



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE

TITOLO

Progettazione di un separatore gravimetrico e di un impianto per il trasporto e la
miscelazione di miscele e loro possibile utilizzo in campo industriale e nell'ambito delle
energie rinnovabili

Relazione discussa in sede di esame finale
dal candidato: Alessandro Moramarco

Docente tutore: Prof. Stefano Farnè
Correlatore: Dott. Vito Lavanga

A.A. 2018/2019

Indice

Capitolo 1: <u>introduzione e ricerca bibliografica</u>	4
1.1 Processo di miscelazione	5
1.1.2 Scale di miscelazione	5
1.1.3 Classificazione dei miscelatori	7
1.1.3.1 Miscelatori statici	8
1.1.3.2 Miscelatori dinamici	10
1.2 Processo di separazione	17
1.2.2 Separatori gravimetrici	18
1.2.2.1 Separatore gravimetrico trifase Gas-Petrolio-Acqua	20
1.2.3 Utilizzo simulazione CFD	24
Capitolo 2: <u>funzionamento e modelli matematici</u>	
2.1 Funzionamento e Modello matematico GSMF	29
2.1.2 Dimensionamento dei pacchi di honeycomb	30
2.1.3 Forma e dimensioni dei cavedi	32
2.1.4 Rappresentazione dei carichi GSMF	33
2.2 Funzionamento e Modello matematico MHLM	
2.2.2 Perdite e potenza	39
2.2.3 Caratteristiche pompa ITEG	41
2.2.4 Efficienza energetica e della miscelazione	43
2.2.5 Rappresentazione dei carichi MHLM	43

Capitolo 3: Applicazioni e confronto con dispositivi simili

3.1 Applicazione di MHLM e GSMF in un mini-impianto biogas MBGC	46
3.1.2 La digestione anaerobica	46
3.1.3 Il mini-impianto biogas continuo MBGC (Mini BioGas Continuous)	47
3.1.4 MLHM nel mini-impianto MBGC	49
3.1.4.1 Miscelatori comunemente utilizzati nei digestori anaerobici	54
3.1.5 GSMF nel mini-impianto MBGC	55
3.2 Cattura di CO ₂ da insediamenti antropici e processi di combustione	58
3.2.2 Configurazioni di processo della CCS (Carbon dioxide Capture and Storage)	58
3.2.3 Syngas	61
3.3 Cattura di CO ₂ dall'aria	64
3.3.1 GSMF per catturare CO ₂ dall'aria	65
3.3.2 Acidificazione degli oceani per catturare CO ₂ dall'aria	66

Capitolo 4 : Conclusioni

Riferimenti bibliografici	69
---------------------------	----

1. Capitolo 1: introduzione e ricerca bibliografica

I sistemi Mixer Homogeneous Local in Media (*MHLM*) e Gravity Separation Mixture Fluid (*GSMF*), sono due dispositivi ideati e già brevettati dal Professor Stefano Farnè e dal Dott. Vito Lavanga.

Il primo dispositivo permette di miscelare una miscela fluida aumentandone la omogeneità e uniformità lungo superfici con profilo voluto. Il più grande vantaggio apportato da tale meccanismo è la possibilità di effettuare una miscelazione in modo localizzato e non interessando l'intero volume di fluido.

Esso è costituito da un impianto semplice e non ingombrante, soprattutto non costoso perché formato da elementi facilmente trovabili sul mercato, costituito da due tubi drenanti collegati da un circolatore e sfrutta la tecnica idraulica del "ritorno inverso", ovvero una tecnica che grazie alla caratteristica disposizione dei tubi, con entrate ed uscite poste in maniera simmetrica e inversa, riesce a garantire una distribuzione simmetrica e uniforme dei carichi che agevola il movimento del fluido e ne migliora l'efficienza. La pompa di circolazione, necessaria alla movimentazione del fluido e alla sua miscelazione, utilizzata in questa tesi è una pompa ITEG, un altro brevetto del Professor Stefano Farnè e del Dott. Vito Lavanga. Essa per funzionare utilizza un campo magnetico tra statore e rotore, che rappresenta la girante, e quest'ultima è progettata in modo tale che ci sia la maggior capacità di adescamento del fluido e che non ci sia potenza persa per il moto di taglio impresso dalle pale, delle classiche giranti, al fluido.

Il secondo dispositivo invece, permette di ottenere lo scopo inverso rispetto a quello del primo brevetto. Esso consente di separare una miscela nelle sue diverse fasi a peso specifico differente, sfruttando lo stazionamento del fluido negli spazi creati da ciascuno dei due pacchi di honeycomb presenti che, oltre ad aumentare la superficie utile alla separazione della miscela, fornisce lo spazio verticale utile ad eliminare i moti orizzontali che renderebbero vano il processo di separazione gravimetrica. Il flusso necessario al passaggio all'interno del dispositivo è garantito da tubi drenanti di entrata, e di uscita dalla quale estrarre le diverse fasi della miscela, disposti in assetto per ritorno inverso tridimensionale.

I due processi interessati da questi due dispositivi, miscelazione e separazione, sono fondamentali in molti ambiti dell'industria, dall'agroalimentare, alla depurazione dei reflui urbani o nei processi petroliferi.

1.1 Il processo di miscelazione

Il processo di miscelazione è un processo molto comune in svariati processi industriali dall'ambito della produzione di alimenti, al trattamento dei reflui urbani. È soprattutto rilevante l'esigenza di sistemi per la miscelazione di sostanze fluide (liquide e/o gassose) funzionali per accelerare i processi chimici o fisici previsti oppure semplicemente per omogeneizzarle o mantenere in sospensione particelle di diverse densità e fasi rispetto al substrato. Un esempio in cui la miscelazione del fluido di lavoro è importante possono essere gli impianti di digestione anaerobica, in cui vengono ricavati vari prodotti, come acqua, sali utilizzati come fertilizzanti e biogas dalla digestione in assenza di ossigeno di rifiuti organici, e in cui è fondamentale l'omogeneità della miscela per alcune delle sue reazioni chimiche.

I dispositivi che effettuano una miscelazione di miscele fluide sfruttano la creazione di movimento e turbolenze per far sì che le diverse fasi componenti la miscela spossano venire in contatto e distribuirsi nel substrato in maniera uniforme e omogenea. Questa movimentazione del fluido tende a diminuire le dimensioni delle particelle della fase dispersa rendendo la miscela più stabile, ostacolando la naturale tendenza della miscela a separarsi per gravità.

1.1.2 Scale di Miscelazione

La miscelazione, come fenomeno fisico, è un processo complesso da studiare e analizzare. Per una comprensione più profonda, è inevitabile distinguere e descrivere alcune fasi più semplici di miscelazione, vale a dire macromixing, mesomixing e micromixing illustrate nella seguente figura. (Ghanem, Lemenand, Della Valle, Peerhossaini, 2014)

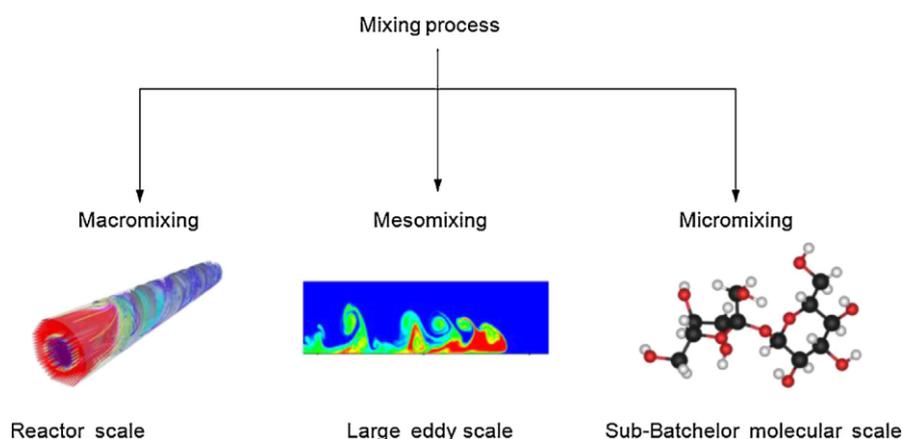


Figura 1: scale di miscelazione

- Macromixing.

La miscelazione su scala dell'intero dispositivo/serbatoio si chiama "macromixing". Questo determina le concentrazioni nell'ambiente di lavoro collegando le particelle fluide nel dominio del flusso. Il processo di miscelazione dipende direttamente dall'efficienza di trasferimento del flusso "medio" su diverse scale. Il macromixing rappresenta la capacità dispersiva del flusso sulla scala del volume messo a disposizione dal dispositivo ed è generalmente caratterizzato mediante il metodo di distribuzione del tempo di residenza (RTD) come segno dell'uniformità del campo di velocità. Infatti, l'RTD è direttamente correlato al movimento globale del flusso poiché rappresenta nuovamente il tempo impiegato dalle particelle di fluido per migrare dall'ingresso del dispositivo all'uscita. Questo movimento su larga scala, causato dalla velocità media del flusso, guida le particelle fluide tra le regioni alto e bassa turbolenza nel volume del miscelatore, determinando il trasferimento convettivo su larga scala chiamato macromixing. Il macromixing quindi può essere modificato generando un trasferimento convettivo radiale, per esempio creano vortici longitudinali (generatori di vortici) o prevedendo deflettori che perturbano il percorso del fluido miscelandolo.

- Mesomixing

Il mesomixing, rappresenta la scala intermedia, identificabile tramite lo scambio turbolento su larga scala tra l'alimentazione "fresca" e i suoi dintorni governati dalle fluttuazioni turbolente. Una reazione chimica rapida è solitamente localizzata vicino al punto di alimentazione, formando una cresta di flusso di alimentazione nel substrato, (vedere figura sopra). Essa identifica una scala intermedia tra la scala di micromixing e quella del sistema o del serbatoio. L'evoluzione spaziale della cresta di alimentazione può essere identificata con il processo di diffusione turbolenta. Un altro aspetto del mesomixing è legato al processo inerziale-convettivo di disintegrazione dei grandi vortici. La miscelazione per disintegrazione inerziale-convettiva di grandi vortici procede senza alcun effetto diretto della miscelazione molecolare. Tuttavia, vi è un effetto della miscelazione inerziale-convettiva sul processo di micromix. La completa comprensione e descrizione del mesomix non è un compito semplice e per questo sono stati sviluppati parecchi modelli che si propongono lo scopo di modellizzare in modo più realistico possibile la formazione e disintegrazione dei vortici che sono presenti in questa scala di miscelazione. Essi considerano vari parametri quali l'energia cinetica turbolenta k , la scala di lunghezza delle fluttuazioni turbolente L e la loro combinazione nella diffusività turbolenta D_t . Ma dipendono anche dalle condizioni operative specifiche come il diametro del tubo, il rapporto tra la velocità di flusso dell'alimentazione e la velocità media del flusso che circonda il punto di alimentazione ed eventuale rimescolamento nel tubo di alimentazione.

Uno dei modi più semplici per esprimere le caratteristiche essenziali della miscelazione è quello di collegarlo all'RMS delle fluttuazioni di velocità.

- Micromixing

Il micromixing, l'ultimo degli stadi di miscelazione, consiste nella deformazione viscosa-convettiva di elementi fluidi che accelera la riduzione della dimensione degli elementi aggregati fino alla scala di diffusione. La selettività delle reazioni chimiche dipende dal micromixing: come si mescolano i reagenti nella scala molecolare. Questo meccanismo comporta la deformazione dei vortici di micro-scala di Kolmogorov (Batchelor, 1953) ed è il processo limitante nella riduzione dei gradienti di concentrazione locali. Può essere caratterizzato dal tempo di micromixing direttamente correlato al tasso di dissipazione della turbolenza energetica. Seguendo la teoria di Hinze e Kolmogorov, che si basa sull'idea della cascata di energia, la rottura della bolla di fase dispersa di un flusso multifase è anche caratterizzata dal tasso di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta. Pertanto, un aumento di questo tasso di dissipazione favorisce il processo di micromixing, migliorando la selettività di reazioni chimiche veloci e riducendo anche la dimensione massima delle bolle disperse nei flussi multifase.

1.1.3 Classificazione dei miscelatori

In prima istanza, i miscelatori vengono differenziati in base al tipo di azionamento dell'organo che effettua la miscelazione.

Più in particolare si parla di

- *miscelatore statico*, ovvero, un'apparecchiatura utilizzata per miscelare tra di loro due correnti fluide (in genere liquidi) senza l'ausilio di componenti movimentate. L'energia richiesta per la miscelazione statica viene fornita dal movimento degli stessi fluidi, spinti da gravità, pompe o soffianti.

