



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E
DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE

TITOLO:

ITEG: CARATTERISTICHE MECCANICHE E DI FUNZIONAMENTO E
POSSIBILE UTILIZZO NELL'INDUSTRIA ALIMENTARE

Relazione discussa in sede di esame finale da: Nicolò Pelizza

Relatore: Prof. Stefano Farnè

Correlatore: Dott. Vito Lavanga

INDICE:

1. Introduzione	pag. 3
2. Caratteristiche meccaniche	pag. 5
2.1 Rotore	pag. 5
2.2 Statore	pag. 6
2.3 Testate	pag. 7
2.4 Assieme	pag. 8
2.5 Accorgimenti tecnici sui magneti	pag. 9
3. Modello matematico	pag. 12
3.1 Volume	pag. 12
3.2 Portata	pag. 16
3.3 Potenza	pag. 17
3.4 Rendimenti	pag. 19
3.5 Triangoli delle velocità	pag. 20
4. Analogia con la vite di Archimede	pag. 24
5. Funzionamento magnetico	pag. 26
6. Stampa 3D	pag. 29
7. Pompe nell'industria alimentare	pag. 31
7.1 Processi dell'industria alimentare	pag. 31
7.2 Confronto numerico	pag. 34
7.3 Pompe in commercio e confronto con ITEG	pag. 35
8. Conclusioni	pag. 48

Capitolo 1 - Introduzione

ITEG (integrated turbine electric generator) è un dispositivo in via di sviluppo, ideato e già brevettato dal Professor Stefano Farnè e dal Dottor Vito Lavanga. Essendo una macchina reversibile, possiede la caratteristica di saper conferire energia ad un fluido oppure di accumulare energia da un fluido, cioè svolgere rispettivamente le funzioni di pompa e turbina, a seconda di come lo si vuole utilizzare. Non è specifico per un'applicazione ma può essere utilizzato nella maggior parte dei processi che necessitano di una pompa o di una turbina, sia perché è economico e poco invasivo, sia per la facilità di installazione e la scarsa manutenzione che richiede essendo privo di ingranaggi, ma soprattutto, per la sua adattabilità di progetto.

Una vantaggiosa differenza dalle altre macchine di questa categoria che salta subito all'occhio osservando i dettagli costruttivi di ITEG è la sezione del rotore, che garantisce una massima superficie di intercettazione del fluido, dato che riempie interamente la superficie interna del condotto in cui è alloggiato senza presentare elementi strutturali che ne devierebbero il flusso che vi scorre, portando inoltre ad un'omogeneità di intercettazione. Invece di utilizzare delle pale come le più classiche pompe e turbine, l'energia viene data o ceduta al fluido mediante il contatto con le pareti dei condotti, che si avvolgono in modo elicoidale attorno all'asse di rotazione del rotore, e generano quindi il rotore stesso.

La miglior soluzione per l'equilibrio del rotore è tramite cuscinetti magnetici con magneti permanenti, in modo tale da evitare l'attrito, che genererebbe usura, ma anche surriscaldamento del fluido, che in alcune applicazioni può risultare dannoso.

La sua realizzazione avviene con il facile assemblaggio di pezzi ottenuti mediante stampante 3D, magneti al neodimio, bulloni e colla. Saranno poi necessari dei giunti a bicchiere per poter collegare le testate con la tubazione. Le parti meccaniche stampate in 3D che compongono ITEG sono: rotore, statore, testate.

Lo scopo della tesi è verificare le caratteristiche progettuali di ITEG, vedere in quali processi dell'industria alimentare può essere utilizzato, e

compararlo alle pompe tutt'oggi in utilizzo in tali processi. Inizialmente, verranno descritte le caratteristiche meccaniche di ITEG, poi verrà dedotto un modello matematico per ITEG, in modo tale da poter progettare il dispositivo in base alle caratteristiche energetiche e dimensionali di cui si necessita. Siccome la realizzazione di ITEG avviene mediante il processo industriale di stampa 3D, verrà brevemente spiegato questo processo, e verrà scelto il materiale con cui verrà realizzato il dispositivo in base al fluido che dovrà elaborare una volta messo in utilizzo. Verranno elencati alcuni processi dell'industria alimentare nei quali l'utilizzo di pompe è fondamentale, e vedremo in quali ITEG può essere sostituito ad una pompa classica. Verrà anche fatto un confronto tra le tipologie di pompe alimentari in commercio tutt'oggi e ITEG per elencare i suoi possibili vantaggi e il suo potenziale rispetto ad esse.

Capitolo 2 – Caratteristiche meccaniche

Rotore

Il rotore è il componente cilindrico rotante della macchina, il cui scopo è quello di intercettare il fluido che lambisce la sua stessa superficie, per poter effettuare uno scambio energetico con esso.

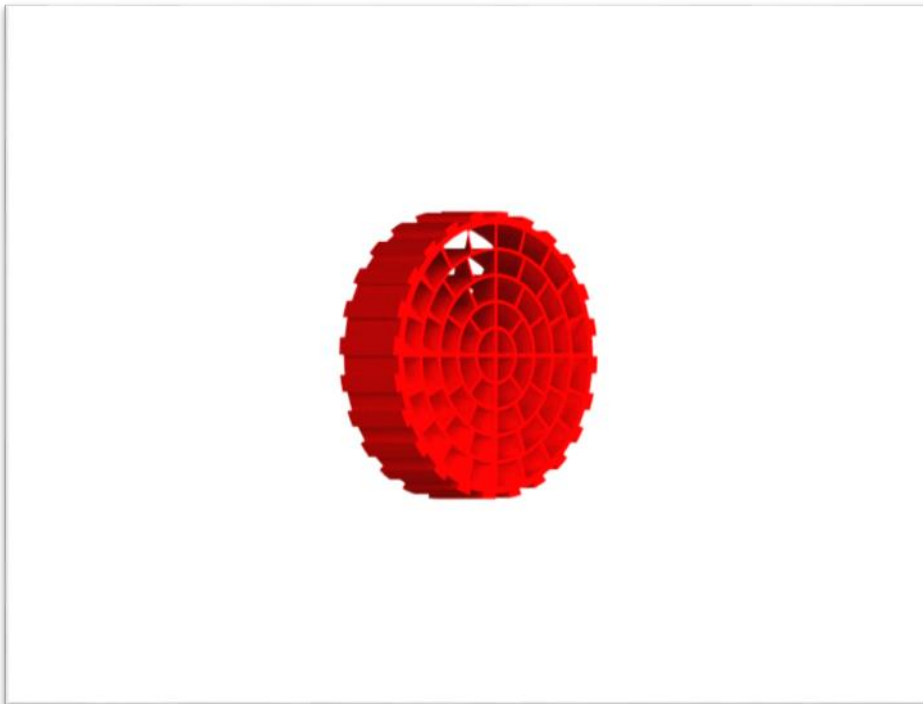


Figura 1

La superficie occupata dalle bocche d'ingresso dei condotti si estenderà radialmente sulla superficie del rotore fino a coincidere con quella della tubazione in cui verrà installato, per fare in modo che tutto il fluido venga intercettato ed elaborato. Sulla superficie esterna cilindrica saranno presenti degli incavi a coda di rondine dove sarà possibile posizionare e incollare i magneti permanenti precedentemente polarizzati, che hanno una duplice funzione, quella di generare il campo magnetico permanente per la levitazione del rotore, e quella di agire come magnete intermedio dei cuscinetti magnetici.

Il rotore non presenta organi di fissaggio, ma essendo immerso in un campo magnetico galleggia in aria. Sarà però racchiuso, a meno di un

minimo gioco tra le parti, tra lo statore e le due testate, in modo da evitare possibili traslazioni che lo porterebbero fuori asse e quindi fuori dal campo magnetico. Ovviamente, il campo magnetico è sufficiente per non generare attrito contro lo statore, invece, per non generare attrito contro le testate, saranno presenti due magneti toroidali, uno per testata, posizionati in modo da essere sovrapposti ai magneti permanenti sul rotore, polarizzati con lo stesso verso, per possedere la capacità di respingerli e tenere a distanza il rotore dalle testate.

Il rotore è forato da tanti piccoli condotti elicoidali. La sezione d'entrata dei condotti può essere progettata con qualsiasi forma in base al fluido da elaborare, tenendo i tramezzi tra un condotto e l'altro dimensionalmente più irrilevanti possibili. La loro lunghezza, diversa in base alla distanza radiale a cui ci troviamo, sarà invece stabilita in base alla potenza che vogliamo dare o ricevere dal fluido, ponendo però attenzione alla sua viscosità, che, se troppo elevata, porterebbe all'ostruzione dei condotti se progettati troppo lunghi o sottili. Sottigliezza che però è fondamentale per evitare turbolenze in uscita, quindi si progetteranno condotti quanto più sottili possibili nel limite della viscosità del fluido che si andrà ad elaborare. Inoltre, lo spessore dei tramezzi tra un condotto e l'altro sarà il più sottile possibile per ottimizzare l'intercettazione.

Statore

Lo statore è la parte fissa della macchina. Formato da un cilindro cavo, con delle propagazioni radiali che serviranno come supporti per inserire gli avvolgimenti, e per fissarlo alle due testate mediante bulloni.

Esso è progettato dimensionalmente in modo da contenere perfettamente il rotore a meno di una piccolissima tolleranza di misura per potergli garantire la rotazione. Progettualmente, il suo diametro interno è leggermente più ampio del diametro esterno del rotore, come la sua profondità, leggermente più ampia di quella del rotore, per ridurre al minimo le perdite di fluido che si incanala nei margini esterni del rotore, dato che lo racchiude.

Tra le propagazioni radiali verranno inseriti i lamierini ferromagnetici, mentre su parte di esse verrà ancorato il filo conduttore che si allungherà poi sui lamierini, in modo tale che quando circolerà corrente nel filo, il campo magnetico generato dall'elettromagnete sarà potenziato per la presenza dei lamierini a contatto con il filo.

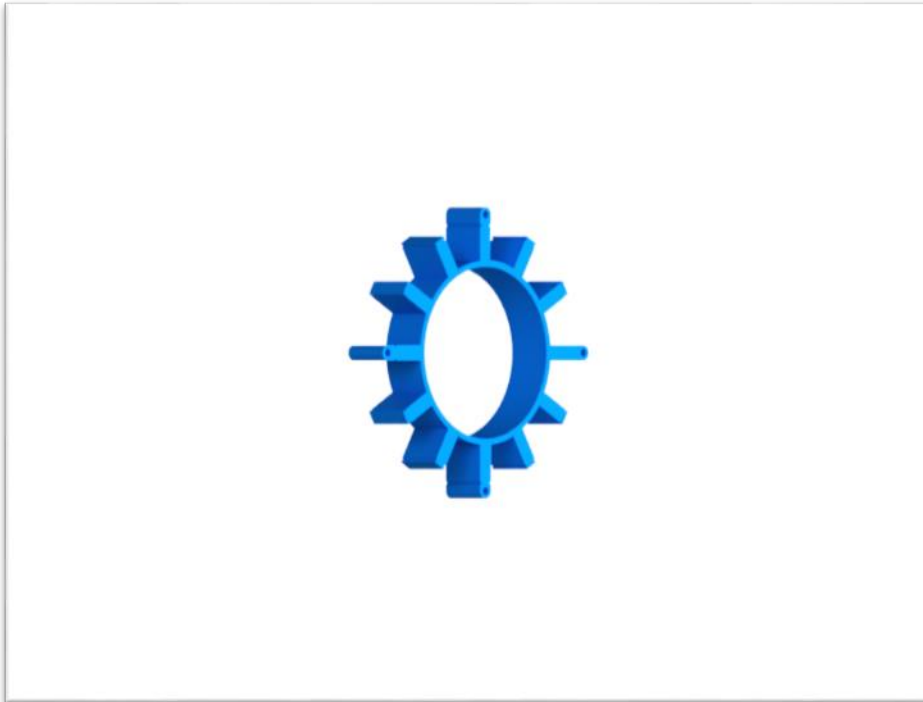


Figura 2

Siccome lo statore rappresenta il circuito indotto, o induttore, a seconda del verso della corrente, è bene che sia isolato dal fluido, che nella maggior parte dei casi è un conduttore. Per isolarlo è possibile utilizzare del materiale plastico di opportuno spessore, in modo tale che il fluido, non potendo attraversare questo materiale, non entri in contatto con lo statore. Se invece, come più ovvio, è progettato in materiale plastico, non ci saranno problemi.

Testate

Servono a racchiudere il rotore e a mantenerlo in posizione tramite dei magneti toroidali posizionati e incollati in cavità circolari su di esse, magneti che rappresentano i magneti esterni del cuscinetto, e sono

posti ad una distanza dal centro tale da essere sovrapposti polarmente ai magneti del rotore, e poterli respingere, data l'ugual polarizzazione.

Più esternamente presentano dei fori, i quali saranno allineati a quelli dello statore, per poi bloccare il tutto tramite bulloni. Inoltre, esse si allungano in quello che è l'innesto da inserire nel tubo tramite un giunto a bicchiere.

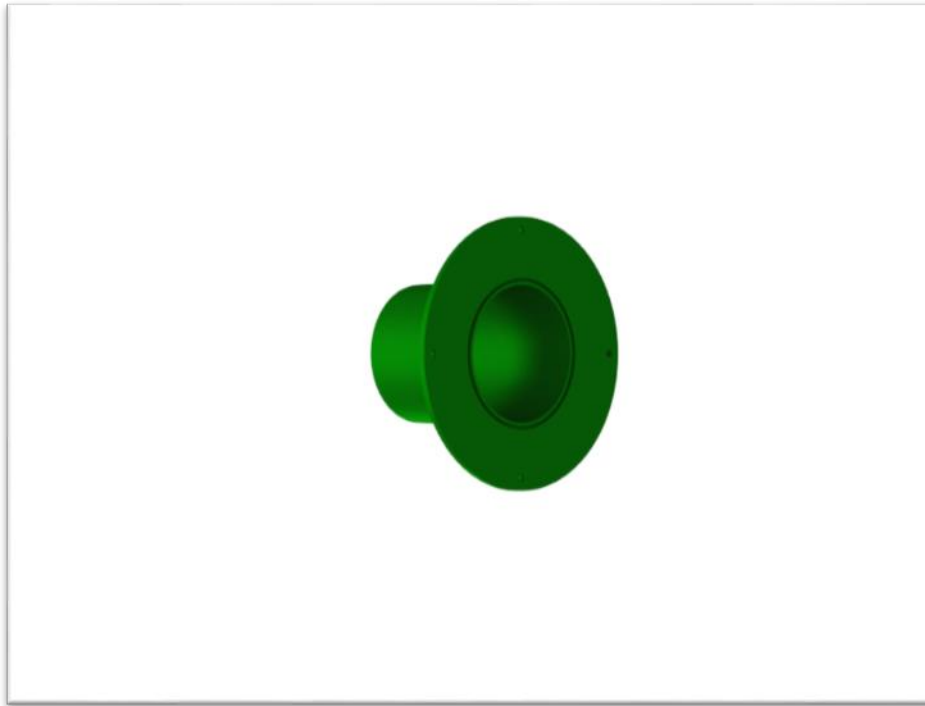


Figura 3

Devono essere realizzate in materiale isolante, per evitare che lo statore, essendo a contatto con esse, possa disperdere corrente se non perfettamente isolato. Oltretutto, l'interazione tra il campo magnetico rotante e le testate, genererebbe correnti parassite dovute al movimento relativo dei magneti rispetto alle testate, se quest'ultime fossero conduttrici, con la conseguente dispersione di energia.

