicazione richiesta. La valvola precedentemente scelta era una valvola proporzionale avente le seguenti caratteristiche:

Pressione massima p_{max}	100 bar
Isteresi	$\pm$ 2.5 % p_{max}
Ripetibilità	$< \pm$ 2 % p_{max}
Linearità	$\pm$ 3.5 % p_{max}

Come mostrato nella tabella i valori di ripetibilità e di isteresi, risultano troppo alti per la nostra applicazione in cui il range di pressione di lavoro sul ramo di pilotaggio a pressione ridotta è di 0-25 bar. Inoltre, la valvola scelta non ci garantiva una pressione di 0 bar a fronte di un segnale elettrico nullo in ingresso. Per tale motivo è stata scelta una valvola proporzionale diretta con fondo scala di 30 bar che riporta le caratteristiche di tabella:

Pressione massima p_{max}	30 bar
Isteresi	$\pm$ 2 % p_{max}
Ripetibilità	$< \pm$ 2 % p_{max}

Tale valvola ci ha consentito di ottenere un miglioramento in termini di ripetibilità e l'annullamento della pressione con segnale elettrico di ingresso nullo. Si riporta, inoltre, la caratteristica della valvola scelta in cui viene mostrato l'andamento della pressione in funzione del segnale di corrente in ingresso.

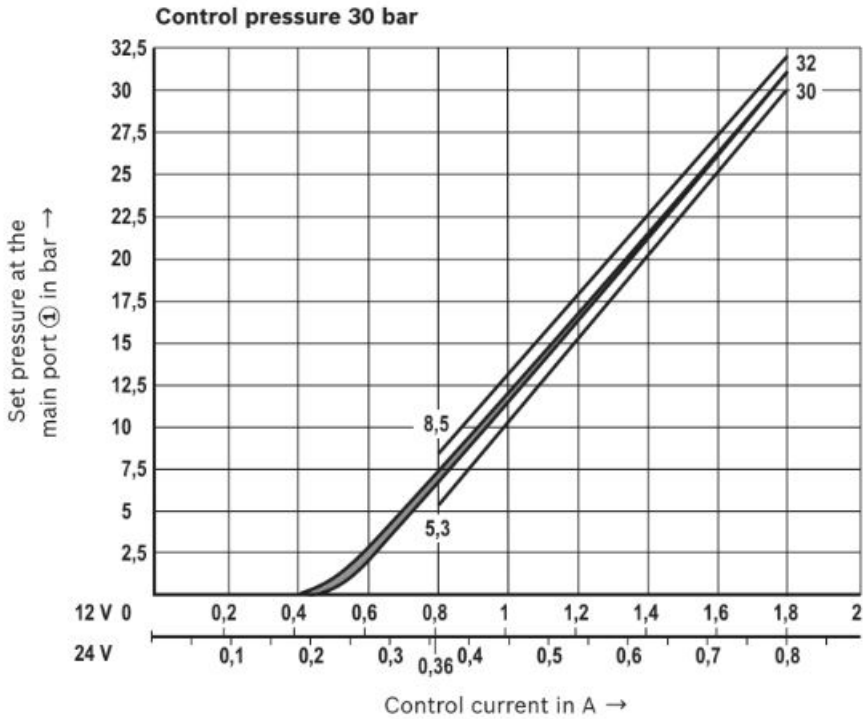

Figura 5.15. Caratteristica valvola riduttrice di pressione proporzionale

Durante i medesimi test sono stati riscontrati andamenti di pressione poco stabili con improvvisi picchi di pressione non solo nel ramo di pilotaggio ma anche nel ramo di circuito principale di carico. Tali oscillazioni si è scoperto essere dovute alla presenza di emulsione di olio e aria nel serbatoio di dimensioni troppo piccole. L'olio minerale infatti è in grado di sciogliere, in condizioni di saturazione alla pressione atmosferica, circa il 9% d'aria in volume. In particolare, secondo la legge di *Henry-Dalton*, fino a circa 300 bar la quantità d'aria disciolta è proporzionale alla pressione assoluta, per cui con l'aumentare della pressione l'olio tende a scioglierne una quantità maggiore fino alla saturazione. Si riporta la legge di *Henry-Dalton*:

$$V_{aria} = K \cdot V_{olio} \cdot \frac{p}{p_1} \tag{5.2}$$

Dove p_1 è la pressione atmosferica (1 bar)e K è un coefficiente che per l'olio minerale vale circa 0.09. Da tale formula si evince che, quando si ha un incremento di pressione, la quantità di aria in volume disciolta nell'olio aumenta. Una successiva riduzione della pressione determina la formazione di schiuma dovuta proprio alla decompressione dell'aria. Questo fenomeno risulta particolarmente marcato nella

zona di aspirazione della pompa, dove alle bolle d'aria liberate per decompressione si aggiungono quelle già presenti nel volume d'olio del serbatoio. La presenza di queste bolle determina picchi di pressione, in accordo con le oscillazioni rilevate durante le prove e picchi di temperatura con possibili danni per cavitazione alla pompa e ai componenti oleodinamici. Per rimediare a questi tipi di problemi, si è quindi sostituito il serbatoio con uno di dimensioni maggiori, in modo da aumentare il volume di olio e ridurre il fenomeno sopra descritto.

5.3.3 HMI per il collaudo automatico

La *Human-Machine Interface* è l'interfaccia Uomo-Macchina attraverso il quale è stata effettuata la programmazione delle fasi di collaudo automatiche e consente la visualizzazione delle informazioni operative del processo in tempo reale. L'interfaccia utilizzata per la programmazione delle fasi di collaudo, riportata in Figura 5.16, può essere suddivisa in diverse parti, di cui si è scelto di riportare una breve descrizione di quelle più importanti utilizzate.

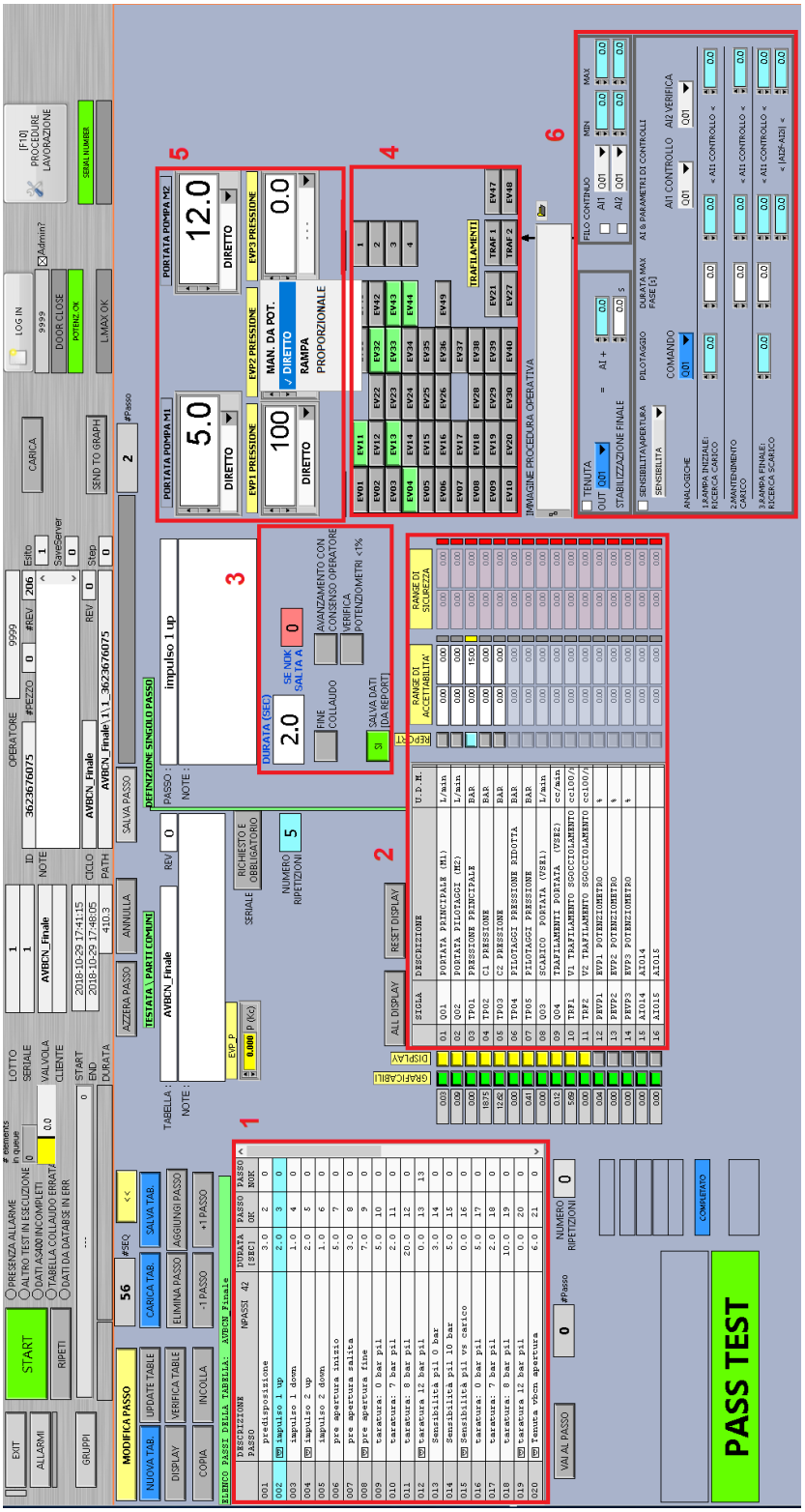

Figura 5.16. HMI per la programmazione delle fasi di collaudo

Nella parte indicata con 1 è riportato l'elenco dei passi di collaudo inseriti con l'informazione della durata in secondi. Viene, inoltre, indicato il numero del passo successivo nel caso di esito positivo o di esito negativo. Nel caso di esito positivo (OK) la prova prosegue al passo successivo, nel caso invece di esito negativo (NOK) è possibile ripeterla per un certo numero di volte indicando da quale passo bisogna riiniziare. Durante la prova, inoltre, viene evidenziato in azzurro il passo in corso di esecuzione. Nel blocco, indicato con 2, è riportato l'elenco di tutte le analogiche. Per ciascuna analogica è possibile inserire i range di accettabilità e di sicurezza per soddisfare le specifiche di ciascuna fase di collaudo.
Attraverso il blocco 3 è possibile inserire la durata del passo e il numero di ripetizioni (tentativi) del passo stesso nel caso in cui l'esito sia negativo. Come detto in precedenza, quando il passo è fallito (NOK), è necessario indicare da quale passo iniziare per eseguire i tentativi successivi. È necessario prestare attenzione nello scegliere il passo da cui iniziare poiché il banco potrebbe non trovarsi nella configurazione desiderata in termini di pressione nei vari tratti del circuito. Il pulsante di fine collaudo viene attivato solamente per l'ultimo passo per indicare la fine del collaudo. Infine, il pulsante di "avanzamento con consenso operatore", serve ad indicare che il passo selezionato è di tipo manuale e richiede il consenso da parte dell'operatore per proseguire al passo successivo. Si ha poi una parte di interfaccia, indicata con 4, in cui sono presenti una serie di pulsanti che se premuti consentono di eccitare le elettrovalvole presenti sul circuito idraulico. I pulsanti "TRAF1" e "TRAF2" abilitano il lettore di gocce, consentendone il conteggio nello stillicidio.
Nel blocco, indicato con 5, si ha la possibilità di inserire la portata richiesta per le due pompe ed indicare il valore di pressione richiesto per le tre valvole proporzionali presenti nel circuito. Per ciascuna valvola proporzionale, attraverso un menù a tendina, è possibile scegliere uno tra i seguenti campi: comando da potenziometro, diretto, rampa e proporzionale. Il comando da potenziometro indica che è possibile comandare la valvola agendo tramite potenziometro presente sul panel pc. La scelta "diretto", indica un set-point a gradino della pressione con un controllo in anello aperto. Il campo "proporzionale" indica invece, un set-point a gradino della pressione con un controllo in anello chiuso. Infine, il campo "rampa" indica che il set-point è una rampa di durata pari alla durata del passo di collaudo.
In ultimo, nel blocco 6, sono riportate alcune funzioni speciali per eseguire alcune fasi di collaudo impossibili da realizzare con gli altri strumenti a disposizione. Tali funzioni sono state sviluppate in stretta collaborazione con il fornitore indicando come realizzare le funzioni sulla base delle specifiche di collaudo richieste. Queste funzioni, chiamate "*tenuta*", "*filo continuo*" e "*sensibilità/apertura*", verranno

descritte in modo approfondito nelle fasi di collaudo automatiche.