Un'unità di miscelazione statica può essere infatti formata da una serie di elementi miscelanti inseriti in una condotta, secondo la direzione del flusso. Essi possono avere svariate forme: in genere formano delle strutture variamente "intrecciate" oppure elicoidali, Fig. 2. Le due correnti fluide convogliate nella tubazione, incontrando questi elementi fissi, subiscono delle variazioni di direzione repentine e vengono ad incontrarsi tra di loro, miscelandosi (Paul, Atiemo-Obeng e Kresta, 2004). Inoltre, possono essere assimilati ai miscelatori statici anche quelli composte da tubazioni in cui il fluido scorrendo, sempre grazie all'ausilio di pompe o simili, si miscela grazie alle proprietà diffusive del fluido;

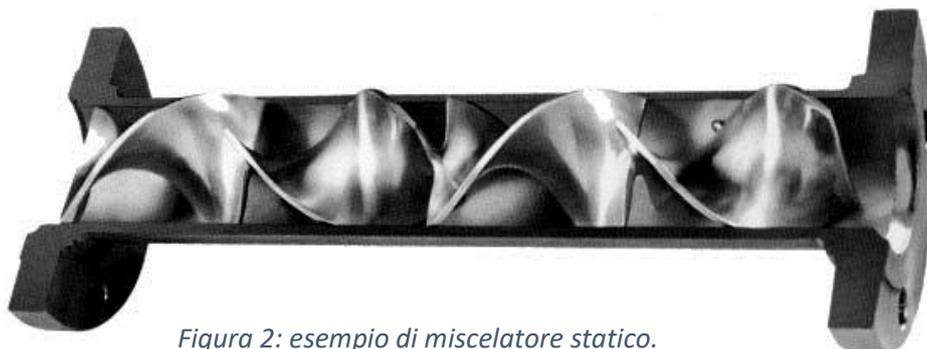


Figura 2: esempio di miscelatore statico.

- *miscelatore dinamico*, invece è un dispositivo che presenta un organo mobile all' suo interno (turbine o girante con palette) che tramite la turbolenza creata nel fluido dal loro movimento miscelano le sostanze.

Si possono riconoscere apparecchiature come gli agitatori a elica o a palette rotanti e gli agitatori a turbina, con o senza insufflamento d'aria.

Questi dispositivi vengono di regola utilizzati per processi discontinui oppure, nel caso di trattamento acqua, in bacini aperti; raramente nelle condotte in pressione, in cui è più adatto un miscelatore statico. I miscelatori dinamici forniscono una buona dissipazione di energia vicino alle pale o ai diffusori, ma via via che ci si allontana da questi, il rendimento si abbassa sensibilmente.

- Nel caso di fluidi in regime turbolento altamente miscibili (è il caso di molti gas) è sufficiente, per realizzare la miscelazione, una giunzione a T.

1.1.3.1 *Miscelatori statici*

Un miscelatore statico può essere un tubo o canale cavo con una specifica costruzione geometrica che influenza la struttura del flusso in modo da promuovere flussi trasversali secondari che migliorano il trasferimento di massa e calore nella sezione trasversale.

Un altro tipo di concetto di miscelatore statico è la configurazione con inserto, la cui struttura tipica è una serie di inserti fissi di varie dimensioni e geometrie che possono essere installati in tubi, canali o condotti. Lo scopo di questi elementi è quello di ridistribuire il fluido nelle direzioni trasversali al flusso principale, ovvero le direzioni radiali e tangenziali. I miscelatori statici dividono e distribuiscono le linee di flusso utilizzando solo l'energia di pompaggio del fluido che vi scorre all'interno. Gli inserti possono essere personalizzati e ottimizzati per applicazioni e regimi di flusso particolari.



Figura 3: esempi di inserti per miscelatori statici

I miscelatori statici non sono stati ampiamente utilizzati nel processo industriale prima degli anni '70, sebbene alcuni brevetti siano molto più antichi. Infatti, esiste un brevetto risalente al 1874, considerato il più antico, che descrive un miscelatore statico a singolo strato e multistrato usato per mescolare combustibile gassoso con aria (Sutherland, 1874).

Esistono più di 2000 brevetti e 8000 articoli in letteratura che descrivono i miscelatori statici e le loro applicazioni. Al giorno d'oggi, i miscelatori statici rappresentano apparecchiature standard nell'industria di processo. Vengono utilizzati in processi continui in alternativa all'agitazione convenzionale poiché possono essere raggiunte prestazioni simili e talvolta migliori con costi inferiori. I miscelatori statici presentano in genere un consumo di energia più basso e richiedono una manutenzione ridotta poiché non includono parti mobili. Richiedono uno spazio più ridotto, un costo inferiore per le attrezzature e nessuna alimentazione energetica se non per il pompaggio. Possono fornire un'omogeneizzazione del substrato con un tempo di permanenza minimo e possono essere fabbricati con la maggior parte dei materiali di costruzione in modo da soddisfare le varie necessità e adattarsi a condizioni di lavoro difficili. Tuttavia, i recipienti agitati rimangono potenti strumenti nell'industria di processo e trovano applicazioni soprattutto per la lavorazione di prodotti altamente viscosi.

L'uso più comune di miscelatori statici nell'industria è nella miscelazione di fluidi miscibili. Due o più fluidi o una miscela reagente vengono miscelati per ridurre o persino eliminare i gradienti di concentrazione, ad esempio per incorporare gli enzimi necessari nel latte per realizzare lo yogurt. I miscelatori statici inoltre possono essere utilizzati per la miscelazione di solidi, in cui sono alimentati per gravità, e per la miscelazione di solidi in particelle come chicchi di cereali, miscele di pane e dolci e componenti in calcestruzzo. La dispersione di gas / liquidi come l'ozonizzazione di acqua potabile rappresenta una comune applicazione nell'industria moderna.

Le applicazioni di miscelatori statici nell'industria alimentare sono numerose. I prodotti alimentari sono in genere altamente viscosi e fluidi non-newtoniani e di solito vengono elaborati nel regime laminare. Dalla letteratura si evince che i miscelatori statici sono usati per mescolare succhi, oli, bevande, cioccolato, bevande al latte o salse e molti altri. Le loro superfici sono generalmente elettrolucidate e sono per lo più realizzate in acciaio inossidabile AISI 316 e alloggiare in tubi sanitari di materiali simili.

Anche il trattamento di chiarificazione dell'acqua e il trattamento dei fanghi possono fare uso di questi dispositivi. La torbidità in acqua potabile è causata da particelle solide sospese a basse concentrazioni. I miscelatori statici vengono usati per disperdere un agente flocculante, come l'alginato, come primo passo di chiarificazione. In questo caso i flussi sono nel regime turbolento, ma una forza di taglio eccessiva, come potrebbe essere causato dall'agitazione meccanica, può danneggiare gli elementi flocculati, portando ad un elevato consumo dell'agente flocculante e perdendo dunque la sua efficienza.

I miscelatori statici sono anche buoni strumenti per miscelare gas e combustibili liquidi pre-vaporizzati prima di una reazione. In effetti, questo è il primo uso registrato di un mixer statico (Sutherland, 1874). Nonostante la diffusività dei gas, le miscele non raggiungono immediatamente l'omogeneità e potrebbero essere necessarie ulteriori miscelazioni per una buona combustione. Baker (1991) ha discusso del loro uso nella produzione di acido nitrico. Miscelatori statici posti a

monte di un reattore per miscelare aria con ammoniaca aumentano la resa di acido nitrico ed eliminano i punti caldi che possono danneggiare il costoso catalizzatore di platino.

Molte reazioni chimiche che coinvolgono gas possono essere migliorate usando miscelatori statici, come quelli per la produzione di cloruro di vinile, dicloruro di etilene, stirene, xilene e anidride maleica (Baker, 1991).

1.1.3.2 *Miscelatori dinamici*

In letteratura sono molte le tipologie e i modelli di miscelatori dinamici utilizzati nelle più diverse operazioni e nei più svariati ambiti. Le tipologie che prevedono un sistema di pale per effettuare la miscelazione, sono i più comuni e prevedono un serbatoio contenente il fluido da miscelare, in cui viene inserita l'apparecchiatura per effettuare la miscelazione. Il serbatoio è provvisto di un sistema di tenuta, tramite diverse guarnizioni, per il funzionamento a serbatoio chiuso. I componenti preposti alla miscelazione sono formati generalmente da una elica, o comunque un sistema di pale di varie forme, tipologie e materiali in base alle caratteristiche del liquido da miscelare, come la sua viscosità o la sua capacità corrosiva, quindi da un albero che trasferisce il momento torcente all'elica, collegato a sua volta al motore che fornisce l'energia necessaria al processo. Solitamente l'albero gira a una velocità inferiore o uguale a quella del motore per cui spesso è previsto un sistema riduttore costituito da ruote dentate o cinghie. L'albero su cui sono montate le pale e la palettatura stessa sono i componenti più onerosi da dimensionare e su cui si basa la maggior parte dell'efficienza del miscelatore. Spesso i serbatoi contengono degli elementi chiamati deflettori che influiscono sull'efficienza del dispositivo perché inseriscono un aumento della turbolenza del fluido. I materiali di costruzione, sebbene siano solitamente leghe metalliche, dipendono dai processi chimici e dai requisiti operativi.

I miscelatori a palettatura si differenziano in base alla posizione di montaggio rispetto al serbatoio e alla potenza messa in gioco dal motore che rende alcuni miscelatori più adatti ad alcuni processi rispetto ad altri.

- Miscelatori Top-entering

I miscelatori Top-entering, come si evince dal nome sono miscelatori che vengono montati in cima ad un serbatoio. Possono essere di varie dimensioni, i più piccoli sono considerati miscelatori portatili o comunque da laboratorio, non adatti a operazioni industriali. Prevedono per il montaggio dei supporti flangiati o a piedistallo, e morsetti o supporti a piastra girevole per i modelli più piccoli. Inoltre, possono essere montati sia centrati rispetto all'asse verticale del serbatoio, che presenta deflettori lungo la superficie interna, ma anche decentrati o montati ad angolo.

L'albero può essere azionato e collegato direttamente al motore o può essere presente un sistema di riduzione per concordare la velocità del motore a quello dell'albero. I motori utilizzati in questi miscelatori non superano i 7460 W (10 CV) di potenza. La maggior parte dei miscelatori top-entering ha una girante a flusso assiale, come una girante aliscafo o talvolta un'elica marina (Paul, Atiemo-Obeng e Kresta, 2004).

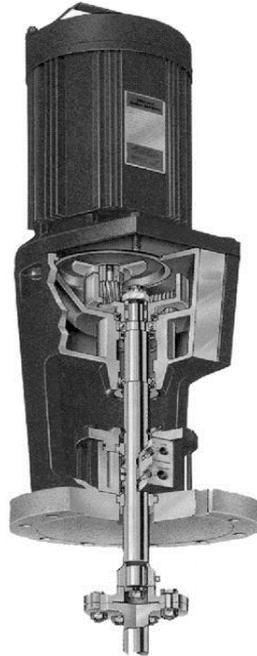


Figura 4: Miscelatore Top-entering

- [Miscelatori a turbina](#)

I miscelatori a turbina sono miscelatori verticali che necessitano di una progettazione più robusta, soprattutto per quanto riguarda l'albero e la palettatura e utilizza motori che forniscono una potenza che varia tra i 746 W e 746000 W (range in cui possono rientrare anche i miscelatori top-entering). Visto l'ampio range di potenze utilizzabili esse possono avere dimensioni anche molto differenti, come visibile dall'immagine di seguito, Fig. 5.

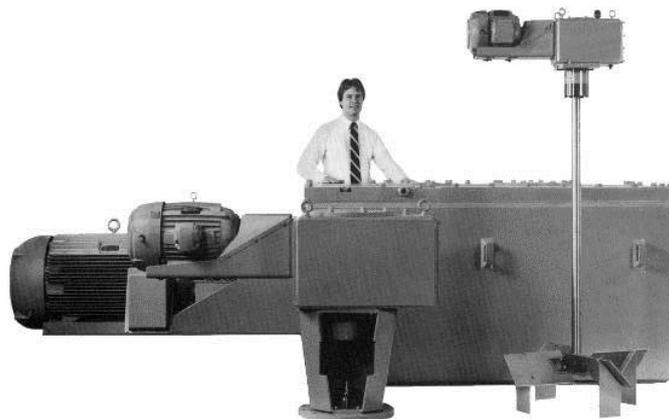


Figura 5: Differenti dimensioni dei miscelatori a turbina

Solitamente sono montati verticalmente in serbatoi cilindrici o bacini o casse rettangolari e sono previsti anch'essi di sistemi di tenuta a guarnizione nel caso di operazioni a serbatoio chiuso. La progettazione dell'albero e del sistema di palettature è fondamentale e critica in miscelatori di questa tipologia soprattutto per le varie potenze possibili da mettere in gioco che rende questo miscelatore versatile per differenti tipi di fluido e per differenti applicazioni (Paul, Atiemo-Obeng e Kresta, 2004).