Assieme

Protagonista è il rotore, pronto a svolgere il suo compito di scambio energetico con il fluido. Esso è racchiuso radialmente dallo statore, fissato a sua volta alle testate, che racchiudono assialmente il rotore

una volta che tutte le semplici componenti meccaniche sono assemblate. In figura 4 si vede il tutto, in assenza di magneti e bulloni.

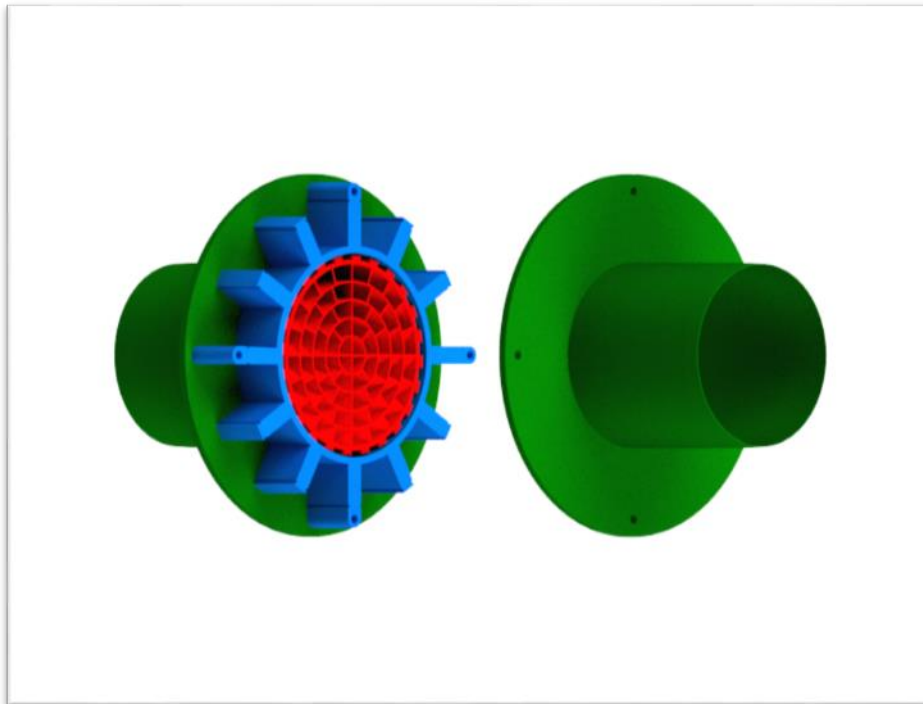


Figura 4

Accorgimenti tecnici sui magneti

I magneti utilizzati possono essere al neodimio, per le elevate caratteristiche magnetiche di questa lega.

Essi vengono incastrati sulla superficie radiale più esterna del rotore, che possiede un profilo a coda di rondine, come mostrato in figura 5, per evitare che durante la rotazione, a causa della forza centrifuga, abbandonino la loro sede. Questo tipo di incastro garantisce un buon ancoraggio alla superficie del rotore ed evita l'utilizzo di organi meccanici di fissaggio che possono rappresentare un punto debole per l'integrità e per l'efficienza della macchina. Con questa tecnica l'unico accorgimento a cui bisogna porre particolare attenzione è l'esagerata variazione di temperatura nel processo, perché per via dei differenti coefficienti di dilatazione termica dei materiali, può aumentare pericolosamente il gioco nel sistema di fissaggio se la temperatura si abbassa bruscamente; al contrario, se la temperatura aumenta troppo si

avrà un'elevata dilatazione termica che potrà provocare crepe nel rotore, con la sua conseguente rottura. Inoltre, per una maggior sicurezza si può completare il fissaggio con della colla, per impedire ai magneti di sfilarsi dal suo alloggiamento. L'utilizzo di questa, oltre ad assicurare il fissaggio dei magneti, attutisce gli urti, ottima caratteristica data la non ottimale resilienza dei magneti al neodimio.

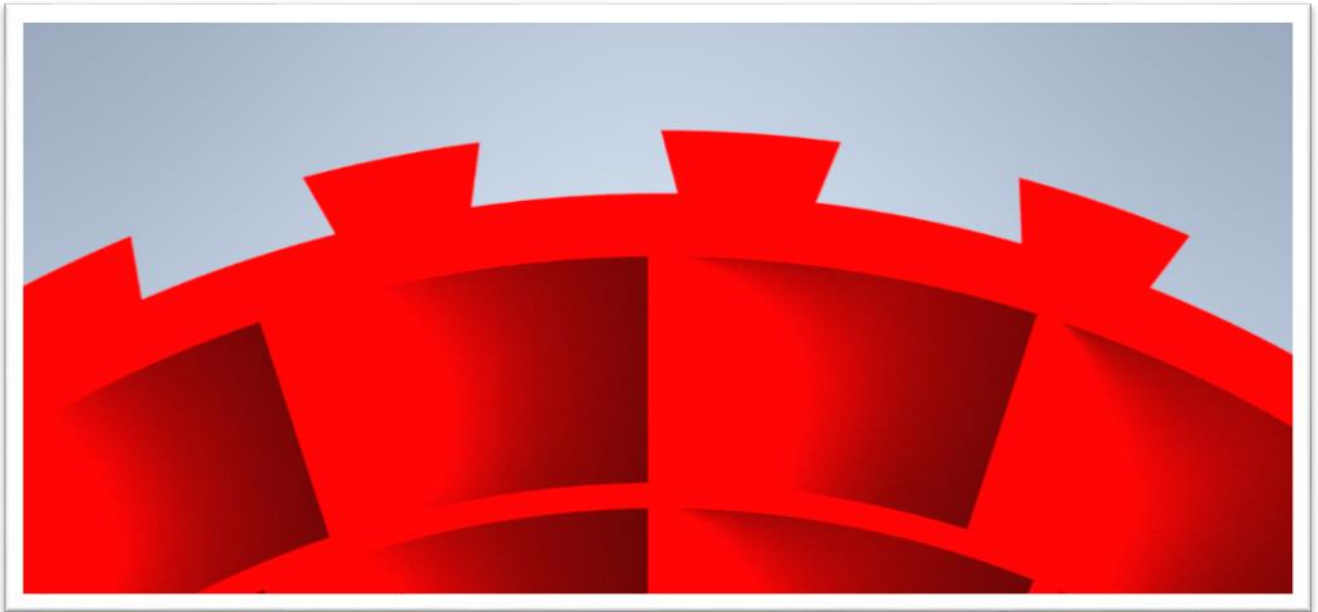


Figura 5

Altri magneti, sempre al neodimio, saranno alloggiati e incollati in apposite cavità nelle testate (figura 6). Siccome servono come reggispira, si è pensato a magneti toroidali, in modo da poter reggere la spinta in modo equilibrato. Essi inoltre, essendo allineati su entrambe le testate e avendo stesso verso di polarizzazione, si manterranno in posizione.



Figura 6

Di seguito alcune caratteristiche dei magneti al neodimio, rese note sul sito calamite.org.

Essi sono costituiti da una lega di boro, ferro e neodimio. Questa lega è fortemente magnetica, il suo colore naturale è argenteo, e l'unico difetto che possiede è quello di avere una resilienza piuttosto bassa. Esistono magneti al neodimio di diversi gradi: il grado è un codice che inizia sempre con la lettera N ed è seguito da due cifre (per esempio N30, N33, N35, N38, N40, N42, N45, N48, N50). Esso sta ad indicare il prodotto d'energia. I gradi più bassi hanno meno forza attrattiva e repulsiva, i gradi più alti hanno forze maggiori. In commercio esistono magneti con gradi compresi tra N24 e N55, tuttavia i gradi superiori a N52 non sono facilmente reperibili. In laboratorio si è arrivati alla creazione di magneti di grado massimo N56, anche se N64 è il limite teorico.

Per far capire il perché vengono scelti magneti al neodimio, basti pensare che la loro forza attrattiva può essere 20 volte superiore a quella posseduta dai più classici magneti in ferrite, pur non avendo una differenza di prezzo così accentuata.

Capitolo 3 - Modello matematico

Per poter usufruire e sfruttare al massimo le potenzialità di questo dispositivo, ho elaborato delle equazioni generali per rotor costruttivamente simili tra loro. La loro peculiarità sta nel fatto di avere la sezione dei condotti con ugual forma a quella da me progettata. Se consideriamo la sezione di entrata del fluido nel rotore, essa deve essere suddivisa in corone circolari, suddivise radialmente a loro volta da propagazioni radiali. Ovviamente, le dimensioni di queste geometrie possono essere varie. L'obiettivo che mi sono posto è quello di conoscere l'equazione della portata, passo intermedio tra le equazioni per il calcolo delle potenze e le caratteristiche costruttive del rotore. Si parte con l'equazione del volume di fluido elaborato dal rotore.

Volume

Il primo step per arrivare all'equazione della portata è quello di trovare il volume in m^3 occupato dal fluido all'interno del rotore.

Guardando frontalmente il rotore e considerando la sezione di ingresso del fluido, che sarà pari a quella della tubazione, è necessario sottrarre da questa sezione l'area occupata dalle pareti che separano i condotti. Questa può risultare praticamente nulla se lo spessore delle pareti che separano i condotti è progettato nell'ordine delle decine di micron, dimensione realizzabile tranquillamente con la maggior parte delle stampanti 3D professionali.

Partendo dall'equazione generale del volume, sono poi andato a specificare nel dettaglio i termini nel mio caso costruttivo. La formula di base è:

$$V = S * L$$

Dove S rappresenta la sezione disponibile per il passaggio del fluido all'interno del rotore. L, invece, rappresenta la lunghezza del rotore, intesa come profondità.

Arrivati fin qui bisogna fare però un appunto: i condotti sono elicoidali, e quindi la loro lunghezza sarà sempre e comunque maggiore della lunghezza del rotore, però, se immaginassimo il rotore sezionato infinite volte perpendicolarmente al suo asse di rotazione, vedremmo che in ogni sezione l'area disponibile per il passaggio del fluido (S) sarà sempre la medesima della sezione di ingresso, essendo i condotti a sezione costante; quindi per trovare il volume occupato dal fluido nel rotore immaginiamo di sommare tutte queste infinite sezioni, che di seguito una all'altra saranno lunghe quanto la profondità del rotore. Le seguenti figure chiariranno questo ragionamento.

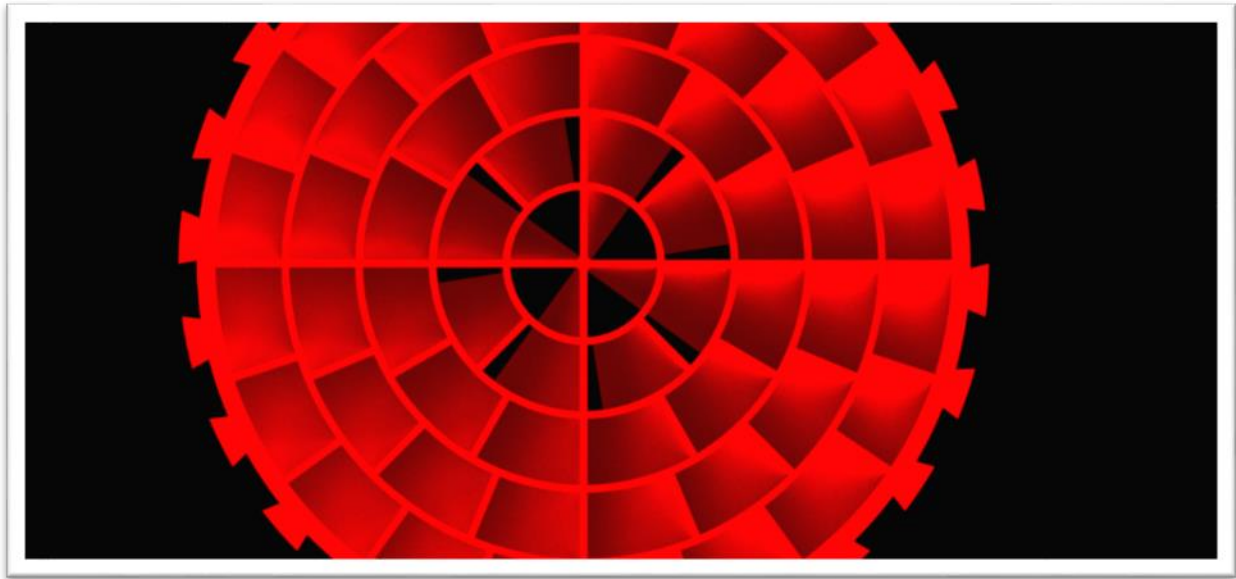


Figura 7

La figura 7 rappresenta la sezione di ingresso che ha a disposizione il fluido. Considerando la sezione della tubazione, pari alla sezione della circonferenza che contiene tutti i condotti, l'area disponibile per il passaggio di fluido è 90% del totale nel rotore in figura, e, per sottrazione, l'area occupata dai tramezzi tra un condotto e l'altro è 10% del totale.

