



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di una pompa volumetrica per alimentazione di slurry di  
carbone

*Romano Bruschi, Giuseppe Messina*

## SVILUPPO DI UNA POMPA VOLUMETRICA PER ALIMENTAZIONE DI SLURRY DI CARBONE

Romano Bruschi, Giuseppe Messina (ENEA)

Settembre 2010

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: *Tecnologie innovative per migliorare i rendimenti di conversione delle centrali a polverino di carbone*

Responsabile Tema: Stefano Giammartini, ENEA

# SVILUPPO DI UNA POMPA VOLUMETRICA PER ALIMENTAZIONE DI SLURRY DI CARBONE

## 1. Introduzione

Nel processo di valutazione della pompa triplex a zero pulsatilità come sistema di alimentazione slurry di carbone sono state individuate due fasi:

- test funzionale-qualitativo**, mirato alla verifica delle possibilità funzionali: possibilità di pompaggio di slurry di carbone, criticità funzionali di tipo on/off e indicazioni di modifiche strutturali consistenti, continuità di esercizio, deperibilità del componente. La concentrazione carbone/acqua usata per la composizione dello slurry è quella indicata da ITEA.
- test funzionale-analitico**, mirato alla validazione analitica della funzionalità: entità della pulsatilità, curve di rendimento e di lavoro. Questo test implica anche lo studio della fluidodinamica dello slurry di carbone e della sua interazione con la funzionalità della pompa.

Terminato il test funzionale qualitativo, si è in procinto di realizzare un loop per i test funzionali-analitici.

Il test qualitativo è mirato alla verifica della possibilità di pompaggio di slurry di carbone e delle possibili criticità funzionali di tipo on/off, ovvero della continuità di esercizio e della deperibilità del componente. E' stato approntato un loop chiuso di prova, riportato in fig. 1, costituito da: serbatoio in pressione contenente slurry di carbone, pompa triplex, misuratore di pressione, carico fluidodinamico e valvola di spillamento per la stima di portata in pressione. Il loop è anche dotato di una adduzione acqua in pressione per il pre e post lavaggio.

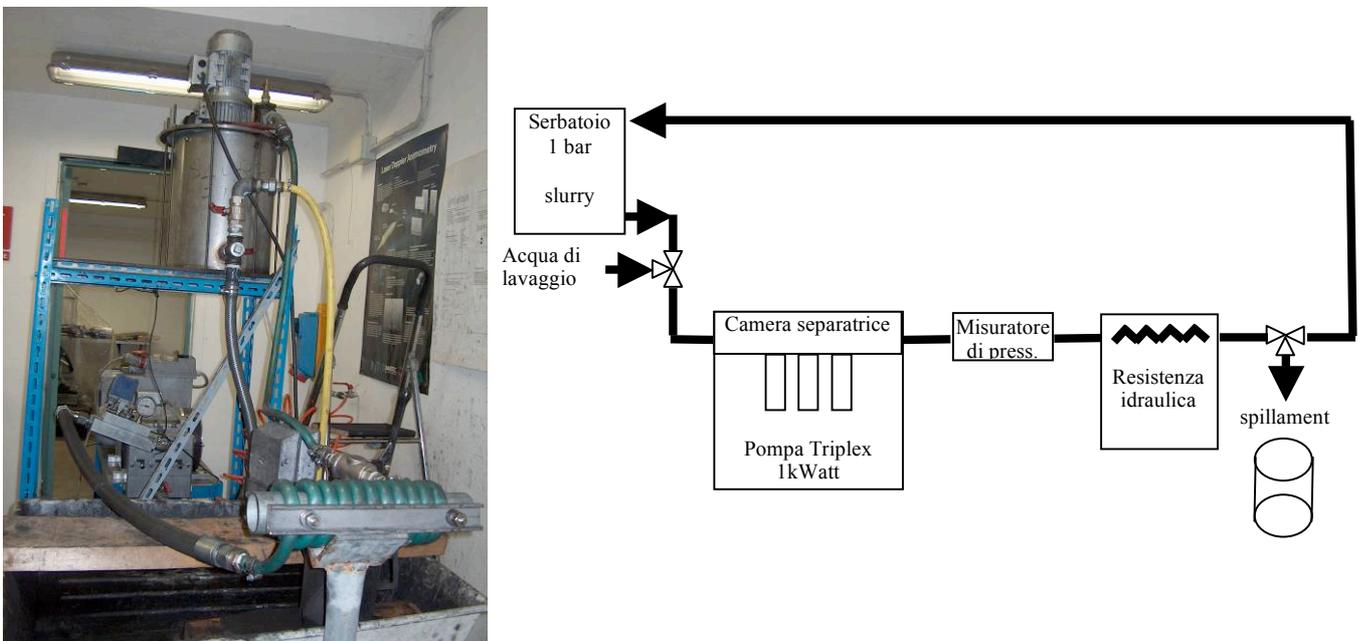
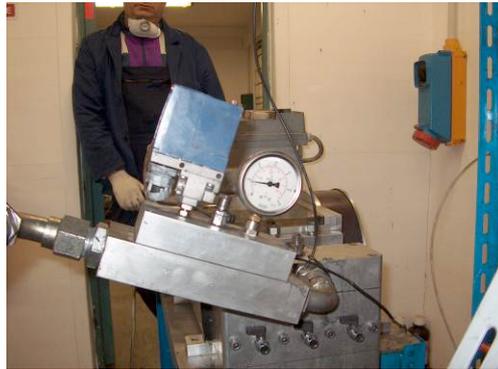