- [Miscelatori Side-entering](#)

I miscelatori Side-entering, Fig. 4, prevedono il montaggio lateralmente al serbatoio fornendo la possibilità di essere montato sotto il livello del liquido, solitamente al livello del fondo per miscelare anche bassi livelli di composti. Ciò costituisce anche il maggior svantaggio di questi miscelatori. Infatti, essi presentano guarnizioni di tenuta sommerse che in base alla natura del fluido di lavoro possono essere compromesse da azioni chimiche o dalla possibile natura abrasiva del fluido che sottopone la guarnizione a deterioramento per usura. Per questo motivo essi solitamente richiedono una manutenzione piuttosto onerosa e costosa.

D'altro canto, i miscelatori Side-entering presentano vantaggi rispetto alle tipologie sopraccitate, soprattutto dal punto di vista economico, consentendo bassi costi iniziali, l'assenza di supporti di montaggio in cima al serbatoio e l'uso di semplici meccanismi di riduzione visto la velocità elevata delle palettature di questo tipo di miscelatori che solitamente consente di utilizzare il collegamento diretto con l'albero (Paul, Atiemo-Obeng e Kresta, 2004).

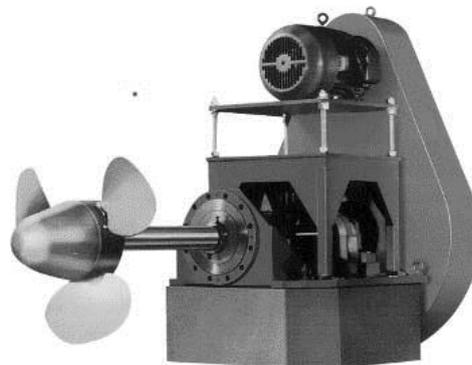


Figura 5: miscelatore Side-entering

- [Miscelatori Bottom-entering](#)

I miscelatori Bottom-entering, Fig. 5, sono miscelatori con le stesse caratteristiche costruttive dei miscelatori a turbina, ma prevedono il montaggio sul fondo del serbatoio. Esso presenta quindi gli stessi svantaggi dei miscelatori Side-entering, per quanto riguarda ad esempio l'aggressività del fluido sulle guarnizioni di tenuta, senza però fornire i vantaggi

che questi ultimi sono in grado di garantire sul lato economico. Vista la loro bassa efficienza rispetto alle altre diverse tipologie di miscelatori il loro utilizzo è limitato ad applicazioni in cui gli altri tipi di montaggio sono impraticabili per forma o geometrie particolari del serbatoio (Paul, Atiemo-Obeng e Kresta, 2004).



Figura 6: miscelatore Bottom-entering

- Miscelatori per alte viscosità

Questi tipi di miscelatori vengono progettati per miscelare fluidi con elevati valori di viscosità, 100 000 cP o superiori, attraverso l'utilizzo di palettature che riducano lo spazio tra le pale e le pareti interne del serbatoio, o lo eliminino totalmente grazie all'utilizzo di flange flessibili. Questa caratteristica porta la dimensione delle giranti a essere molto superiore a quella solitamente usata per i miscelatori a turbina.

Le caratteristiche più importanti dei miscelatori per alte velocità sono la bassa velocità di rotazione e l'elevato momento torcente impresso all'albero, per vincere le forti resistenze viscoso dovuto al fluido. Inoltre, la loro efficienza risente dell'influenza della forma delle palettature che devono essere progettate caso per caso in base al diametro del serbatoio e alla viscosità del fluido. Due esempi di girante possono essere a nastro elicoidale, Fig. 6a, o giranti ad ancora, Fig. 6b. (Paul, Atiemo-Obeng e Kresta, 2004).

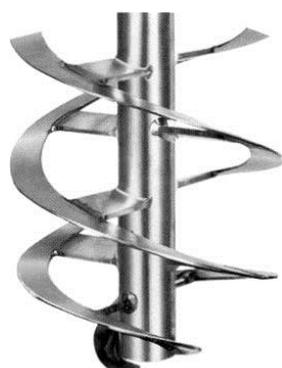


Figura 7a: girante a nastro elicoidale per fluidi viscosi

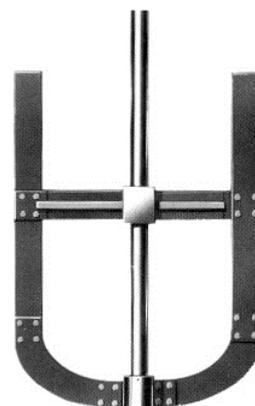


Figura 7b: girante ad ancora per fluidi viscosi

- Miscelatori High-shear

I miscelatori di questa tipologia presentano caratteristiche opposte a quelle appartenenti ai miscelatori per alte viscosità, presentando un diametro della girante molto inferiore rispetto a quello del serbatoio, anche 10-20% rispetto al diametro del contenitore, e opera con elevate velocità di giri, da 1000 a 3600 rpm. La dimensione più piccola della girante, rispetto ai miscelatori esposti in precedenza, ha come scopo quello di ridurre la potenza richiesta al motore per sostenere le alte velocità. Le giranti possono presentarsi come dischi con dentature sporgenti lungo i suoi bordi, Fig. 7a, o di forma cilindrica con fori o asole sulla parte rotante, formando una tipica girante chiamata girante rotore-statore, Fig. 7b. Quando le pale rotanti passano attraverso ciascuna apertura nello statore, tagliano meccanicamente particelle e goccioline, diminuendone le dimensioni e aumentando quindi la stabilità delle fasi nella miscela, ed espellono il materiale ad alta velocità nella miscela circostante. Tanto più velocemente il materiale viene espulso, tanto di più ne viene attirato nella girante che promuove il flusso continuo e la miscelazione rapida.

Pur potendo prevedere il montaggio verticale nel serbatoio, molti miscelatori High-shear sono utilizzati in linea, come fossero delle pompe con le pale capaci di imprimere un alto sforzo di taglio, attraverso il quale il fluido fluisce o viene pompato. Essi quindi lavorano principalmente come miscelatori statici, con un flusso messo in moto da una pompa esterna (Paul, Atiemo-Obeng e Kresta, 2004).

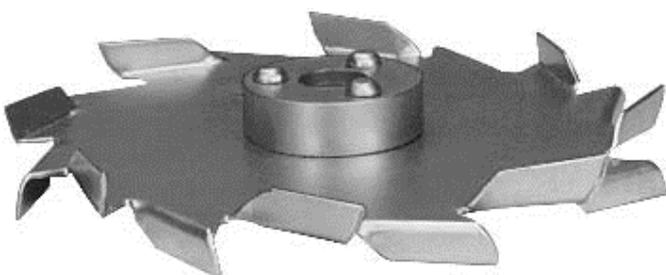


Figura 8a: girante a disco High-shear. È facilmente visibile la dentatura sporgente dai bordi

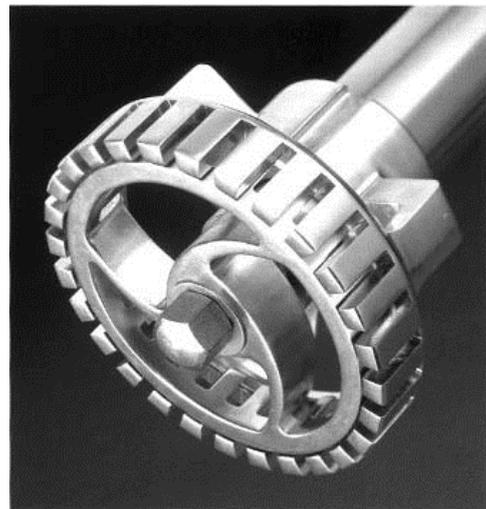


Figura 8b: girante rotore-statore per miscelatore High-shear.

- Miscelatori combinati: Dual-Shaft o Triple Shaft Mixers

Esistono anche miscelatori che combinano le caratteristiche dei diversi miscelatori sopracitati attraverso l'impiego di due alberi distinti e almeno due giranti: la parte per miscelare fluidi ad alta viscosità del miscelatore fornisce il movimento della massa fluida all'interno del serbatoio, in particolare vicino alle sue pareti, e il miscelatore High-shear crea la dispersione, spesso di due fasi, due liquidi o un liquido e solidi. La parte High-shear può anche prevedere entrambe le soluzioni di girante a disco e rotore/statore formando un miscelatore a tre alberi aumentandone il valore della viscosità supportata (Fig. 9). Essi vengono usati soprattutto nel settore agroalimentare per la lavorazione di sciroppi, salse, burro di arachidi e altri.



Figura 9: Triple Shaft Mixers: un albero con girante rotore-statore (a sinistra), uno con palette ad ancora (in centro) e un albero con girante High-shear. Ogni albero è azionato e movimentato indipendentemente dagli altri.

Alcuni di questi dispositivi presentano invece due alberi coassiali con due tipi di giranti, una per fluidi viscosi e l'altra ad alta azione tagliente, che ruotano a velocità diverse, o con uno dei due alberi distinti che oltre a girare attorno al suo asse ruota intorno all'asse del serbatoio, come nei miscelatori planetari. I loro costi, sebbene siano più elevati dei miscelatori specifici ai fluidi miscelati, sono compensati dalla loro versatilità di utilizzo in svariate applicazioni industriali.

Il miscelatore MHLM trattato in questa tesi è un miscelatore che effettua la miscelazione di volumi fluidi tramite una pompa di circolazione, in questa tesi viene utilizzata una pompa ITEG. Esso può essere assimilato a un miscelatore statico, esulando la pompa dalla definizione potendo essere di vario genere e avendo lo scopo di far circolare il fluido attraverso il miscelatore, oltre che ad aumentarne l'azione miscelante.

Rappresenta una grande innovazione nell'ambito della miscelazione industriale perché grazie ai componenti utilizzati, ovvero tubi drenanti facilmente trovabili in commercio, e alla loro disposizione per garantire il ritorno inverso, riesce ad effettuare una miscelazione lungo superfici prestabilite, di profilo piano, circolare, sinusoidale, segmentato, ecc., e in porzioni localizzate del fluido senza coinvolgere e intaccare il totale volume esistente. I dispositivi in commercio non dispongono di questa possibilità e per miscelare solo porzioni di fluido, magari presenti in una certa zona di una vasca o di un serbatoio per mantenere in sospensione sostanze di densità diverse o per agevolare reazioni chimiche, vengono utilizzate palettature che sebbene progettate per miscelare in modo circoscritto, inevitabilmente coinvolgeranno anche una parte del volume circostante abbassando sensibilmente l'efficienza del miscelatore e del processo voluto.

Inoltre, disponendo i tubi drenanti di uscita e di entrata in modo che aspiri fluido da una parte e lo restituisca miscelato dall'altra, MHLM può creare un flusso di fluido miscelato uniformemente, combinando così la capacità di miscelazione a quella di azionamento e movimentazione del fluido lungo direzioni specifiche.

L'utilizzo della pompa ITEG, grazie alla caratteristica di essere poco ingombrante, infatti non richiede un motore esterno per il funzionamento, e alle ridotte dimensioni in relazione alle portate smaltite, fornisce la possibilità di installare il dispositivo direttamente dentro il volume della miscela senza incorrere in difficoltà di montaggio o nella corrosione e usura delle guarnizioni, assenti in ITEG. Inoltre, ITEG preserva dalla contaminazione di oli e parti meccaniche in movimento.

1.2 Il processo di separazione

Il processo di separazione di miscele fluide è molto diffuso nell'industria e in svariati suoi processi. Esso porta alla separazione di miscele in singole sostanze, o di insiemi omogenei di componenti delle materie prime, in base alle loro caratteristiche fisiche o chimico-fisiche. Le operazioni di separazione si contrappongono alla naturale tendenza delle sostanze di mescolarsi intimamente e spontaneamente tra loro che costituisce una tipica manifestazione del secondo principio della termodinamica. La loro rilevanza è visibile anche nel settore ecologico poiché vengono applicati nella rimozione degli inquinanti contenuti in una corrente liquida o gassosa.

Appartengono a questo gruppo di tecniche operative le operazioni di filtrazione, centrifugazione, decantazione, flottazione, estrazione con solventi liquido-liquido o liquido-solido e distillazione.

- Filtrazione con membrane: È l'operazione unitaria mediante la quale acqua e alcuni soluti in una soluzione sono selettivamente rimossi attraverso membrane finissime semipermeabili (filtrazione tangenziale). I metodi principali per concentrare con membrane sono l'ultrafiltrazione e l'osmosi inversa.
- Centrifugazione: È la separazione di miscugli eterogenei (liquido-liquido, liquido-solido) mediante l'applicazione di una forza centrifuga. Il principio fisico utilizzato si basa sull'accelerazione della forza di gravità tramite la rotazione rapida di un tamburo rotante.
- Decantazione: È un'operazione unitaria basata sulla separazione di un solido da un liquido o di due liquidi non miscibili tra loro grazie alla forza di gravità (sedimentazione o affioramento).
- Flottazione (o flottaggio): È un'operazione che si effettua insufflando aria all'interno di un recipiente contenente un miscuglio solido o colloidale in sospensione, i componenti con maggiore aerofilia vengono trascinati verso la superficie della vasca (formazione di schiuma), mentre quelli con maggiore bagnabilità (idrofile) precipitano sul fondo (formazione di "torbida").
- Estrazione con solventi liquido-liquido: È un'operazione unitaria che consente di separare due liquidi miscibili tra loro utilizzando un solvente che preferibilmente dissolve uno dei due. L'estrazione di una sostanza liquida da una miscela liquida è detta "estrazione in fase liquida". Nell'industria alimentare si applica per raffinare gli oli di semi grezzi o per estrarre aromi dai vegetali.
- Distillazione: È un sistema di separazione di un liquido da una miscela di liquidi, sfruttando le loro differenti temperature di ebollizione. La distillazione separa più facilmente due liquidi quanto più è diverso il loro punto di ebollizione. Attualmente gli impianti, o colonne,

di distillazione hanno raggiunto dimensioni notevoli che si possono osservare per esempio nelle raffinerie in cui vengono prodotti carburanti che alimentano la forte esigenza di energia della nostra società.