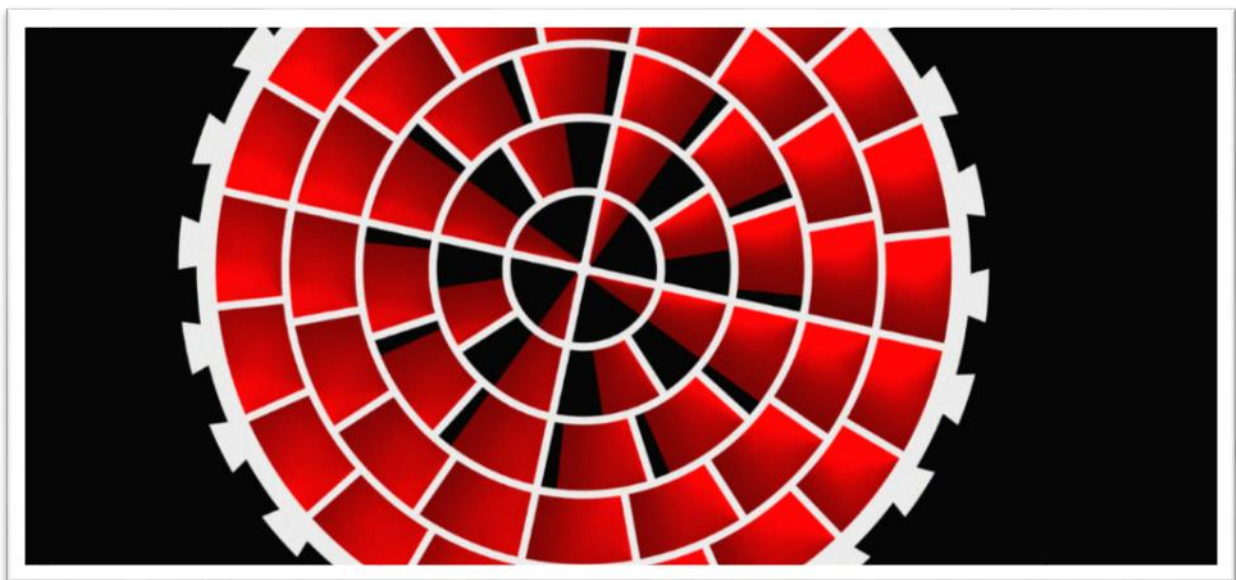


Figura 8

La figura 8 invece rappresenta la sezione del rotore presa a 10 mm di profondità. Quello che è importante notare, è che l'area occupata dai tramezzi dei condotti è la medesima che nella sezione di ingresso, e vale 10% dell'area della tubazione.

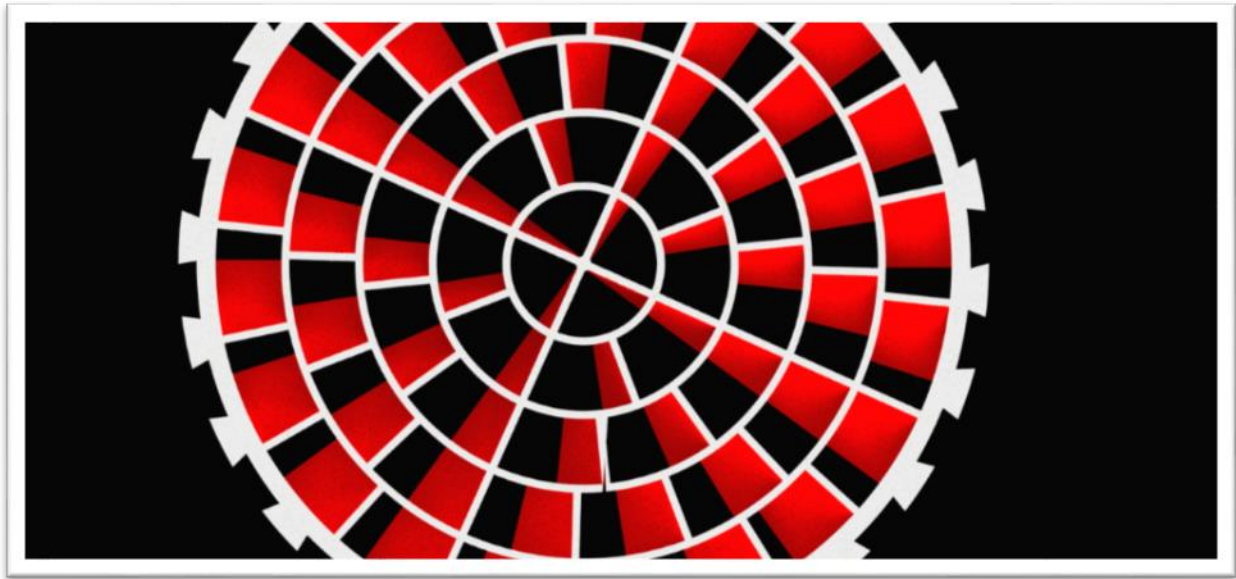


Figura 9

La figura 9, infine, rappresenta la sezione del rotore presa a 20 mm di profondità. Anche qui, l'area occupata dai tramezzi dei condotti vale 10% dell'area della tubazione. Quindi possiamo concludere che la sezione disponibile dal fluido all'ingresso del rotore va moltiplicata per la profondità del rotore.

Se ancora non si è convinti di questo concetto, ho elaborato un'ulteriore spiegazione a cui porre attenzione. Guardando la figura 10, in cui in primo piano abbiamo il volume interno del rotore disponibile al passaggio del fluido nel caso in cui i condotti non fossero elicoidali, e quindi il loro volume sarà semplicemente calcolato come area moltiplicata per la lunghezza del rotore; mentre in secondo piano vediamo il volume interno del rotore disponibile al passaggio del fluido nel caso in cui i condotti fossero elicoidali; possiamo notare come il volume occupato sembri uguale. Infatti, se con Inventor calcoliamo il volume dei solidi, andando sulle proprietà fisiche del modello, noteremo che è esattamente lo stesso, e nel rotore progettato da me è pari a 200093 mm^3 , che equivalgo a circa 0.2 l, cioè 0.0002 m^3 . Quindi, vale l'equazione per il volume sopra citata.

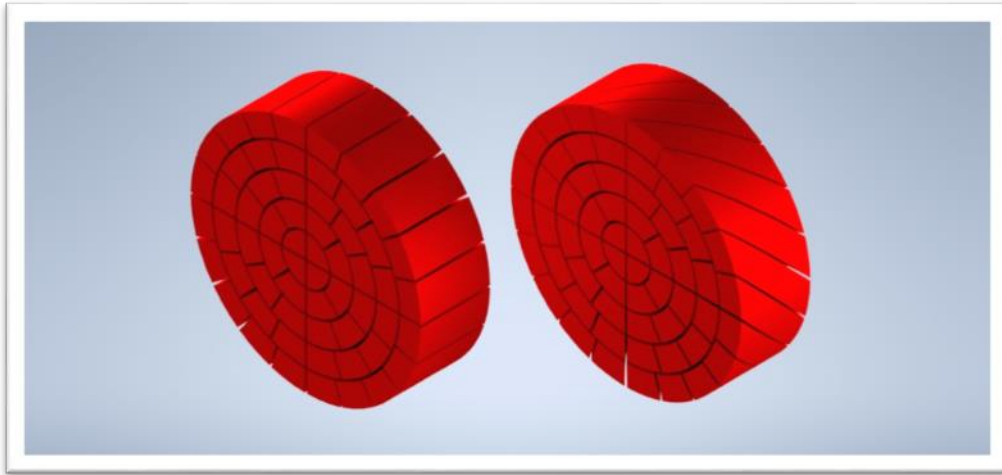


Figura 10

L'equazione per trovare il valore di S risulta:

$$S = R^2 * \pi - \sum_{i=1}^n \{ [(R_{i\max}^2 - R_{i\min}^2) * \pi] + \sum_{j=1}^k [(R_{i+1\min} - R_{i\max}) * s] \}$$

In pratica si calcola l'area della sezione della tubazione ($R^2\pi$) a cui andrà sottratta l'area occupata dalla sezione delle pareti dei condotti del rotore. Quest'ultima, per rotori progettati costruttivamente simili a quello in tesi, non sarà altro che l'area delle sezioni circolari che dividono i condotti, sommata all'area delle propagazioni radiali aventi anch'esse la funzione di dividere i condotti.

Entrando più nel dettaglio: con la prima sommatoria che compare si considera uno ad uno ogni sezione circolare che divide i condotti (conteggiate con l'indice n), iniziando dalla più piccola, che è una circonferenza (e quindi $R_{1\min} = 0$) e se ne calcola l'area. Calcolata l'area di una sezione circolare, si va a sommare l'area di tutte le propagazioni radiali che dividono i condotti appena esterni alla sezione circolare di cui si è appena calcolata l'area, questo per merito della seconda sommatoria. Nella seconda sommatoria infatti si sommano tutti i contributi delle aree delle propagazioni radiali (conteggiate con l'indice k, che ripartirà da 0 ad ogni iterazione di n), che verranno calcolate come il raggio più piccolo della sezione circolare di indice successivo della prima sommatoria, a cui si sottrae il raggio più grande della corona circolare di cui si è appena calcolata l'area, il tutto moltiplicato per lo spessore di questo raggio.

Importante da notare sono le parentesi, che includono la seconda sommatoria all'interno di ogni iterazione della prima sommatoria, siccome per ogni anello si considerano le propagazioni radiali esterne ad esso.

Portata

Trovato il volume, si passa alla determinazione dell'equazione della portata Q espressa in m^3/s .

Mi sono ispirato all'equazione del calcolo della portata per una pompa volumetrica ad eccentrico, che, se pur funzionante in modo differente da ITEG, possiede, come esso, una correlazione tra numero di giri e volume di fluido elaborato. L'equazione della portata è:

$$Q = V * \frac{n}{60}$$

Dove V rappresenta il volume di fluido elaborato all'interno della pompa in un giro dell'eccentrico, mentre n è il numero di giri al minuto dell'eccentrico.

In pratica la portata è calcolata come il volume elaborato dalla pompa in un giro moltiplicato per il numero di giri nell'unità di tempo. Per ITEG, la formula è analoga, con l'aggiunta di un termine.

Quest'ultimo è dovuto al seguente fatto: in analogia con la pompa volumetrica che ad un giro dell'eccentrico elabora la quantità di fluido al suo interno, ITEG ad un giro del rotore elabora la quantità di fluido che alloggia in un'elicoide completa, a meno del coefficiente di regresso che riteniamo unitario. Siccome però, viene calcolato il volume di fluido nel rotore, che non è detto che contenga condotti per l'intera lunghezza di un passo, dobbiamo aggiungere un termine che è rappresentato dall'unità frazionata dalla percentuale del passo che hanno i condotti all'interno del rotore $1/\lambda$.

Ad esempio, se nel rotore i condotti compiranno due passi, ovvero $\lambda=2$, significa che ad un giro completo di ITEG verrà espulsa la metà del volume contenuto (che permanendo il doppio, subirà una maggiore azione di trasduzione energetica e quindi maggiore densità di energia per volume procapite. Questo significa che più passi nel rotore il fluido

compirà, più aumenta la quantità di energia nello scambio energetico tra rotore e fluido). Di contro se i condotti percorrono una frazione di passo all'interno del rotore, per esempio pari a metà del passo, $\lambda=1/2$, ad una rotazione verrà espulso due volte il volume di fluido contenuto nel rotore, che equivale alla quantità di fluido che sarebbe contenuta in un passo. Quindi, l'equazione della portata risulta:

$$Q = V * \frac{n}{60} * \frac{1}{\lambda}$$

Potenza

A seconda dell'utilizzo di ITEG, come pompa o come turbina, la potenza varia la sua equazione. Anche se questa variazione è semplicemente dovuta alla posizione del rendimento globale in essa.

Se ITEG viene utilizzato come pompa, avremo una potenza utile ed una potenza assorbita. La pompa assorbe una potenza in energia elettrica e la trasforma in energia meccanica da trasferire al fluido, che quindi riceverà una potenza utile, e durante questo processo entra in gioco il rendimento globale della macchina, che va a diminuire sensibilmente il valore della potenza assorbita, che verrà quindi chiamata potenza utile.

$$Nu = Q * H * \gamma \text{ [kgf m/s]} \quad Nu = \frac{Q * H * \gamma}{102} \text{ [kW]}$$

Dove:

- Q è la portata che passa nel rotore espressa in [m³];
- H è la prevalenza che la pompa deve fornire, cioè il dislivello che deve andare a superare espresso in [m];
- γ è il peso specifico del fluido in gioco, espresso in [kgf/m³] nel primo caso, e in [N/m³] nel secondo.

$$Na = \frac{Nu}{\eta} \text{ [kgf m/s] [kW]}$$

Dove il rendimento globale della macchina η è adimensionale e inferiore all'unità, rendendo sensata l'equazione che enuncia che la pompa dovrà assorbire più potenza di quella che trasmetterà al fluido per via delle perdite nella macchina.

Se ITEG viene utilizzato come turbina, avremo una potenza effettiva della turbina e una potenza teorica. Il fluido possederà una potenza teorica da cedere sotto forma di energia meccanica alla turbina, cosicché generi energia elettrica e si possa assorbire la potenza effettiva, al netto delle perdite di energia che ci saranno nel rotore, e durante questo processo entra in gioco il rendimento globale della macchina, che va a diminuire sensibilmente il valore della potenza teorica, che verrà quindi chiamata potenza effettiva.

$$N_t = Q * H * \gamma \text{ [kgf m/s]} \quad N_t = \frac{Q * H * \gamma}{102} \text{ [kW]}$$

Dove:

- Q è la portata che passa nel rotore espressa in [m³];
- H è la prevalenza del fluido, cioè il dislivello che compie prima di entrare in turbina, espresso in [m];
- γ è il peso specifico del fluido in gioco, espresso in [kgf/m³] nel primo caso, e in [N/m³] nel secondo.

$$N_e = N_t * \eta \text{ [kgf m/s]} \text{ [kW]}$$

Dove il rendimento globale della macchina η è adimensionale e inferiore all'unità, rendendo sensata l'equazione che ci dice che la turbina assorbirà meno potenza di quella che il fluido le trasmetterà, per via delle perdite nella macchina.

Rendimenti

Si è parlato di rendimento globale della macchina η e seppur ci sono anche altri rendimenti in un processo che comprende una pompa o una turbina, a noi interessano solamente il rendimento causato dalla dispersione di energia della macchina. Il rendimento globale può essere scomposto da 3 rendimenti, che sono: rendimento idraulico η_i , rendimento volumetrico η_v , rendimento meccanico η_m .