Figura 1 Prova pompa triplex, loop-slurry e relativo diagramma funzionale

## 2. Descrizione dei componenti critici del circuito

Il sistema, come da diagramma funzionale riportato in fig.1, è costituito da:

- a) Serbatoio in acciaio, a chiusura ermetica, per una pressione di esercizio di 1 bar, dotato di valvola di sicurezza. Contiene un agitatore necessario a mantenere lo slurry, fluido non newtoniano, in uno stato di viscosità e fluidità accettabile (lo slurry in condizione statica si separa nelle due fasi che lo costituiscono, solida e liquida, e si altera pesantemente la sua caratteristica fluidodinamica)
- b) Pompa triplex a zero pulsatilità da 1 kW, componente sotto test.
- c) Misuratore di pressione con pressostato, tarato a 20 bar. Il pressostato esegue un intervento veloce di protezione togliendo l'alimentazione elettrica al motore della pompa quando si verifica il superamento del limite di pressione impostato.



**Figura 2 Misuratore di pressione e relativo limitatore di pressione**

- d) Carico idraulico variabile, ottenuto con un tubo flessibile (pressione max 30 bar) avvolto a spirale attorno ad un tubo di acciaio, e comprimibile, per diminuirne la sezione utile ed aumentare il carico idraulico, tramite due barre in metallo laterali e serrabili, a modo di morsa, con due bulloni.



**Figura 3 Resistenza idraulica variabile.**

- e) Valvola a tre vie per lo spillamento, in pressione dello slurry. La valvola garantisce il mantenimento in pressione del serbatoio, durante lo spillamento.
- f) Slurry di carbone ed acqua.

Il fluido utilizzato nel loop è un fango costituito da polverino di carbone, a grana omogenea di diametro 0.1 mm, ed acqua. E' stato preparato secondo le indicazioni fornite da ITEA:

volumi uguali dell'acqua e del carbone (le prescrizioni precedenti erano massa acqua uguale alla metà della massa carbone), in questo caso il rapporto delle masse carbone acqua non è 2 a 1, ma 1.13 a 1. La densità dello slurry ottenuto è: 1.217 g/cc. Lo slurry stabilizzato e decantato presenta 1/3 di volume di acqua in eccesso al carbone saturo di acqua, che occupa i restanti 2/3.



**Figura 4 Slurry di carbone, grana da 0.1 mm, umido.**

La velocità di separazione della parte solida da quella liquida è alta, pertanto il fluido trattato è molto instabile dal punto di vista fluidodinamico.

### **3. Procedura per il test funzionale-qualitativo**

La procedura seguita per attuare il test consiste in quattro azioni:

- a. Innesco pompa
- b. Messa in pressione del loop
- c. Spillamento
- d. Valutazione dei risultati

#### **3.1. Innesco Pompa**

Il processo di innesco pompa, è una fase abbastanza delicata in quanto implica due attenzioni particolari:

- la prima che lo slurry non si sia separato ed abbia ostruito il condotto;
- la seconda è che la somma (pressione aria [nel nostro caso 1 Bar] nel serbatoio slurry) + (pressione dovuta al dislivello serbatoio pompa) + (valore assoluto depressione nel cilindro pompa in riempimento [nel nostro caso non superiore a 0.5 Bar] )  $\geq$  (massima perdita di carico nel condotto tra serbatoio slurry e pompa alla massima portata di lavoro): ciò garantisce che la portata in entrata alla pompa sia uguale a quella che la pompa volumetrica richiede in entrata ed invia all'uscita. Se questa condizione non viene realizzata la pompa si blocca con i relativi inconvenienti della ostruzione della tubazione di ingresso.