Di questi processi, utilizzano una differenza di densità o peso specifico, come nel caso di GSMF, il processo di centrifugazione e di decantazione/sedimentazione.

1.2.2 Separatori gravimetrici

La separazione gravimetrica è una delle tecniche di separazione più diffuse. Infatti esso sfrutta l'utilizzo della gravità, ovunque presente sulla Terra senza l'ausilio di azioni esterne, che rende il processo estremamente economico. Tuttavia, generalmente può richiedere elevati tempi di ritenzione della miscela all'interno dei dispositivi per rendere efficace la separazione.

Le apparecchiature che effettuano una separazione delle fasi sfruttando la capacità di sedimentazione della miscela per via della differenza di peso specifico si differenziano, in primo luogo, in

- *Separatori continui*: in cui la fuoriuscita delle diverse fasi, e quindi l'entrata della miscela da separare non produce un fermo macchina, o comunque forma un flusso continuo e non necessita di valvole di controllo per la fuoriuscita delle diverse fasi separate;

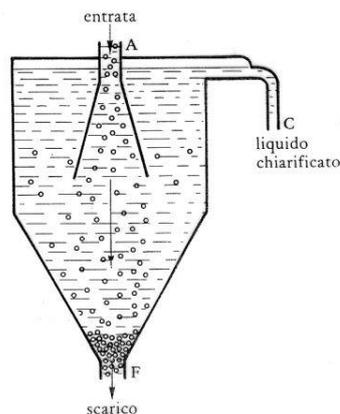


Figura 10: separatore gravimetrico continuo

- *Separatori discontinui (imbuto separatore)*: in cui l'immissione di miscela da separare e la fuoriuscita delle diverse fasi non avviene in modo continuativo ma periodicamente, per esempio dopo aver fatto passare il tempo di sedimentazione necessario affinché la miscela si separi in un decantatore, ed è consentito e controllato da valvole applicate ai tubi di uscita.

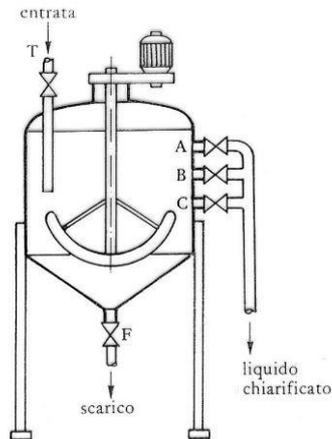


Figura 11: separatore gravimetrico discontinuo

Un'ulteriore differenziazione viene effettuata considerando il numero di fasi che riescono ad isolare, esistono infatti separatori per miscele bifase o trifase.

- I *separatori bifase* sono utilizzati per esempio per eliminare quantità di gas intrappolate nel flusso di idrocarburi durante processi petroliferi, per separare due sostanze fluide immiscibili, come sostanze oleose emulsionate a sostanze acquose o per separare due gas aventi pesi specifici diversi, come anidride carbonica e metano prodotti dalla digestione di biomasse.

In base alla differenza di peso specifico esistente tra le due fasi da separare, esistono separatori di miscele bifase verticali, orizzontali o sferici.

I separatori verticali sono utilizzati nei processi in cui il rapporto tra gas e liquido sono bassi oppure per rimuovere sabbia o sedimenti solidi all'interno della miscela. Hanno una bassa efficienza di separazione, soprattutto rispetto a quelli orizzontali, sono costosi da costruire e difficili da installare per via del proprio peso.

Quelli sferici presentano appunto un serbatoio sferico, e sono utilizzate nei piccoli impianti e a pressioni moderate. Essi sono difficili da progettare in modo preciso e offrono limitazioni di spazio che influiscono sull'efficienza. Inoltre, sono i più costosi da costruire, hanno l'efficienza più bassa perseguibile anche se sono i più facili da installare visto la dimensione contenuta.

I separatori gravimetrici orizzontali sono invece i più utilizzati, soprattutto quando il rapporto tra le fasi è alto, per via della più ampia superficie messa a disposizione per la separazione gravimetrica. Si differenziano da quelli verticali anche per la direzione di separazione delle fasi, che per un separatore orizzontale sono perpendicolari al flusso e

non paralleli ad esso come nei dispositivi verticali, che porta solitamente a una maggior purezza delle fasi estratte rispetto ai verticali. In essi il flusso da separare segue un percorso orizzontale durante il quale si separa, e grazie a elementi quali dischi, piatti forati tubi curvati o altri, le diverse fasi raggiungono parti differenti del dispositivo per essere estratti attraverso condotti controllati da valvole.

- *I separatori di miscele trifase* dividono le miscele in tre fasi. Anche essi possono essere verticali, orizzontali o sferici, ma presentano la migliore efficienza e scelta costruttiva se realizzati per un flusso orizzontale. Un' esempio in cui è richiesta una separazione in tre fasi, può essere sempre nell'industria petrolchimica per la separazione di prodotti di raffinazione quali acqua, petrolio e gas. Il funzionamento tra i dispositivi bifase e trifase è pressoché identico, infatti molte volte un separatore bifase è utilizzato in uno trifase per agevolare la separazione di due delle tre fasi (come goccioline di liquido, di dimensione minore a quella separabile dal separatore trifase, rimaste nella fase gassosa) e migliorare l'efficienza del dispositivo.

1.2.2.1 Separatore gravimetrico trifase Gas-Petrolio-Acqua

In letteratura, si evince come la progettazione dei separatori gravimetrici, pur sfruttando principi fisici relativamente semplici e naturali, sia articolata soprattutto per via dei diversi fattori da tenere in considerazione durante la progettazione e la scelta dei criteri costruttivi di tali dispositivi per rendere il processo funzionante ed efficiente.

Inoltre, la separazione gravimetrica, pur essendo un argomento molto analizzato e studiato da vari esperti e ingegneri presenta una forte aleatorietà dei risultati che risentono molto delle condizioni circostanti e del fluido da separare, come minime variazioni di velocità di entrata del flusso o la sua temperatura. Con i recenti sviluppi dei software di simulazione fluidodinamica (CFD) questo fenomeno sta diventando sempre più facilmente comprensibile e soprattutto si possono analizzare diverse casistiche, con dati e configurazioni del dispositivo diversi di volta in volta, per poi capire quale sia la più conveniente scelta progettuale.

Di seguito vi è riportata un'analisi di un separatore gravimetrico trifase Gas-Oli/petroli/idrocarburi-acqua (Fig. 12) che rappresenta un ottimo esempio per capire come il suo funzionamento può risentire facilmente delle diverse scelte progettuali di tali dispositivi (Ahmed, Makwashi e M.Hameed, 2017).

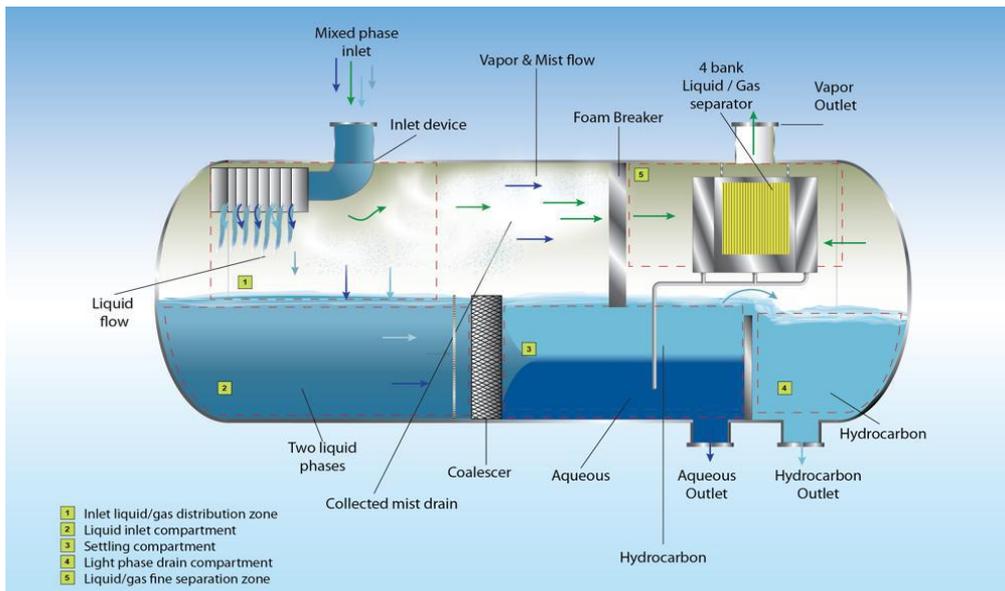


Figura 12: separatore gravimetrico trifase Gas-Petrolio-Acqua

I più comuni separatori di questo tipo presenti sul mercato presentano un serbatoio cilindrico in cui il fluido viene immesso da una estremità attraverso un dispositivo di immissione che può essere di diverse tipologie e forme, tubi a 90° o altri di diversa efficienza, e che presenta, subito dopo la bocca di immissione un deviatore per ridistribuire il fluido e creare un flusso di massa uniforme lungo la direzione del flusso. Esso oltre che a diminuire sostanzialmente la quantità di moto del flusso, per eliminare turbolenze o moti che vanificherebbero la separazione, effettua anche una operazione di pre-separazione. Solitamente sono costituiti da piastre, distributori a palette o a T, coni o dischi, o tubi con differenti angoli di curvatura sui quali impatterà il liquido, perdendo quantità di moto, a differenza del gas, contenente meno energia, che invece fluirà attorno al deviatore verso la sezione di separazione.

Il flusso una volta uscito dal deviatore di entrata inizierà a separarsi per via della gravità e la fase più pesante, ovvero quella contenente le due componenti liquide (acqua e oli), precipiterà verso la zona sul fondo del serbatoio destinata all'accumulo del liquido, sulla area di interfaccia tra liquido e gas. La fase liquida stazionerà nella zona di raccolta del liquido (sul fondo del serbatoio) per un tempo necessario affinché le bolle di gas rimaste nel liquido possano, tramite fenomeni di coalescenza agglomerarsi e raggiungere la zona di interfaccia per liberarsi nella zona della fase gassosa. Questo tempo viene chiamato tempo di ritenzione e nei dispositivi illustrati viene garantito attraverso il controllo del volume di liquido attraverso galleggianti o sbarramenti.

Il liquido allora continuerà il percorso nel dispositivo incontrando un *filtro a coalescenza* in cui la fase oleosa e l'acqua si divideranno, grazie alla coalescenza delle gocce di olio disperse nell'acqua, stratificandosi nel comparto di decantazione per poi essere estratti separatamente a fine percorso dalla parte inferiore del serbatoio.

Parallelamente la fase gassosa, dopo aver percorso un tratto nella zona centrale del serbatoio, in cui le goccioline trattenute dal gas non si separano per il deviatore di immissione si separeranno grazie alla gravità, passerà attraverso un eliminatore di schiuma e poi attraverso un separatore

bifase liquido-gas per eliminare le ultime goccioline in sospensione e uscire come gas dalla bocca di uscita superiore.