Il rendimento idraulico tiene conto delle dissipazioni di energia dovute ad urti e deviazioni del fluido nella macchina. Di particolare importanza per stimare il rendimento idraulico sono gli aforismi idraulici che enunciano:

- l'ingresso del fluido nella macchina deve avvenire in modo tale da ridurre al minimo gli urti del fluido contro le pareti della macchina;
- la velocità in uscita dalla macchina deve avere il minimo valore compatibile con il funzionamento di essa.

Nel realizzare il rotore di ITEG, grazie alla sua adattabilità di progetto, si può facilmente tener conto di questi aforismi per ottenere il rendimento idraulico più elevato possibile.

Il rendimento volumetrico tiene conto del fluido che entra nella macchina ma non viene elaborato. Per come è costituito ITEG, solo una parte minima di fluido può non essere elaborato perché finisce nell'intercapedine tra rotore e statore. Quindi il rendimento volumetrico è assimilabile pari a 1.

Il rendimento meccanico tiene conto degli attriti tra gli organi meccanici della macchina. Nel caso di ITEG, essendoci cuscinetti magnetici, se essi sono ben progettati gli attriti meccanici sono inesistenti. Quindi il rendimento meccanico è assimilabile a 1.

Sicuramente il rendimento che più va ad impattare sull'efficacia della macchina è quello idraulico. Vediamo, attraverso i triangoli di velocità, come rispettare al meglio gli aforismi idraulici.

Triangoli di velocità

Il rotore è progettato in modo da avere passo costante in tutti i condotti da cui è formato, in modo da avere un flusso omogeneo. Questo significa che, se in contemporanea entrano due particelle nel rotore, in condotti che hanno distanze radiali diverse, esse usciranno dal rotore nello stesso istante.

Questo fatto espone un problema: avendo passo costante, i condotti, da quelli più interni a quelli più esterni, avranno lunghezza sempre maggiore. Sappiamo che abbiamo una correlazione tra giri del rotore e avanzamento del fluido nel condotto: ad un giro del rotore corrisponde un avanzamento del fluido pari alla lunghezza di un passo nel condotto,

qualunque lunghezza esso abbia. Quindi si intuisce che se abbiamo una particella di fluido all'ingresso di un condotto della corona più esterna che entra nello stesso istante di una particella di fluido all'ingresso di un condotto della corona più interna, le particelle dovendo uscire nello stesso istante dal rotore, dato il passo costante, avranno sicuramente velocità relative diverse. La particella che percorre il condotto più esterno avrà sicuramente velocità relativa maggiore rispetto alla particella che percorre il condotto più interno. Siccome stiamo parlando di velocità relativa, facciamo ulteriore chiarezza andando a vedere che velocità ci sono in gioco.

Il rotore possiede una velocità di rotazione propria, e il fluido nella tubazione, che andrà a lambire la sezione di ingresso del rotore, possiede a sua volta una propria velocità che per semplicità ipotizziamo sia perpendicolare alla superficie di ingresso del fluido del rotore. Quindi il sistema studiato è caratterizzato da un doppio sistema di riferimento. Il riferimento assoluto descrive come si muove l'acqua rispetto all'intero sistema che comprende tubazione e ITEG. Il secondo è quello relativo che descrive come si muove l'acqua all'interno del rotore dato che esso gira ad una certa velocità. Ci affidiamo alle classiche formule della fisica che enunciano:

$$V_{\text{assoluta}} = V_{\text{relativa}} + V_{\text{trascinamento}}$$

Per semplicità, come usuale nello studio delle macchine idrauliche, definiamo "c" come V_{assoluta} , "v" come V_{relativa} e "u" come $V_{\text{trascinamento}}$. Risulta quindi:

$$c = v + u$$

Assumiamo come velocità assoluta c (nera) la velocità dell'acqua in entrata nel rotore e la velocità che l'acqua possiede all'uscita del rotore. La velocità assoluta è la composizione vettoriale data dalla somma dei vettori v (verde) e u (giallo). La velocità relativa, v, è la velocità che l'acqua possiede all'interno dei condotti considerando un sistema di riferimento solidale al rotore. La velocità di trascinamento u è la velocità tangenziale alla sezione del rotore legata alla velocità di rotazione. I triangoli di velocità presi per semplicità nei condotti più esterni sono mostrati in figura 11.

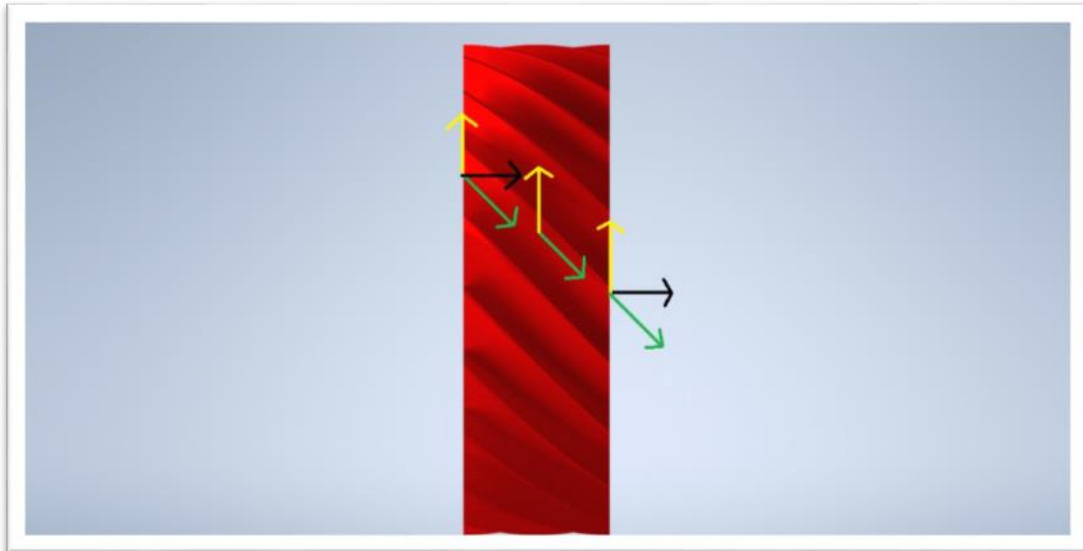


Figura 11

Poiché il fluido arriva con la stessa velocità assoluta c su tutta la superficie del rotore, si potrebbe pensare che, percorrendo lunghezze diverse, i tempi di attraversamento sarebbero diversi, con squilibri nella portata. In realtà bisogna ragionare in termini di velocità relative. Infatti, ad ogni corona di condotti di diverso diametro cambierà il triangolo delle velocità, pur rimanendo c costante, dato che sappiamo che la velocità assoluta in uscita sarà sicuramente uguale alla velocità assoluta in entrata, siccome vale l'equazione di continuità della portata per ogni condotto:

$$Q = A_{\text{condotto}} * c$$

E siccome i condotti hanno sezione costante, la velocità assoluta dell'acqua entro essi si manterrà costante, ad ogni distanza radiale. Cambia però come sopra accennato la velocità relativa a mano a mano che ci si avvicina all'asse di rotazione, e questo cambiamento è dovuto al fatto che la composizione vettoriale di v risulta:

$$v = c - u$$

Ma se c è costante, vuol dire che deve variare u . Infatti, la velocità di rotazione aumenta con l'aumentare della distanza radiale a cui ci si trova nel rotore, e lo si evince dal suo legame con la velocità angolare ω :

$$u = \omega * r$$

Con $\omega = 2\pi n/60$ che rimane sempre costante, essendo n costante ad ogni distanza radiale.

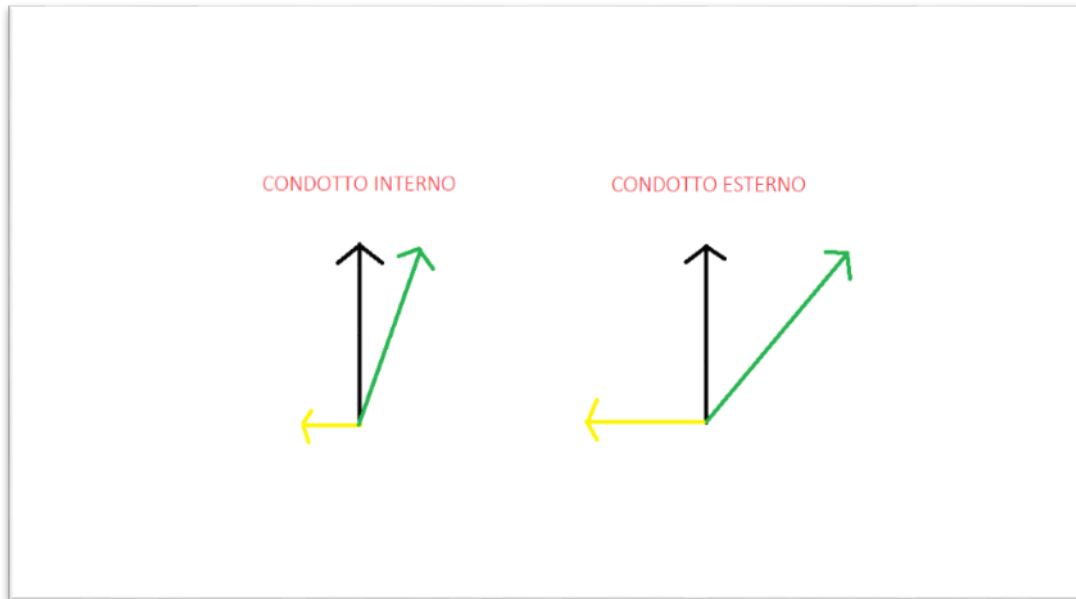


Figura 12

La direzione di v dovrà essere parallela alla parete del condotto per far funzionare al meglio il rotore, sia se utilizzato come pompa sia se utilizzato come turbina. Dall'immagine 12 si vede come v è maggiormente inclinata nei condotti più esterni, dato che la loro torsione è maggiore rispetto a quella nei condotti più interni. Inoltre, si vede come u nei condotti più esterni sia maggiore, come sopraccitato.

Dopo questo ragionamento possiamo dire che per assicurarci velocità assolute uguali in tutti i condotti abbiamo due parametri da poter far variare:

- il numero di giri n , con il quale varierà u ;
- l'inclinazione dei condotti, con la quale varierà v ;

Ovviamente la cosa più semplice è variare il numero di giri n , siccome l'inclinazione dei condotti la si decide al momento della progettazione.

In conclusione, per rispettare il primo aforisma idraulico abbiamo visto come v all'ingresso (e per tutta la lunghezza del condotto) sia parallela alla parete del condotto; mentre per rispettare il secondo aforisma idraulico il più possibile dobbiamo avere v in uscita che non abbia un valore troppo elevato; lo si regola con l'inclinazione dei condotti, oppure tenendo sotto controllo il numero di giri per contenere u . Quindi se ITEG viene correttamente dimensionato il rendimento idraulico non causerà perdite di energia superiori a 10%. Oltre a questo, si è dimostrato come

c sia uguale all'uscita di ogni condotto per evitare disomogeneità del flusso.

Capitolo 4 – Analogia con la vite di Archimede

Nello studio del funzionamento meccanico di ITEG, si evince una particolare analogia con la vite di Archimede, semplicemente detta coclea.

La prima analogia sta nel fatto che sia ITEG che la coclea sono macchine idrauliche reversibili assiali. Entriamo più nel dettaglio.

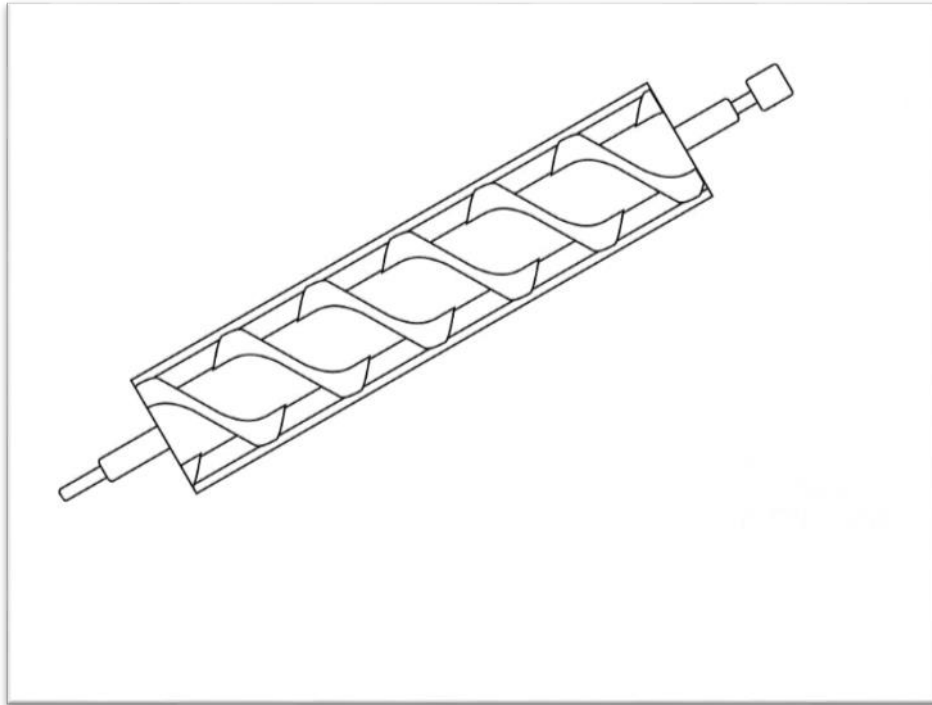


Figura 13

Una coclea è costituita essenzialmente da un tronco cilindrico nel cui interno ruota un asse attorno al quale si sviluppa una superficie elicoidale ad uno o più principi. Come ITEG la coclea può essere utilizzata sia come pompa sia come turbina. Se consideriamo il funzionamento come pompa, la sua parte inferiore è immersa nel liquido o nel materiale granulare da sollevare, e attraverso la rotazione della vite se ne raccoglie una certa quantità, che viene intrappolata tra una spira e l'altra di un principio, e avanza poi di una distanza pari al passo per ogni giro della vite, fino a fuoriuscire dalla coclea. In ITEG allo stesso modo, ad un giro del rotore il fluido in un suo qualsiasi condotto avanza di una distanza pari al passo.

Più precisamente, ogni corona circolare di condotti di ITEG, aventi tutti la stessa distanza dall'asse di rotazione, può essere vista come una coclea a più principi, con il numero di condotti equivalente al numero di principi. Si può quindi ritenere che ogni sezione circolare corrisponda ad una vite che non si sviluppa assialmente ma che accosta i principi uno accanto all'altro in una disposizione circolare.