5.3.4 Tecniche di controllo della pressione

Un sistema di controllo è un qualsiasi sistema fisico che stabilisce una relazione, secondo una legge prestabilita, tra una grandezza di ingresso, detta di riferimento, ed una grandezza di uscita, che costituisce la variabile controllata. Il sistema di controllo si prefigge di modificare il comportamento della grandezza di uscita attraverso la manipolazione di opportune grandezze d'ingresso. Esistono due tipologie di sistemi di controllo: ad anello aperto, e ad anello chiuso o retroazionato. Nel controllo ad anello aperto, il segnale di ingresso applicato al sistema, viene elaborato producendo l'uscita desiderata. L'ingresso del sistema da controllare è calcolato attraverso un modello matematico costruito sulla base di leggi fisiche che regolano il sistema. Questo sistema di controllo è rappresentato dal seguente diagramma a blocchi:

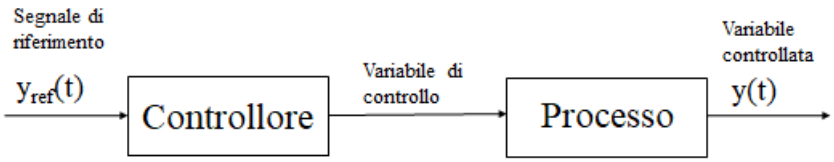

Figura 5.17. Schema a blocchi sistema di controllo ad anello aperto

Il sistema di controllo ad anello chiuso è caratterizzato da un blocco di retroazione, costituito da un trasduttore che misura la grandezza di uscita e la riporta all'ingresso del processo, dove viene comparata con l'input. Il segnale che giunge al controllo è l'*errore* ottenuto dalla differenza tra il segnale di input o riferimento y_{ref} e la grandezza misurata y_m. Questo tipo di controllo cerca di correggere l'errore tra il segnale di riferimento e quello ottenuto in uscita dal sistema, compensando in gran parte l'effetto dei disturbi. Il segnale di riferimento in ingresso in questa applicazione è rappresentato da una variazione a gradino della pressione. Il sistema di controllo ad anello chiuso è caratterizzato da una legge di controllo puramente proporzionale, in cui l'uscita $u(t)$ viene ottenuta moltiplicando l'errore $e(t)$ per il guadagno proporzionale k_p.

$$u(t) = k_p \cdot e(t) \tag{5.3}$$

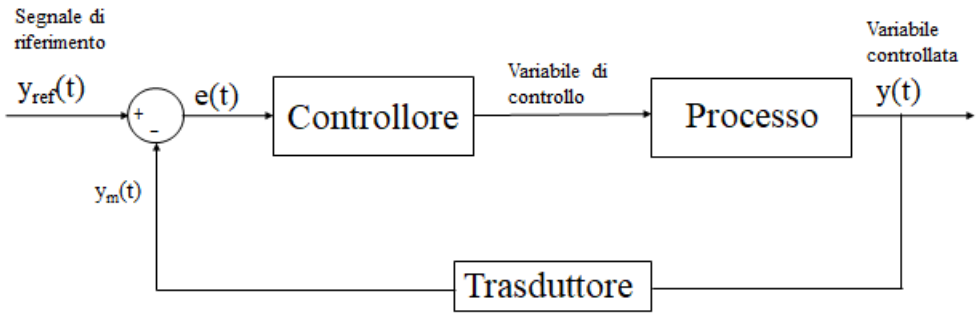

Figura 5.18. Schema a blocchi sistema di controllo ad anello chiuso

Da questa relazione si evince che maggiore sarà l'errore *e(t)* all'ingresso del controllore, maggiore sarà l'azione di controllo svolta dallo stesso regolatore.
La differenza di risposta tra un sistema di controllo in anello aperto e in anello chiuso, si può osservare nel grafico riportato in Figura 5.19. Questo grafico è stato ottenuto imponendo un segnale di pressione in ingresso a gradino ed eseguendo la prova prima in anello aperto (diretto) e poi in anello chiuso (proporzionale).

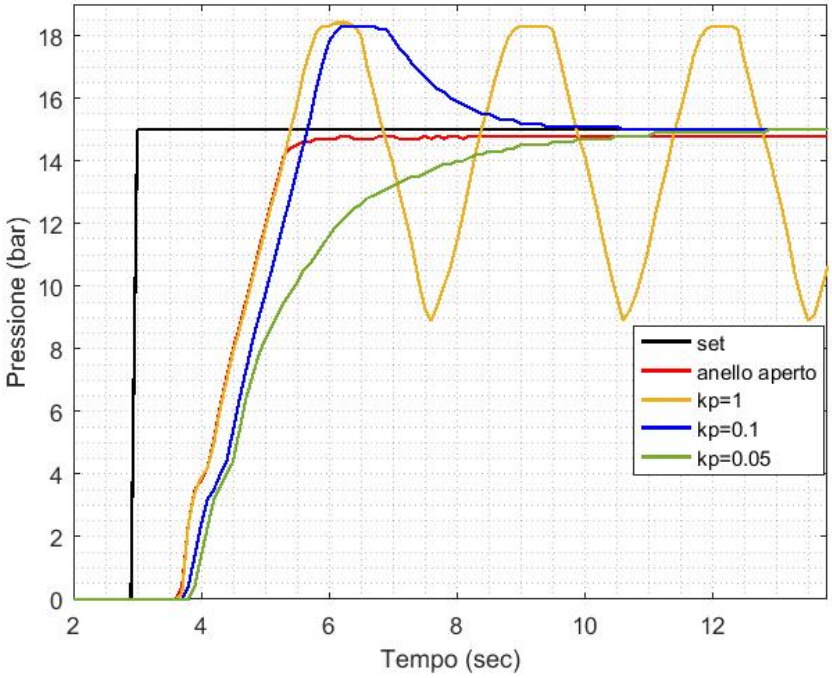

Figura 5.19. Confronto tra le risposte di un sistema ad anello aperto e chiuso

Nelle prove in anello chiuso, si è anche variato il coefficiente proporzionale k_p per osservare le differenti risposte del sistema. Dal grafico si può notare che la risposta del sistema in anello aperto presenta un errore a regime (offset) rispetto al valore di set-point, tuttavia il processo risulta asintoticamente stabile. L'offset viene eliminato adottando un sistema di controllo ad anello chiuso anche se, rispetto al sistema precedente, si ottiene una velocità di risposta inferiore. Quest'ultima può essere aumentata incrementando il valore di k_p, ma nel contempo diminuiscono i margini di stabilità del sistema, infatti, si può notare che per k_p=1 si ottiene un andamento di pressione oscillatorio. Questa condizione coincide con una situazione di instabilità del sistema. Per k_p=0.5, si è ottenuto un overshoot prima di raggiungere a regime il valore di pressione di riferimento.
Nella programmazione delle fasi di collaudo automatiche, in base all'esigenza della prova si è scelta la corretta tipologia di controllo della pressione nel ramo di pilotaggio e nel ramo principale di carico.

5.3.5 Fasi di collaudo VBCN

La valvola VBCN è una valvola di controllo e mantenimento del carico che oltre a svolgere una funzione di sicurezza consente di controllare in modo preciso il posizionamento e la discesa del braccio, ad esempio, di un escavatore. Affinché sia assicurata la qualità del prodotto è necessario che siano soddisfatte tutte le specifiche tecniche definite dall'ufficio tecnico. Si riporta in Figura 5.20, lo schema idraulico della valvola a cui si fa riferimento nei passi di collaudo descritti.

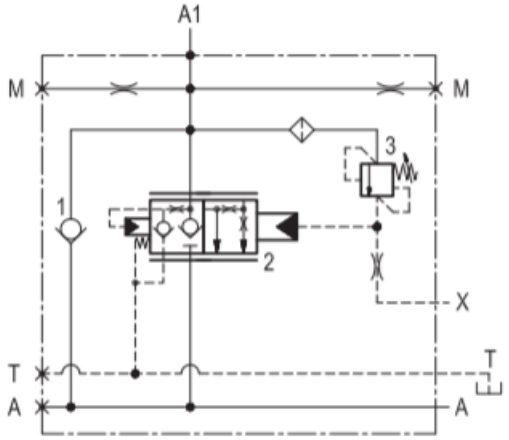

Figura 5.20. Schema idraulico VBCN

Fase di preapertura

La preapertura è la prima delle diverse principali fasi di collaudo eseguite su una valvola VBCN. Come già descritto nel capitolo 3 la valvola VBCN è una valvola normalmente chiusa che necessita di una pressione di pilotaggio per l'apertura e per garantire il collegamento diretto tra la bocca C1 e la bocca A. In questa fase si vuole verificare che la preapertura della valvola, ovvero l'inizio del passaggio di un filo continuo di olio attraverso la bocca di uscita A e la bocca di scarico T, avvenga ad una pressione di pilotaggio compresa all'interno di un range prestabilito e definito dall'ufficio tecnico. Il passaggio di un filo continuo di olio attraverso le bocche di uscita A e T, avviene per effetto della pressione che agisce sulla superficie del pistone pilota, quando viene raggiunta una pressione sufficiente a vincere il precarico della molla di ritorno. Il pistone pilota, che è in contatto con l'asta di pilotaggio, permette lo spostamento dello spillo di preapertura determinando un trafilamento attraverso la bocca T. La sede di preapertura essendo in contatto con la spola, quando scorre

determina uno spostamento della spola stessa provocandone il distacco rispetto alla sede di tenuta. L'olio in ingresso in A1 inizia a trafilare dalla bocca di uscita A, incrementando la frequenza di gocciolamento man mano che viene incrementata la pressione, fino ad ottenere un filo continuo, il cui valore di pressione corrisponde al valore di preapertura. Nella sezione riportata in Figura 5.21, è evidenziata la pressione agente sul pistone pilota (in rosso) e le zone di tenuta dello spillo (in verde) e della spola (in blu).

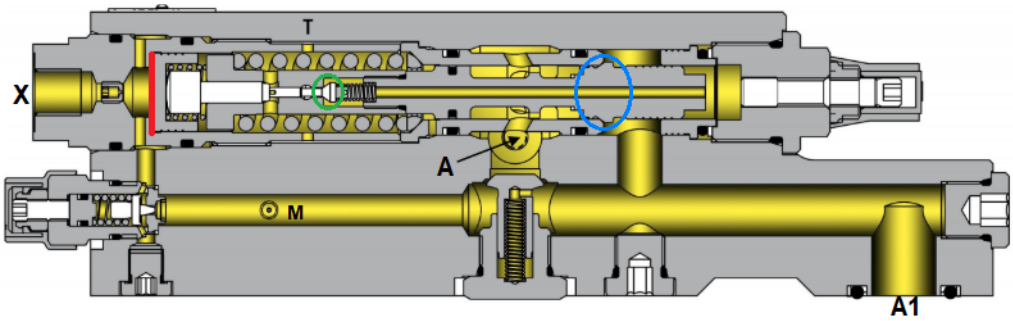

Figura 5.21. Sezione valvola VBCN fase preapertura

Prima di iniziare la prova di verifica della preapertura, vengono eseguiti due impulsi di pressione di pilotaggio dalla durata di due secondi per verificare il corretto scorrimento della spola ed evitare che un eventuale fenomeno di "incollamento" possa falsare la prova. Durante la prova, la bocca X della valvola viene collegata al ramo di pilotaggio del banco PIL e gli impulsi vengono forniti sfruttando il ramo di pilotaggio "diretto" del circuito. Viene imposta una pressione di 20 bar attraverso la valvola proporzionale EVP2 e mantenuta eccitata la valvola EV44 per l'intera durata dell'impulso di pressione. Quest'ultima viene diseccitata per mandare a scarico il ramo di pilotaggio durante l'annullamento dell'impulso. La bocca C1 della valvola viene invece collegata alla bocca C1 del banco e sfruttando il tratto principale di carico vengono imposti 100 bar attraverso la valvola proporzionale EVP1.

Durante questi impulsi si verifica che la pressione sul carico scende al di sotto di 15 bar per effetto dell'apertura della valvola come mostrato dal grafico di Figura 5.22.

Successivamente agli impulsi di pilotaggio si esegue la fase di preapertura, utilizzando il ramo di pilotaggio di "bassa pressione", in modo da ottenere una regolazione della pressione più precisa a bassi valori, attraverso la valvola regolatrice di pressione proporzionale EVP3. La bocca di uscita A della valvola viene collegata alla bocca