#### **3.2. Messa in pressione del loop**

La messa in pressione del loop viene ottenuta aumentando il carico, ovvero la resistenza idraulica. Durante il raggiungimento della pressione voluta (non superiore ai 10 bar per questioni di sicurezza) è possibile che lo slurry abbia un comportamento fluidodinamico instabile. Infatti, per raggiungere il carico idraulico adeguato all'ottenimento della pressione voluta è possibile che la sezione di strozzamento del tubo sia troppo piccola rispetto a quella necessaria affinché le dimensioni dei grani di carbone non costituiscano un problema di scorrimento: raggruppandosi in prossimità della

strozzatura ostruiscono completamente il condotto, e quindi l'anomalia si ha per una questione geometrica e non di viscosità. Si è notato che con resistenze elevate, in prossimità della strozzatura si possono provocare fenomeni di turbolenza (fruscio) che giocano a favore della stabilità del flusso, e quindi anche della pressione di esercizio, in quanto non favoriscono l'aggregamento dei granuli di carbone. Questo ci permette di ipotizzare che l'utilizzo di un sistema che vibri il fluido, e che quindi lo mantenga uno stato dinamico anche se fermo (soprattutto nelle zone critiche), sia una soluzione da non trascurare per garantire una buona funzionalità del loop.

### 3.3. Spillamento

Lo spillamento è l'operazione che viene effettuata per misurare la portata e per verificare (anche se non in modo ortodosso) se il sistema mantiene le sue caratteristiche di generatore di portata, ossia di indipendenza della portata dalla pressione del carico. Il metodo usato consiste nella registrazione, tramite telecamera della sequenza relativa al riempimento di un volume noto (contenitore da 2 litri). Per ogni misura viene registrata, la pressione di esercizio e la frequenza dell'inverter in modo da risalire, conoscendo la cilindrata complessiva dei tre pistoni (53cc), ed il rapporto motore/asse-pompa (72/14) anche alla portata volumetrica corrispondente. La possibilità di rivedere rallentati i fotogrammi (acquisiti a 25 Hz) permette di misurare, con una certa correttezza, il tempo di riempimento del contenitore. Il contenitore, una volta pieno, viene pesato con una bilancia elettronica in modo da stimare la portata massica con una discreta precisione, da cui derivare la portata in volume essendo nota la densità dello slurry.

### 3.4. Valutazione dei risultati

Sono state fatte due serie di misure di portata massica a frequenza diversa (50 e 40 Hz) fissa e pressione di carico variabile con 4,6,8,10 bar. Questo per avere due curve di confronto e poter così verificare il possibile diverso comportamento della pompa.

filename	frequenza inverter (Hz)	pressione in uscita (bar)	t0 (sec)	t1 (sec)	t riempimento	pesata (g)
910	50	4	20	35	15	2530
912	50	6	28	42	14	2521
918	50	10	26	41	15	2642
920	50	10	26	41	15	2558
923	50	10	26	41	15	2599
925	50	8	27	42	15	2642
927	50	8	26	42	16	2705
929	50	8	29	46	17	2551
931	50	6	25	40	15	2539
933	50	6	22	38	16	2621
935	50	4	25	40	15	2674
937	50	4	25	40	15	2657
0939, 0940, 0941	40	10	2	27	25	2701
0944, 0945	40	8	2	27	25	2598
950	40	8	6	30	24	2553
0952, 0953	40	6	1	23	22	2734
0955, 0956	40	6	0	22	22	2734

Figura 5 Tabella delle misure effettuate con frequenza di inverter 50 e 40 Hz e pressione di esercizio 4,6,8,10 bar



Figura 6 Nelle figure sono riportate i fotogrammi delle quattro fasi della misura: freq. inverter, press. di esercizio, spillamento e pesatura slurry.

I risultati riportati nella tabella di fig.5 sono stati graficati in modo da verificarne l'andamento.

