



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

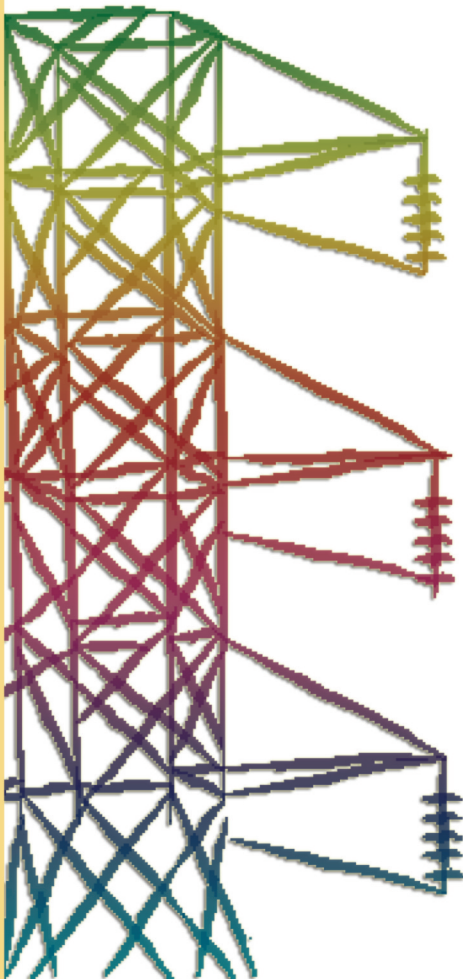


Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di una pompa volumetrica a flusso continuo per slurry

R. Bruschi, C. Stringola, S. Giammartini, M. Arabia





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di una pompa volumetrica a flusso continuo per slurry

R. Bruschi, C. Stringola, S. Giammartini, M. Arabia

SVILUPPO DI UNA POMPA VOLUMETRICA A FLUSSO CONTINUO PER SLURRY

R. Bruschi, C. Stringola, S. Giammartini (ENEA)

M.Arabia (EN.SY.EN. Srl)

Aprile 2009

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 - Sviluppo di un sistema di combustione di tipo "flameless" per impianti di produzione di elettricità con ridottissimi livelli di emissione di inquinanti e CO₂

Responsabile Tema: Stefano Giammartini, ENEA

Introduzione

Le pompe a pistoni sono dispositivi tecnicamente e commercialmente noti, che hanno una loro nicchia di mercato caratterizzato da un ben preciso campo applicativo.

In particolare le pompe “Triplex”, caratterizzate da tre pistoni, consentono di ottenere flussi sufficientemente stabili, unitamente ai pregi tipici dei dispositivi volumetrici a pistoni.

Comparandole a sistemi di pompaggio molto diffusi quali le pompe a girante (centrifughe o assiali) possiamo sinteticamente elencare le principali caratteristiche:

Pompe a girante (centrifughe, assiali):

- flusso continuo
- non volumetriche
- portate elevate
- prevalenza limitata a poco più di 100 Bar.

Pompe a pistoni:

- flusso pulsato (può rappresentare un inconveniente)
- volumetriche
- consentono pressioni elevate (migliaia di Bar)
- portate più basse di quelle a girante (a pari ingombro esterno).

La nuova pompa a pistoni, in corso di sviluppo, è caratterizzata dalla capacità di realizzare un flusso continuo (senza pulsatilità o con pulsatilità estremamente ridotta), eguagliando il principale pregio delle pompe a girante. Oltre a ciò essa presenta indubbi vantaggi quali:

- un comportamento volumetrico che rende precisa la misura di portata;
- la possibilità di raggiungere pressioni molto elevate (molte migliaia di Bar);
- rendimenti volumetrico ed energetico elevati.

Tutte queste caratteristiche, tipiche delle pompe a pistoni, consentono la controllabilità istantanea della portata.

Uno degli elementi critici del sistema ISOTHERM, messo in luce fin qui dalle sperimentazioni condotte, è rappresentato dall'apparato di pompaggio dello slurry per le lance, caratterizzato da pulsatilità elevata, scarsa affidabilità e fonte di problemi per il sistema di raccolta delle ceneri fuse.

Si ritiene pertanto utile perseguire l'obiettivo di sviluppare e testare una pompa volumetrica a pistoni da installare sul ramo di alimentazione del reattore ISOTHERM, al fine di rimuovere le problematiche messe in luce da soluzioni più convenzionali.

L'innovazione proposta: la Nuova Pompa Triplex

La nuova pompa Triplex (costituita da 3 gruppi cilindro-pistone) genera una portata senza pulsatilità sia in entrata sia in uscita. Tale risultato è ottenuto grazie ad un particolare profilo di moto dei pistoni (coperto da brevetto) azionati da un meccanismo desmodromico a camme.

Questa soluzione comporta un evidente miglioramento rispetto al classico meccanismo biella-manovella delle attuali Triplex.

Brevemente consideriamo come nasce la pulsatilità in una pompa volumetrica a pistoni. La Fig. 1 illustra con chiarezza l'effetto sulla portata istantanea del numero di cilindri presenti.