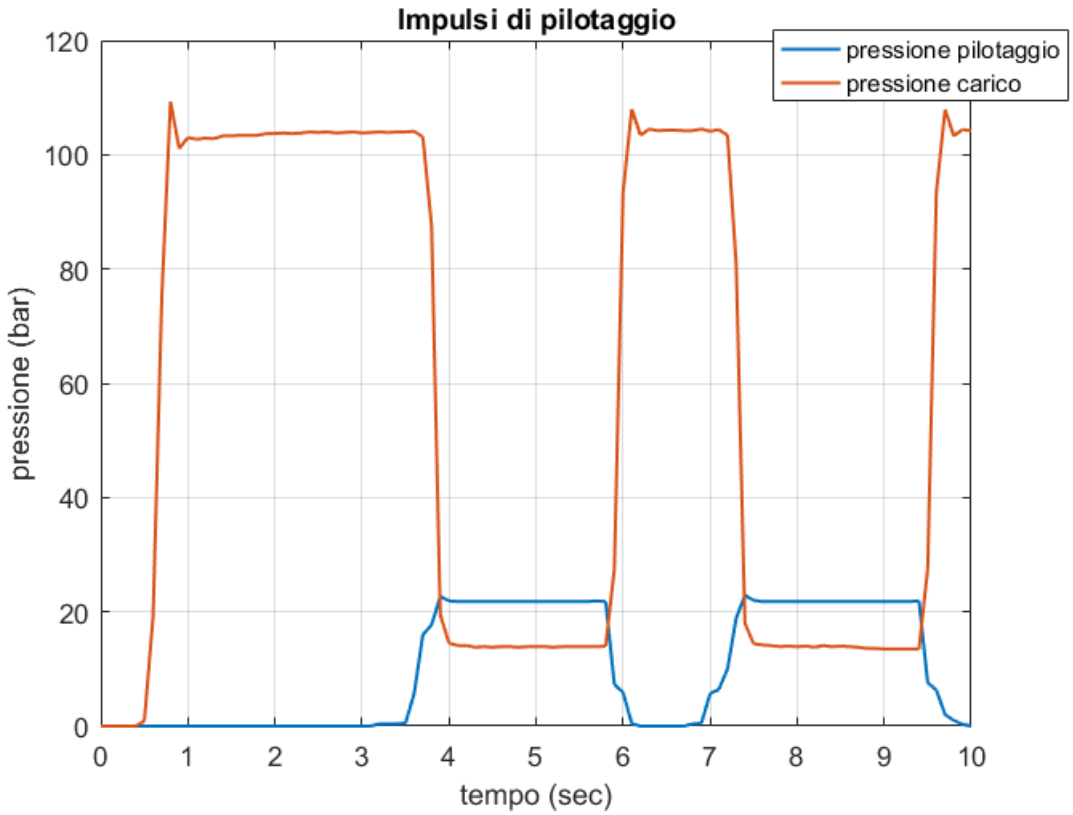

Figura 5.22. Impulsi di pilotaggio preapertura

U1 del banco, mentre la bocca T viene collegata a U2 e vengono eccitate le elettrovalvole che consentono il passaggio dell'olio al serbatoio attraverso i gocciolatori. L'obiettivo, attraverso l'utilizzo del lettore di gocce, è quello di rilevare il valore di pressione di pilotaggio nell'istante di inizio distacco, cioè di fine gocciolamento e inizio del passaggio di un filo continuo di olio, che ne indica la preapertura. Il lettore di gocce restituisce un segnale digitale binario: 1 al passaggio di una goccia e 0 in assenza di passaggio. In questa fase viene imposto un incremento graduale della pressione di pilotaggio da 0 fino a 5 bar. Contemporaneamente all'incremento della pressione, quando il lettore di gocce restituisce due bit successivi uguali a 1, viene memorizzato il valore di pressione che corrisponde a quello di preapertura. L'abilitazione del campo "Filo Continuo", Figura 5.23, nell'interfaccia di programmazione abilita tale funzione e scegliendo l'analogica di ingresso, ovvero in questo caso la pressione di pilotaggio rilevata tramite il trasduttore TP04, si possono inserire i range di accettabilità della pressione all'interno del quale deve trovarsi il valore

memorizzato.

Figura 5.23. Funzione prova di preapertura (filo continuo)

Nel grafico di Figura 5.24, viene riportato l'andamento della pressione di pilotaggio durante la fase di preapertura e si può notare ad una pressione di circa 3.6 bar una leggera diminuzione che ne indica la preapertura della valvola.

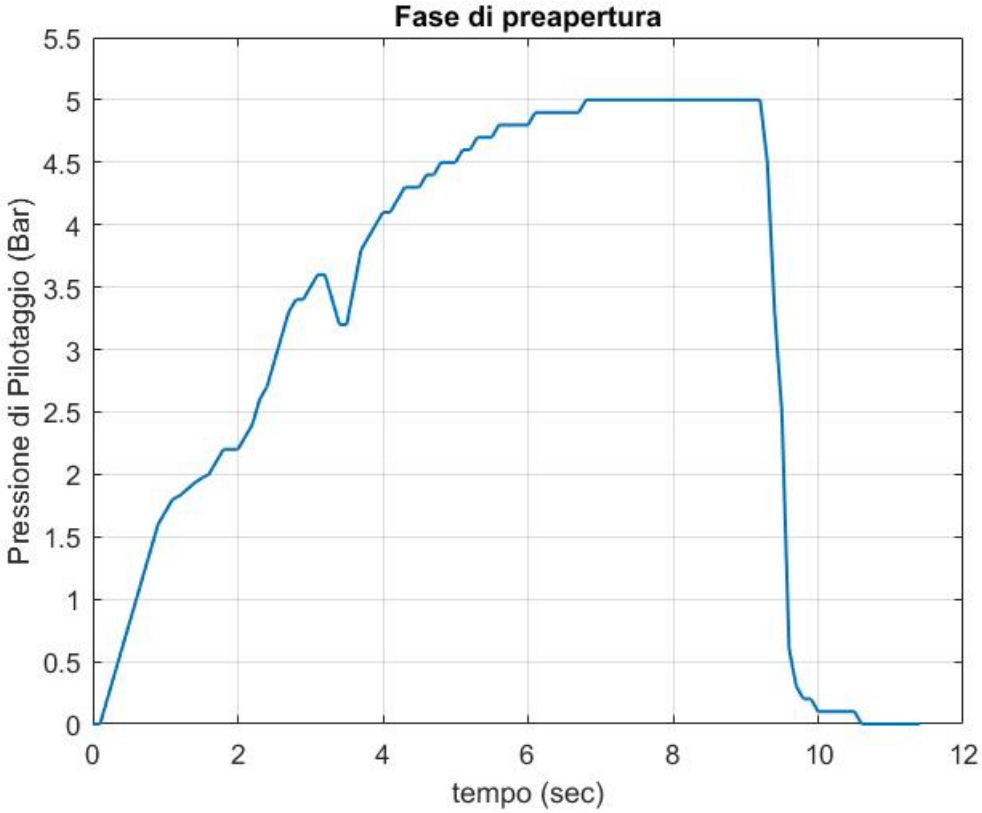

Figura 5.24. Andamento pressione di pilotaggio durante la preapertura.

Verifica Inizio apertura

In questa fase l'obiettivo è verificare che, l'inizio apertura della valvola avvenga ad una pressione di pilotaggio compresa all'interno di un range prestabilito. L'inizio apertura è legato al posizionamento e alla particolare forma della spola. Se si osserva la sezione di Figura 5.25, incrementando la pressione di pilotaggio si ha uno scorrimento della spola verso destra. Quando il baffo della spola supera la sede di tenuta, si ha una maggiore luce di passaggio determinando una maggiore portata. Questa condizione coincide con la fine della fase di preapertura e l'inizio apertura della valvola. Il valore di pressione di pilotaggio dipende dalla taratura della valvola

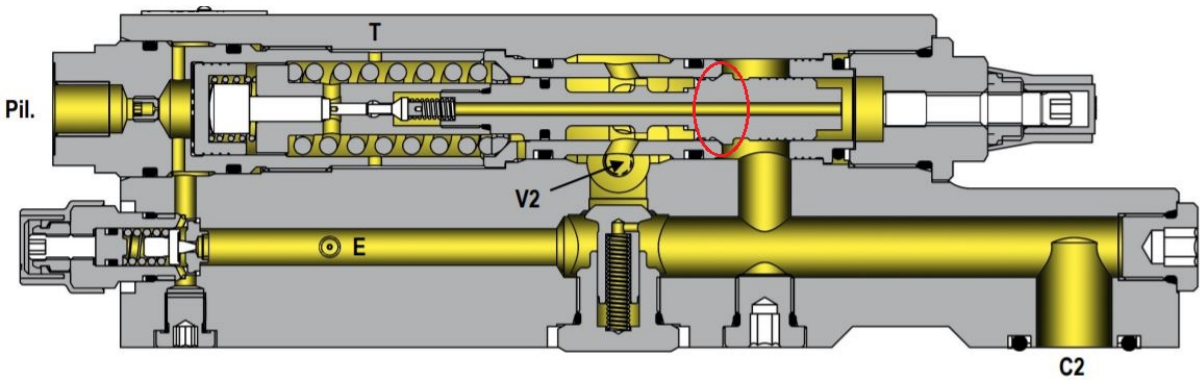

Figura 5.25. Sezione valvola VBCN

che viene eseguita durante la fase di montaggio mediante l'inserimento di spessori tra la molla e la sede di tenuta. La prova è effettuata mantenendo i collegamenti della valvola con il banco invariati rispetto alla prova precedente, imponendo una pressione sul carico di 100 bar e pilotando la valvola attraverso il ramo di pilotaggio di "bassa pressione". A differenza, però, della prova di preapertura l'olio in ingresso al banco attraverso la bocca V1 viene scaricato passando per il flussimetro e non più per il gocciolatore, in modo da poter leggere il valore di portata in uscita dalla valvola. La verifica taratura viene svolta in due sottofasi:

1. Una prima fase in cui si ha un aumento della pressione di pilotaggio fino a 8 bar per circa 20 secondi in modo da determinare il riempimento del tratto di circuito che collega al flussimetro;

2. Una seconda fase in cui, partendo dal valore di pressione precedente, si ha un aumento in rampa della pressione di pilotaggio fino a determinare una portata letta dal flussimetro compresa tra 150 e 200 cc/min. La pressione

memorizzata corrisponde alla pressione di inizio apertura e quindi di verifica della taratura. Questa parte è stata effettuata mediante l'abilitazione della funzione "sensibilità/apertura" e selezionando la spunta su "inizio apertura". Attraverso questo campo è possibile indicare l'analogica di comando EVP3, il valore massimo di comando e la durata della rampa, i quali parametri ne determinano la pendenza. Inoltre, è possibile indicare l'analogica di controllo che, è rappresentata dalla portata letta dal flussimetro Q04 indicandone il range di controllo e l'analogica di verifica che è rappresentata dalla pressione di pilotaggio misurata tramite il trasduttore TP04 (Figura 5.26).

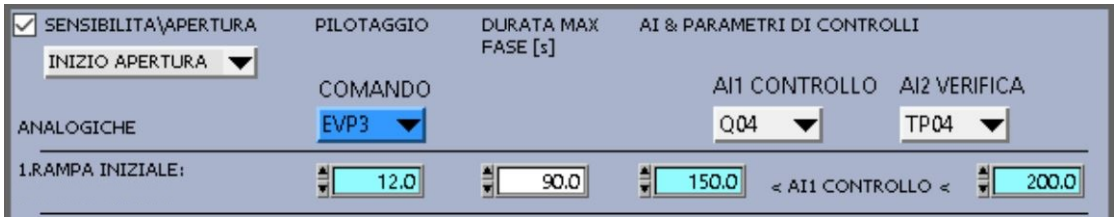

Figura 5.26. Funzione prova di inizio apertura

Quanto descritto si può osservare attraverso il grafico riportato in Figura 5.27, che mostra gli andamenti della pressione di pilotaggio e della portata. In particolare, si può notare un incremento in rampa della pressione di pilotaggio fino a 8.9 bar a cui corrisponde una portata di circa 170 cc/min. Questo valore di pressione corrispondente alla pressione di inizio apertura deve essere verificato e compreso all'interno di un range di accettabilità che, per la valvola in oggetto, è tra 8.5 e 9.5 bar.

Qualora non sia verificata questa fase, ovvero la pressione di pilotaggio rilevata non rientra all'interno del range di accettabilità, è richiesto l'intervento dell'operatore che corregge il valore di taratura aggiungendo o togliendo gli spessori.

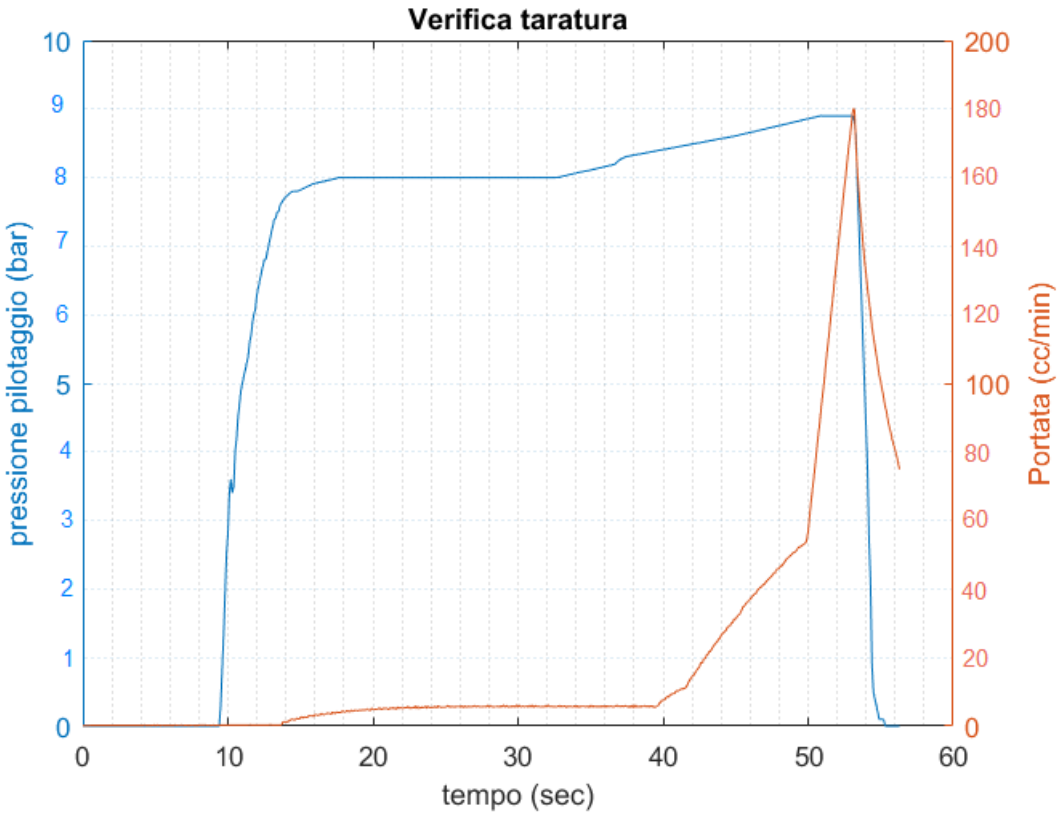

Figura 5.27. Prova di verifica inizio apertura

Verifica della sensibilità in richiusura

Successivamente alla prova di verifica della taratura della valvola si effettua la verifica della sensibilità in richiusura della valvola, intesa come la rapidità di risposta nel richiudersi partendo da una configurazione di valvola parzialmente aperta. Tale prova è stata eseguita mantenendo invariati i collegamenti della valvola con il circuito e imponendo sul ramo principale di carico una pressione di 100 bar e pilotando la valvola attraverso il ramo di pilotaggio di "bassa pressione". La prova viene eseguita in più fasi: nella prima si riduce la pressione sul carico da 100 bar fino ad un valore compreso tra 50 e 60 bar per effetto dell'apertura della valvola tramite l'incremento della pressione di pilotaggio. Successivamente, viene mantenuto costante, per qualche secondo, il segnale di pressione di pilotaggio così da mantenere costante il valore della pressione sul carico. Infine, viene ridotta la pressione di pilotaggio fino ad ottenere un incremento della pressione sul carico di almeno un bar. Quello che si verifica al termine della prova è che, l'incremento della pressione sul carico di

almeno un bar sia ottenuto con una riduzione di pressione di pilotaggio, rispetto alla condizione di mantenimento, inferiore a 1.5 bar. La prova è stata effettuata in tre fasi successive, in cui le prime due rappresentano delle fasi di predisposizione alla prova:

1. Nella prima fase si ha l'annullamento della pressione di pilotaggio dopo la fase di verifica taratura, diseccitando l'elettrovalvola EV44 che consente di mandare a scarico l'olio, così da riportare la pressione sul carico a 100 bar.