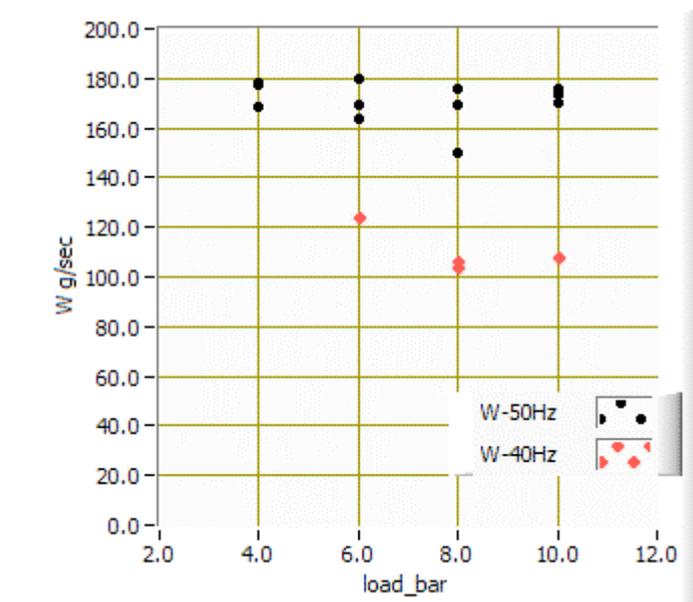


Figura 7 Rappresentazione grafica delle due curve nero (50Hz) e rossa

#### Dati statistici

50 Hz	portata media misurata = 171.03 g/sec	sd = 8.16
40 Hz	portata media misurata = 113.38 g/sec	sd = 10.05

Poiché la portata geometrica a 50 Hz è pari a 163 cm<sup>3</sup>/sec (portata in massa = 198.4 g/sec) ed a 40 Hz è pari a 128.8 cm<sup>3</sup>/sec (portata in massa = 156.8 g/sec), si ottiene uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati pari al 14% a 50 Hz e pari al 28% a 40 Hz. Questo risultato è da attribuire ai reflussi dinamico (durante la fase di chiusura) e statico (a valvola chiusa, per imperfetta chiusura) delle valvole di entrata e di uscita.

### 3.5. Deperibilità delle valvole

La pompa, dopo le misure è stata smontata per verificare lo stato delle valvole. Queste mostrano un logorio evidente dove l'otturatore batte sulla tazza di contenimento. Il materiale delle valvole è acciaio inox normale, questo dovrebbe essere trattato con un processo di indurimento.



**Figura 8 Vista dello stato delle valvole dopo un esercizio 5 giorni (6 ore gg)**

Il fenomeno essenzialmente è dovuto all'effetto della pressione di carico che completa la chiusura della valvola (sia per la valvola di entrata, sia per quella di uscita) quando c'è ritardo di chiusura dell'otturatore rispetto all'inizio della fase in cui tale valvola deve essere chiusa. L'utilizzo di valvole attive annulla questo effetto in quanto è garantita la corretta tempistica nella chiusura delle valvole.

#### Note tecniche

Dati sistema motore-pompa

Motore asincrono 4 poli

Rapporto di trasmissione 72/14 (5.14)

Cilindrata 53 cm<sup>3</sup>

Portata geometrica massima:

50 Hz            1440 giri/min (24 giri/sec)    riduzione 72/14 > 4.7 giri/sec asse pompa

40 Hz            1152 giri/min (19.2 giri/sec)    riduzione 72/14 > 3.7 giri/sec asse pompa

Portata a 50 Hz    53 cm<sup>3</sup> \* 4.7 = 247 cm<sup>3</sup>/sec -> \* 1.217 g/cc > 300.6 g/sec

Portata a 40 Hz    53 cm<sup>3</sup> \* 3.7 = 196 cm<sup>3</sup>/sec -> \* 1.217 g/cc > 238.6 g/sec

## 4. Riprogettazione del corpo pompa

E' stato riconfigurato il loop di prova della pompa in modo da poter valutare funzionalità e difetti congeniti di questa.

L'impianto, di cui alla figura 9, risulta opportunamente strumentato per consentire di valutare in tempo reale le condizioni di funzionamento della pompa ed eventualmente diagnosticare l'evolvere verso condizioni di malfunzionamento.



Figura 9: riconfigurazione del loop di prova.