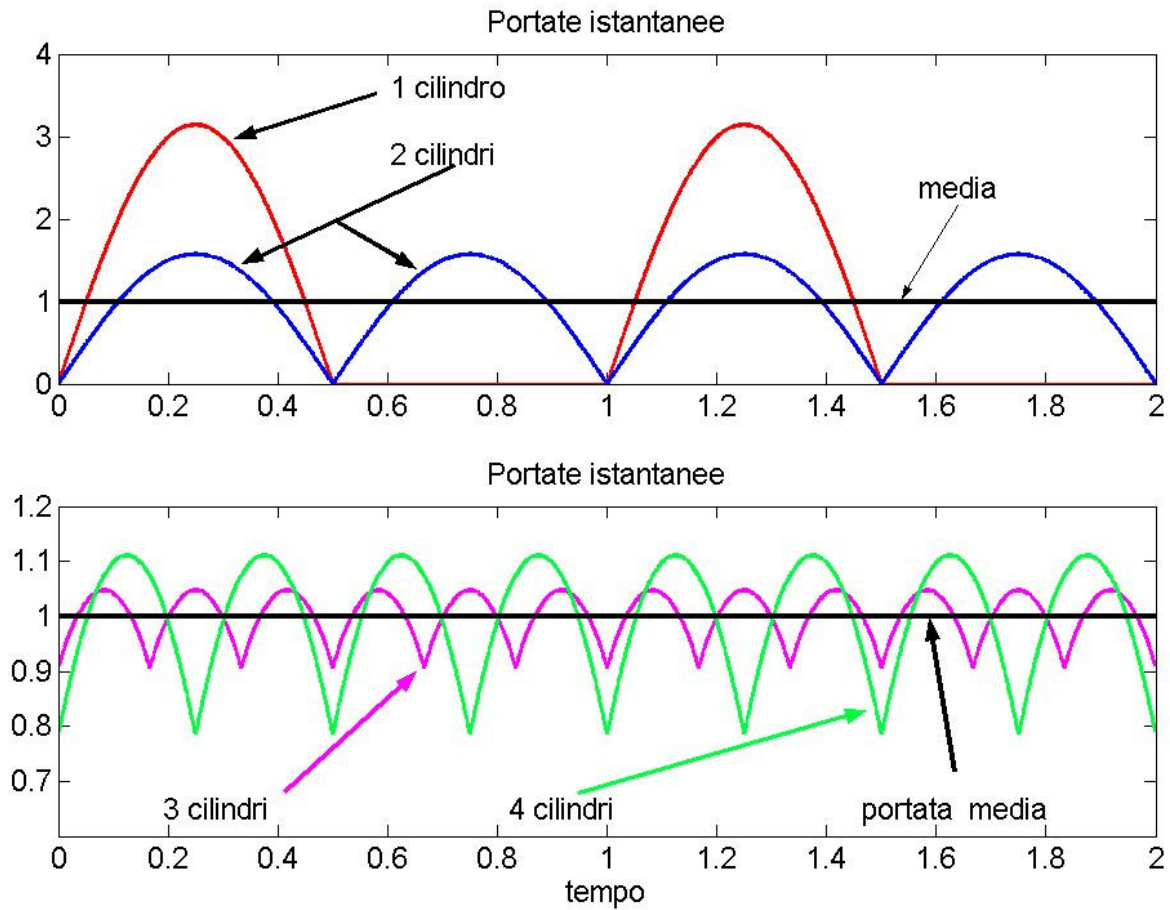


Fig. 1 andamento delle portate istantanee in funzione del numero di cilindri

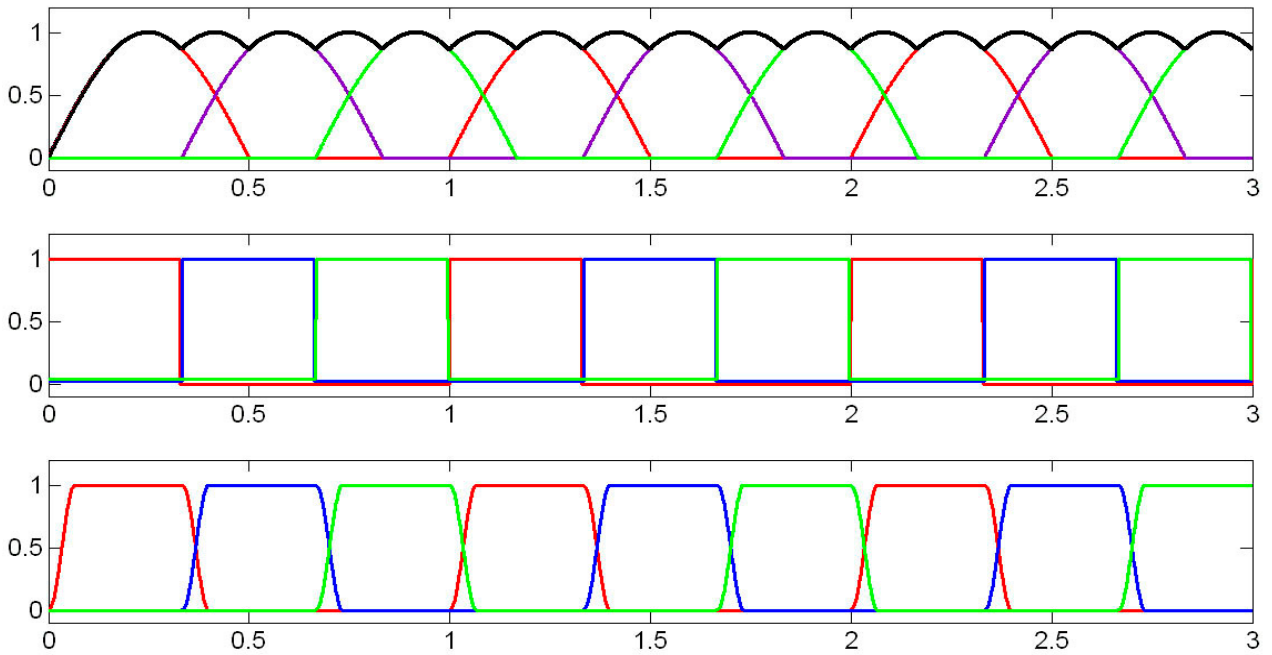


Fig. 2 andamento delle portate istantanee in funzione del numero di cilindri

La Fig. 2 illustra il profilo teorico in eiezione ed in riempimento per una pompa a tre cilindri: il profilo teorico è la somma dei tre contributi (linea rossa + linea blu + linea verde).

Nelle Triplex commerciali il moto generato dal sistema biella-manovella presenta una pulsatilità teorica :

$$\Delta Q / Q_{media} \sim 16\%$$

Nella nuova Triplex, il moto generato da una camma opportunamente profilata determina una pulsatiità teorica pari a circa lo 0 %.

Nella realtà a pulsatilità reale è superiore a quella teorica. Tuttavia la nuova pompa presenta una pulsatilità reale, misurata, pari al 3 %, ed è determinata dalle tolleranze di lavorazione e dal funzionamento delle valvole

Ulteriori cause di pulsatilità sono:

- Complanza della camera di compressione di ogni gruppo cilindro pistone; ed in particolare dal segmento di tenuta tra cilindro e pistone. Infatti durante la fase di compressione tale elemento si deforma accumulando (in piccola quantità) un volume di fluido che pertanto non partecipa alla eiezione.
- Funzionamento delle valvole: chiusura ritardata rispetto all'istante di inversione del moto del pistone; tenuta insufficiente quando la valvola è chiusa.
- Comprimità del fluido pompato. Per fluidi tipo acqua, tale fenomeno diventa non trascurabile quando le pressioni di pompaggio superano i 100 Bar.

In Fig 3 viene mostrata la forma d'onda di pressione nella nuova Triplex. (misura eseguita a 400 giri/min – 30 Bar – 1 m3/h.)

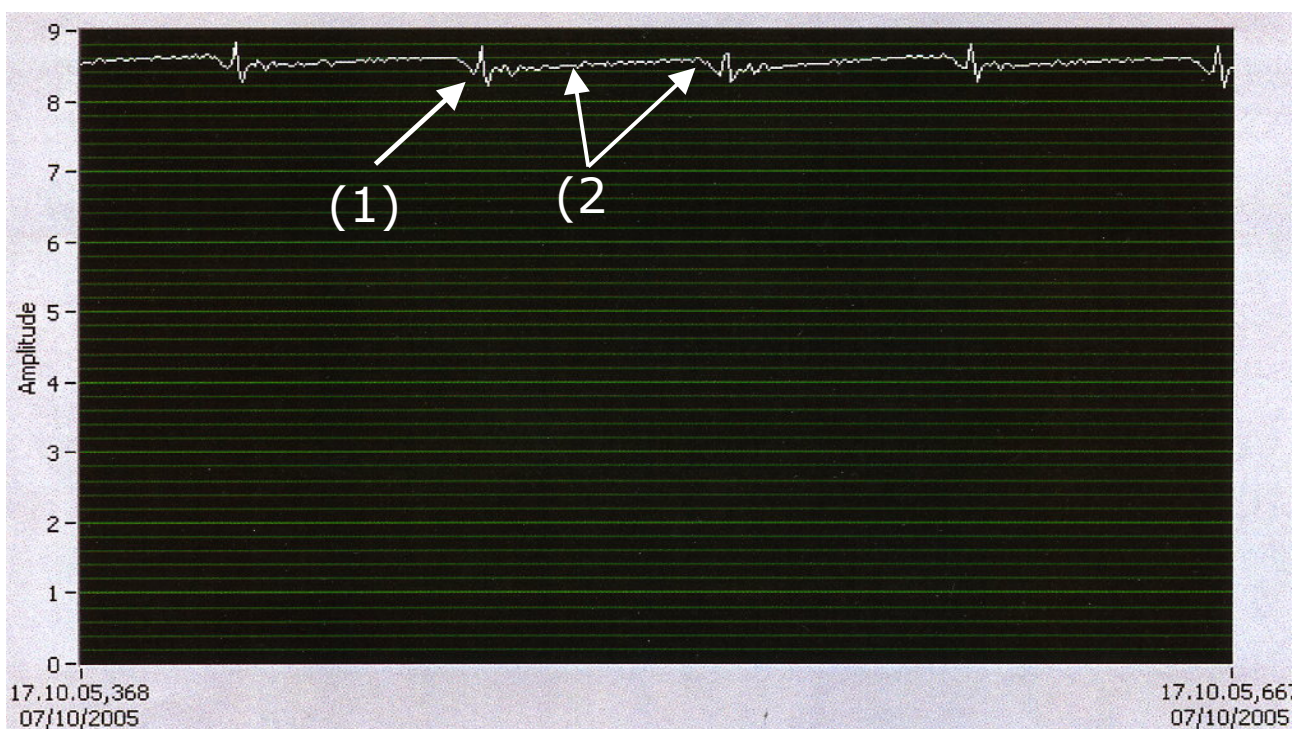


Fig. 3 andamento della forma d'onda di pressione della nuova Triplex

La piccola oscillazione (1) di breve durata visibile in figura è una vibrazione di tipo acustico dovuta alla apertura chiusura delle valvole, mentre quella di maggiore durata (2) è una fluttuazione di portata, dovuta alla compliance della camera di compressione.