2. Nella seconda fase si impone un incremento rapido della pressione di pilotaggio fino a 9 bar.

3. La terza fase è stata programmata mediante l'utilizzo della funzione "sensibilità" (Figura 5.28) che consente di effettuare i tre passi necessari a verificare la sensibilità. Il comando è rappresentato dalla valvola riduttrice di pressione proporzionale EVP3, il controllo dal trasduttore TP01 che misura la pressione sul carico e la verifica dal trasduttore TP04 che misura la pressione sul ramo di pilotaggio. Nel primo passo si ha una rampa di salita della pressione di pilotaggio, tramite la EVP3, fin quando non si raggiunge sul carico una pressione compresa tra 50 e 60 bar. Nel secondo passo si ha la fase di mantenimento costante della pressione di pilotaggio e della pressione di carico e in ultimo, nella terza fase, si ha una rampa di discesa della pressione di pilotaggio fino ad ottenere un incremento della pressione sul carico di almeno un bar. Nell'ultimo passo si verifica che la pressione di pilotaggio non sia diminuita di oltre 1.5 bar.

Figura 5.28. Funzione prova di sensibilità

Quanto descritto si può osservare attraverso il grafico di Figura 5.29, che mostra gli andamenti della pressione di pilotaggio e del carico.

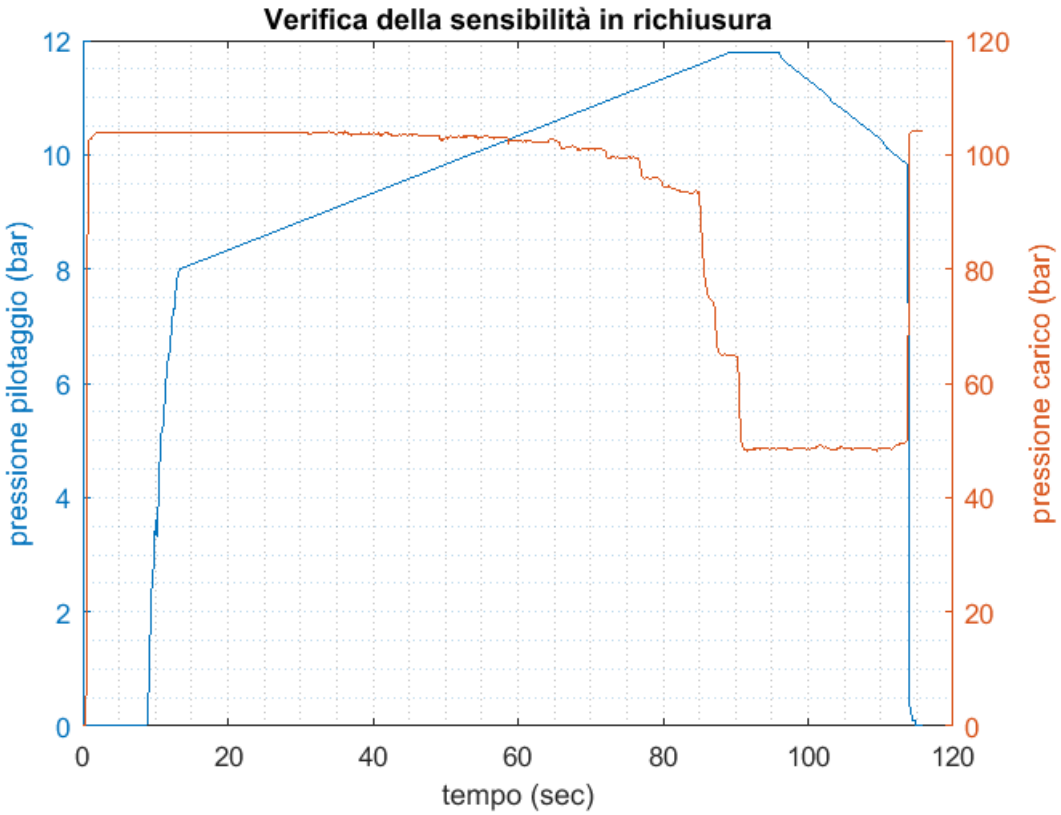

Figura 5.29. Andamento pressioni prova di sensibilità

Tenuta VBCN

La prova di tenuta consiste nel verificare l'assenza di trafilamento attraverso la bocca C1 della valvola, nella condizione di valvola chiusa in cui la spola è posta in battuta sulla sede. La prova viene eseguita mantenendo i collegamenti della valvola con il banco invariati rispetto alle prove precedenti, ovvero la bocca A collegata con la bocca C1 del banco, la bocca A1 con U1 e la bocca X collegata con il ramo pilotaggio PIL. Il tratto di circuito di scarico con ingresso U1 deve essere configurato in modo da permettere lo scarico dell'olio a serbatoio attraverso il passaggio nel gocciolatore eccitando l'elettrovalvola EV48. Ciò consente di quantificare il numero di gocce e verificare la tenuta della valvola.
La prova viene eseguita anche in questo caso in più fasi. Successivamente alla prova di verifica della sensibilità, la pressione di pilotaggio viene incrementata fino a 20 bar con un controllo in anello chiuso tramite la EVP3, in modo da mantenere la valvola totalmente aperta per 6 secondi. La pressione sul carico di conseguenza, per effetto

della pressione di pilotaggio, viene messa a scarico riducendosi da 100 bar fino a valori inferiori a 15 bar. Il non annullamento totale della pressione è legato alla presenza di un Δp dovuto alla valvola stessa e a tutti i componenti oleodinamici posti tra lo scarico e la bocca di carico C1. La fase appena descritta è successivamente seguita da una fase di annullamento della pressione di pilotaggio diseccitando la EV44 e la EV32 del ramo di pilotaggio, per riportare la valvola in condizioni di chiusura, con la spola in battuta sulla sede di tenuta. La durata di 5 secondi di quest'ultima fase ha l'obiettivo di riportare la valvola in chiusura e determinare lo svuotamento dell'olio residuo rimasto nel tratto di circuito che collega la bocca U1 con il gocciolatore. La durata è stata stimata con ripetute prove sperimentali e risulta di fondamentale importanza per evitare che l'ultimo passo di verifica della tenuta possa essere falsato per effetto dell'olio residuo rimasto nei tubi di collegamento. Nell'ultimo passo di verifica, infatti, viene eseguito il conteggio delle gocce, tramite il lettore, per una durata di 30 secondi e la prova risulta superata soltanto con la lettura di una sola goccia. Nel caso in cui la prova fallisce dopo la ripetizione dei tre tentativi disponibili, è richiesto l'intervento dell'operatore per la sostituzione della spola.

Verifica taratura VS5

La VS5 è la valvola di massima che si trova all'interno della VBCN, la cui taratura viene eseguita dall'operatore che agisce, tramite una brugola, sulla vite di regolazione della valvola. Quest'operazione viene eseguita manualmente dall'operatore ad inizio collaudo prima che vengano eseguite tutte le fasi in automatico. Essendo una valvola di massima, l'obiettivo della prova è quello di verificare che la valvola sia in grado limitare la pressione in A1 ad un valore massimo indicato dalla distinta della specifica valvola.

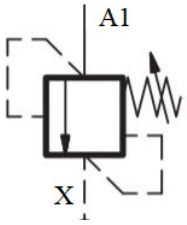

Figura 5.30. Schema idraulico VS5

Per eseguire la prova è necessario mantenere collegata la bocca A1 della valvola con C1 del banco e collegare la bocca X della valvola con la bocca U1 del banco. Per far ciò, viene utilizzata un elettrovalvola a tre vie, esterna al banco, che nella

condizione di riposo collega A con U1 e quando eccitata permette il collegamento della bocca X con U1. Prima della verifica di taratura vengono dati due impulsi di pressione a 680 bar attraverso il ramo principale di carico in modo da far scorrere il pistoncino della valvola di massima ed evitare fenomeni di incollamento. Gli impulsi, come già detto, vengono forniti imponendo una pressione di 680 bar attraverso la valvola limitatrice di pressione EVP1 ed eccitando le elettrovalvole EV11 ed EV13 durante la salita e diseccitandole quando viene tolto l'impulso. Successivamente si esegue la prova di verifica taratura, imponendo 680 bar sul ramo di carico e mandando a scarico l'olio in uscita dalla bocca X della valvola, collegata in U1, passando per il gocciolatore. La pressione di taratura della valvola è determinata dalla pressione misurata sul ramo di carico dal trasduttore TP01. Tale valore corrisponde alla massima pressione che la valvola riesce a garantire sul ramo di carico, e quindi nelle applicazioni reali, è la massima pressione che si ha nella camera del cilindro. Il valore misurato dal trasduttore deve essere compreso all'interno di un range di accettabilità. Nel caso in cui la prova fallisce è necessario interrompere l'intera prova di collaudo e rieseguire la fase di taratura.
In Figura 5.33 viene riportato l'andamento della pressione di carico. Si può osservare la limitazione della pressione a circa 280 bar, nonostante è stata imposta sul ramo principale di carico una pressione di 680 bar.

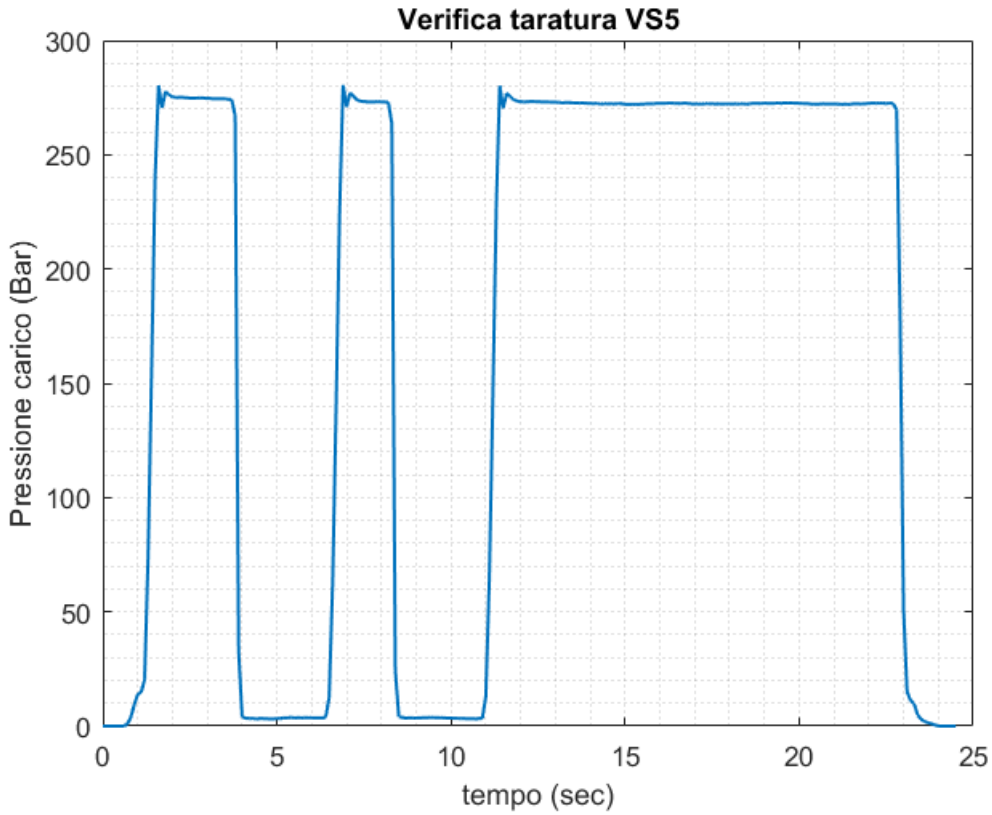

Figura 5.31. Pressione di taratura della VS5

Verifica tenuta VS5

La prova di verifica della tenuta della VS5, viene eseguita per verificare la tenuta della valvola ad un valore di pressione inferiore a quello di taratura. Per eseguire tale prova è necessario aver determinato prima l'esatta pressione di taratura per poi ridurla, rispetto al valore determinato, di una quantità che dipende dalla specifica valvola. La prova è stata programmata mediante l'utilizzo della funzione "Tenuta", presente sull'interfaccia di programmazione. Attraverso questa funzione è possibile scegliere l'analogica di comando, che nella prova in questione, è la valvola EVP1 del ramo di carico. Per poter eseguire tale prova il comando imposto dalla EVP1 è determinato dal valore dell'analogica di ingresso TP01, misurato nella prova precedente di verifica taratura, sottratto di una quantità variabile in base alla valvola oggetto di collaudo. In questo modo si impone sul ramo di carico una pressione costante, inferiore a quella di taratura. Dopo 10 secondi di mantenimento costante della pressione di carico, si verifica la tenuta della valvola attivando il lettore di

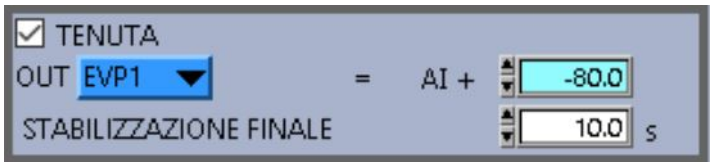

Figura 5.32. Funzione tenuta

gocce. Anche in questo caso, per la prova di tenuta della VS5 è ammesso un numero massimo di gocce, secondo le specifiche tecniche definite dall'ufficio tecnico.