La progettazione di questi dispositivi, oltre a parametri geometrici legati alla fattibilità di installazione del dispositivo e del suo funzionamento, deve tenere conto di molti fattori come

- La temperatura di esercizio: questo fattore incide molto sulla scelta del materiale per costruire il serbatoio e i vari componenti che interagiranno con fluido. Solitamente vengono utilizzate costose leghe metalliche per sopportare le alte temperature e le forti pressioni necessarie per la buona riuscita del processo di separazione di fluidi petroliferi. Per esempio, l'aumento della temperatura aumenta la corrosione dell'acciaio al carbonio per mezzo della CO₂ e H₂S, fino a un massimo di 40°C, oltre il quale si ha una graduale diminuzione della corrosione per l'alta resistenza al trasporto dello strato corrosivo all'aumentare della temperatura.
- Le proprietà fisiche del fluido: le proprietà del fluido influenzano in maniera importante l'efficienza del dispositivo e la durata del processo. Fluidi con alta differenza di densità e bassa viscosità richiederanno un tempo di ritenzione minore se comparati a fluidi meno densi.
- Portata dei flussi delle diverse fasi costituenti il fluido: per ottenere un minor tempo di ritenzione all'interno del separatore il fluido immesso deve avere una velocità di immissione elevata. Ciò comporterebbe una diminuzione delle dimensioni delle particelle disperse nel substrato, rendendo difficoltosa la separazione delle fasi, e un aumento considerevole delle dimensioni del dispositivo per evitare il riassorbimento del liquido nella fase gassosa (Elhaj e Adli, 2014).
- Costi (di capitale e operativi): come tutti i tipi di industrie, anche quella petrolifera cerca di ottenere il massimo risultato al minor costo possibile. Per questa ragione i costi sono un aspetto fondamentale durante la progettazione di questi dispositivi, soprattutto per quanto riguarda le dimensioni, la forma e i materiali di costruzione.
- Presenza di impurità e tendenza del fluido a creare schiuma: la presenza di impurità, come sabbia o altre particelle solide grossolane, possono creare gravi problemi al separatore per evitare i quali spesso sono presenti all'interno del dispositivo dei filtri e dei componenti per facilitare la manutenzione e la pulizia (Arnold e Stewart, 2008). Inoltre, molte miscele di idrocarburi presentano una più o meno forte tendenza a creare schiuma e sostanze cerose, perciò solitamente vengono iniettate sostanze chimiche nel processo in modo da prevenire questi problemi che allungherebbero il tempo di ritenzione nel separatore. Spesso vengono anche previsti dei componenti chiamati eliminatori di schiuma per eliminare le sostanze schiumose formatesi senza l'utilizzo di agenti chimici esterni.

In letteratura vengono usati modelli per dimensionare i separatori gravimetrici che si basano principalmente su due teorie, *la teoria di decantazione delle goccioline* (Droplet Settling Theory) e *la teoria del tempo di ritenzione* (Retention Time Theory).

La teoria della separazione delle goccioline (*Droplet Settling Theory*) si basa sul presupposto che una goccia di liquido di una determinata dimensione impiegherà un tempo finito per separarsi dal substrato fluido, percorrendo una distanza nota. Si presume che le particelle/goccioline abbiano una forma sferica e il liquido trascinato tenda a cadere e separarsi dal flusso di gas a causa della gravità. Ogni goccia accelera a causa della sua forza di galleggiamento negativa fino a quando questa forza è uguale alla forza di trascinamento provocata dal flusso immesso. Gradualmente l'accelerazione tende a zero finché la goccia raggiunge la sua velocità terminale. La separazione o trascinamento è determinata da questa velocità. Se la velocità è leggermente inferiore alla velocità di flusso del gas, la goccia verrà trasportata insieme al gas. D'altra parte, se la velocità supera leggermente la velocità del flusso di gas, la goccia si depositerà e si separerà dal gas.

La velocità terminale può essere calcolata con la formula di Stoke, per bassi valori del numero di Reynolds (< 2) ricavata dall'equilibrio delle forze incidenti sulla gocciolina, forze peso e di galleggiamento, e considerando un coefficiente di resistenza $C_d = \frac{24}{Re}$

$$V_t = \frac{g d_p^2 (\rho_l - \rho_g)}{18 \mu_g}$$

Per $Re > 500$ il coefficiente di resistenza non dipende dal numero di Reynolds e risulta $C_d = 0,34$ e viene utilizzata la formula di Newton per esprimere la velocità terminale

$$V_t = K_s \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}}$$

Con $K_s = \sqrt{\frac{4 g D_p}{3 C_D}}$

Mostafaiyan et al., (2014) propone un modello iterativo basato su un algoritmo computazionale evolutivo, incentrato sulla teoria di decantazione delle goccioline e sviluppato con l'obiettivo di ottimizzare i separatori trifase per ridurre al minimo il volume. La scelta di ottimizzare questo parametro è mirata al supporto del progettista nel caso di installazioni in cui lo spazio è limitato. Utilizzando come dispositivo analizzato un separatore trifase orizzontale ben definito, sono state identificate le caratteristiche più importanti per la sua progettazione sulle quali basare gli altri parametri. La lunghezza, il diametro, la lunghezza del canale idrico, i tempi di separazione e di picco del separatore sono stati manipolati per soddisfare l'obiettivo di un progetto che comprenda un volume minimo. Il progetto è stato ottenuto in modo iterativo attraverso la ricombinazione e la mutazione dei parametri del passo precedente, fermandosi quando l'insieme dei parametri verificava condizioni sottoposte al calcolatore, come per esempio la condizione di garantire il minimo volume occupato.

La teoria del tempo di ritenzione (Retention Time Theory) invece fornisce un dimensionamento che assicura il tempo di ritenzione nel dispositivo sufficiente ai tempi richiesti dalla separazione. Esso sfrutta dati provenienti dalla pratica o da processi sperimentali per determinare il tempo necessario alla separazione della miscela nelle sue fasi. Il tempo calcolato aumenterà se si prevedono fenomeni di formazione di schiuma o se aumentano la densità e la viscosità del fluido. Sebbene gli esperimenti siano facili da svolgere, spesso forniscono una sovrastima del tempo di ritenzione, accelerato nella realtà da processi di coalescenza, e inoltre la progettazione sarà tanto più accurata tanto maggiore sarà il numero di esperimenti effettuati e quanto più le condizioni in cui sono stati effettuati gli esperimenti saranno simili a quelle del separatore reale.

Arnold and Stewart (1986) forniscono un modello solitamente utilizzato per i separatori trifase con il serbatoio a forma cilindrica in cui si calcolano le dimensioni del dispositivo in base al tempo di ritenzione proveniente dalla pratica e da esperimenti effettuati precedentemente. In questo modello devono essere specificati sia il tempo di ritenzione per eliminare acqua dalla fase oleosa, sia per eliminare quest'ultima dall'acqua

$$d^2 L_{eff} = 42000 (Q_W(t_r)_W + Q_o(t_r)_o)$$

1.2.3 Utilizzo simulazione CFD

Spesso questi dispositivi vengono sottoposti, dopo una progettazione base di partenza, a una simulazione CFD per verificare che il flusso, durante il processo, assuma caratteristiche idonee alla separazione e prevedere il suo comportamento di fronte a diversi assetti e configurazioni dei componenti interni che aumentano l'efficienza del dispositivo, agevolando per esempio i fenomeni di coalescenza, o modificano la velocità del flusso d'immissione.

Nel lavoro sviluppato da Lauri Kirveskari, per la sua tesi di Master alla Aalto University (2006), è presente una attenta analisi di un separatore bifase orizzontale, di configurazione riportata in Fig 13, in cui vengono analizzate i profili delle velocità e l'efficienza del dispositivo al variare dei componenti interni o delle condizioni al contorno. Il software utilizzato per la simulazione è OpenFoam.

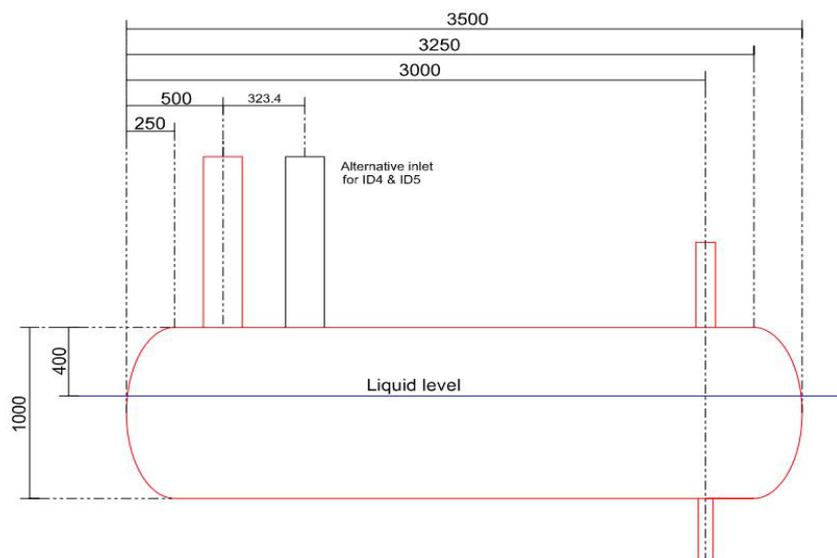


Figura 13: rappresentazione del separatore utilizzato per la simulazione CFD

Il livello del liquido all'interno del serbatoio modificherà in maniera consistente l'efficienza del separatore, modificando il volume della parte destinata al gas, limitando l'affidabilità delle simulazioni. La miscela immessa è composta da gas e liquido, considerando quest'ultima fase come quella dispersa. Per misurarne l'efficienza, il rendimento del separatore viene calcolato come rapporto tra la quantità di fase dispersa accumulata alla relativa uscita (in questo caso il liquido) e la quantità di fase dispersa entrante:

$$\eta = \frac{m_{liq,in} - m_{liq,out}}{m_{liq,in}}$$

Dai risultati ottenuti dal suo studio, si evince come un aspetto importante per l'efficienza del dispositivo consista nella scelta del dispositivo di immissione della miscela che deve garantire una velocità di entrata inferiore rispetto a quella di separazione di fase calcolata con la formula di Stokes. Kirveskari, nel suo lavoro, ha studiato le variazioni dell'efficienza causate da diverse tipologie di dispositivi di entrata o dalla loro assenza.

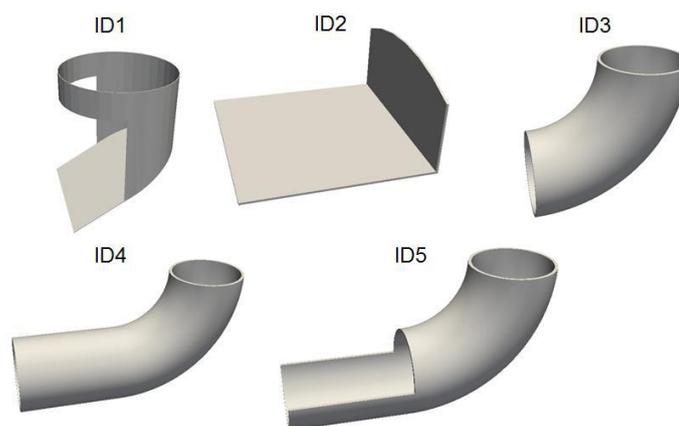


Figura 14: dispositivi di entrata

Considerando le limitazioni comportate dall'esistenza di vari modelli di simulazione, sia in regime turbolento ($k-\epsilon$, Eulerian-Eulerian, $k-\omega$...) che laminare, tutti comportanti errori e affidabilità dei risultati diverse, i risultati ottenuti da Kirveskari mostrano la maggiore efficienza dei tubi curvi in entrata (ID3, ID4) rispetto ai dispositivi a piastra. E comunque, simulando anche il caso dell'assenza di dispositivi di entrata, si vede come tutti i dispositivi introducano una maggiore efficienza rispetto al caso base (assenza di dispositivi di entrata), dimostrando così come il profilo delle velocità del flusso incida in maniera consistente sull'efficienza del separatore.

Dal grafico sottostante è evidente come i componenti ID3 e ID4 siano i più efficienti, raggiungendo efficienze superiori all' 80%, riuscendo meglio a limitare la velocità di entrata della miscela nel dispositivo in modo da garantire un funzionamento migliore.

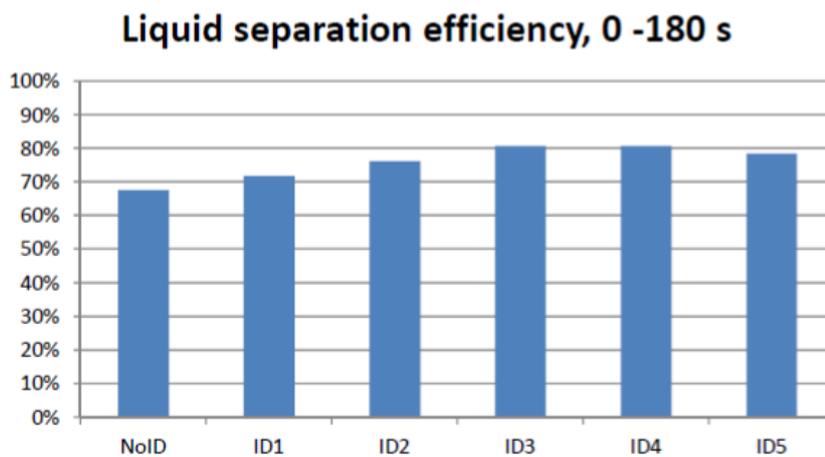


Figura 14: grafico riportante l'efficienza della separazione per i diversi dispositivi di entrata analizzati

Il risultato più importante ottenuto durante l'analisi di Kirveskari mostra come la dimensione delle gocce di fase dispersa (in questo caso il liquido) influisca in maniera ancora più consistente dei componenti interni del separatore. Kirveskari ha condotto simulazioni aumentando l'alimentazione in ingresso della fase dispersa (portandola al 200%, SP200) e aumentando la dimensione delle gocce a 50 micron (contro i 30 micron delle simulazioni precedenti, 50_ID4). Riportando i risultati della quantità di liquido presente all'uscita su di un grafico in funzione del tempo (Fig. 15) si nota facilmente come l'aumento dell'alimentazione comporti un brusco abbassamento dell'efficienza (aumentando la quantità di liquido all'uscita) mentre come l'aumento delle dimensioni delle gocce porti un miglioramento dell'efficienza del separatore (portando quasi a zero la quantità di liquido all'uscita). Questi due casi sono stati confrontati con il caso base del separatore senza particolari dispositivi di entrata (NoID) e con una dimensione delle gocce di 30 micron.