Entrambe le oscillazioni possono essere ancora ridotte, curando la qualità delle soluzioni adottate, o annullate utilizzando valvole attive.

La tabella seguente sintetizza il confronto tra caratteristiche di una pompa a girante rispetto alla nuova pompa triplex.

NUOVA TRIPLEX	POMPA A GIRANTE
La portata è determinata dalla velocità dell'albero della pompa e non dipende dalla prevalenza.	La portata è determinata dalla velocità dell'albero della pompa e diminuisce all'aumentare della prevalenza.
Nota la velocità dell'albero della pompa, la portata è nota con una precisione di circa 1-2 %.	La portata può essere conosciuta precisamente solo attraverso una misura da eseguire con un <u>flussimetro</u> .
In presenza di rapida <u>pulsatilità</u> del carico il controllo di velocità della pompa garantisce la costanza della portata	In presenza di rapida <u>pulsatilità</u> del carico il controllo di velocità della pompa non garantisce la costanza della portata
La portata è continua.	La portata è continua.
Pressioni massime raggiungibili elevate (molte centinaia di Bar)	Pressioni massime raggiungibili limitate (circa 100 Bar per le più sofisticate).
ESEMPIO: Rendimento pompa: 0.87 Rendimento motore: 0.92 <u>KWh idraulici</u> : 1000 <u>KWh elettrici</u> : 1250	ESEMPIO: Rendimento pompa: 0.67 Rendimento motore: 0.92 <u>KWh idraulici</u> : 1000 <u>KWh elettrici</u> : 1622

Tabella 1: confronto tra caratteristiche Nuova Triplex v/s Pompa a Girante

La Figura 4 illustra i rispettivi andamenti di portata e prevalenza in funzione di giri/min e portata.

Le figure 4a e 4b mostrano l'andamento della portata in funzione della velocità dell'albero del motore. La figura 4a si riferisce alla nuova pompa Triplex, mentre la figura 4b si riferisce ad una pompa a girante. Dalla figura 4a si vede che la portata è determinata dalla velocità dell'albero della pompa e non dipende dalla prevalenza. Nelle pompe a girante invece (vedi figura 4b), la portata è determinata dalla velocità dell'albero della pompa e dalla prevalenza (in figura i diversi valori di prevalenza sono indicati in modo crescente con H1, H2 e H3).

Le figure 4c e 4d mostrano l'andamento della prevalenza in funzione della portata della pompa. La figura 4c si riferisce alla nuova pompa Triplex, mentre la figura 4d si riferisce ad una pompa a girante. La relazione tra prevalenza e portata è rappresentata a diverse velocità dell'albero del motore (in figura i diversi valori della velocità sono indicati in modo crescente con n1, n2 e n3). Dalla figura 4c si vede che a velocità costante la portata è costante all'aumentare della prevalenza

per la nuova pompa Triplex, mentre nel caso di una pompa a girante (vedi figura 4d) a velocità costante la portata diminuisce sensibilmente all'aumentare della prevalenza.

Ne segue (vedere le figure 4e e 4f) che, al variare per una qualsiasi ragione del carico, ad esempio in presenza di un aumento del carico, nella nuova pompa cresce la prevalenza di lavoro ma la portata non cambia (il punto di lavoro si sposta da "a" a "b"), mentre nella pompa a girante la prevalenza cresce (in misura minore) mentre la portata diminuisce (il punto di lavoro si sposta da "a" a "c"). Occorre quindi aumentare la velocità della pompa a girante per riportare la portata al valore desiderato. E ciò può essere fatto con una regolazione della velocità del motore fino a spostare il punto di lavoro da "c" a "b". Ma tale operazione richiede, come detto, un misuratore di portata, un inverter, un controllore con aggravio di costi di acquisto e esercizio.