Inoltre, calcolando la portata per una corona circolare di ITEG e per una coclea avente principi in numero uguale ai condotti della corona circolare, si avrebbe la stessa equazione:

$$Q = V * z * \frac{n}{60}$$

Dove:

- V: volume di fluido intrappolato tra due spire nel caso di una coclea; volume intrappolato in un condotto del rotore lungo un passo nel caso di ITEG;
- z: numero di principi della coclea; numero di condotti della corona di circolare nel caso di ITEG;
- n: numero di giri al minuto della vite; numero di giri al minuto del rotore nel caso di ITEG.

Capitolo 5 – Funzionamento magnetico

Ipotizziamo ITEG utilizzato come pompa, cioè che il dispositivo deve imprimere una certa energia di pressione al fluido che elabora, attraverso la rotazione del rotore. Come viene data energia al rotore per permettergli di ruotare?

Il meccanismo è costituito da magneti permanenti e da elettromagneti. Un magnete permanente è formato da materiale ferromagnetico che è stato precedentemente magnetizzato e crea un proprio campo magnetico. Mentre un elettromagnete è costituito da una bobina di filo conduttore che agisce come un magnete quando è attraversato da una corrente elettrica, ma smette di essere magnete non appena la corrente si ferma. Inoltre, è costruttivo avvolgere l'elettromagnete attorno ad un nucleo ferromagnetico per aumentare il campo magnetico prodotto dalla bobina. In ITEG, i magneti permanenti sono quelli incastrati sul rotore, polarizzati tutti nello stesso modo, mentre gli elettromagneti sono gli avvolgimenti posizionati negli appositi vani sullo statore.

Per l'innesco del rotore devono essere implementate particolari strategie, quindi per semplicità consideriamo il rotore a regime rotativo. A regime rotativo si sfrutta l'inerzia rotante della massa rotorica grazie alla conservazione di quantità di moto angolare. Tutti i singoli avvolgimenti, pilotati da corrente di congruo verso in modo da esporre il polo del campo magnetico generato contrario a quelli configurati negli assetti dei magneti permanenti, intensificheranno il campo magnetico nelle loro disposizioni assiali ed esprimeranno il picco, attraendo lo specifico polo del magnete permanente in prossimità di transitare nella zona assiale dell'avvolgimento che si sta attivando, che subito dopo diminuirà, per riattivarsi all'approssimarsi del magnete permanente successivo, mentre il precedente magnete permanente transitato oltre, entrerà nella sfera di azione del successivo elettromagnete. La forza generata dall'elettromagnete che andrà ad agire sul rotore è data dall'equazione:

$$F = \frac{B^2 * S}{\mu}$$

Dove:

- B: induzione magnetica;
- S: sezione del campo magnetico;
- μ : permeabilità;

La forza generata dal campo magnetico può essere legata alla corrente necessaria per generare tale forza con l'equazione:

$$I = \frac{F}{N}$$

In cui N è il numero di spire dell'avvolgimento.

Siccome ITEG ha più di un avvolgimento, il calcolo della forza data da un avvolgimento sarà moltiplicata per il numero di avvolgimenti presenti (supposti uguali). Essa sarà la forza in grado di mettere in rotazione il rotore e quindi trasmettere energia al fluido. Conoscendo questa forza, che sarà applicata in periferia al rotore, possiamo conoscere facilmente la coppia:

$$C = F * D$$

In cui D è il diametro del rotore, cioè il braccio della forza.

Conoscere la coppia è importante per legare la potenza del rotore con la sua velocità angolare:

$$P = C * \omega$$

Altro aspetto assai fondamentale del funzionamento magnetico di ITEG è capire se i cuscinetti toroidali posti sulle testate riescono a reggere la spinta generata dal fluido in transito nel rotore per evitare che esso si accosti alla testata e non riesca ad effettuare una corretta rotazione.

Come primo passo si vuole quantificare la forza repulsiva del magnete toroidale. Per far questo, si può utilizzare il tool per il calcolo della forza attrattiva di un magnete che si trova sul sito supermagnete.it che ci permette di scegliere le caratteristiche dimensionali del magnete in esame. Sapendo poi che la forza repulsiva è lievemente inferiore a quella attrattiva, a quest'ultima si sottrarre 5% di essa stessa. Se assimiliamo i magneti permanenti sul rotore come un anello, con il tool possiamo per esempio calcolare la forza attrattiva di due anelli in neodimio N45 con diametro esterno pari a 100 mm e diametro interno pari a 90 mm e spessore pari a 5 mm. Per distanze inferiori al millimetro essa supera i 30 kg, fino ad arrivare a circa 50 kg per distanze che si aggirano attorno alle decine di micron. Questa forza è espressa in kg perché è da considerarsi come il peso che applicato a due magneti in equilibrio, permette loro di staccarsi in direzione perpendicolare al piano di attrazione. Se vogliamo la forza in Newton come consigliato dal sito supermagnete.it basta moltiplicare il valore trovato per g (accelerazione di gravità). Quindi per esempio se ho una forza di repulsione di 45 kg corrisponderà ad una forza di repulsione di 440 N.

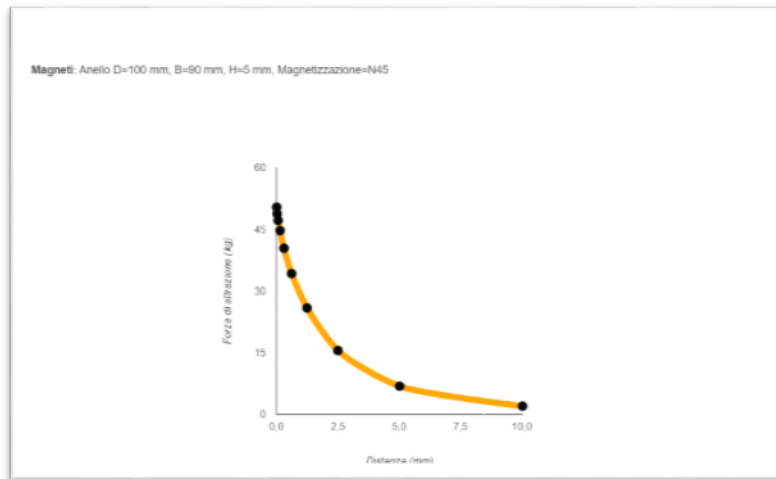


Figura 14

Possiamo a questo punto dividere la forza trovata per l'area su cui è applicata, cioè l'area della sezione del toro, per ottenere la pressione massima per cui i cuscinetti magnetici tengono a distanza il rotore dallo statore e permettergli una corretta rotazione. Per il caso preso in esame, otterremo una pressione di circa 74000 Pa. Questa pressione potrà essere comparata con quella che il fluido esercita sul rotore (ad esempio ricavabile dall'equazione di Bernoulli), in modo tale da poter dimensionare correttamente i cuscinetti magnetici.

I valori trovati sono da considerarsi per l'esempio specifico fatto, se con i cuscinetti magnetici si volesse reggere una pressione dell'acqua maggiore basterebbe dimensionarli coerentemente.

Capitolo 6 – Stampa 3D

Quale tecnologia è meglio utilizzare per creare ITEG? Di quale materiale realizzare la macchina? La risposta ci è stata fornita da un'azienda di settore che dal 1995 distribuisce i sistemi di prototipazione rapida, divenendo in breve una delle società in grado di fornire sul

mercato italiano soluzioni complete in più settori. La stampa 3D è il simbolo dell'identità innovativa di quest'azienda: infatti essa è diventata il punto di riferimento del mercato nazionale della manifattura additiva.

La stampa 3D è una tecnologia di fabbricazione additiva. Si tratta di processi che sfruttano modelli digitali CAD per creare oggetti tridimensionali attraverso l'unione di materiali. A differenza dei processi di lavorazione sottrattivi, in cui l'oggetto si ottiene mediante la rimozione di materiale da blocchi solidi, la fabbricazione additiva prevede la deposizione successiva di strati di materiale. Attraverso la stampa 3D, gli oggetti o i pezzi sono costruiti in strati molto sottili che consentono geometrie altamente complesse che sono impossibili con qualsiasi altro processo produttivo. La stampa 3D funziona al meglio per creare rapidamente prototipi funzionali e parti di uso finale con un alto livello di dettaglio.

L'Azienda con i suoi marchi, presenta con modelli X3, X5, X7, le sole stampanti disponibili sul mercato progettate ed interamente sviluppate in proprio (hardware, software e materiali) per consentire l'esclusiva possibilità di realizzare pezzi funzionali, resistenti e raffinati, in filamento di Nylon o di Onyx (Nylon con carbonio tritato) rinforzati a deposizione continua con fibra di carbonio, di vetro, di vetro per alte temperature e di Kevlar.

La tecnologia innovativa di queste stampanti consiste nell'esclusiva deposizione in filamenti continui di fibre sagomate di carbonio, vetro e Kevlar. Il sistema a doppia testa permette di creare parti sorprendentemente robuste, fino a 25 volte più rigide di quelle ottenute con altre stampanti 3D. Gli strati di materiale che vengono sovrapposti sono da 50 micron, permettendo di ottenere dettagli anche piccoli e ottima precisione.

Inoltre, a seconda del materiale di cui si vuole realizzare il pezzo e della strategia di costruzione scelta, le stampanti 3D permettono di ottenere pezzi anche in materiali differenti a seconda del tipo di applicazione necessaria e risultato finale che si vuole ottenere. In particolare, sempre con tecnologia di estrusione, i materiali compositi hanno il vantaggio di avere, in certe condizioni:

- un rapporto resistenza/peso superiore a quello dell'alluminio (fibra di carbonio);
- la massima resistenza all'abrasione e all'impatto (kevlar);
- grandi proprietà di rigidità e resistenza alla temperatura (vetro);

I materiali che vengono consigliati dall'azienda sono i seguenti:

- NYLON PA12, polimero specificatamente sviluppato per l'uso nella produzione additiva. La polvere garantisce un alto livello di stabilità e un'alta risoluzione, anche nel caso di oggetti fini e complessi.
- ELASTOMERO TPE, è una polvere pensata per stampare parti gommosi ed altamente flessibili.

Per ITEG, si necessita un materiale che sostituisca la plastica (solitamente utilizzata per realizzare componenti con stampa 3D), ma che, allo stesso tempo, sia leggero, economico e resistente. Si deduce quindi che il polimero da considerare per ITEG sia NYLON PA12, in quanto ITEG, durante la sua fase operante, non deve flettersi o deformarsi. Diversi altri materiali metallici (leghe) o base di carbonio possono trovare impiego, in funzione delle caratteristiche perseguite (durezza, usurabilità, rilascio chimico) e confacenti ai prodotti in transito.

Capitolo 7 – Pompe nell'industria alimentare

Processi dell'industria alimentare

L'industria alimentare comprende un'ampia varietà di processi intermedi, con cui, partendo dagli ingredienti grezzi si arriva fino al confezionamento di alimenti.

Molti di questi processi, necessitano dell'utilizzo di pompe, e si vuole andare a verificare in quali di questi processi può essere sostituito ITEG a pompe più classiche, in modo da creare dei benefici energetici.

Alcuni dei processi più comuni in cui è fondamentale l'utilizzo di una pompa, sono:

- trasporto: è l'operazione più diffusa nei vari processi dell'industria alimentare dato che è compresa nella maggior parte di essi, anche in quelli in cui l'obiettivo primario non è il semplice spostamento di materiale. La pompa in questo caso dovrà fornire una pressione a ciò che elabora, per fargli vincere un eventuale dislivello e per farlo avanzare nella tubazione e vincere gli attriti che si generano con l'avanzamento. In tutte le operazioni di trasporto può essere utilizzato ITEG;

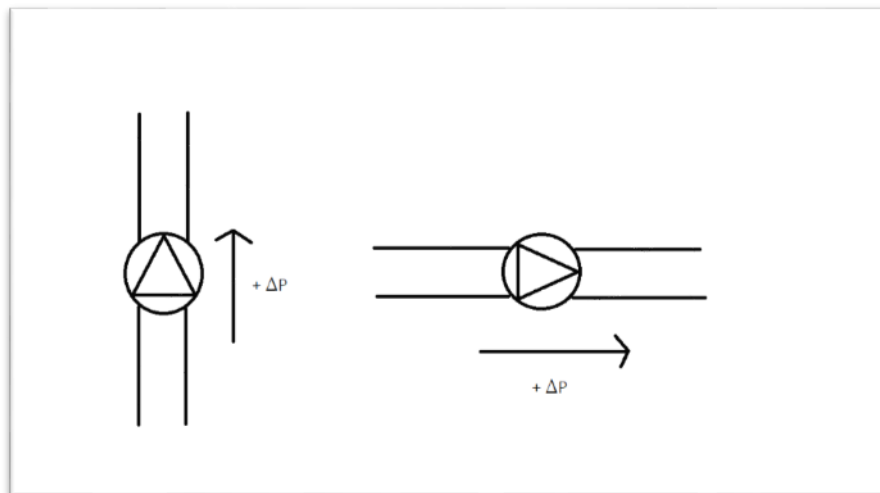


Figura 15

- filtrazione: è un'operazione con la quale un liquido in movimento, sotto l'azione di pressione generata da una pompa, si separa dalle particelle solide in esso disperse, per effetto della loro ritenzione da parte di un mezzo filtrante poroso attraverso cui il liquido viene fatto passare. In tutte le operazioni di filtrazione può essere utilizzato ITEG;

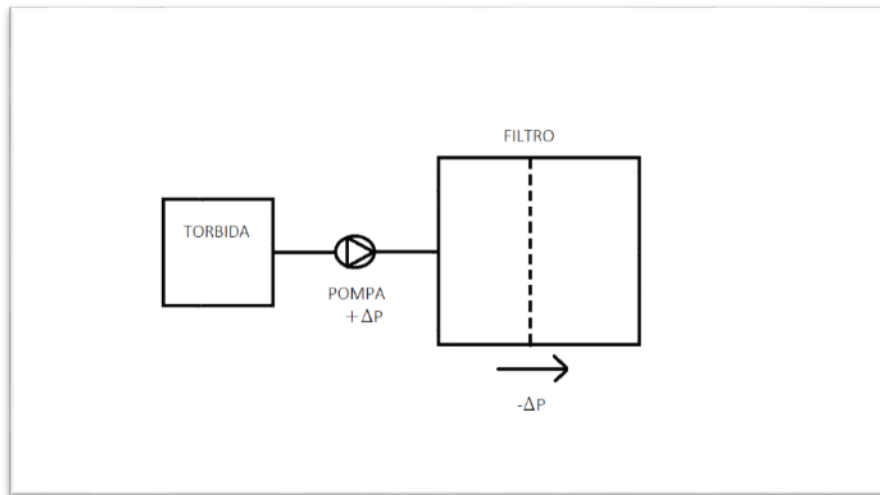


Figura 16

- dosaggio: operazione per cui può essere richiesta un'elevata precisione siccome il dosaggio di un componente in un altro spesso è necessario in quantità molto ridotte e precise. Il dosaggio può essere richiesto continuo, o discontinuo. In caso di dosaggio continuo può essere utilizzato ITEG dato l'elevatissimo rendimento volumetrico, e quindi la precisione del dosaggio, siccome a meno di infinitesime tolleranze tutto il fluido che entra nel rotore ne uscirà elaborato;