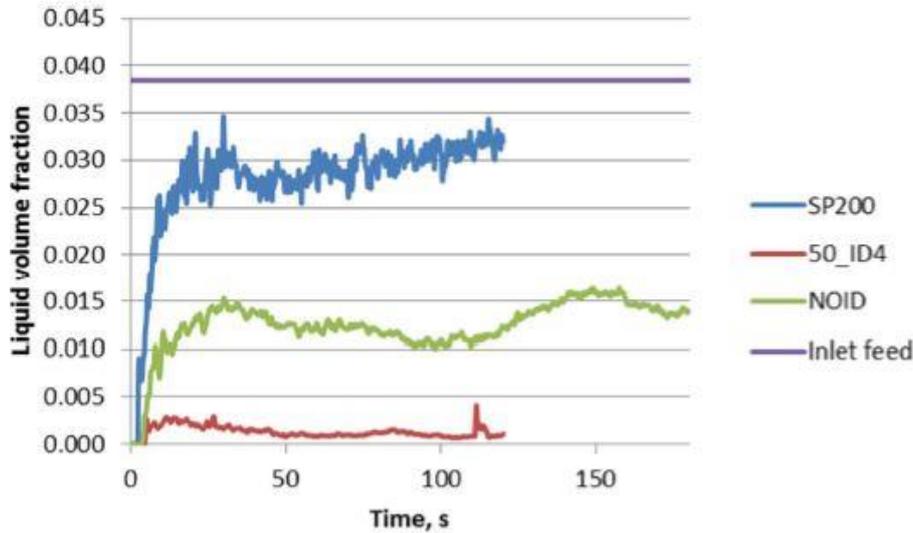


Figura 15: grafico riportante la frazione di volume liquido all'uscita del separatore in funzione del tempo

Esso dimostra come dimensioni maggiori delle gocce di fase dispersa nella miscela faciliti la coalescenza delle stesse e sfavorisca la loro rottura rendendo quindi la miscela meno stabile e quindi più facile da separare. Il seguente risultato suggerisce la presenza di una dimensione massima, sotto la quale le gocce sono troppo piccole per essere separate efficientemente. Sono presenti in letteratura diverse equazioni matematiche usate per determinare questa dimensione.

Zhou e Kresta (1997) forniscono una correlazione tra il Sauter diametro medio (d_{32}), che può essere misurato tramite osservazione della miscela ed esprime il diametro medio delle gocce presenti nel substrato, considerate sferiche, e il diametro massimo stabile (d_{max}) tramite un coefficiente c .

$$d_{32} = c d_{max}$$

A seconda dei diversi tipi di sistema Zhou & Kresta (1998) hanno dichiarato il valore di c oscillante tra 0,38 e 0,7.

Un altro approccio può essere quello di trovare un numero di Weber critico, rappresentante il rapporto tra forze resistenti (tensione superficiale) e di rottura (stress sulla superficie) della goccia, raggiunto il quale si ha la rottura della goccia (Laleh, 2010)

$$We'_{crit} = \frac{\rho \bar{v}^2 d_{max}}{\sigma} \left(\frac{\rho_d}{\rho_c}\right)^{1/3}$$

Con \bar{v} : velocità media m/s

σ : tensione superficiale kg/s²

ρ_d : densità fase dispersa kg/m³

ρ_c : densità fase continua kg/m³

Secondo Laleh (2010), We'_{crit} dovrebbe essere intorno al valore 1 per dispersione liquido-liquido e liquido-vapore.

Questi risultati dimostrano come il funzionamento efficiente di questi dispositivi risenta di molti aspetti difficilmente prevedibili. La soluzione migliore sarebbe uno studio sperimentale che però può richiedere elevati costi che una simulazione con più accurati dati come condizioni iniziali e al contorno può abbattere, fornendo la stessa utilità.

Il separatore a gravità GSMF trattato in questa tesi è un dispositivo che può essere utilizzato sia come separatori bifase che trifase, in generale N-fase, grazie alla presenza di opportune valvole e sensori di concentrazione, comandati in automatico da dispositivi quali PLC o simili, che possono essere aperte a piacimento e a seconda della fase che si vuole estrarre a fine processo. La possibilità di controllare le valvole in modo preciso grazie alla presenza di sensori, come per esempio conduttimetri che trasducano la conduttività della fase da estrarre in purezza della stessa, innalza il rendimento del dispositivo rendendo perseguibili alti gradi di separazione. L'efficienza del separatore GSMF viene anche garantita dalla presenza di pacchi lamellari i quali aumentano la superficie utile a separare le fasi introducendo una parte del processo in cui non sono presenti moti trasversali, che vanificherebbero il tentativo di separazione, e che diminuiscono i tempi di sedimentazione necessari.

Esso non presenta particolari strutture con deviatori di entrata presenti nei comuni separatori perché la distribuzione omogenea e uniforme all'interno del dispositivo è garantita dai tubi drenanti di entrata e uscita disposti utilizzando tecniche di ritorno inverso tridimensionale che assicura una distribuzione omogenea dei carichi lungo il percorso del fluido all'interno del dispositivo. Inoltre, esso effettua la separazione senza l'ausilio di azioni meccaniche o di sostanze chimiche differenti e non costituenti il fluido di lavoro (solventi) ed è costituito da componenti con geometrie semplici e facilmente trovabili in commercio con cui abbattere i costi per realizzare e mantenere il dispositivo.

2. Capitolo 2: funzionamenti e modelli matematici

2.1 Funzionamento e Modello matematico GSMF

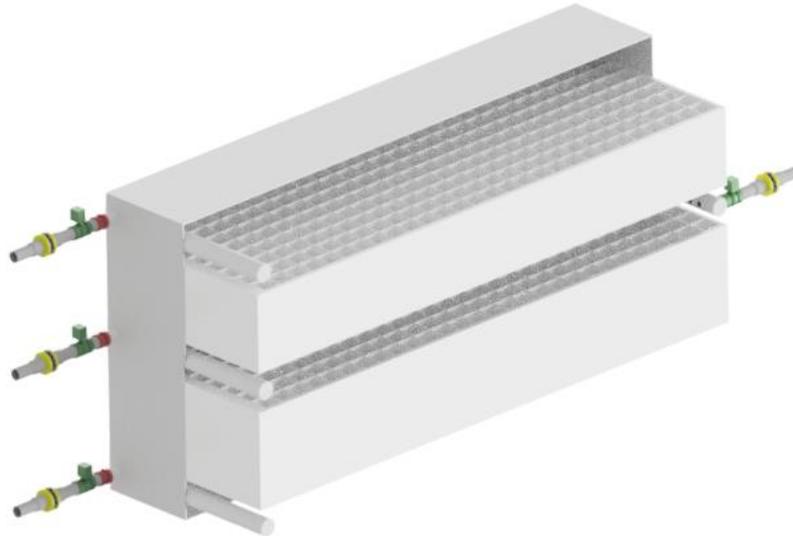


Figura 16: render del separatore gravimetrico GSMF

Attraverso una pressione di entrata fornita da una pompa ITEG, il fluido entrando nel dispositivo si disporrà omogeneamente nel tubo di ingresso, costituito da un tubo drenante in PVC o materiale adatto alla miscela da separare chiuso a un'estremità e con piccoli fori lungo la sua lunghezza. Il flusso si ripartirà in esso in modo omogeneo grazie alla tecnica idraulica di ritorno inverso, garantita dalla particolare disposizione dei tubi di ingresso e di uscita, in modo che le perdite di carico subite da ogni particella fluida siano le stesse perché portate a percorrere lo stesso tragitto in termini di lunghezza. Inoltre, sempre per garantire perdite omogenee lungo il tubo di ingresso, e quindi per non creare zone preferenziali per il fluido, si dovrà rispettare la seguente relazione tra area interna del collettore e somma delle aree dei fori:

$$A_{D \text{ int}} \leq \sum A_{\text{foro}}$$

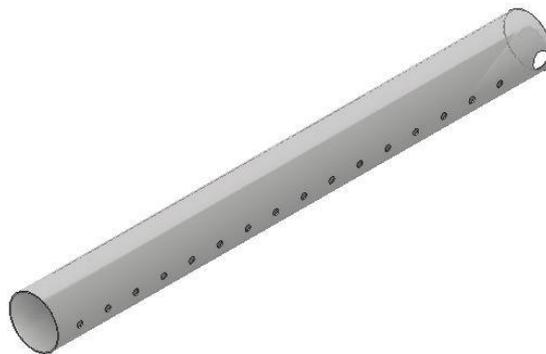


Figura 17: tubi drenanti utilizzati per l'immissione, e successivamente l'estrazione, del fluido e delle sue fasi

A questo punto il fluido uscirà dai piccoli fori formando un flusso laminare che verrà avviato verso l'estremità opposta, garantito anche esso dalla tecnica di ritorno inverso per la disposizione delle entrate e delle uscite. Per realizzare un moto laminare il flusso dovrà uscire dai fori con una velocità che rispetti appunto il campo laminare.

Essa può essere calcolata considerando la portata d'ingresso Q e la somma delle aree dei fori, che può essere assunta pari all'area del diametro interno del collettore d'ingresso, assicurandosi che l'area del singolo foro sia tale da non intasarsi col passare del fluido:

$$v = \frac{Q}{\sum A_{foro}} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Successivamente si può controllare che essa rispetti i valori stabiliti dal campo laminare calcolando il numero di Reynolds

$$Re = \frac{\rho w d}{\mu} = \frac{w d}{\nu}$$

E verificando che sia $Re \leq 1000$.

Il flusso, essendo laminare, permetterà, essendo limitata la turbolenza trasversale, alle diverse fasi presenti nella miscela di iniziare a separarsi per azione della gravità.

GSMF può essere progettato in modo che tra la parete di ingresso e l'inizio degli interstizi tra gli honeycomb sia presente un volume, creato distanziando questi ultimi dall'ingresso, in modo tale che si possa avviare un'iniziale separazione grossolana delle fasi a densità diverse.

Allora, una volta avvenuta la iniziale separazione il volume trattato continuerà il percorso verso il tratto di honeycomb in cui la separazione verrà perfezionata grazie agli interstizi orizzontali e ai tubi drenanti di prelievo. Nella trattazione seguente viene considerato un separatore GSMF trifase, con due pacchi lamellari e tre interstizi orizzontali.

Entrate nell' tratto in cui sono presenti i pacchi di honeycomb, le porzioni di miscela più pesanti urteranno le pareti dei cavedi inferiori, entrando al loro interno, e quelle più leggere nei cavedi superiori. Qui avverrà la vera e propria separazione, perfezionando la separazione avvenuta in precedenza nell'eventuale volume presente tra l'entrata e questo tratto del dispositivo. Le componenti più pesanti inizieranno un moto verticale discendente in cui il fluido non sarà sottoposto a turbolenze orizzontali e potrà superare facilmente le componenti più leggere, che risaliranno il cavedio per essere indirizzate in processi opposti. In ugual modo, le componenti più leggere inizieranno un moto verticale ascendente in cui il fluido, non sottoposto a turbolenze orizzontali, potrà superare facilmente le componenti più pesanti, che discenderanno verso la parte centrale per essere convogliate in processi opposti. I cavedi dovranno avere dimensioni congrue alla miscela dal separare in modo da garantire il passaggio del fluido attraverso di essi e in un tempo di permanenza prefissato, in modo che la gravità abbia il tempo necessario di agire e quindi separare le fasi.

Una volta passato il tempo di sedimentazione, e il tempo di stazionamento nel dispositivo le componenti leggere avranno raggiunto l'interstizio superiore, mentre quelle pesanti quello

inferiore. Le componenti di densità media invece proseguiranno il loro cammino lungo l'interstizio centrale.

Alla fine di ogni interstizio, raggiunta una certa concentrazione di sostanza richiesta, anche opportunamente misurata attraverso sensori di concentrazione come per esempio conduttimetri, le componenti usciranno dai rispettivi tubi drenati di uscita attraverso una depressione creata da valvole ITEG posizionate ad ogni uscita. Sarebbe conveniente predisporre un secondo sensore per ogni uscita posizionato a una certa distanza dall'uscita per assicurare che il valore di concentrazione misurato dal sensore precedente sia affidabile e non dettato da disuniformità create dall'azione della pompa.

Per cui la parte consistente del lavoro di progettazione del separatore consiste nel determinare le dimensioni e la forma dei cavedi e quindi dei pacchi di honeycomb, e degli interstizi.