Nuova Triplex

Pompe a girante

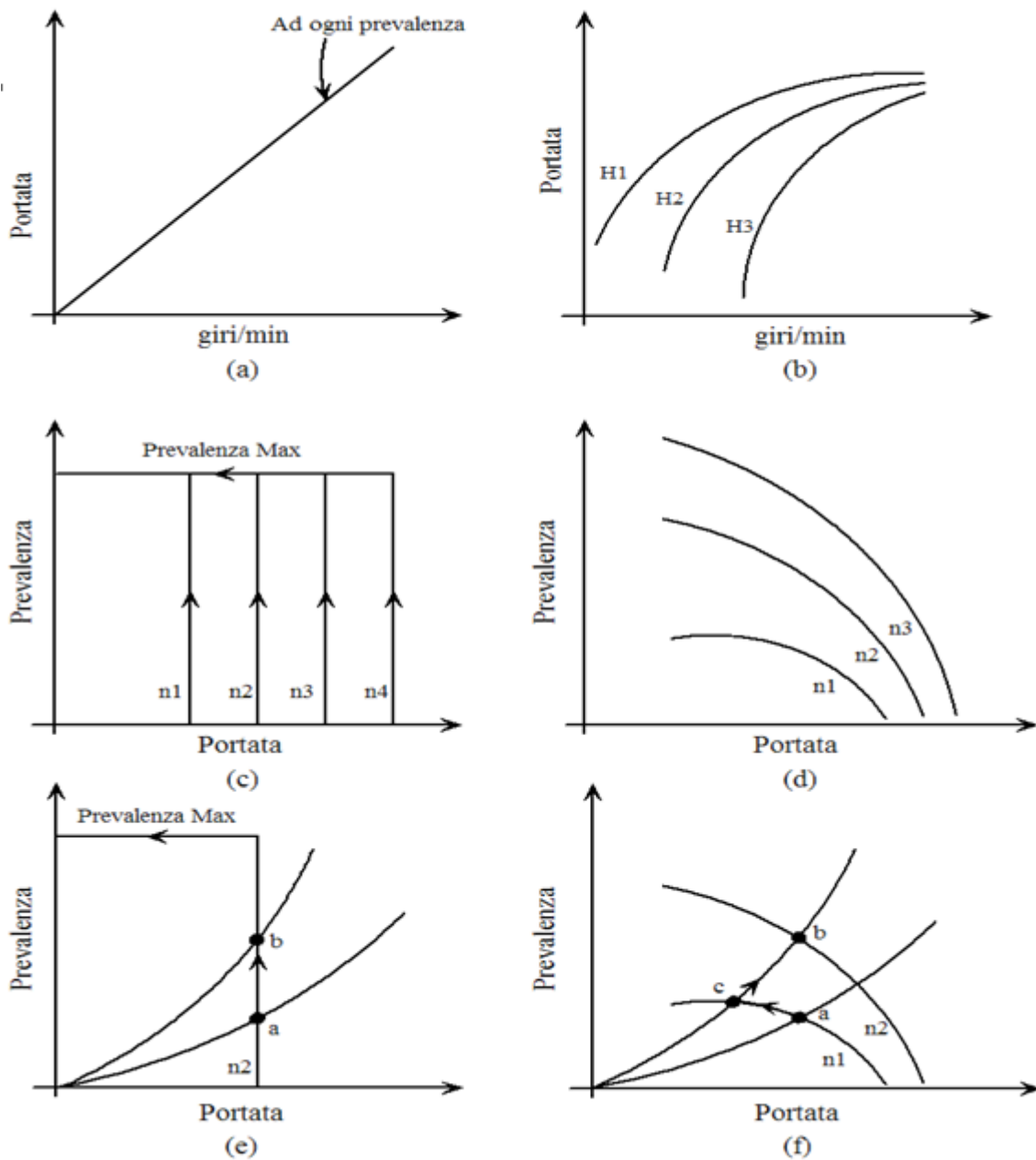


Fig. 4 andamenti di portata e prevalenza al variare dei giri e della portata

La Tabella 2 pone a confronto le principali caratteristiche della nuova triplex rispetto a quelle di una triplex commerciale, mentre Tabella 3 illustra le principali caratteristiche della nuova pompa.

	NUOVA TRIPLEX	TRIPLEX Commerciali
Pressione entrata (Bar)	Da -0.6 a +0.3	Da 0 a +3
Rendimento Energetico (motore escluso)	87% (misurato)	84% (teorico)
<u>Pulsatilità</u> teorica portata	0	16%
<u>Pulsatilità</u> reale portata	3% peak to peak	Non dichiarata
Necessità smorzatori input/output	No	Si
Precompressione del fluido d'ingresso	No	Si
<u>Pulsatilità</u> coppia albero pompa	No	Si

Tabella 2: confronto tra le principali caratteristiche della nuova triplex rispetto a una triplex commerciale

<u>Range di Portate:</u>	da 0.5 a 200 m ³ /h
<u>Range di Pressioni</u>	da 0 a 400 Bar
<u>Pulsatilità</u> della portata picco-picco (valvole passive)	3% della portata media
Rendimento energetico totale	87%
Rendimento volumetrico	98%
<u>Aspirazione</u>	-0.7 Bar
<u>Temperatura del fluido</u>	dipende dall'applicazione
Azionate e controllate tramite <u>inverter</u> possono essere utilizzate come pompe di dosaggio o per processi di iniezione	
Compatibilità con fluidi chimicamente aggressivi	
Utilizzano come carico <u>pressorio</u> la prevalenza => particolarmente adatte a circuiti pressurizzati	
Se corredata di valvole attive la pompa ha un funzionamento reversibile (come nelle pompe peristaltiche)	

Tabella 3: riepilogo delle principali caratteristiche tecniche della nuova Triplex

Test della nuova pompa Triplex con slurry di carbone

In riferimento alla problematica relativa alla alimentazione del processo di ossi-combustione (AdP MSE-ENEA ; Tema di ricerca 5.2.2.2) con slurry di carbone, presso i laboratori di ENEA-Casaccia è stato realizzato un loop di prova per verificare la capacità di una pompa triplex, caratterizzata da pulsatilità prossima a zero, di elaborare un fluido così particolare. La pompa è stata testata usando sia “acqua” che “slurry di carbone” a diversa concentrazione e diversa granulometria. I test sono stati realizzati in modo da evidenziare le problematiche relative al pompaggio dovute sia alle caratteristiche funzionali della pompa che alle proprietà fluidodinamiche dello slurry di carbone.