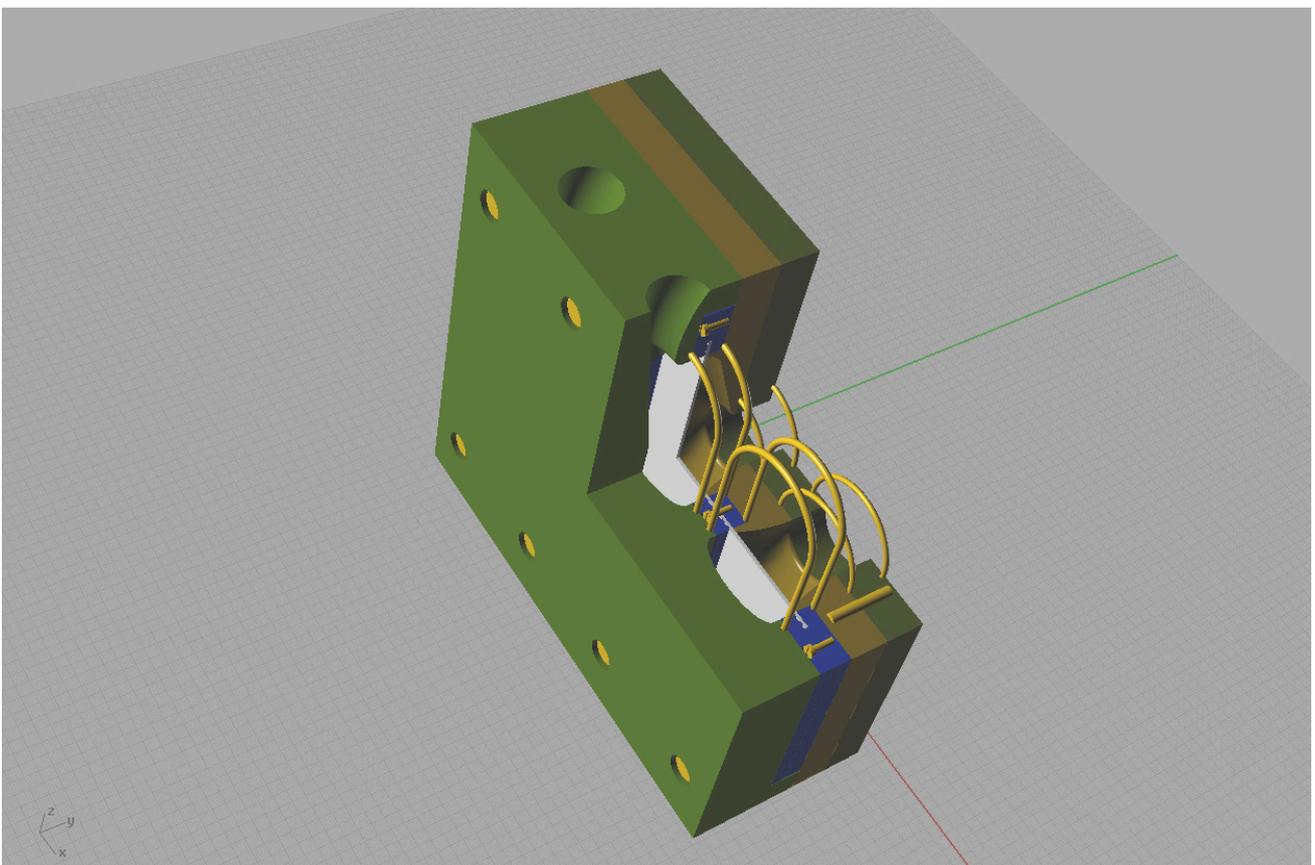
### 4.1 Riprogettazione del corpo pompa

Gli obiettivi del nuovo corpo pompa sono:

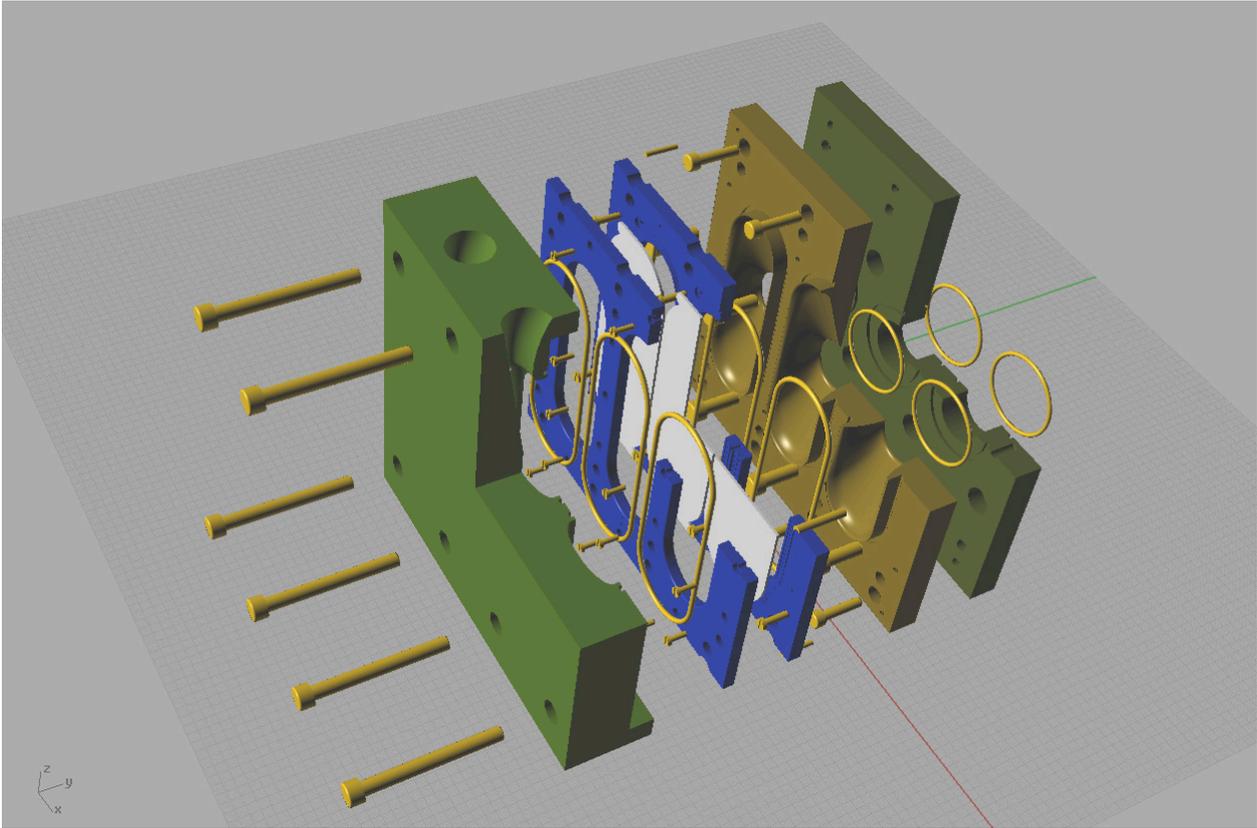
- evitare percorsi non lineari del flusso pompato
- evitare zone di ristagno
- realizzare un sistema di valvole più efficiente (valvole attive)

I criteri progettuali applicati nel disegno del nuovo prototipo consistono nella minimizzazione simultanea di tre variabili giudicate critiche in virtù delle evidenze sperimentali acquisite nella campagna prove del precedente modello. Nella fattispecie: la minimizzazione dei volumi di lavoro è direttamente correlata alla riduzione della pulsatilità, la minimizzazione delle linee di flusso è correlata alla riduzione di malfunzionamenti e avarie dovute a zone di ristagno e di occlusione del fluido, la minimizzazione della deformazione del diaframma attiene all'affidabilità del dispositivo stesso. In virtù delle considerazioni di cui sopra e data la natura prototipale del dispositivo, si è proceduto al disegno del nuovo sistema privilegiando al massimo la modularità dei componenti, onde poterli facilmente sostituire con altri di diversa geometria nel caso nuove evidenze sperimentali lo rendessero necessario. La struttura così concepita si presenta come un "pacco" di componenti sequenziali, rigidamente flangiati l'uno all'altro con il vantaggio di poter intervenire nello smontaggio di ciascuno di essi senza necessariamente incorrere nella perdita di fluidi di lavoro o nel disassemblaggio di tutta la macchina. Nell'ottica di voler mantenere il medesimo azionamento meccanico ampiamente testato, si è provveduto al disegno di una piastra rigida in acciaio inox, con la duplice funzione di interfaccia verso l'azionamento già esistente e di supporto per i successivi elementi. Solidale alla piastra di ancoraggio appena citata, è la camera olio, la cui funzione è quella di contenere il fluido di spinta che diffonde il moto generato dai pistoni. Anche questa è stata completamente ridisegnata onde eliminare tutti quei fattori giudicati critici. La camera olio oltre alle sue peculiarità funzionali, svolge anche la funzione rispettivamente di supporto e centraggio per i moduli seguenti, ovvero il telaio diaframmi e la camera slurry. Il primo è stato concepito per