1.1.1 Dimensionamento dei pacchi di honeycomb

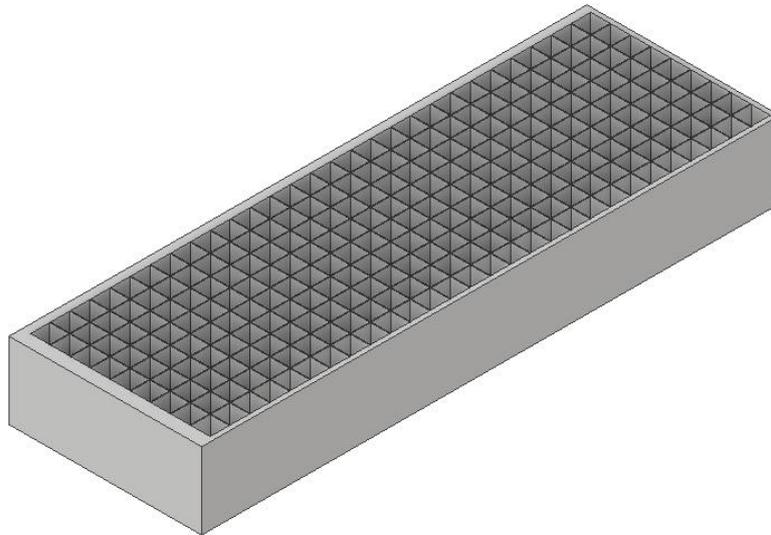


Figura 18: honeycomb utilizzato nel separatore GSMF

Inizialmente si ipotizzano le due dimensioni principali del dispositivo (L e B) che dovranno essere congrue allo spazio in cui il dispositivo verrà installato.

Da dati provenienti da documenti di settore si possono trovare i tempi standard di separazione di alcune miscele sottoposte a test di separazione di fase oppure effettuare delle prove preliminari, utilizzando per esempio i coni di Imhoff che possono dare una stima del tempo di sedimentazione della miscela in esame.

Prendendo questi tempi come quelli da garantire di permanenza all'interno del dispositivo si può dimensionare l'altezza totale H degli honeycomb (data dalla somma delle due altezze parziali h_1 e h_2) tale da garantire questi tempi. Questo modello di ragionamento è riconducibile al modello del tempo di ritenzione esposto nel par. 1.2.1.1.

Più precisamente, si agirà sul rapporto tra volume totale dei pacchi di honeycomb e portata elaborata dal separatore per far sì che i tempi prefissati siano assicurati.

Indicando con V il volume totale messo a disposizione dagli honeycomb e con Q la portata entrante si pone

$$t_{sep} \leq \frac{V}{Q} = \frac{L*B*H}{Q}$$

con t_{sep} : tempo di separazione stabilito [min]

V : volume disponibile di honeycomb complessivo [l]

Q : portata di fluido [$\frac{l}{min}$]

L : lunghezza del pacco di honeycomb

B : larghezza del pacco di honeycomb

H : altezza complessiva dell'honeycomb

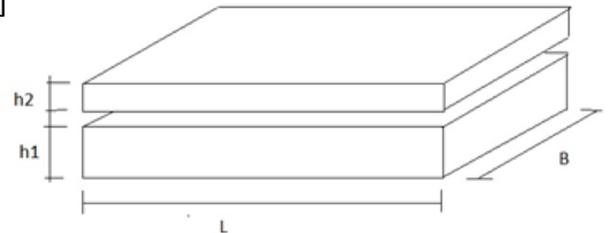


Figura 19: dimensioni principali dei due pacchi di honeycomb

A questo punto, attraverso la formula inversa, si può calcolare l'altezza totale minima a garantire la permanenza negli honeycomb per il tempo stabilito inizialmente (t_{sep})

$$H_{min} = \frac{t_{sep} * Q}{L * B}$$

Questa altezza verrà poi ripartita tra il pacco di honeycomb superiore e quello inferiore in proporzione alle percentuali di porzione a peso specifico superiore e minore rispettivamente, nella miscela.

Anche gli interstizi dovranno avere altezze proporzionali alla concentrazione nel fluido iniziale della fase che andrà ad ospitare. Inoltre, potranno anche essere sovradimensionati per agevolare la separazione e fungere da serbatoi in cui accumulare la determinata fase. Applicando sensori di concentrazione nell'interstizio superiore e inferiore si potrebbe attivare la rispettiva valvola per azionare l'estrazione della fase fino a quando il sensore misura una non corretta concentrazione della fase voluta nella fase estratta. Il tutto pilotato e controllato da PLC.

2.1.2 Forma e dimensione dei cavetti

Un altro importante fattore da considerare è la dimensione e la forma della sezione dei cavetti. Tali parametri possono essere scelti in base alle caratteristiche fisiche della miscela. Le miscele di lavoro possono essere:

- liquide con corpi macroscopici in sospensione (mm): in questo caso la sezione dei cavetti dovrà essere tale da prevenirne l'intasamento durante il fluire di questi corpi. Sarà quindi necessaria un'analisi preliminare del fluido.

- liquide senza corpi in sospensione, costituite quindi da fasi liquide con significativa differenza di peso specifico: in questo caso l'area della sezione influisce meno sulla fattibilità del processo, tranne nel caso in cui la sezione del cavedio sia troppo piccola (diventando soggetto a fenomeni di capillarità), che porterebbe a una predominanza delle forze di adesione tra le molecole del fluido rispetto a quelle di coesione tra fluido e parete del cavedio, impossibilitando l'entrata del fluido nel cavedio.
- Gassose con corpi in sospensione (per esempio con corpi dell'ordine di ppm, come il particolato): i cavedi dovranno essere di sezione congrua al far sì che i corpi in sospensione, sedimentando e incrostando le pareti dei cavedi, non crei l'intasamento di questi ultimi.
- Gassose senza corpi in sospensione (miscele di gas "puri") (CH₄, CO₂, CO, N₂, NO_x, ...): i cavedi dovranno essere di sezione congrua solo ai tempi di separazione di fase in quiete e funzione dei rispettivi pesi specifici

2.1.3 Rappresentazione dei carichi GSMF

A regime il percorso che il "filetto fluido" percorrerà è costituito dal percorso nel tubo d'ingresso, quello del flusso laminare nell'interstizio per raggiungere i cavedi, nel cavedio verticale (inferiore e superiore), quello laminare per raggiungere l'uscita e quello nel tubo d'uscita. Attraverso la stima dei carichi nel dispositivo è possibile dimostrare il funzionamento del ritorno inverso.

- Tubo forato (ingresso)
La pressione assoluta p_0 che permetterà al fluido di entrare nel tubo, applicata al foro di entrata, risentirà delle perdite continue dovute al passaggio nel tubo d'ingresso, per cui non sarà costante lungo l'asse del tubo. I fori vicini all'ingresso presenteranno una pressione molto simile a quella di entrata che decrescerà sempre più allontanandosi da essa. Più precisamente

$$p_n = p_0 - \Delta p_{perdite}$$

Con p_n : pressione foro n-esimo

Dipendendo dalla distanza dal foro di ingresso, le perdite aumenteranno allontanandosi da esso e quindi le pressioni decresceranno lungo l'asse del tubo.

- Flusso laminare in interstizio centrale

Il flusso uscendo dai fori sul collettore formerà un flusso laminare orizzontale. Questo per via del ritorno inverso lungo il piano orizzontale, garantito dai carichi inversi e simmetrici dei tubi d'ingresso e uscita.

Anch'esso subirà delle perdite per via dell'avanzamento lungo l'interstizio. Le perdite di carico saranno uniformi lungo il piano ortogonale del dispositivo, a pari distanza dalla partenza, e aumenteranno invece procedendo dal tubo di entrata a quello di uscita per il tratto via via maggiore che ogni "filetto fluido" dovrà percorrere.

- Cavedio verticale

Una volta che il flusso entrerà nel cavedio subirà un forte rallentamento, per via della assenza di moti orizzontali. Qui avverrà la separazione gravimetrica, e i carichi saranno costanti lungo il piano ortogonale del dispositivo, per ogni batteria di cavedi come per il flusso nell'interstizio, e riverberano, in entrata e in uscita dal cavedio, quelli del tubo di entrata e di uscita, smorzati per via del percorso da effettuare negli interstizi.

- Flusso laminare in interstizio superiore e inferiore

Una volta avvenuta la separazione, quindi dopo il tempo di stazionamento nel cavedio il flusso verrà attirato nell'interstizio, superiore o inferiore, dalla depressione creata nel collettore nel tubo forato di uscita, opportunamente calibrata. I tubi di uscita potranno essere previsti di valvole comandate da PLC che tramite misuratori della concentrazione della fase interessata, apriranno o chiuderanno le valvole, in questo modo si potrà scegliere anche se prelevare la componente dall'interstizio centrale.

- Tubo forato (uscita)

La pressione effettiva p_u che permetterà al fluido di uscire dal dispositivo attraverso il tubo di uscita, applicata al foro di uscita posizionato dalla parte opposta rispetto a quello di entrata, risentirà anche esso delle perdite continue per cui non sarà costante lungo l'asse del tubo. Più precisamente, essendo un tubo in depressione

$$p_m = p_u + \Delta p_{perdite}$$

Con p_m : pressione foro m-esimo

Dipendendo dalla distanza dal foro di uscita, le perdite aumenteranno allontanandosi da esso e quindi le depressioni decresceranno lungo l'asse del tubo.

Il ritorno inverso che governa il funzionamento di questo dispositivo può essere considerato un "doppio ritorno inverso", per ogni pacco di honeycomb in quanto questa tecnica idraulica è verificata sia sul piano orizzontale sia su quello ortogonale.

Per quanto riguarda il piano orizzontale, il ritorno inverso sarà essenziale per creare un flusso laminare nell'interstizio centrale, e per creare carichi costanti all'ingresso e all'uscita di tutti i cavedi a pari distanza dal tubo di partenza.

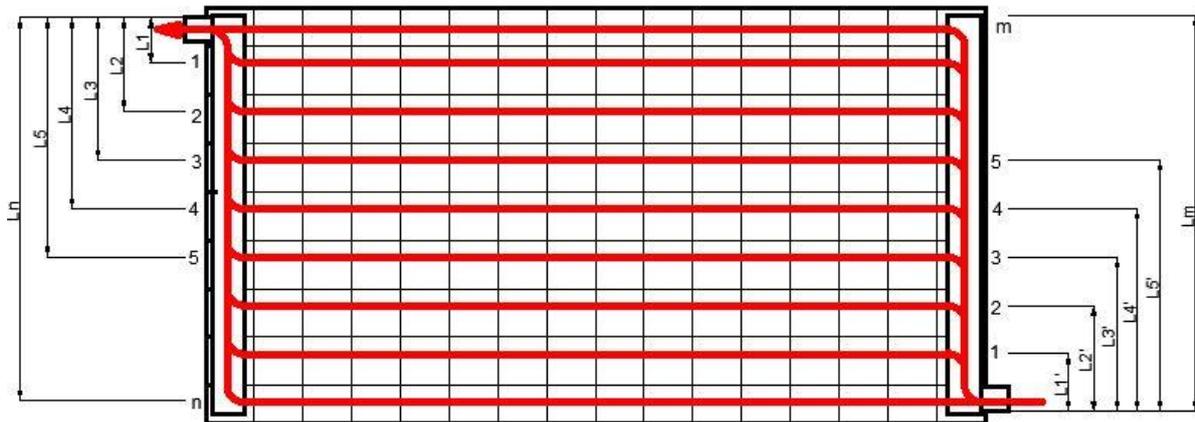


Figura 20: rappresentazione dei carichi lungo il piano orizzontale degli interstizi

Considerando fori affacciati la differenza di pressione tra loro dovrà rimanere costante per tutte le coppie di fori distribuite lungo la lunghezza del tubo.

Quindi

$$p_m - p_n = \text{cost}$$

Effettuando la differenza, e considerando le perdite come le perdite distribuite che incorrono nel tratto di tubo forato si ottiene

$$p_m - p_n = (p_u - p_0) - \frac{\rho \lambda v^2}{2d} (L_n + L'_m)$$

Per esempio per la coppia 5-3 la formula diventa

$$p_5 - p_3 = (p_u - p_0) - \frac{\rho \lambda v^2}{2d} (L'_5 + L_3)$$

Ma $L'_5 + L_3 = L_{tubo}$ che in quanto lunghezza del tubo è costante, per cui il termine a destra dell'uguale è costante per ogni coppia di fori ed è quindi verificato il ritorno inverso lungo il piano orizzontale.

Per quanto riguarda invece il ritorno inverso lungo il piano ortogonale, considerando un piano ortogonale distante xL dalla partenza, nel primo tratto in cui il fluido percorre l'interstizio centrale ci saranno delle perdite proporzionali alla distanza dal tubo di entrata (xL).

Successivamente il "filetto fluido" entrerà nel cavedio in cui stazionerà perché avvenga la separazione. Infine, esso dovrà percorrere il tratto di interstizio (inferiore o superiore) per poi uscire dal dispositivo.