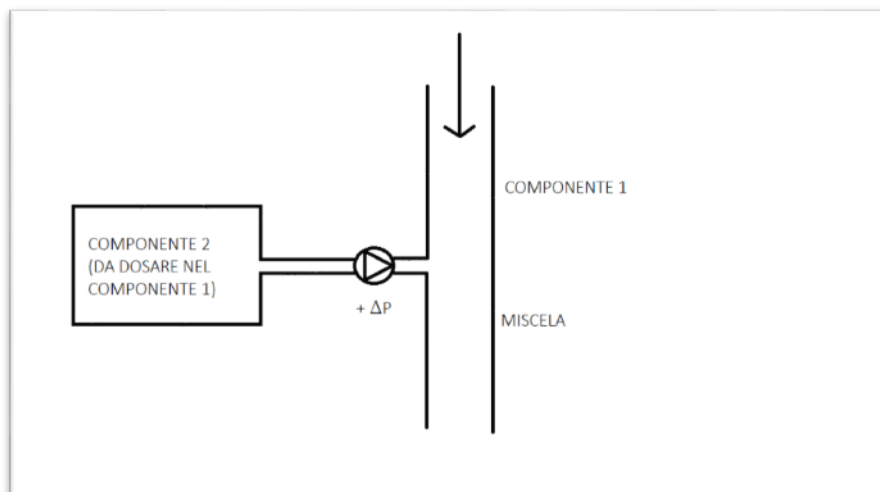


Figura 17

- riempimento: operazione con la quale si posiziona, in modo più o meno preciso, il prodotto finito o le componenti che lo realizzano, nella confezione. Può necessitare di elevate pressioni, ma solitamente è realizzato a basse pressioni. Per alcuni prodotti questa operazione deve essere compiuta con cura, in modo da

non rischiare di degradare nessuna parte di esso. In tutte le operazioni di riempimento può essere utilizzato ITEG;

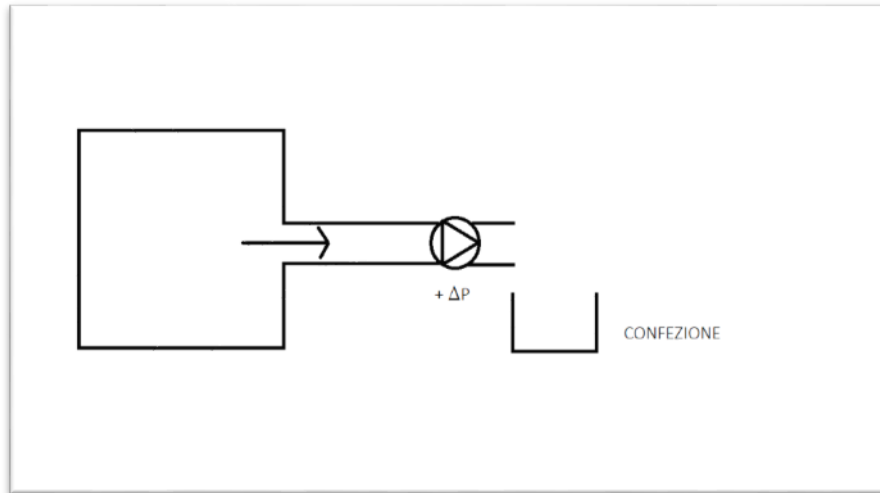


Figura 18

- concentrazione per evaporazione: operazione che ha lo scopo di ridurre volume e peso di un prodotto, per diminuirne i costi di stoccaggio e trasporto. Ma utile anche ad aumentare la conservabilità del prodotto. In un impianto utilizzato per compiere questa operazione, oltre allo scambiatore di calore, sono presenti delle pompe, che possono essere sostituite con ITEG.

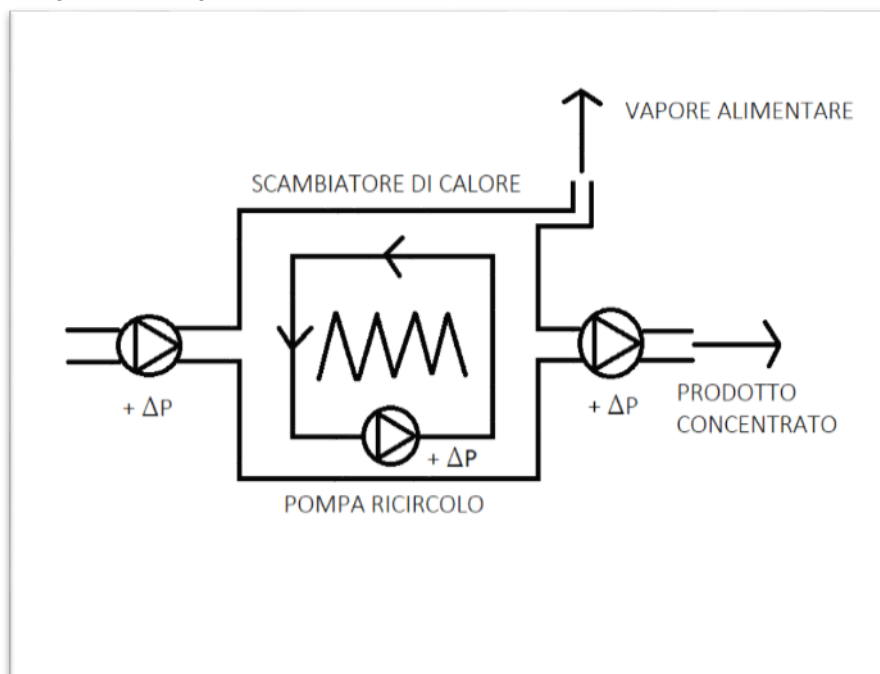


Figura 19

Confronto numerico

Consideriamo il semplice trasporto di fluido in un processo dell'industria alimentare. Solitamente viene compiuto con pompe centrifughe, quindi si vuole verificare se sostituendo una di esse con ITEG si avranno dei benefici.

A parità di portata, prevalenza, peso specifico del fluido e numero di giri del rotore, si evince immediatamente che se consideriamo l'equazione della potenza, ciò che può variare il risultato finale è solamente il rendimento della macchina. Ricordiamo che esso dipende dall'entità di rendimento idraulico, rendimento volumetrico, rendimento meccanico.

Per ITEG il rendimento idraulico lo si può considerare superiore a 0.9, che per pompe centrifughe è il limite massimo, e solitamente si aggira attorno a valori di 0.85; il rendimento volumetrico è assimilabile all'unità per ITEG, mentre nella migliore delle ipotesi per pompe centrifughe si arriva 0.98, e solitamente si hanno valori di 0.95; infine il rendimento meccanico di ITEG è molto vicino all'unità, al contrario di quello che possiamo riscontrare in pompe centrifughe dato che difficilmente si arriva a 0.95, rimanendo intorno a 0.92.

Siccome la potenza assorbita da una pompa è data dalla potenza che essa deve erogare, maggiorata di una percentuale dovuta alle perdite che la pompa stessa ha al suo interno e quantificate dai rendimenti, in ITEG avremo che la potenza assorbita sarà nella peggiore delle ipotesi circa 10% in più rispetto alla potenza che la pompa dovrà fornire al fluido elaborato, mentre in una pompa centrifuga nella migliore delle ipotesi la potenza assorbita sarà circa 15% in più rispetto alla potenza utile erogata dalla pompa. Bisogna tenere presente però che pompe centrifughe con rendimenti massimi sono costruttivamente complicate e costose. Se prendiamo in esame pompe centrifughe classiche, la potenza assorbita sarà almeno il 30% in più rispetto alla potenza che la pompa dovrà erogare.

Ovviamente questo confronto è puramente una stima, basata sui rendimenti ipotizzati per ITEG e su rendimenti di generiche pompe centrifughe.

Pompe in commercio e confronto con ITEG

Vediamo alcune delle pompe in commercio che vengono impiegate nel settore alimentare che più possono essere accostate ad ITEG e che vantaggi può avere ITEG rispetto ad esse. Prendiamo in esame pompe trovate su internet su alcuni siti che offrono sistemi di pompaggio utilizzati in molti ambiti, tra cui l'alimentare. Siccome abbiamo visto l'analogia tra ITEG e la coclea, le pompe che andrò a visionare e confrontare saranno costruttivamente simili a coclee.

Sul sito pcm.it vengono offerte pompe monovite Moineau, il cui meccanismo principale consiste in un rotore elicoidale che gira all'interno di uno statore a cavità elicoidale. Il rotore, fatto di acciaio inossidabile, è progettato con un alto grado di precisione mentre lo statore è plasmato in un elastomero resistente. La geometria e le dimensioni di queste parti, sono tali che quando il rotore è inserito nello statore, si crea una doppia catena di cavità a tenuta stagna a forma di alveolo. Quando il rotore gira dentro lo statore, l'alveolo avanza a spirale senza variare la sua forma e il suo volume, fino a fuoriuscire dalla pompa.



Figura 20

Le più rilevanti caratteristiche vantaggiose di questo meccanismo sono:

- bassa produzione di vibrazioni;

- capacità di elaborare un ampio range di fluidi, da quelli meno viscosi a quelli più viscosi;
- integrità dei prodotti fragili che vengono elaborati, per come avanza il flusso all'interno della pompa senza particolari urti e con basso effetto di taglio;
- facile manutenzione.

Sul sito pcm.it si trovano diverse pompe alimentari con questa tecnologia, tutte molto simili, ma ognuna con la sua caratteristica predominante.

La pompa igienica a cavità progressive (figura 21) è la pompa a cavità progressiva per applicazioni alimentari più delicata ed igienica che ci sia. Protegge la qualità e la consistenza dei prodotti pompati attraverso la tecnologia Moineau. Il 67% della consistenza del prodotto è protetto, rispetto al 15% di altre più classiche pompe in commercio. Essa è costruita in conformità con le linee guida dell'European Hygienic Engineering and Design Group (EHEDG) ed è quindi ottimizzata per l'impiego nelle applicazioni in cui l'igiene è fondamentale, oltre ad assicurare la possibilità di essere pulita al meglio.

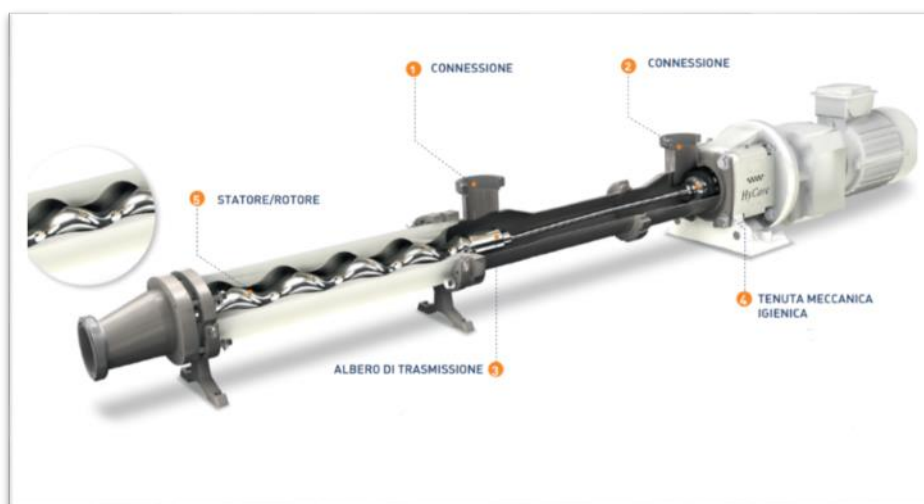


Figura 21

La pompa alimentare ecologica a cavità progressiva (figura 22) è una delle pompe a cavità progressive per applicazioni alimentari più ecologiche sul mercato. Le principali caratteristiche di questa pompa sono il risparmio energetico e il risparmio di spazio. Essa utilizza il

10% di energia in meno rispetto alla maggior parte delle pompe a cavità progressiva sul mercato. Inoltre, rispetto ad esse, è il 42% più corta e il 57% più leggera, e questo significa sia meno materie prime per la realizzazione, sia meno spazio occupato.

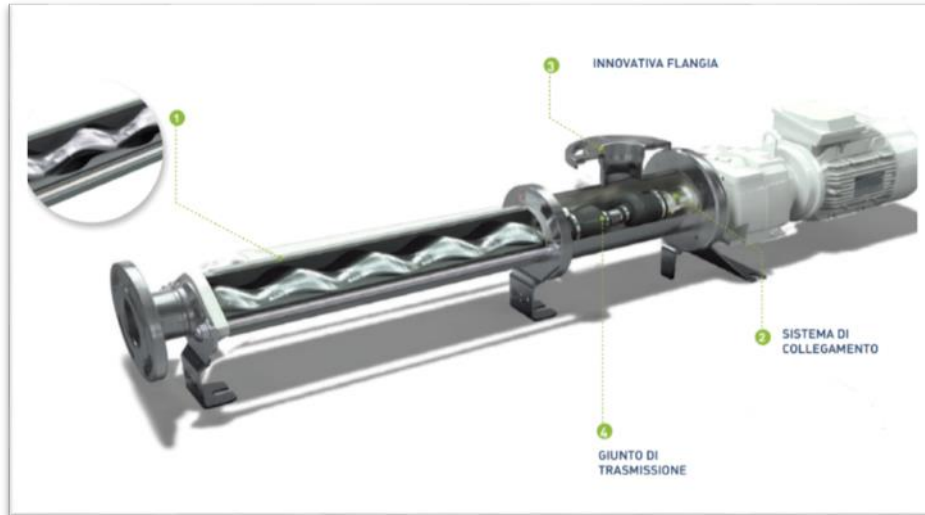


Figura 22

La pompa alimentare compatta a cavità progressiva (figura 23) è una delle pompe a cavità progressive più compatte sul mercato. È caratterizzata da un basso LCC (Life Cycle Costing), grazie al design molto semplice, da un basso costo manutentivo e da ingombro e peso limitati. Per le applicazioni alimentari presenta inoltre uno smontaggio rapido, per permettere una pulizia COP (Cleaning Out of Place) veloce.