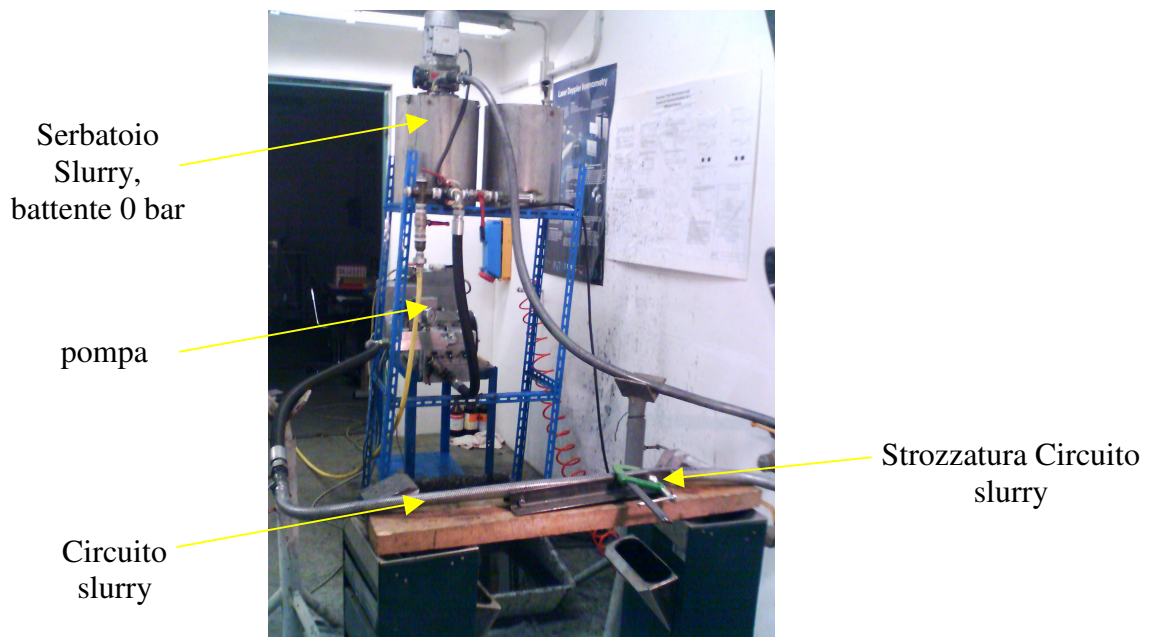


Fig. 5: Loop di prova

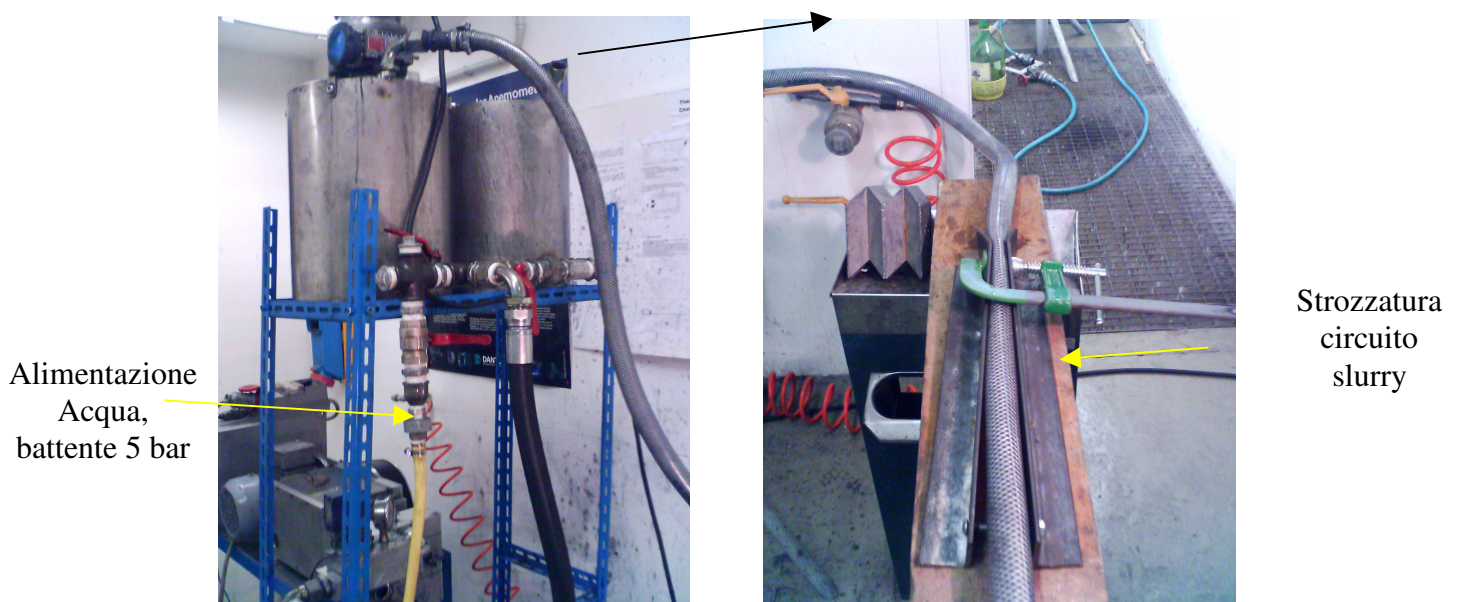


Fig. 6: Particolari: serbatoio slurry, adduzione acqua, valvola di costrizione flusso