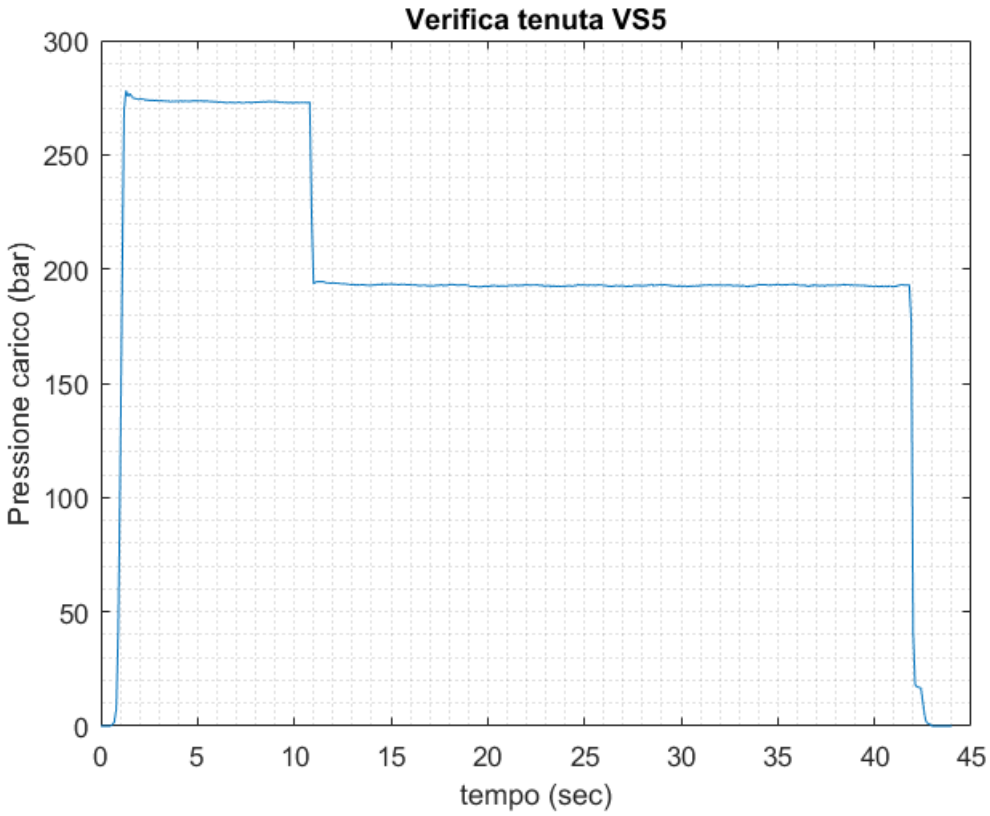

Figura 5.33. Andamento pressione carico durante la prova di tenuta

Flussaggio Valvola unidirezionale VU

Obiettivo di tale fase è quello di realizzare il flussaggio della valvola VU attraverso il passaggio di una portata superiore a quella erogata dalla pompa da 16 l/min. Tale prova viene eseguita mediante il tratto di circuito di lavaggio in cui è presente

l'accumulatore idraulico. Mantenendo invariati i collegamenti della valvola con il banco rispetto alla prova precedente, tale prova viene eseguita principalmente in due fasi:

- Una prima fase, dalla durata di 10 secondi, viene eseguita per effettuare il riempimento dell'accumulatore. Per realizzare questa fase, è stata imposta una pressione di 100 bar tramite la valvola proporzionale EVP2 con un controllo in anello chiuso e sono state eccitate le elettrovalvole EV44, EV36 ed EV37 per garantire il mantenimento in pressione del ramo stesso.

- Nella seconda fase viene effettuato il flussaggio della valvola attraverso lo scarico dell'accumulatore per una durata di 5 secondi. Durante questa fase, l'accumulatore consente di liberare una maggiore portata rispetto a quella erogata dalla pompa. Tale fase viene eseguita diseccitando l'EV36 ed eccitando l'EV34 così da consentire l'ingresso dell'olio nella valvola VBCN attraverso la bocca A1 collegata con la bocca U1 del banco. L'olio in ingresso nella valvola, attraversa la valvola unidirezionale che ne consente il libero passaggio nella bocca A. Quest'ultima collegata alla bocca C1 del banco, mediante l'eccitazione della valvola EV15, consente lo scarico dell'olio a serbatoio.

Tenuta Valvola unidirezionale

La valvola unidirezionale come già descritto in precedenza, ha la funzione di permettere il passaggio del flusso in una sola direzione. L'obiettivo di questa prova è quindi quello di verificare la corretta tenuta della valvola VU nel caso di flusso diretto da A1 verso A. La prova viene eseguita imponendo una pressione costante sul ramo principale di carico attraverso la valvola proporzionale EVP1 e con un controllo in anello chiuso della pressione. Sulla linea di scarico U1, l'eccitazione della valvola EV48 ne consente il collegamento con il gocciolatore. Dopo una prima fase, della durata di 5 secondi, in cui è stata mantenuta costante la pressione sul ramo di carico, è stata eseguita la verifica della tenuta, attivando il lettore di gocce presente nel gocciolatore. Le prove di tenuta, sono fondamentali ai fini del corretto funzionamento della valvola. Per tale motivo, anche in questo caso dopo il fallimento di tre tentativi, è necessario sostituire la valvola unidirezionale mediante l'intervento dell'operatore.

Passaggio libero Valvola unidirezionale

L'ultima fase del collaudo di una valvola VBCN prevede l'esecuzione di una prova per verificare il Δp generato dalla valvola VU quando è attraversata da una portata di 16 l/min nella direzione del passaggio libero. Il Δp è generato dalla presenza di una molla che mantiene in battuta l'otturatore sulla sede di tenuta. Quando l'olio, che agisce nella direzione di apertura, è tale da avere una pressione da vincere la resistenza opposta dalla molla si determina il passaggio dell'olio. Durante la prova, l'olio che attraversa la VU, viene scaricato a serbatoio così da determinare un Δp che è quello generato dalla VU stessa. La prova viene eseguita imponendo una pressione di 50 bar tramite la valvola limitatrice EVP2, ed eccitando le elettrovalvole EV44, EV19, EV16 e il distributore EV38 così da permettere l'inserimento della linea di pilotaggio sulla linea di scarico U1 collegata con A. L'olio attraversa la VU e viene scaricato a serbatoio mediante il passaggio in un breve tratto di circuito di carico. Il valore di pressione letto dal trasduttore TP05 presente sul ramo di mandata della pompa di pilotaggio rappresenta il Δp generato dalla valvola unidirezionale. Tale valore misurato, deve essere compreso all'interno di un range di accettabilità specifico per ciascun codice valvola. Quest'ultima fase è seguita da un ulteriore fase di tenuta, che si ripete in modo identico a quella precedentemente descritta.

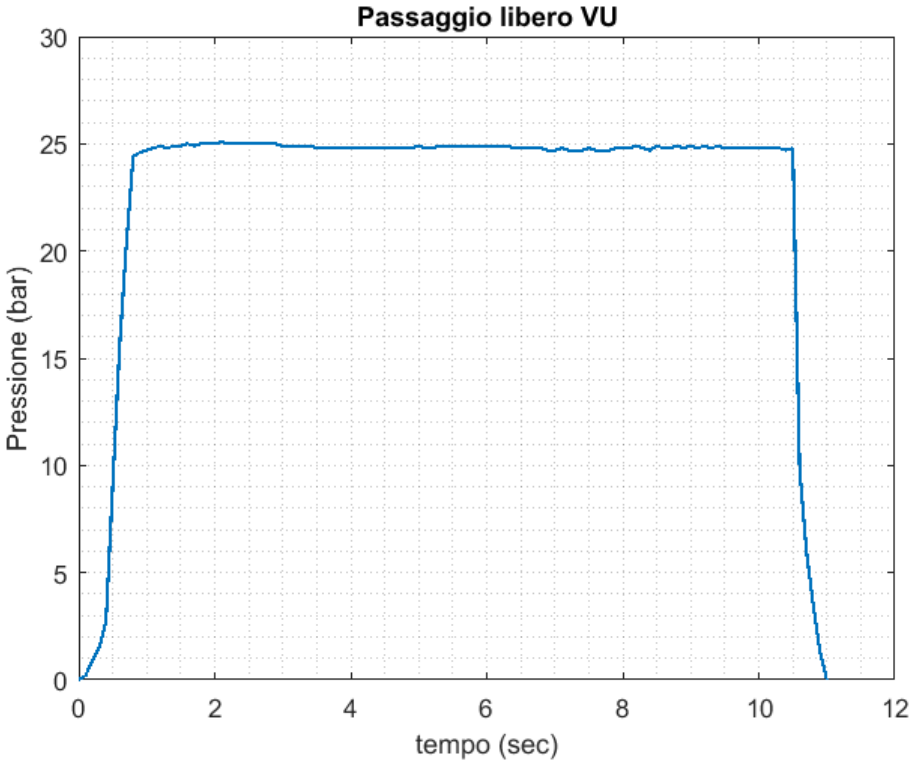

Figura 5.34. Andamento pressione a monte della valvola unidirezionale

5.3.6 Fasi di collaudo VBC

Le fasi di collaudo automatiche eseguite sulle valvole VBC, sono molto simili a quelle eseguite nelle VBCN, essendo entrambe le valvole appartenenti alla stessa categoria e svolgendo funzioni simili. A differenze del collaudo delle valvole VBCN, il collaudo delle VBC, è caratterizzato da più fasi manuali eseguite dall'operatore. La differenza più importante è rappresentata dalla fase di taratura. Nelle valvole VBCN, infatti, la taratura è fissa mediante l'inserimento di spessori in fase di montaggio; mentre nelle valvole VBC la taratura viene effettuata durante il collaudo dall'operatore che agisce manualmente sulla vite di regolazione per variare il precarico della molla. Si riporta, di seguito, la descrizione delle diverse fasi di collaudo.

Taratura VBC

Prima della fase di taratura della valvola, vengono eseguiti alcuni impulsi di pressione di pilotaggio dalla durata di due secondi per verificare il corretto scorrimento della

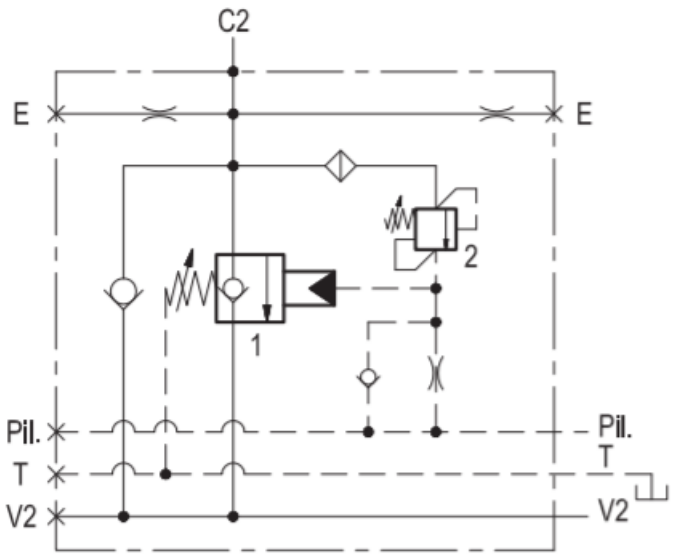

Figura 5.35. Schema idraulico VBC

spola ed evitare che un eventuale fenomeno di "incollamento" non possa permettere la corretta taratura della valvola. Durante la prova, la bocca Pil della valvola viene collegata al ramo di pilotaggio del banco PIL e gli impulsi vengono forniti sfruttando il ramo di pilotaggio "diretto" del circuito imponendo una pressione di 20 bar attraverso la valvola proporzionale EVP2 e mantenendo eccitata la valvola EV44 per l'intera durata dell'impulso di pressione e diseccitandola durante l'annullamento dell'impulso. La bocca C2 della valvola viene invece collegata alla bocca C2 del banco e sfruttando il tratto principale di carico vengono imposti 100 bar attraverso la valvola proporzionale EVP1. Il corretto scorrimento della spola viene verificato controllando che la pressione sul carico C2, quando viene dato l'impulso di pilotaggio, scenda al di sotto di 15 bar. Successivamente viene eseguita la fase di taratura, che come già detto richiede l'intervento dell'operatore. In questa fase viene imposta una pressione di pilotaggio costante, pari alla pressione di taratura della valvola secondo le specifiche richieste, attraverso la valvola riduttrice proporzionale EVP3 presente nel ramo di pilotaggio a pressione ridotta. L'operatore attraverso una brugola agisce sulla vite di regolazione fino a visualizzare su HMI un valore di portata, misurato dal flussimetro, compreso all'interno di un range desiderato. Al termine di tale fase si effettua la verifica della taratura e della tenuta.