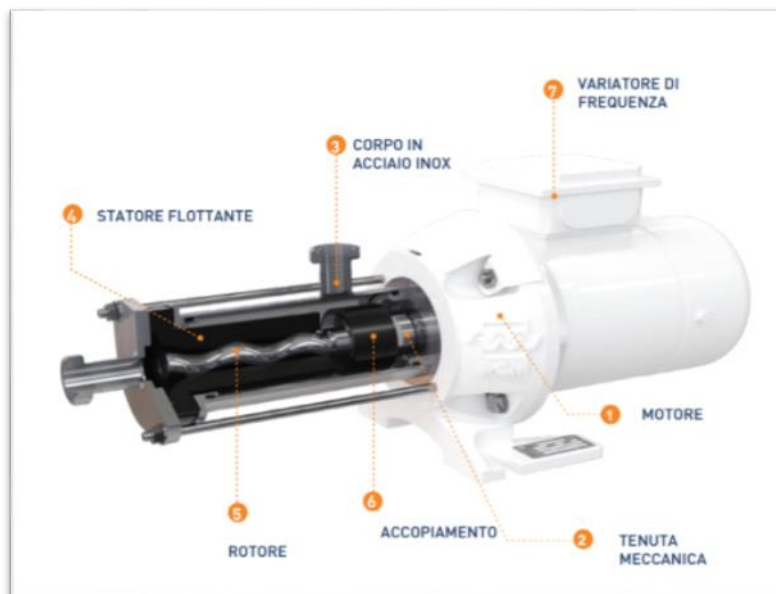


Figura 23

La pompa alimentare con tramoggia a cavità progressiva (figura 24) è stata concepita per l'elaborazione di fluido molto viscosi. Ce ne sono di diverse tipologie, tutte aventi una vite di Archimede come rotore, in modo da poter raggiungere elevate pressioni, utili per l'avanzamento di fluidi viscosi. Dimensionalmente non irrilevanti, consentono però di lavorare a basso consumo energetico.

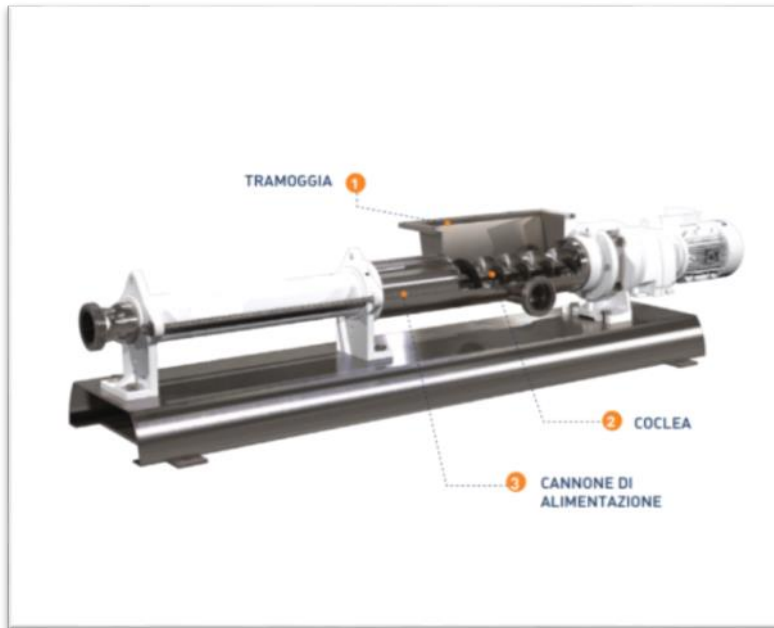


Figura 24

Vediamo le analogie con ITEG e i possibili vantaggi di quest'ultimo rispetto alle pompe appena descritte.

Confrontando la tecnologia Moineau con ITEG, si evince che in entrambi i casi il flusso avanza per azione meccanica del rotore. Si nota però che nel caso di ITEG il flusso attraversa il rotore, mentre nel caso di Moineau il flusso transita nella cavità presente tra il rotore e lo statore. ITEG, grazie agli esigui spessori delle pareti dei cavodi elicoidali (anche fino a decine di micron, in funzione delle applicazioni) ed all'assetto di tensostruttura, offre migliori rapporti tra superfici di azione e volumi impegnati; l'energia conferita in energia di pressione al prodotto avviene con omogeneità, in modo distribuito e non assiale, grazie ad una azione di conferimento, distribuita sulla superficie esterna dell'intero cilindro (aprendo a realizzazioni con minori densità di potenza per unità di superfici), con evidente maggiore efficacia che da assetti assiali consueti.

ITEG è sicuramente meno invasivo delle generiche pompe “cavità progressiva”, sia perché il suo inserimento nel processo in cui sarà utilizzato può avvenire semplicemente con la separazione della tubazione in cui transita il flusso e l’inserimento del dispositivo con dei semplici giunti a bicchiere, sia per il ridotto ingombro del dispositivo. Il minor ingombro è per via del passaggio del flusso all’interno del rotore, e non tra rotore e statore come nella tecnologia Moineau, infatti in ITEG tra essi è presente solo una piccolissima tolleranza dimensionale. Ulteriore volume risparmiato si ha perché l’intero statore di ITEG, richiedendo esigui volumi (distribuiti sull’intera lunghezza della parte rotorica), evita l’impiego di meccanica elaborata (demoltiplicazioni e gruppi cardanici) e volumi pertinenti (meccanici e propulsivi); meccanica che seppur attenta alla riduzione di contaminazioni (da paraoli e lubrificanti), non ne è esente, al contrario di ITEG, al netto di quanto di pertinenza degli specifici rilasci dovute alle proprietà intrinseche dei materiali impiegati.

In analogia con quanto detto per la pompa igienica, ITEG, essendo realizzato con stampante 3D, può essere scelto un materiale di realizzazione perfettamente conforme con la normativa EHEDG, e nella progettazione evitare caratteristiche strutturali del dispositivo in cui possa ristagnare del fluido e si possano generare dei batteri. Inoltre, non possedendo né organi di trasmissione né cuscinetti meccanici, non necessita di nessun tipo di lubrificante che potrebbe contaminare il prodotto alimentare in caso di perdite o di guasti.

Per quanto riguarda l’aspetto energetico, possiamo ipotizzare che in ITEG ci saranno perdite energetiche inferiori rispetto alle pompe ecologiche, dato che in esso non è presente un albero motore, che necessita di trasmissioni per far fluire energia al rotore, e che disperdono una parte di essa.

Altra caratteristica in cui ITEG è sicuramente comparabile con queste pompe, soprattutto con le pompe compatte, è il basso LCC. Partendo dalla sua produzione, essendo composto dall’unione di solamente 4 componenti meccanici realizzati con stampante 3D (rotore, statore, 2 testate), la sua realizzazione è sicuramente più veloce e meno onerosa rispetto a quella di una qualunque altra pompa compatta, che presenta molti più componenti meccanici. Anche per quanto riguarda il montaggio

e la manutenzione ITEG è semplice e sicuramente vantaggioso: una volta inseriti correttamente i magneti ed i bulloni il montaggio è subito completato, mentre quando si vuole effettuare manutenzione per scomporre il dispositivo è sufficiente rimuovere i bulloni che collegano lo statore alle testate.

Come abbiamo visto, possiamo raggruppare buona parte delle caratteristiche fondamentali di più pompe in una sola, cioè in ITEG. Oltre a questo, si può fare un'ulteriore considerazione sulla portata delle pompe. Per esempio, se consideriamo una pompa igienica a cavità progressiva, il range della sua portata varia da 20 l/h come limite inferiore, fino a 50 m³/h come limite superiore. ITEG può avere un range più ampio perché oltre a far variare il flusso magnetico generato dagli elettromagneti per regolare in numero di giri del rotore e quindi anche la portata, lo si può progettare dimensionalmente molto piccolo data la sua semplicità di componenti, o molto grande, dato il suo ingombro relativamente basso, ed avere valori di portata piccolissimi o grandissimi all'occorrenza.

Vediamo un'altra pompa assimilabile meccanicamente a ITEG, e quindi alla coclea, utilizzata nell'ambito agroalimentare, per poterla equiparare a ITEG.

Sul sito rbs.it si trovano pompe monovite (figura 25). Esse sono macchine volumetriche a vite eccentrica con statore flottante azionate da un motore elettrico, sono particolarmente compatte e versatili, caratterizzate da un buon rapporto qualità-prezzo, realizzate in acciaio inox con tenuta meccanica interna facilmente sostituibile all'occorrenza, elastomeri di diverse mescole secondo gli specifici prodotti da trattare. Sono pompe adatte a elaborare sia fluidi puliti che con particelle in sospensione come vino, latte, succhi, passati di verdura, miele ed altri prodotti viscosi. Queste pompe sono particolarmente adatte per l'impiego nel settore agroalimentare in quanto tutte le sue parti a contatto con il fluido da pompare sono realizzate in acciaio inox e con elastomeri idonei al contatto con alimenti. L'accorgimento più importante da mettere in atto per il corretto funzionamento di questa pompa è il controllare che il fluido da pompare sia sempre disponibile al fine di evitare che la pompa giri a vuoto e si danneggi lo statore. Queste pompe sono adatte al pompaggio di: uva, mosto, vino, polpa di verdura,

polpa di frutta, succhi di verdura, succo di frutta, macinato di carne, latte e derivati, pomodoro, olio, marmellata, maionese, acidi, collanti.



Figura 25

In analogia con questa pompa ITEG ha sicuramente un buon rapporto qualità-prezzo, e può essere utilizzato con una vasta gamma di fluidi, anche se sicuramente una pompa a vite elaborerà più facilmente fluidi molto viscosi, mentre ITEG avrebbe bisogno di un'attenta analisi sull'occlusione dei condotti. Però esso ha degli innegabili vantaggi rispetto a questa pompa: ITEG non genera azione tagliante in grado di degradare il prodotto che elabora, al contrario di questa pompa che, utilizzando una vite come rotore, genera tale azione tagliante. Inoltre, lo spazio occupato da ITEG è inferiore, basta mettere a confronto le componenti statoriche e si nota immediatamente che in ITEG oltre a quella parte non ci sono altre parti meccaniche che occupano volume, a differenza delle pompe monovite più comuni. Questo aspetto vantaggioso di ITEG è fondamentale, perché è un vantaggio che può valere confrontandolo con tutte le tipologie di pompe simili in commercio, di seguito andremo più nel dettaglio.

Si vuole anche mettere in relazione l'organo rotorico di ITEG con quello di altre pompe in commercio con simili caratteristiche. Si consideri la figura 26.

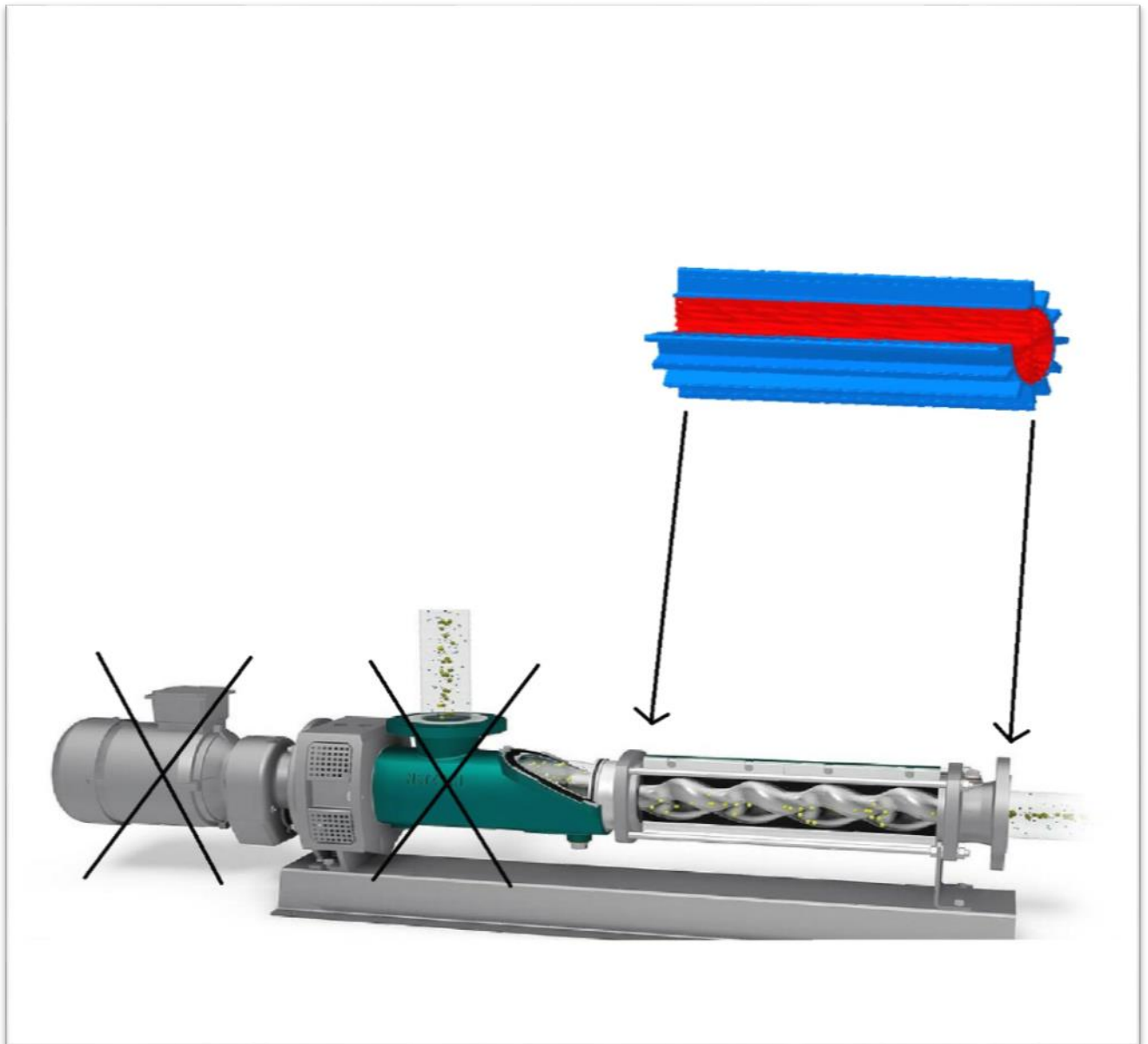


Figura 26

Si vede ITEG con l'organo rotorico dimensionato coerentemente con un altro organo rotorico di una pompa a cavità progressiva in commercio (lo spaccato del rotore consente anche di notare l'assetto e dinamismo interno). Si stima il rotore di questa pompa di lunghezza pari ad almeno mezzo metro, sulla lunghezza complessiva della pompa sul mercato di almeno un metro e mezzo.