Tipologia delle valvole

Sono stati usati otturatori a tazza vincolati con molle a spirale piana. Questa soluzione permette:

- un maggior grado di libertà di movimentazione dell'otturatore
- di evitare l'utilizzo di steli guida bloccabili dallo slurry
- che l'alzata dell'otturatore sia limitata solo dalla estensibilità della molla

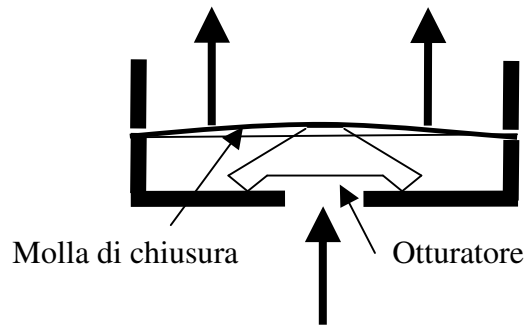


Fig. 7: Valvole con molla piana elicoidale

Considerazioni sull'effetto della pressione di ingresso

Durante la fase di riempimento la pressione (relativa) nella sezione di entrata del tubo può risultare inferiore a quella atmosferica, ma non deve essere inferiore, nella pratica, ai -0.7 bar, pena l'evaporazione della fase liquida dello slurry con ovvia anomalia funzionale.

E' necessario pertanto fornire una opportuna pressione di battente sia per evitare la depressione all'ingresso cilindro che per fornire la spinta necessaria allo slurry per spostarsi dal serbatoio al cilindro.

La pressione di battente tende ad aprire la valvola di ingresso e pertanto permette (obbliga) di usare un maggior precarico delle molle.

Comunque, nel caso in cui la pressione di battente sia tale da aprire le valvole di ingresso, durante il funzionamento questa caratteristica non altera il funzionamento della pompa: infatti nelle tre fasi successive (compressione isocora, eiezione, distensione isocora) le valvole di entrata rimangono chiuse.

Considerazioni sull'effetto della pressione di uscita

La pressione di esercizio sull'uscita ha un ruolo importante nei processi di riflusso:

- se la valvola di uscita è "bloccata aperta" la pressione di uscita provoca un riflusso pari al flusso;
- nella fase di inizio aspirazione questa pressione agisce sulle valvole favorendone la chiusura;

- La forza agente sull'otturatore generata da questa pressione potrebbe essere di gran lunga superiore a quella dovuta alle molle: ha un ruolo decisivo nella distruzione dei granuli che bloccano la valvola.

Sporcamento delle sedi valvole

Lo sporcamento di una sede valvola provoca un difetto di chiusura ed il conseguente riflusso.

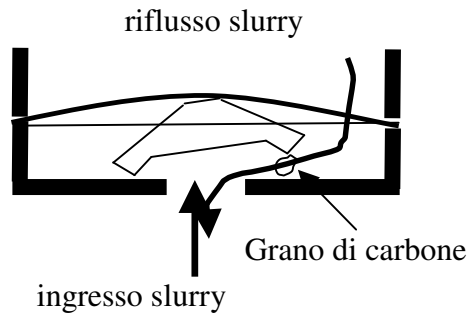


Fig. 8: Adattamento della valvola allo sporcamento

Il processo di sporcamento dovuto a granuli anomali di carbone è tanto più efficace quanto più è bassa la concentrazione di carbone nello slurry. Si è notato che una concentrazione elevata di carbone garantisce maggiore capacità di trasporto e di drenaggio garantendo un'auto pulizia della sede valvola.

Preparazione dello Slurry di carbone



Fig. 9: Confronto granulometrie di carbone

Lo slurry è stato realizzato con vari rapporti tra massa acqua e massa carbone. La polvere di carbone è stata fornita da ITEA con due diverse granulometrie medie: 0.3 mm e 1 mm. La polvere di carbone da 1 mm è comunque poco omogenea (fig. 3). Per la realizzazione dello slurry è stata seguita la procedura fornita da ITEA: la massa di acqua è metà di quella del carbone.

Nel realizzare lo slurry si è perseguita l'esigenza che il fluido da ottenere fosse incompressibile e fluidodinamicamente stabile (ossia con una omogeneità di concentrazione indipendente dallo stato fluidodinamico). Secondo questo concetto si è cercato di individuare il rapporto ottimale tra le masse che garantisse la incompressibilità. Si è ipotizzato che il granulo di carbone fosse sferico e di raggio r , volume è $\frac{4}{3} \pi R^3$, e contenuto in un cubo di lato $2r$, volume $2^3 r^3$. Pertanto si ha che il volume libero è circa la metà del cubo, ossia $4r^3$. Per rendere incompressibile il contenuto nel cubo è necessario che questo non abbia volumi vuoti; e pertanto al carbone è stato aggiunto un pari volume di acqua. La incompressibilità è ottenuta per assenza di volumi liberi; la stabilità fluidodinamica è mantenuta se si rispettano i rapporti indicati, in quanto la concentrazione non cambia con lo stato dinamico del fluido. Se l'acqua fosse in eccesso alla quantità indicata in condizioni statiche, o di bassa velocità, si avrebbe una variazione delle concentrazioni delle fasi (il carbone per gravità decanta).

Test in pressione con acqua



Fig. 10: Test in pressione: 10,15 e 20 bar

Sono state fatte prove con acqua per evidenziare la capacità della pompa di garantire il mantenimento della portata al variare della pressione di uscita (10,15,20 bar) ed una pulsatilità molto bassa.