Verifica taratura e tenuta

La fase di taratura della valvola è seguita da due fasi automatiche di verifica taratura e assenza di trafilamento. Nella fase di verifica taratura, l'obiettivo è verificare che la valvola sia stata tarata in modo corretto, ovvero che l'inizio apertura della valvola avvenga alla pressione di pilotaggio corretta. Questa prova viene eseguita allo stesso modo della prova effettuata sulla valvola VBCN mediante l'utilizzo della funzione speciale "inizio apertura". Al termine della fase di verifica taratura, si ha l'annullamento della pressione di pilotaggio per verificare che la spola in battuta sulla sede di tenuta sia tale da non determinare trafilamento. La prova di tenuta viene anch'essa eseguita allo stesso modo della valvola VBCN mediante la lettura delle gocce sulla linea di scarico in cui è presente il gocciolatore.

Serraggio dado

La fase di serraggio, è una fase manuale eseguita al termine delle prove di verifica taratura e tenuta. Durante tale fase l'operatore si occupa di serrare il dado che ferma in posizione la vite di taratura, attraverso l'ausilio di una specifica chiave dinamometrica opportunamente tarata al valore di coppia specifico. L'obiettivo del serraggio è quello di bloccare in posizione la vite di regolazione per evitare che gli spostamenti della vite possano causare variazioni della taratura. Tuttavia, anche durante l'operazione di serraggio del dado, una piccola rotazione della vite di regolazione può cambiare il valore di taratura. Per questo motivo, la fase di serraggio è seguita da un'ulteriore fase automatica di verifica taratura.

Verifica taratura e tenuta VS5

La VS5 è la valvola di massima presente all'interno della VBC, la cui taratura viene eseguita dall'operatore tramite una brugola agendo sulla vite di regolazione. Quest'operazione viene eseguita manualmente dall'operatore ad inizio collaudo prima che vengano eseguite tutte le successive fasi. Essendo una valvola di massima, l'obiettivo della prova è quello di verificare che la valvola sia in grado limitare la pressione in C2 ad un valore massimo corrispondente alla pressione di taratura. Questa valvola è quindi di fondamentale importanza quando durante le applicazioni si hanno sovraccarichi. Successivamente alla fase di verifica taratura, viene eseguita la fase di verifica tenuta, in cui l'obiettivo è quello di controllare che la valvola ad un valore di pressione sul carico inferiore a quello di taratura sia in grado di mantenere una perfetta tenuta, senza trafilamento. Questa prova è finalizzata a verificare che

la valvola sia in grado di mantenere una pressione costante sul carico, che corrisponde a mantenere, per esempio, il braccio di un carrello elevatore in posizione fissa e sollevata. Queste prove vengono eseguite nello stesso modo di quanto visto per le valvole VBCN.

Tenuta Valvola unidirezionale

La valvola unidirezionale come già descritto in precedenza, ha la funzione di permettere il passaggio del flusso in una sola direzione. L'obiettivo di questa prova è quindi quello di verificare l'assenza di trafilamento nel caso di flusso diretto da C2 verso V2. La prova viene eseguita allo stesso modo di quanto visto nel collaudo della valvola VBCN, imponendo una pressione costante sul ramo principale di carico attraverso la valvola proporzionale EVP1 e rilevando il gocciolamento attraverso il gocciolatore presente sulla linea di scarico U2 collegata con la bocca V2.

5.3.7 Fasi di collaudo VBSO

Tra le diverse tipologie di valvole di controbilanciamento VBSO, si è scelto di riportare le fasi di collaudo di una valvola bilanciata a taratura fissa, il cui schema idraulico è riportato in Figura 5.36. Tali valvole sono dette a taratura fissa poiché

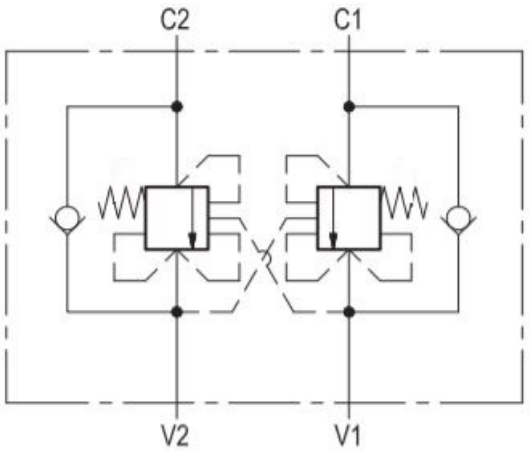

Figura 5.36. Schema idraulico VBSO

non è presente una vite di regolazione su cui agire per variare il precarico della molla. In questo caso, la taratura viene eseguita durante il montaggio mediante l'inserimento di spessori che consentono il precarico della molla. In base al numero di spessori inseriti e alla rigidezza della molla si determina la pressione di taratura della valvola. Considerando lo schema idraulico, si può notare che essa è caratterizzata da 4 bocche: C1 e C2 collegate alle uscite del ramo principale di carico del banco di collaudo e V1 e V2 collegate rispettivamente alle linee di scarico U1 e U2 del banco. I passi di collaudo automatici, di seguito riportati, fanno riferimento al collaudo di una sola parte della valvola, ovvero alla valvola di massima con collegamenti C2 e V2, pilotata tramite V1. I passi di collaudo riferiti alla valvola di massima con i collegamenti C1 e V1, pilotata tramite V2, sono stati omessi poiché uguali a quelli eseguiti sull'altra valvola di massima.

Verifica Inizio apertura

La prima fase di collaudo eseguita su questa tipologia di valvole, è quella di inizio apertura o verifica taratura, in cui l'obiettivo è quello di verificare il valore della pressione di pilotaggio che determina l'apertura della valvola. Come già visto per

le altre tipologie di valvole, prima della fase di verifica della taratura, vengono applicati alcuni impulsi di pilotaggio dalla durata di due secondi mediante la bocca di ingresso V1 della valvola collegata alla linea U1 del banco. L'obiettivo di tali impulsi è quello di verificare il corretto scorrimento del pistoncino ed evitare che un eventuale fenomeno di "incollamento" possa falsare la prova di verifica taratura. Durante gli impulsi sul ramo principale di carico, collegato con la bocca C2 della valvola, vengono imposti 20 bar mediante la valvola proporzionale EVP1 con un controllo in anello aperto della pressione. Il ramo è messo in pressione mediante l'eccitazione delle elettrovalvole EV11 ed EV13. La bocca V2 della valvola, è collegata con l'uscita U2 del banco e mediante l'eccitazione dell'EV47 l'olio viene scaricato passando per il gocciolatore. Gli impulsi vengono applicati sfruttando il tratto di circuito di pilotaggio collegato alla linea di uscita U1. Sulla valvola proporzionale EVP2 del ramo di pilotaggio, durante gli impulsi vengono imposti 200 bar così da garantire l'apertura della valvola di massima. La messa in pressione della linea U1 avviene mediante l'eccitazione dell'EV44, EV38, EV39, EV19 ed EV16.

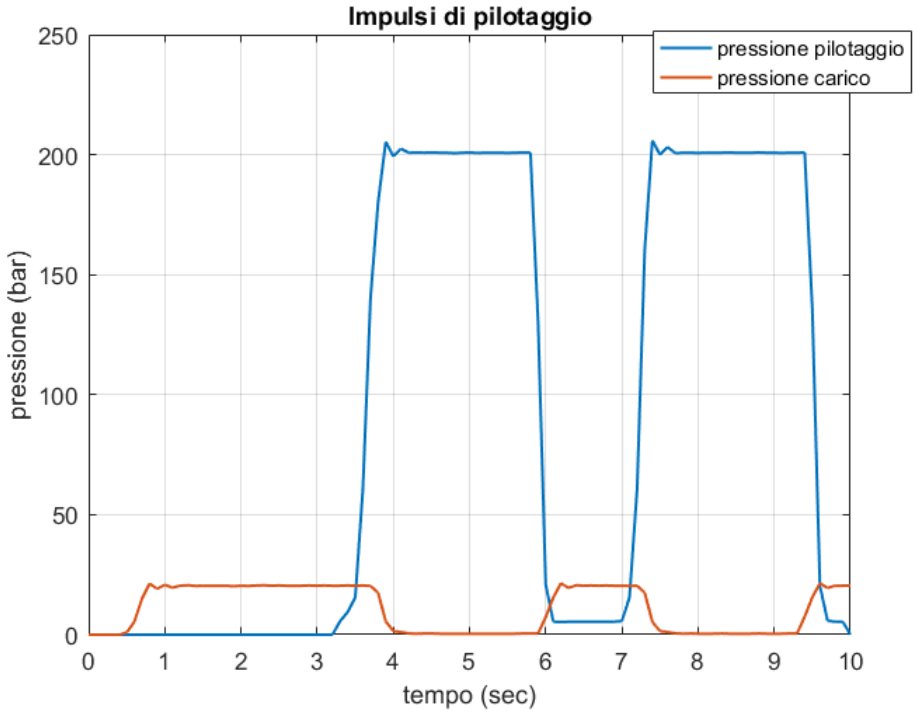

Figura 5.37. Impulsi di pilotaggio prova di inizio apertura

Dal grafico si può osservare l'annullamento della pressione di carico corrispondentemente agli impulsi di pilotaggio.

La pressione di pilotaggio necessaria a determinare l'apertura della valvola è legata alla pressione di taratura, alla pressione di carico e al rapporto di pilotaggio secondo la seguente espressione:

$$p_{pil} = \frac{p_s - p_c}{R} \tag{5.4}$$

Note le specifiche tecniche della valvola, ovvero pressione di taratura p_s e rapporto di pilotaggio R, imponendo una certa pressione sul carico, l'obiettivo è quello di verificare che l'inizio apertura della valvola avvenga ad una pressione di pilotaggio corrispondente al valore teorico ricavato dall'equazione 5.4. Come già visto per le valvole VBCN, l'inizio apertura della valvola è definito dal passaggio di una portata compresa tra 150 e 200 cc/min dalla bocca di uscita V2 della valvola. La prova è stata eseguita mantenendo invariati i collegamenti rispetto alla prova precedente e collegando la bocca V2 della valvola con la linea U2 del banco per permettere lo scarico dell'olio attraverso il flussimetro. La funzione speciale "sensibilità/apertura", consente di effettuare tale prova, memorizzando il valore di pressione di pilotaggio quando viene misurata dal flussimetro una portata compresa all'interno del range di controllo. Affinché la prova sia superata, il valore di pressione memorizzato deve essere compreso all'interno del range di accettabilità, determinato dalla formula precedente.

Dal grafico di Figura 5.38, si può osservare l'andamento della pressione di pilotaggio e della portata misurata dal flussimetro durante la prova. Quest'ultima, è stata effettuata su una valvola avente una pressione di taratura p_s pari a 700 bar e un rapporto di pilotaggio R pari a 4.5. Imponendo una pressione sul carico di 20 bar, dalla formula precedentemente riportata si ottiene una pressione di pilotaggio di 151 bar. Il grafico, infatti, mostra il raggiungimento di una portata superiore a 150 cc/min per un valore di pressione di pilotaggio poco superiore a 150 bar, in accordo con il valore teorico calcolato.