Da tenere ben presente è la dimensione dell'ugello di fuoriuscita del fluido in ITEG e nelle altre due pompe. Si nota immediatamente come ITEG occupi meno spazio nella direzione radiale al flusso. Anche in direzione assiale ITEG occupa meno spazio, basta infatti comparare

rotori approssimativamente della stessa dimensione in modo da elaborare simile portata e quindi poter fare un confronto equo: in ITEG oltre al rotore e allo statore in cui è avvolto, sono presenti solamente le testate, di ridotte dimensioni; mentre nelle altre macchine l'insieme di rotore e statore comprendono solamente un terzo (o metà nella migliore delle ipotesi possibili) della lunghezza totale. E questo mette ancor più in evidenza il vantaggio di avere ITEG nel processo, oltre al risparmio economico dovuto al fatto che non è presente un motore (concettualmente sostituita dalla parte statorica) e delle trasmissioni che devono essere comprate e mantenute.

Siccome non si vuole limitare l'utilizzo di ITEG in sostituzione a pompe di simil fattura, vediamo il paragone tra esso e altre tipologie di pompe utilizzate in aziende alimentari.

Sul sito pumps.netzsch.com vengono proposte interessanti pompe a lobi, che tra i vari impieghi sono indicate per l'utilizzo nel settore alimentare. Sono pompe volumetriche, adatte per raggiungere elevati valori di pressione. Effettuano un trasporto continuativo e delicato, e sono indicate per il dosaggio proporzionale al numero di giri. Sono pompe molto compatte e che occupano poco spazio, richiedono poca manutenzione e assistenza, poiché tutti i componenti a contatto con la sostanza sono subito accessibili senza bisogno di dover smontare la tubazione. La manutenzione è semplice e senza l'utilizzo di attrezzi speciali. I lobi possono essere rimossi con facilità perché non sono fissati all'albero con bulloni interni al corpo pompa, ma bensì all'esterno con un sistema di bloccaggio rapido, pertanto nemmeno a contatto con il prodotto. Inoltre, i lobi possono essere rimossi indipendentemente uno dall'altro, ed essere poi rimontati nella corretta posizione semplicemente per mezzo di un attrezzo posizionario in dotazione che dopo l'utilizzo viene riposto in un proprio alloggiamento sulla parte esterna della macchina. Queste caratteristiche riducono notevolmente il tempo di intervento di manutenzione.

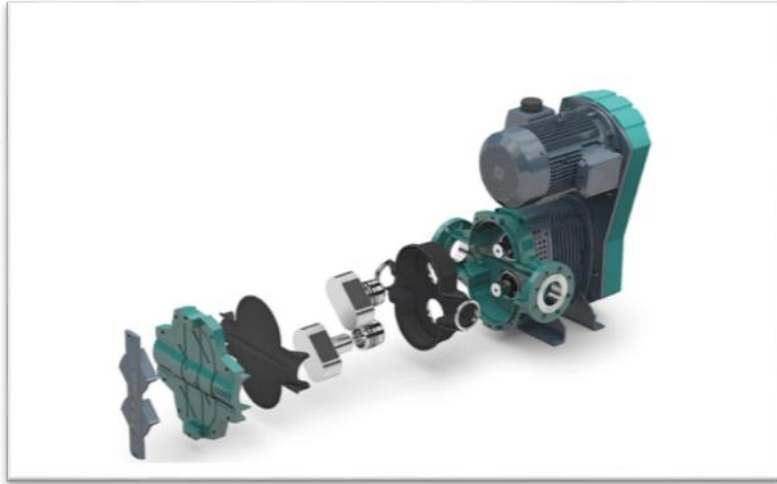


Figura 27

Caratteristica predominante di questa pompa è la semplicità dei componenti che permette una rapida manutenzione. Caratteristica che è in analogia con ITEG siccome lo smontaggio di esso è altrettanto semplice: una volta svitati i pochi bulloni che collegano lo statore alle testate la macchina è smontata. Si è detto che le pompe a lobi prese in esame offrono un'elaborazione del fluido continua e delicata, caratteristica che offre anche ITEG, riuscendo inoltre ad essere più delicato di queste pompe non generando effetti di taglio che danneggiano il fluido come succede nelle pompe a lobi (anche se in maniera ridotta per le forme tondeggianti dei lobi). Ovviamente, mettendo a confronto la zona di elaborazione del fluido in pompe a lobi in commercio e in ITEG si nota immediatamente il maggiore spazio occupato da parte del sistema totale di queste pompe rispetto a ITEG.

Sul sito lewa.it si trovano svariate tipologie di pompe dosatrici per il settore alimentare, tra le quali si prende in analisi una pompa dosatrice a pistone. La maggior parte delle pompe dosatrici in commercio sono con tecnologia a membrana, per ottimizzare la precisione del dosaggio, ma questa tipologia di pompa è piuttosto onerosa e non sempre è di fondamentale utilizzo. Per il dosaggio dei fluidi meno critici si utilizza la pompa dosatrice a pistoni. Compattezza ed economicità sono le sue caratteristiche predominanti. Essa può essere equipaggiata con più teste pompanti se necessario, tutte collegate allo stesso motore con organi di trasmissione. Tutte le parti di questa pompa a contatto con il fluido sono realizzate con materiali di alta qualità, come ad esempio i pistoni realizzati in ossido ceramico.



Figura 28

Se venisse utilizzato ITEG come pompa dosatrice, esso sarebbe dimensionato con rotore avente diametro pari alla tubazione del fluido elaborato. Vedendo l'immagine sovrastante in cui il fluido scorre solamente a contatto con l'estremità del pistone, si intuisce immediatamente lo spazio risparmiato utilizzando ITEG, ma soprattutto il risparmio nel dover comprare una pompa di dimensioni notevolmente ridotte rispetto a quella in immagine. Oltretutto ITEG non presenta né un motore né gli organi di trasmissione relativi ad esso che ne comportano sicuramente una manutenzione, ma anche una perdita energetica legata ai rendimenti.

Come ultimo esempio, vediamo una pompa centrifuga, trovata sul sito csf.it. La pompa centrifuga a girante periferica, realizzata in acciaio inox, grazie al particolare design della girante e all'assenza di pulsazioni, è particolarmente adatta per il trasferimento senza recare particolari danni di liquidi puliti, non abrasivi, e senza solidi in sospensione nell'industria alimentare. Questa pompa è realizzata in materiali conformi con le normative, che possono entrare a contatto con gli alimenti senza provocarne il degrado in nessun modo. Il suo range di utilizzo è per prevalenze che vanno da un fattore medio ad elevato (100 m), però con portate piuttosto esigue (6 m³/h). Il suo punto di forza è sicuramente l'aspetto economico. Infatti, pompe centrifughe semplici costruttivamente come questa, possono avere un prezzo all'incirca di 300 euro.



Figura 29

ITEG può essere sostituito a pompe centrifughe che hanno il compito di trasporto del liquido. Anch'esso è vantaggioso economicamente, sia per la semplicità meccanica che possiede, sia per la non fruizione di un motore nel suo utilizzo, cosicché la maggior parte del costo di I-TEG sia concentrato sullo stampaggio 3D dei pochi componenti meccanici e sull'acquisto di magneti al neodimio. Inoltre, I-TEG ha sicuramente un range di portata più ampio in cui può operare, ottenuto variando semplicemente la dimensione del rotore e il numero di giri di esso. Anche in questo caso si nota l'enormità della macchina rispetto alla semplice girante in cui è elaborato il fluido ed avviene lo scambio energetico, fatto sconveniente rispetto ad I-TEG dato il suo esiguo spazio occupato.

Di seguito con una tabella si riassumono i possibili vantaggi di I-TEG rispetto a pompe in commercio

POMPE IN COMMERCIO	ITEG
Pompe monovite	<ul style="list-style-type: none"> · minor ingombro · distribuzione più omogenea della pressione al fluido da parte dei condotti · minor azione tagliante · assenza di trasmissioni
Pompe a lobi	<ul style="list-style-type: none"> · minor ingombro · minor azione tagliante · assenza di trasmissioni
Pompe dosatrici	<ul style="list-style-type: none"> · minor ingombro · risparmio di materiale

	<ul style="list-style-type: none">· assenza di trasmissioni
Pompe centrifughe	<ul style="list-style-type: none">· minor ingombro· rendimenti più performanti· maggior adattabilità di progetto

Capitolo 8 – Conclusioni

Questa tesi vuole far emergere le potenzialità che ITEG può raggiungere se ben progettato. Potenzialità che lo renderebbero un'ottima alternativa alle macchine simili tutt'oggi sul mercato. La duttilità di questo dispositivo, data dall'adattabilità di progetto è sicuramente uno dei maggiori punti di forza che permette a ITEG di poter essere utilizzato nella maggior parte dei processi che richiedono una macchina idraulica. Grazie alla sua realizzazione mediante stampa 3D possiamo scegliere per la composizione di ITEG materiali altamente tecnologici aventi elevate caratteristiche meccaniche ma allo stesso tempo piuttosto economici. Oltre a poter assumere caratteristiche dimensionali irraggiungibili senza la stampa 3D; e con essa può essere realizzato in breve tempo e senza materiali di scarto, generando un primo aspetto di risparmio economico. Altri aspetti economici a favore di ITEG sono: sicuramente la ridotta manutenzione che richiede, non presentando elementi strutturali come giunti o trasmissioni; il facile montaggio e smontaggio, che avviene semplicemente attraverso i bulloni che collegano lo statore alle testate (e quindi senza l'ausilio di tecnici specializzati); non meno importante è l'aspetto energetico del dispositivo, che presuppone un risparmio di energia, e quindi di costi, grazie agli elevati rendimenti. Importantissima è anche l'omogeneità con cui il rotore scambia energia con il fluido: se in molte delle pompe che abbiamo visto in tesi, la superficie di scambio energetico tra rotore e fluido era ridotta, comportando anche problemi di omogeneità, in ITEG la superficie di scambio è molto ampia, siccome è essa stessa la superficie interna dei condotti in cui transita il fluido. Nella seguente immagine si vede il rotore sezionato proprio per far emergere la superficie di scambio all'interno di esso.

Riassumendo, le caratteristiche vantaggiose in dotazione a ITEG sono: adattabilità di progetto, semplicità costruttiva, risparmio energetico, risparmio economico.

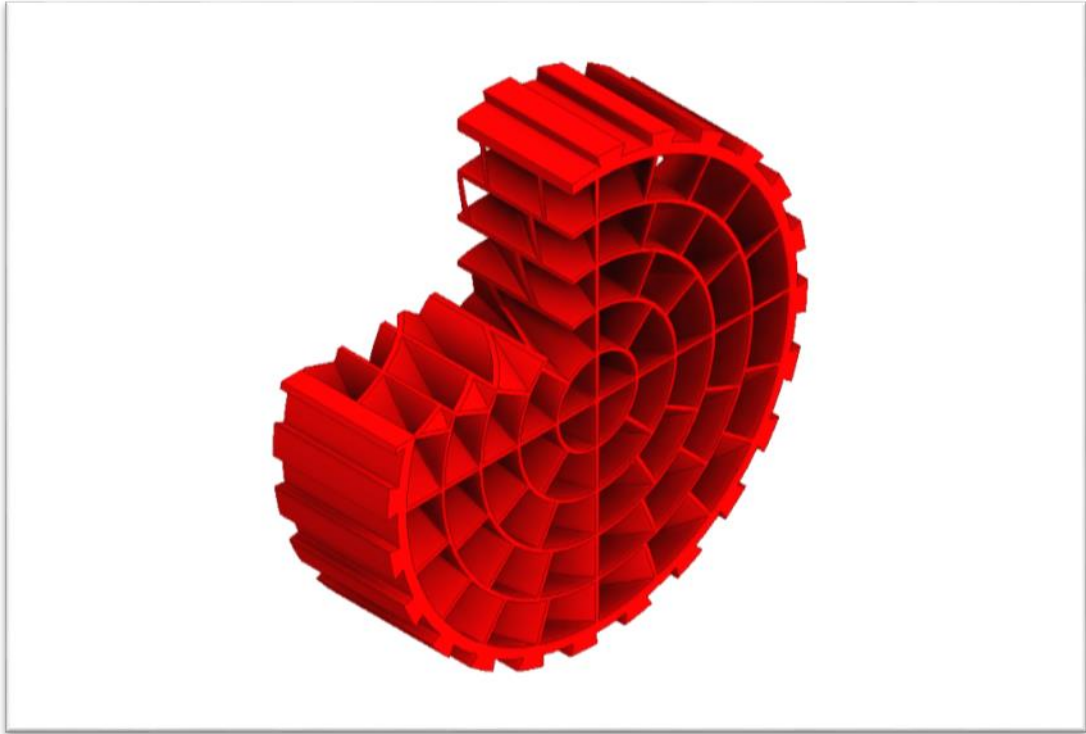


Figura 30

Tutti questi aspetti rendono ITER una macchina senza eguali, conclusione frutto del confronto della stessa con altri sistemi aventi le stesse funzioni. Se tutta la teoria scientifica riguardante ITER dovesse essere comprovata dall'esperienza sul campo, è fuori discussione il successo che questo dispositivo potrà ottenere.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA:

- Macchine, macchine idrauliche. Farnè. Synopsis.
- Ingegneria dell'industria agroalimentare. Friso. Cleup.
- Manuale dell'ingegnere. Nuovo Colombo. Hoepli.
- Fisica per scienze ed ingegneria. Serway, Jewett. Edises.
- Appunti di meccanica applicata alle macchine. Mimmi. Synopsis.
- www.supermagnete.it
- calamite.org
- edutecnica.it
- www.cmf.it
- www.pcm.eu
- www.rbs-srl.it
- pumps.netzsch.com
- www.lewa.it
- csf.it