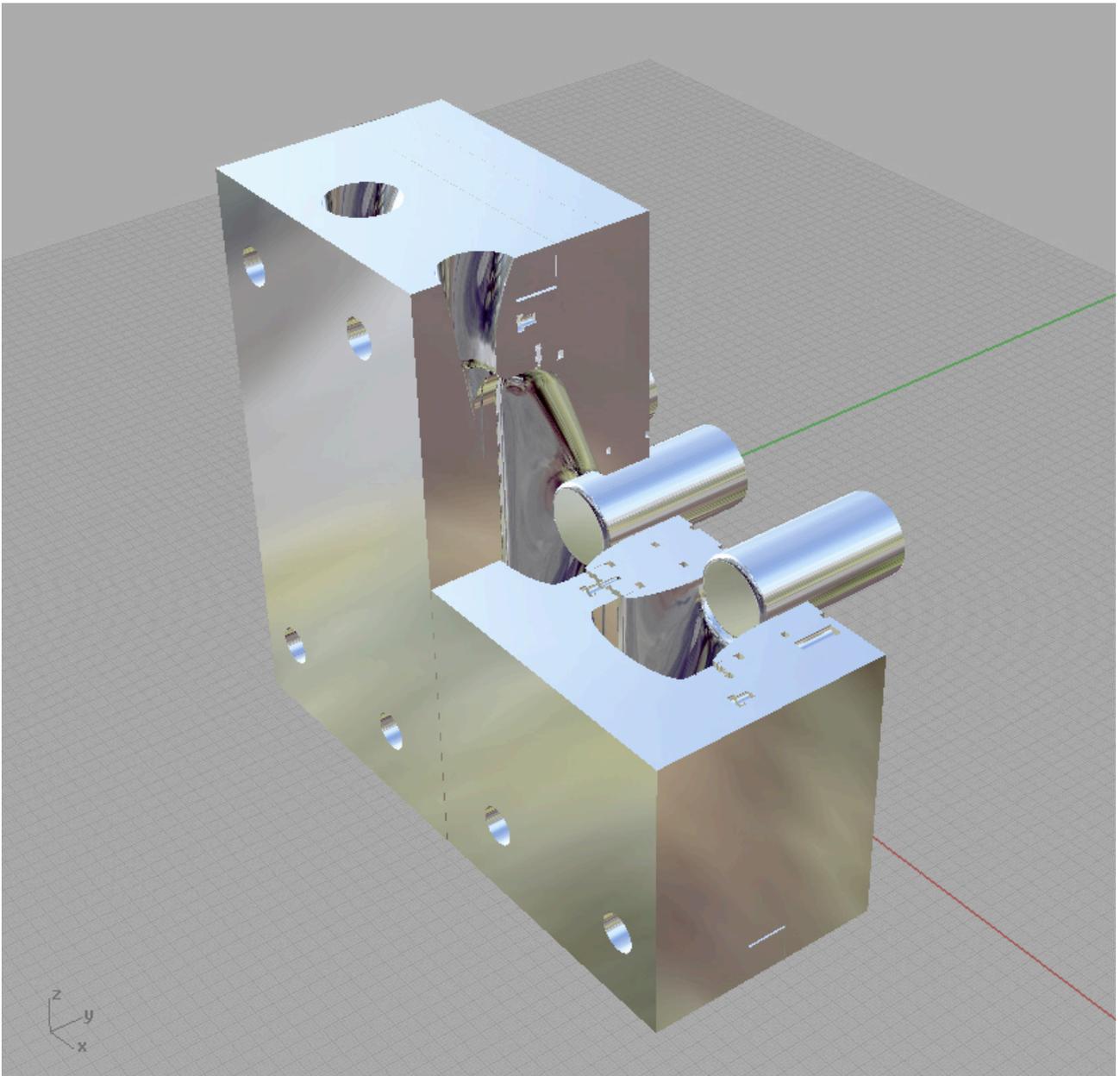
garantire il corretto serraggio e centraggio di un elemento altrimenti intrinsecamente labile, ovvero il diaframma, costituito da un materiale assimilabile alla gomma. Il telaio diaframmi costituito da due semi elementi rigidi, ospita i diaframmi veri e propri, in modo da poter agevolare l'assemblaggio e il corretto posizionamento degli stessi. I diaframmi fungono da interfaccia a tenuta ermetica tra il fluido di lavoro (olio) e il fluido di processo (slurry). Quest'ultimo viene elaborato in un ulteriore modulo, la camera slurry, accoppiata meccanicamente con la camera olio, ma separata fluidodinamicamente da essa per mezzo dei diaframmi. I moduli sopra esposti sono assemblati l'uno all'altro secondo lo schema in figura, corredati di tutti gli elementi di centraggio, serraggio e tenuta. Particolare attenzione è stata inoltre rivolta al disegno delle valvole, altro elemento particolarmente critico nella configurazione precedente. Dopo aver esplorato diverse soluzioni, ci si è orientati verso valvole a stelo, con asta a tenuta e molla esterna a contrasto. Tale configurazione è stata ritenuta la più versatile dal punto di vista dell'adattamento di diversi otturatori e di eventuali soluzioni di tipo attivo. La progettazione è attualmente allo stadio di revisione degli esecutivi, scelta dei materiali definitivi e definizione di contratto d'opera con ditta specializzata in questo tipo di lavorazioni. E' stato utilizzato come ambiente di progettazione meccanica un ambiente 3D (tipo RHINOCEROS) in modo da produrre i progetti esecutivi sotto forma di file parametrici pronti ad essere inviati al centro di lavoro ( per la realizzazione del prototipo).