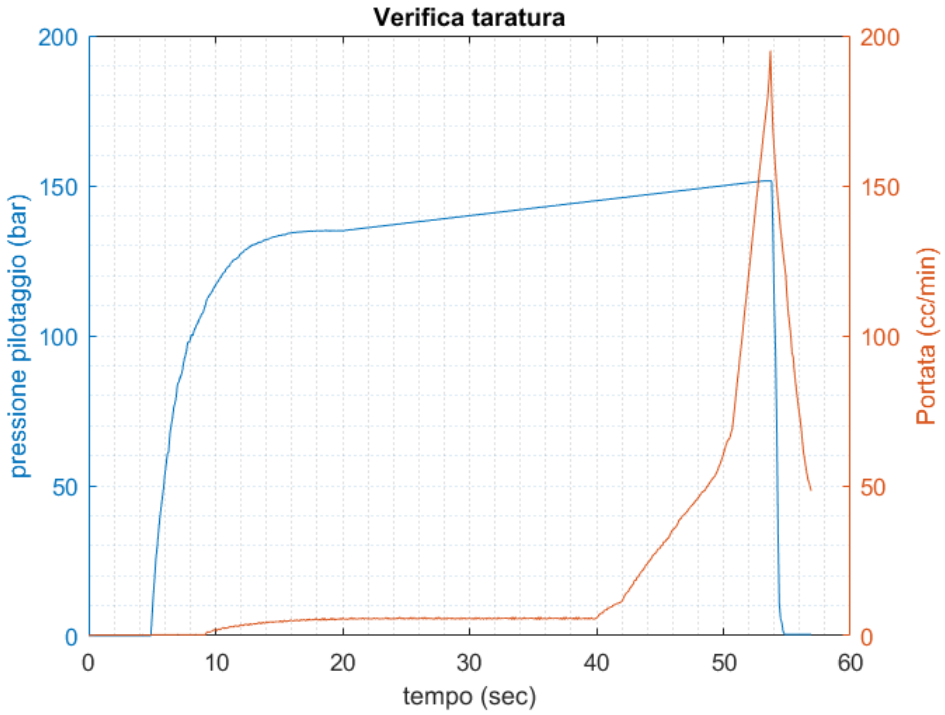

Figura 5.38. Prova di verifica inizio apertura

Verifica tenuta

La prova di tenuta consiste nel verificare l'assenza di trafilamento attraverso la bocca V2 della valvola, nella condizione di valvola chiusa in cui il pistoncino è posto in battuta sulla sede. La prova viene eseguita mantenendo i collegamenti della valvola con il banco invariati rispetto alle prove precedenti. La linea di scarico U2 deve essere configurata in modo da permettere lo scarico dell'olio a serbatoio attraverso il passaggio nel gocciolatore eccitando l'elettrovalvola EV47. Ciò, consente di quantificare il numero di gocce e verificare la tenuta della valvola. La prova viene eseguita imponendo una pressione elevata sul carico, ovvero sulla bocca C2 della valvola, secondo le specifiche tecniche richieste dall'ufficio tecnico. Questi valori imposti sul carico dipendono dalla pressione di taratura della valvola. Nella prova eseguita sulla valvola in questione, sono stati imposti 400 bar attraverso la valvola proporzionale EVP2 del ramo principale di carico per una durata di 10 secondi. Contemporaneamente attraverso il gocciolatore e il lettore di gocce posti sull'uscita V2 della valvola si rileva un eventuale trafilamento di portata. Affinché la prova di tenuta risulti superata è necessario che non venga rilevata nemmeno una goccia. Nel caso in cui la

prova fallisce dopo la ripetizione dei tre tentativi disponibili è richiesto l'intervento dell'operatore per la sostituzione del pistoncino.

Per le altre tipologie di valvole VBSO a taratura variabile si ha l'aggiunta di alcune fasi di collaudo manuali per eseguire le fasi di taratura e serraggio dado. Queste fasi vengono eseguite dall'operatore nelle stesse modalità descritte per la valvola VBC.

5.4 Check: La fase di verifica

Questa macro-fase del metodo PDCA prevede la verifica del raggiungimento degli obiettivi prefissati nella fase "plan" attraverso un'analisi sulle durate delle prove di collaudo eseguite. Al termine della fase di programmazione dei vari passi, ciascuna prova di collaudo è stata ripetuta cinque volte per ottenere una stima dei tempi e per fare una valutazione sull'impatto delle operazioni manuali presenti all'interno dell'intera prova di collaudo. Ciò ha consentito di effettuare un confronto con la situazione obiettivo definita nella fase "Plan".
La ripetizione delle prove di collaudo eseguite sulla valvola VBCN scelta ha consentito di ottenere i seguenti risultati in termini di tempo ciclo:

Prova	t_c automatico (min/pz)	t_c manuale (min/pz)
1	7.3	0.8
2	6.83	0.75
3	7.1	0.75
4	7.1	0.85
5	6.7	0.8
Media	7	0.79

In tabella è riportato il tempo impiegato per eseguire tutte le fasi automatiche di collaudo e il tempo per eseguire le operazioni manuali. Il tempo di collaudo manuale comprende la fase di taratura della valvola di massima VS5, eseguita prima delle fasi di collaudo automatiche, e il tempo di carico e scarico della valvola dal banco. Il tempo di collaudo totale medio ottenuto è stato di 7.79 min/pz, di cui 7 eseguiti in modalità totalmente automatica e 0.79 eseguiti dall'operatore. Questi risultati se confrontati con il caso di collaudo totalmente manuale mostrano una riduzione del takt time della linea da 7,65 min/pz a 7,19 min/pz e l'eliminazione dell'operatore dal collaudo. La parte di collaudo manuale, viene eseguita dall'operatore situato nella postazione di montaggio. Gli istogrammi di Figura 5.41 e 5.40 mostrano i risultati descritti.

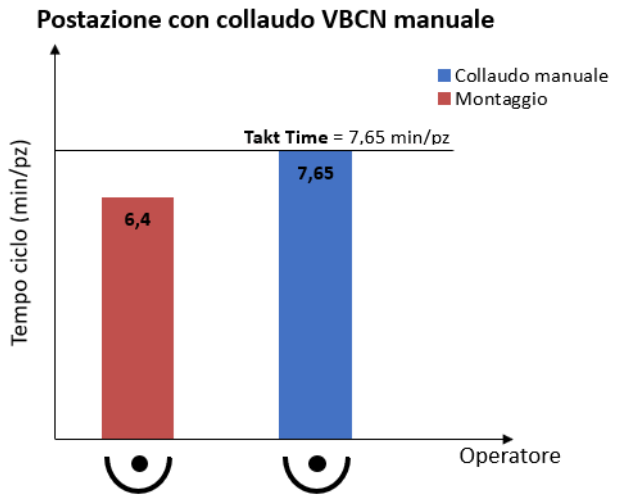

Figura 5.39. Takt time collaudo manuale VBCN

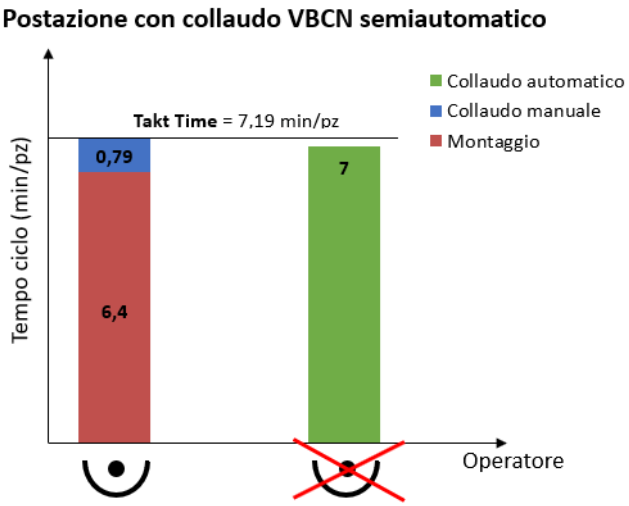

Figura 5.40. Takt time collaudo semiautomatico VBCN

Il collaudo delle valvole VBC è caratterizzato da più fasi manuali che richiedono l'intervento dell'operatore. Come già visto nel paragrafo 5.3.6, prima dell'esecuzione delle fasi di collaudo automatiche, sono presenti due fasi manuali di taratura della VBC e della valvola di massima VS5. Inoltre, dopo le fasi di verifica taratura e tenuta della VBC è prevista l'interruzione del collaudo automatico per eseguire la fase di "serraggio dado". Dalla ripetizione di cinque prove di collaudo si sono ottenuti i seguenti risultati:

Prova	t_c automatico (min/pz)	t_c manuale (min/pz)
1	5.4	2.25
2	5.55	2.05
3	5.6	2.15
4	5.2	2.2
5	5.45	2.3
Media	5,44	2.19

Il tempo di collaudo totale medio ottenuto è stato di 7.63 minuti, di cui 5.44 minuti eseguiti in modalità totalmente automatica e 2.19 eseguiti dall'operatore. Dal confronto con i dati di collaudo manuale si ottiene un aumento del takt time da 6.9 min/pz a 8.69 min/pz. Quest'ultimo valore è determinato dal tempo impiegato dall'operatore per svolgere la fase di montaggio e le operazioni di collaudo manuali. Questi risultati sono meglio mostrati negli istogrammi riportati di seguito, in cui viene fatto un confronto tra il caso di collaudo manuale e semiautomatico.

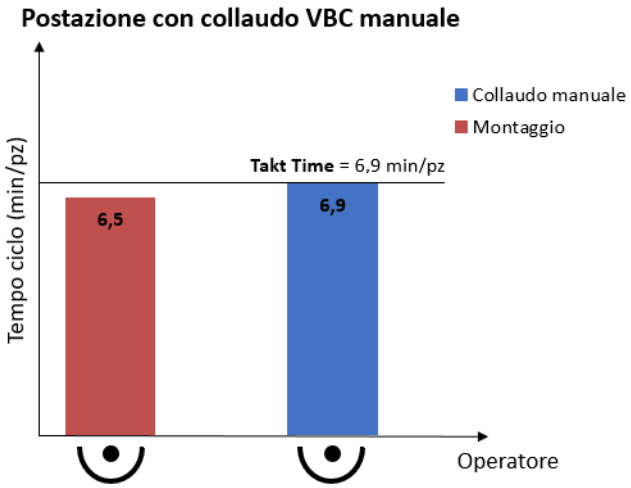

Figura 5.41. Takt time collaudo manuale VBC

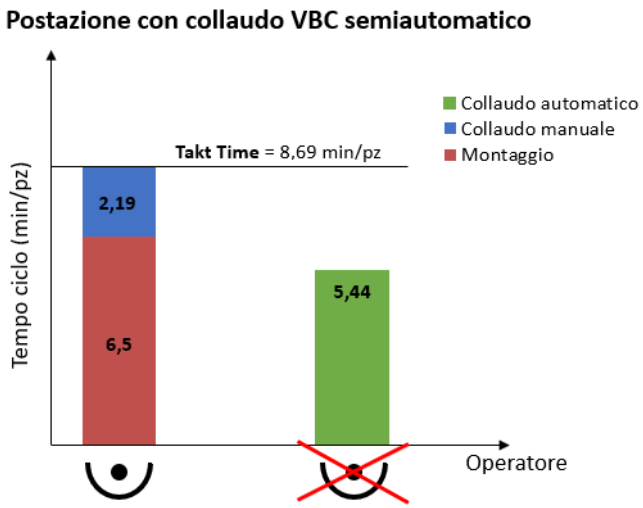

Figura 5.42. Takt time collaudo semiautomatico VBC

In ultimo, è stata fatta una valutazione sui tempi di collaudo anche per la valvola di controbilanciamento VBSO a taratura variabile. Tale valvola, così come la VBC, è caratterizzata da più fasi di collaudo manuali che richiedono l'intervento dell'operatore. In particolare, sono presenti due fasi di taratura manuale e due fasi di serraggio dadi. La prima taratura viene eseguita dall'operatore prima dell'inizio del collaudo automatico, le altre fasi manuali richiedono ogni volta l'interruzione del collaudo automatico e l'intervento dell'operatore. Dalla ripetizione delle prove di collaudo sono stati ottenuti i seguenti tempi:

Prova	t_c automatico (min/pz)	t_c manuale (min/pz)
1	4.3	3.65
2	4.2	3.3
3	4.25	3.4
4	4.1	3.8
5	4.35	3.5
Media	4,24	3.53

Dalle prove effettuate è stato ottenuto un tempo medio di collaudo pari a 7.77 minuti, di cui il 55% in automatico e il 45% in manuale. Inoltre, dal confronto con il caso di collaudo totalmente manuale si è ottenuto, come è possibile osservare dagli istogrammi, un incremento del takt time da 6.1 min/pz a 8.72 min/pz.

Sulla base dei risultati ottenuti in tale fase, sono state prese delle decisioni al fine di raggiungere la massima efficienza del processo di collaudo.

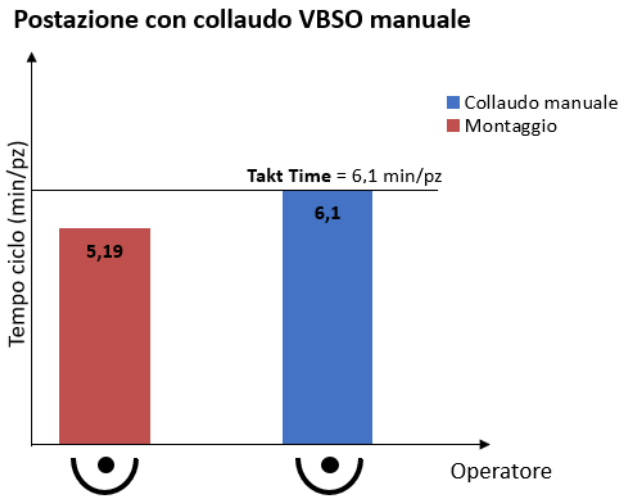

Figura 5.43. Takt time collaudo manuale VBSO

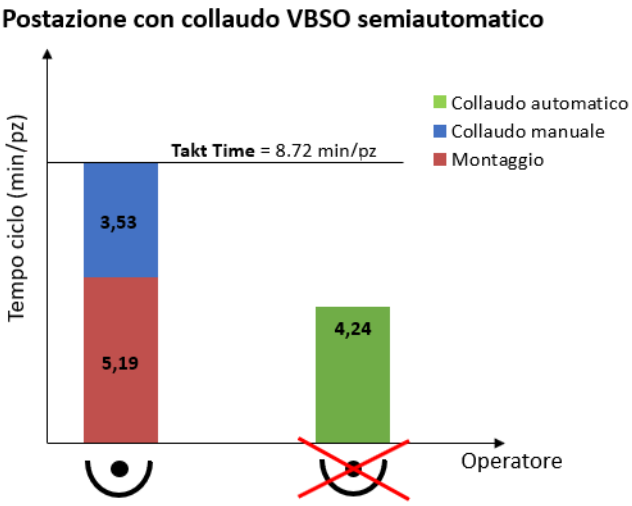

Figura 5.44. Takt time collaudo semiautomatico VBSO

5.5 Act:La fase di correzione

L'ultima fase del ciclo di Deming, è la fase di "azione" che prevede la standardizzazione e il consolidamento di un processo o di una soluzione, in base ai risultati ottenuti nella precedente fase di controllo. Per l'avvio della produzione (SOP) si è resa necessaria un'analisi dei primi risultati ottenuti dalle prove di collaudo, per decidere quali valvole consentono di ottenere la maggiore efficienza e produttività della linea.