L'acqua in ingresso (proveniente dall'acquedotto) ha una pressione di battente di 5 bar; i test sono stati effettuati strozzando l'uscita della pompa in modo da provocare le tre pressioni di carico. (il tubo in uscita è da un pollice; la portata, calcolata misurando il tempo di riempimento -80 sec- di un contenitore da 10 litri, è risultata 450 litri/h).

Le stesse prestazioni sono state ottenute a loop chiuso e con pressione di battente in entrata di 0.1 bar. Le condizioni di lavoro sono: velocità albero pompa circa 3giri/sec, frequenza inverter 50 Hz.

[HPIM0174.3gp](#)

Test con slurry di carbone.

Le prove sono state eseguite anche con rapporti inferiori e superiori a quello di riferimento. Le concentrazioni diverse sono state utilizzate per evidenziare la criticità funzionale del sistema di pompaggio.

Utilizzando la granulometria a 0.5 mm si è riscontrato:

- acqua in eccesso, pompaggio slurry critico
- acqua in difetto, pompaggio slurry regolare



Flusso di ritorno slurry

Fig. 11: Ritorno dello slurry nel serbatoio

Utilizzando la granulometria da 2-4 mm, si è riscontrato :

- bloccaggio delle valvole indipendentemente dalla concentrazione dello slurry.

Utilizzando slurry con granulometria da 0.5 mm e rapporto 1kg H₂O con 2kg di carbone, il sistema ha funzionato correttamente per alcune ore (spegnimento regolare effettuato dagli operatori) con pressioni di carico in uscita di circa 8 bar e portata di circa 450 l/h, [HPIM0167.3gp](#) , [HPIM0172.3gp](#)

Pressioni di esercizio stabili e superiori ai 10 bar sono state evitate, a causa della criticità del tipo di tubo in uscita pompa e della inaffidabilità (criticità) funzionale del meccanismo di strozzamento del tubo (le pressioni sono state ottenute solo per tempi molto ridotti, pochi secondi).

Problematiche associate alle diverse concentrazioni di carbone

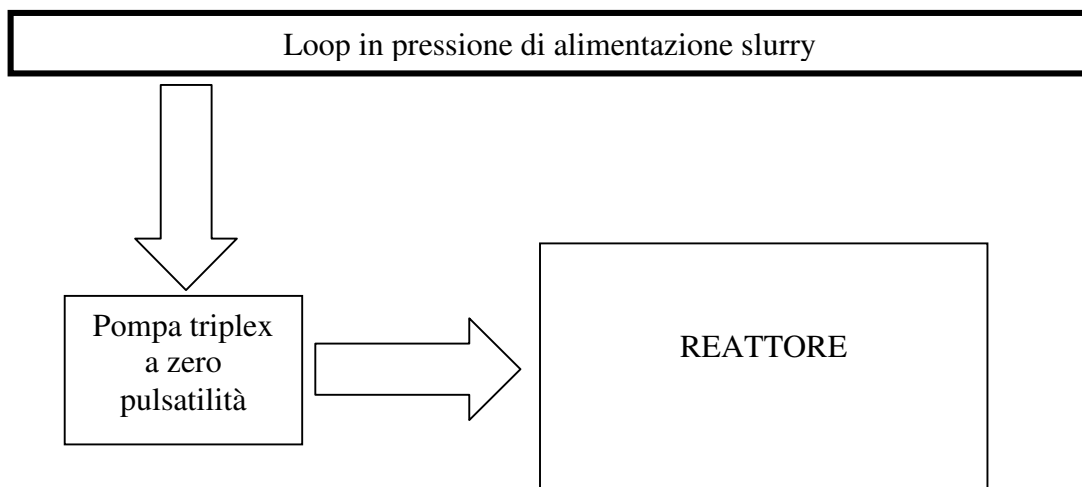
I test con lo slurry hanno permesso di osservare che:

1. la velocità di separazione della fase solida da quella liquida è elevata, pertanto se si lavora con una concentrazione bassa di carbone facilmente si perde la omogeneità del fluido,

2. con concentrazioni basse di carbone, si sono avute criticità locali nei punti del condotto dove si realizzavano strozzature: la fase liquida tende ad estrudere amplificando l'effetto della strozzatura, blocchi locali della fase solida.
3. allo start-up, il passaggio dalla fase solo liquida allo slurry deve essere immediato, le fasi transitorie possono mostrare percentuali di concentrazione difficilmente gestibili.

Ipotesi di un loop di alimentazione slurry

Poichè il sistema di pompaggio, data la bassa pulsatilità, non necessita dello smorzatore, si potrebbe assemblare la pompa il più vicino possibile al reattore (lancia di alimentazione). Questa soluzione ridurrebbe la lunghezza del condotto pompa-lancia con ritorni positivi sia sulla criticità della fluidodinamica dello slurry che sulla cedevolezza dei condotti di uscita (riduzione dei reflussi e quindi della pulsatilità).



Conclusioni ed azioni future

I risultati fin qui raggiunti, che riteniamo incoraggianti, suggeriscono una rapida conclusione della fase di indagine e fattibilità. Sarà oggetto delle prossime prove:

- l'irrobustimento della linea di scarico per consentire un funzionamento stabile e sicuro oltre i 10 bar, permettendo di testare il sistema fino a 20 bar;
- la strumentazione del loop per l'acquisizione dati.