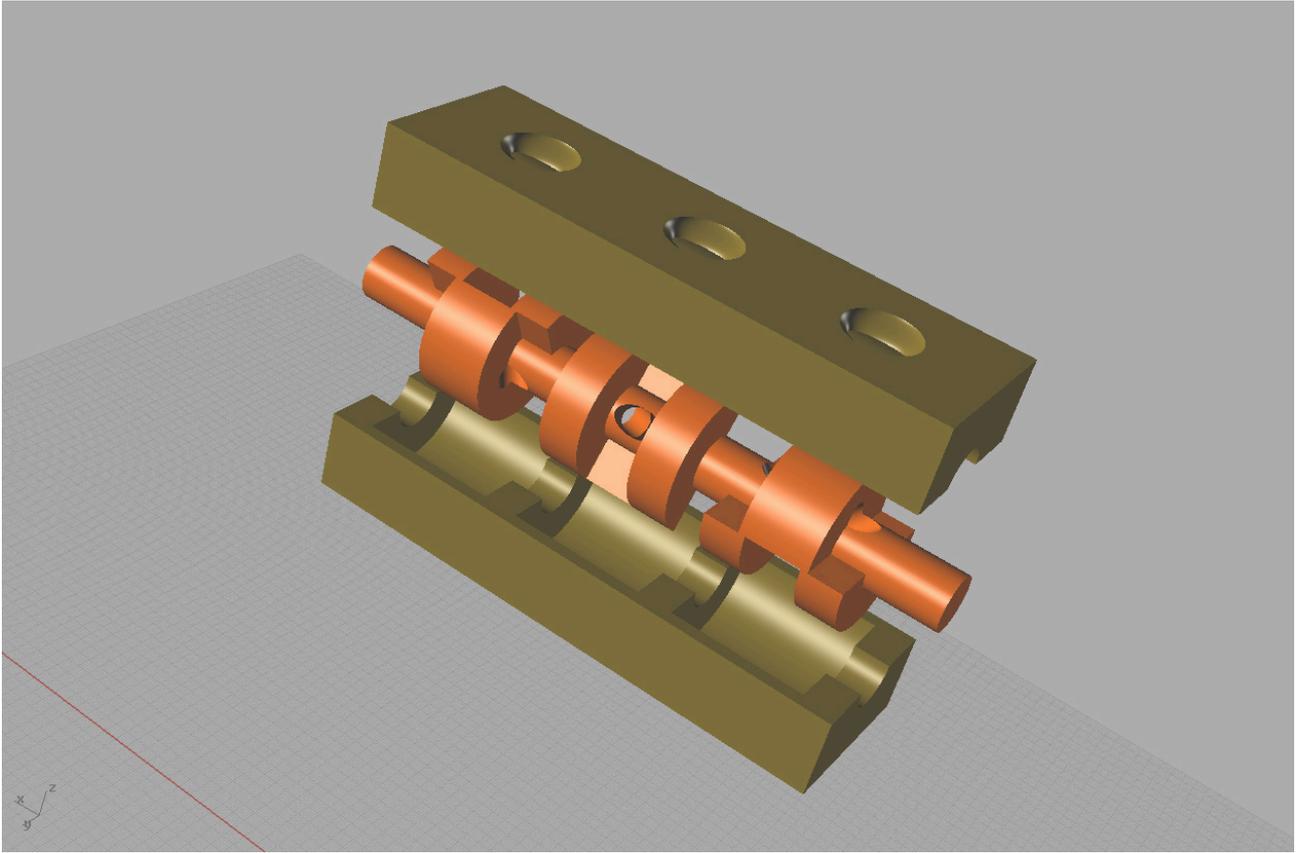
**Figura 10: componenti assemblati**



**Figura 11: Esploso del corpo pompa**



**Figura 12: Rendering del corpo pompa assemblato con pistoni posizionati**



**Figura 13: Esploso valvola ad otturatori rotativi**