I risultati ottenuti per la famiglia di valvole VBCN, hanno dimostrato il raggiungimento degli obiettivi prefissati, ovvero l'eliminazione dell'operatore dal collaudo e la riduzione del takt time della linea. Analizzando i risultati riguardanti le valvole VBC e VBSO, si evince il raggiungimento parziale degli obiettivi prefissati. L'automazione di alcune fasi di collaudo, infatti, ha consentito la riduzione del numero di operatori, tuttavia si è ottenuto un incremento del takt time della linea. Inoltre, la presenza di fasi di collaudo manuali poste tra fasi di collaudo automatiche, richiede il ripetuto spostamento dell'operatore dalla postazione di montaggio a quella di collaudo, determinando, nel tempo, una perdita di efficienza.

Tra le valvole VBSO, tuttavia, è stata individuata una tipologia, definita a "taratura fissa", che permette l'esecuzione del collaudo in modalità totalmente automatica. Tali valvole sono dette a "taratura fissa" poiché non è presente una vite di regolazione su cui agire per variare il precarico della molla e quindi la resistenza che la molla esercita nell'apertura della valvola. A differenza delle altre valvole VBSO, la fase di taratura viene eseguita durante il montaggio mediante l'inserimento di spessori che consentono di precaricare la molla. In base al numero di spessori inseriti e alla rigidezza della molla si varia la taratura della valvola. L'eliminazione delle fasi di taratura e di serraggio del dado della vite di regolazione, ha permesso l'esecuzione dell'intero ciclo di collaudo in modo automatico. Dalle prove di collaudo eseguite su tale tipologia di valvola si sono ottenuti i seguenti tempi:

Prova	t_c automatico (min/pz)	t_c manuale (min/pz)
1	3.9	0.4
2	3.85	0.4
3	3.9	0.4
4	3.9	0.4
5	3.8	0.4
Media	3,87	0.4

Alla durata delle fasi di collaudo automatiche si aggiunge il tempo impiegato dall'operatore per il carico e lo scarico della valvola dal banco, rispettivamente all'inizio e alla fine dell'intero ciclo di collaudo. Rispetto al collaudo completamente manuale, come mostrato nelle Figure 5.45 e 5.46, in questo caso si ottiene sia una riduzione del numero di operatori che del takt time.

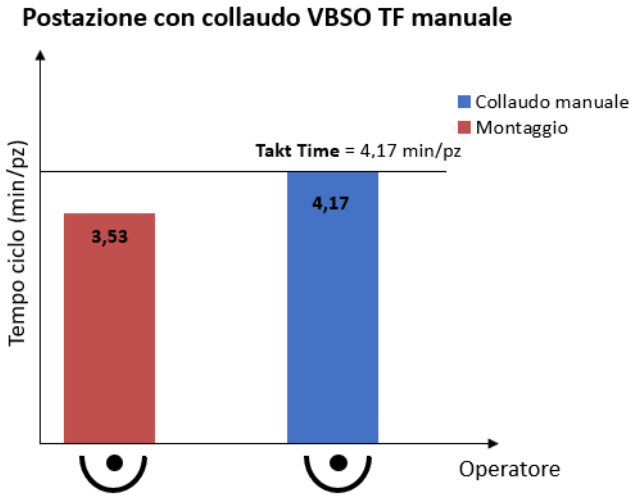

Figura 5.45. Takt time collaudo manuale VBSO a taratura fissa

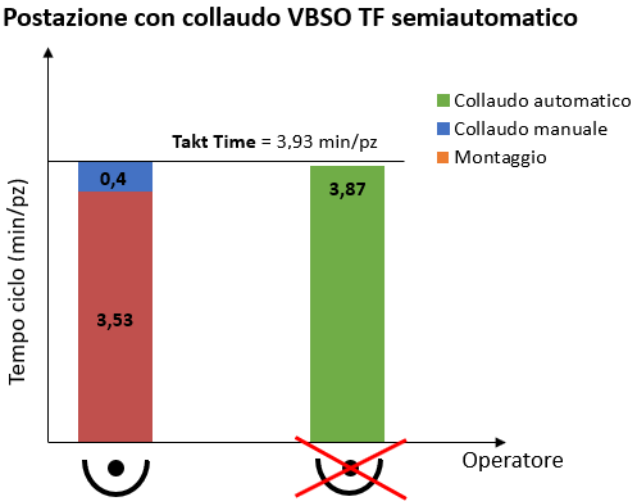

Figura 5.46. Takt time collaudo semiautomatico VBSO a taratura fissa

Sulla base di questi risultati, si è deciso quindi, di avviare la produzione con il collaudo di tutti i codici-prodotto delle valvole VBCN e VBSO a taratura fissa. Per l'avvio della produzione si è proceduto con l'implementazione dei passi di collaudo dei codici-prodotto con maggiori volumi di produzione. Ciascun codice richiede l'implementazione di un programma di collaudo personalizzato per soddisfare le specifiche tecniche richieste.

Infine, l'avvio del nuovo banco di collaudo all'interno del reparto produttivo, ha

richiesto il coinvolgimento di diversi enti aziendali: ufficio tecnico e qualità per la validazione delle tecniche e procedure eseguite nei vari passi di collaudo e l'ufficio HSE (*Health, Safety and Environment*) per la verifica della rispondenza del banco ai requisiti richiesti dalla normativa vigente in materia di salute e sicurezza sul lavoro.

Capitolo 6

Risultati

Dopo aver illustrato le fasi che hanno caratterizzato il progetto, nel seguente capitolo si pone l'attenzione sui risultati ottenuti dall'applicazione del collaudo semiautomatico. L'automazione del processo di collaudo funzionale, ha permesso la memorizzazione dei dati principali di collaudo e dei risultati dei test effettuati (pressioni, portate) all'interno di un database, utile non soltanto per un riscontro diretto con le richieste del cliente, bensì per fornire all'azienda dati per analisi periodiche e programmare azioni di miglioramento continuo.
Parallelamente all'automazione di funzionamento si è riusciti ad ottenere un banco di collaudo capace di garantire una pressione massima di esercizio di 700 bar, molto superiore rispetto a quella gestita dal vecchio banco (450 bar). Tale aspetto ha permesso di assegnare al nuovo banco di collaudo, tutti i codici valvola caratterizzati da una pressione di esercizio elevata, denominati HP (*high pressure*), che rappresentano l'attuale tendenza dominante nel mercato dell'idraulica compatta per applicazioni mobili, in quanto sinonimo di prestazioni ed efficienza energetica.

I KPI (*Key Performance Indicator*) che sono stati monitorati durante l'avviamento del progetto e che costituiscono il risultato di punta del lavoro di tesi sono: riduzione del takt time ed aumento della produttività della linea. Attraverso l'analisi dei dati, si sono confrontati i tempi di montaggio e collaudo, precedentemente rilevati nell'esecuzione manuale, con quelli attuali ottenuti con l'esecuzione del collaudo semiautomatico. Il risparmio generato per l'azienda è dato dalla riduzione del numero di ore necessarie a produrre i volumi richiesti dal mercato nella configurazione di collaudo semiautomatico rispetto ad un collaudo manuale. Per la quantificazione dei risultati si veda la tabella sottostante.

	VBCN	VBSO TF
VPZ (Volume pz/anno)	12925	10726
t_{mont} + t_{coll} manuale (min/pz)	14.05	7.7
t_{mont} + t_{coll} semiautomatico (min/pz)	7.19	3.9
ore/anno manuale	3026	1376
ore/anno semiautomatico	1548	702
Saving ore/anno	1478	674
Saving ore/anno %	49%	49%

Dai dati riportati in tabella, si può notare che l'automazione del processo di collaudo ha permesso di stimare un *saving* in ore anno di circa il 50% rispetto al caso di collaudo manuale. Questo dato consente di stimare un ROI (return on investment) inferiore ai 3 anni, conforme a quello previsto dall'azienda in fase di pianificazione del progetto. La quantificazione del ROI è stata determinata tenendo conto che ciascuna ora di lavoro risparmiata rappresenta una riduzione dei costi sia diretti (personale) che indiretti (energia, manutenzione, impatto ambientale).
In ultimo, un ulteriore beneficio che ci si attende dall'automazione del banco di collaudo è l'aumento della qualità del prodotto, come diretta conseguenza della riduzione della soggettività nelle fasi di collaudo.

Conclusioni

In quest'ultimo capitolo dell'elaborato si vuole riassumere il lavoro svolto e i risultati ottenuti. L'obiettivo principale del progetto è stato l'ottimizzazione del processo di collaudo funzionale di una categoria specifica di valvole oleodinamiche (Parts in Body), attraverso la trasformazione e l'automazione di un banco di collaudo manuale. Per raggiungere tale obiettivo, la prima parte dell'attività di tesi ha previsto lo studio del funzionamento delle *check and metering valves* e *counterbalance valves* e successivamente l'osservazione e analisi diretta del processo di collaudo manuale. La restante parte è stata dedicata, alla risoluzione delle problematiche riscontrate in fase di progettazione del circuito idraulico e all'implementazione di tutti i passi di collaudo automatici. Quest'ultima attività, ha richiesto l'esecuzione di ripetute prove sperimentali permettendo di determinare i limiti del banco e ottimizzare i parametri di funzionamento da inserire per garantire la corretta esecuzione del collaudo. Al termine di queste attività si è arrivati alla completa trasformazione del banco di collaudo manuale e allo sviluppo di cicli di collaudo semiautomatici che hanno permesso il raggiungimento degli obiettivi prefissati in fase di definizione del progetto.

Come sperato, l'ottimizzazione del processo di collaudo, attraverso l'utilizzo di un sistema semiautomatico, ha permesso principalmente di ridurre il numero di risorse impiegate nell'esecuzione delle operazioni e di diminuire il *takt time* della linea, generando un aumento della produttività e quindi un saving economico rilevante per l'azienda, con un ROI inferiore ai tre anni. A questi risultati va aggiunta, inoltre, la possibilità di collaudare valvole con pressioni di esercizio fino a 700 bar e di garantire la memorizzazione dei dati principali di collaudo, utili al cliente e all'azienda stessa per eseguire analisi periodiche e programmare azioni di miglioramento.

In un'ottica di miglioramento continuo dell'efficienza del sistema produttivo aziendale, questo lavoro risulta essere la base per il passaggio da un collaudo completamente manuale, ad un collaudo semiautomatico che coinvolga altre tipologie di valvole oltre a quelle analizzate. A tal proposito, si vuole fornire una visione sui possibili sviluppi futuri di tale progetto, ovvero il raggiungimento di obiettivi a medio-lungo termine.

Le esigenze del mercato odierno comportano spesso l'adozione di sistemi di produzione sempre più performanti in termini di produttività e qualità seguendo una logica costante di riduzione dei costi. Tali obiettivi possono essere raggiunti tramite un'attenta politica di investimenti, dotandosi, cioè, delle giuste attrezzature e degli strumenti adeguati ad ottimizzare l'organizzazione del processo industriale. Nel progetto presentato si parla di collaudo semiautomatico e non automatico, dovuto alla presenza di alcune fasi manuali (taratura, serraggio) eseguite dagli operatori. L'obiettivo futuro è rappresentato dall'oggettivazione delle fasi manuali a valore aggiunto e la loro integrazione nel sistema di raccolta dati e consenso all'avanzamento, attraverso l'utilizzo di avvitatori elettronici. L'obiettivo è quello di fare in modo che il software del banco di collaudo, interfacciandosi con l'avvitatore, durante i passi manuali, carichi il corrispondente programma di serraggio, caratterizzato da un certo valore di coppia e di angolo. Al termine del serraggio, i valori di coppia e angolo ottenuti vengono memorizzati e confrontati con dei valori limite, restituendo in tempo reale un *feedback* positivo o negativo all'operatore e consentendo l'avanzamento al passo successivo. L'utilizzo di tale strumento permetterebbe di oggettivare le fasi di taratura e serraggio eliminando l'errore umano e garantendo la memorizzazione dei dati di coppia e angolo. L'introduzione di questa tecnologia permetterebbe di effettuare un ulteriore passo verso le esigenze dell'*Industry 4.0* di connessione con le tecnologie di controllo e monitoraggio della produzione.

Bibliografia

[6.1] C. Barlotti, "Appunti di formazione interna Bosch Rexroth Oil Control S.p.A", 2012

[6.2] Bosch Rexroth Oil Control S.p.A "Compact Hydraulics product trainings"

[6.3] https://www.iwolm.com/blog/il-metodo-pdca-o-ruota-di-deming/

[6.4] H. Speich, A. Bucciarelli, "Manuale di Oleodinamica", 2018