Quindi considerando un carico di inizio percorso p_0 esso verrà smorzato di una quantità proporzionale a xL e successivamente a $(1-x)L$, la cui somma indica che ogni filetto fluido sarà soggetto complessivamente a perdite di carico proporzionali a L , con L =lunghezza del dispositivo, qualunque sia la distanza del piano ortogonale dal tubo di ingresso.

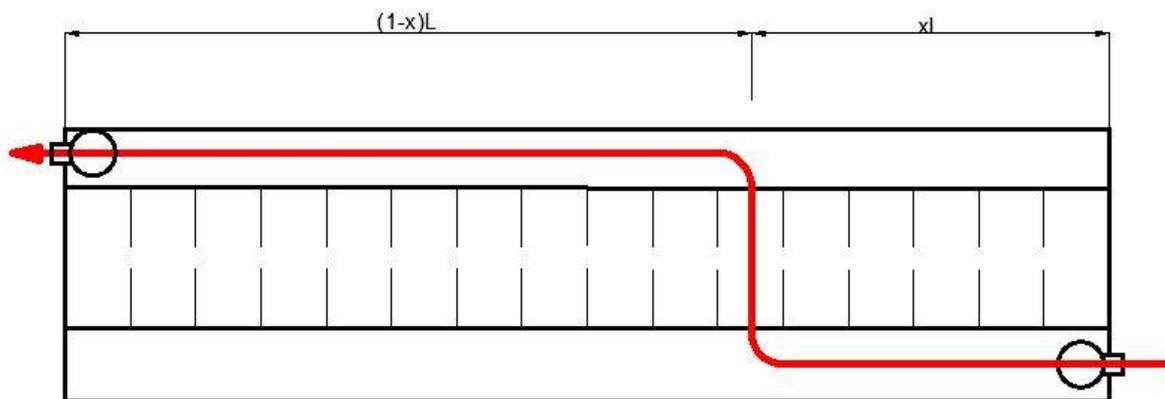


Figura 21: rappresentazione del flusso lungo il piano ortogonale verticale a distanza xL dall'ingresso per l'honeycomb superiore

Lo stesso ragionamento può essere effettuato per ogni distanza xL dall'entrata, quindi per ogni fila di cavedi e per entrambi gli honeycomb, ovviamente in modo simmetrico rispetto al piano laminare dell'interstizio centrale.

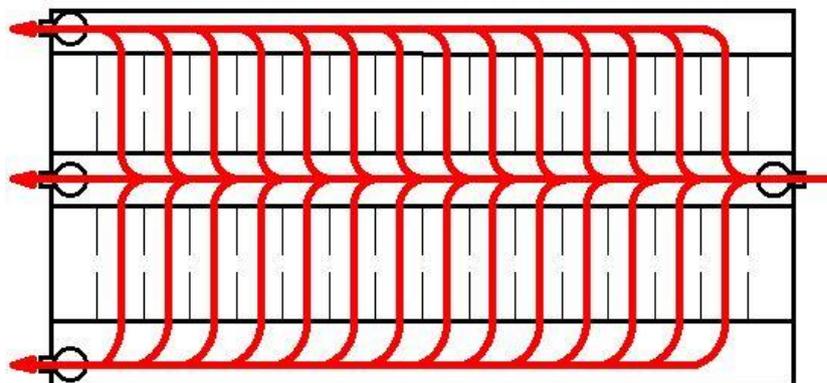


Figura 22: rappresentazione dei flussi sul piano verticale ortogonale per ogni fila trasversale di cavedi

Entrambi i ritorni inversi, quello lungo il piano orizzontale e quello lungo i piani verticali trasversali, vanno intesi coesistenti e cooperanti dinamicamente affinché si possa parlare di ritorno inverso tridimensionale e il dispositivo possa funzionare correttamente.

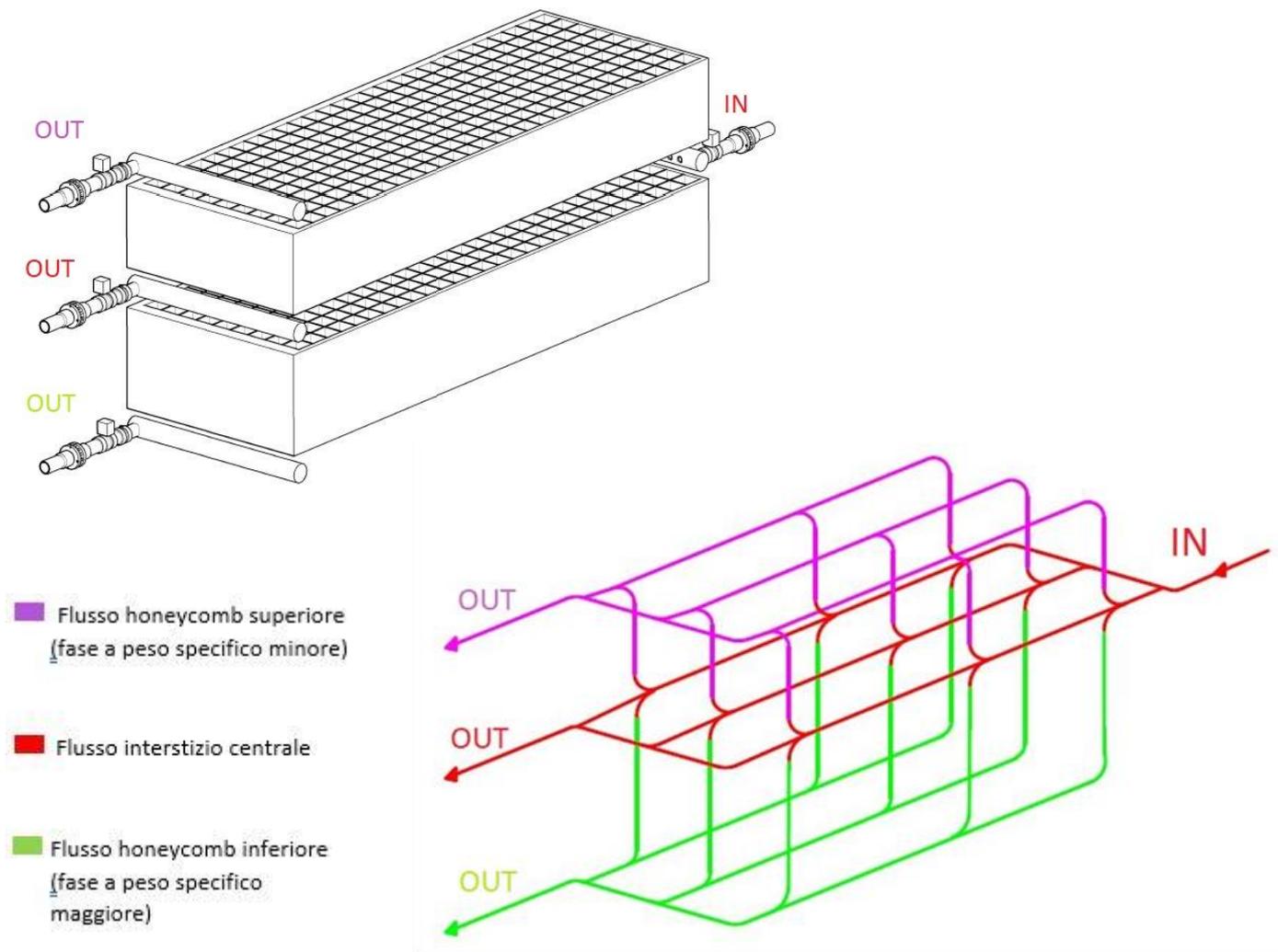


Figura 23: rappresentazione grafica 3D dell'interazione dei flussi all'interno del separatore GSMF

2.2 Funzionamento e Modello matematico MHLM



Figura 24: render del miscelatore MHLM

Una volta azionata la pompa ITEG predisposta alla miscelazione e circolazione del fluido, esso entrerà nel dispositivo attraverso un primo collettore, composto da un tubo in PVC o materiale adatto alle sostanze da miscelare, chiuso a un'estremità e con piccoli fori lungo la lunghezza. Il flusso si distribuirà omogeneamente lungo il tubo, grazie all'assetto per il ritorno inverso in cui sono disposti i due collettori. Anche questi tubi per garantire che il flusso sia continuo e senza vie preferenziali, oltre al ritorno inverso, dovranno rispettare la seguente relazione

$$A_{D\ int} \leq \sum A_{foro}$$

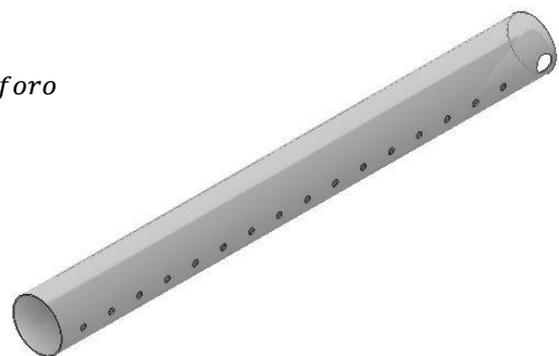


Figura 25: tubi drenanti utilizzati nel miscelatore

Il flusso una volta risucchiato da questo primo collettore, grazie alla depressione creata dalla pompa di circolazione ITEG, avvierà una prima azione di miscelazione al suo interno per poi passare nel circolatore. Esso dovrà avere dimensioni adatte alla miscela da lavorare, quindi avere diametri tali da non rischiare di intasare i tubi una volta in funzione ed essere composti da materiali resistenti all'eventuale aggressività chimica delle sostanze (PVC, metallo, teflon, e simili).

Nel passaggio attraverso il circolatore avverrà la parte fondamentale della miscelazione grazie al passaggio del fluido attraverso la girante della pompa ITEG. Qui le dimensioni delle particelle di fase dispersa diminuiranno grazie all'azione della girante della pompa e si distribuiranno uniformemente nel flusso per via delle turbolenze create.

Nel successivo ramo senza fori verrà rafforzata la miscelazione, grazie alla pressione di mandata creata da ITEG e a fenomeni di diffusività radiale, e successivamente il fluido si distribuirà omogeneamente lungo il secondo collettore forato per uscire dal dispositivo e rientrare nel volume di reazione.

2.2.2 Perdite e Potenza

Affinché il dispositivo abbia un funzionamento efficace la pompa dovrà vincere gli attriti e le perdite che si creano durante il fluire della miscela nei collettori e nel circolatore.

Lungo il tragitto il fluido sarà soggetto a perdite continue che possono essere calcolate con

$$\Delta p = \frac{\rho \lambda v^2 L}{2d} \quad [\text{Pa}]$$

λ : coefficiente di attrito con le pareti

L, d: lunghezza e diametro del tubo

ρ : densità fluido

In regime turbolento il coefficiente d'attrito λ dipende dal numero di Reynolds (Re). Per calcolarlo si può usare la formula di Coolebrooke White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon/d}{3,7} \right)$$

dove: ε/d =rugosità relativa

Essa risulta analiticamente complicata, per cui nella pratica si può utilizzare l'abaco di Moody o delle formule semplificate ricavate da prove sperimentali, che variano in base alla rugosità della parete in cui il fluido scorre.

Per tubi a bassa rugosità:

$$\lambda = 0,316 Re^{-0,25}$$

Per tubi a media rugosità:

$$\lambda = 0,07 Re^{-0,13} D^{-0,14}$$

Per effettuare un calcolo più preciso bisogna tenere conto anche delle perdite accidentali, che nel dispositivo in esame possono manifestarsi con cambi di direzione dei tubi, con la formula:

$$\Delta p = \rho \xi \frac{v^2}{2} \quad [\text{Pa}]$$

Con: ξ = coefficiente adimensionale tabellato che tiene conto del tipo di perdita accidentale.

In questo modo si può calcolare la prevalenza che la pompa dovrà vincere

La formula della prevalenza in fase di progetto è:

$$H = H_g + \frac{p_b - p_a}{\gamma} + \frac{\Delta p_{tot}}{\gamma} \quad [\text{m}]$$

con:

γ : peso specifico

H_g : altezza geodetica

p_b, p_a : pressione serbatoio di mandata e aspirazione rispettivamente

Δp_{tot} : cadute di pressione totali, somma delle perdite continue e accidentali

Utilizzando la pompa ITEG come una pompa di circolazione, che essendo il serbatoio di mandata lo stesso di quello di aspirazione, si pone $H_g=0$ e $p_b = p_a$ (quindi $p_b - p_a=0$), e quindi la prevalenza risulta uguale solo alla somma delle perdite lungo l'intero dispositivo.

$$H = \frac{\Delta p_{tot}}{\gamma} \quad [\text{m}]$$

A questo punto è possibile quindi calcolare la potenza utile che la pompa dovrà fornire:

$$N_u = \frac{\gamma Q H}{102} \quad [\text{kW}]$$

2.2.3 Caratteristiche pompa ITEG

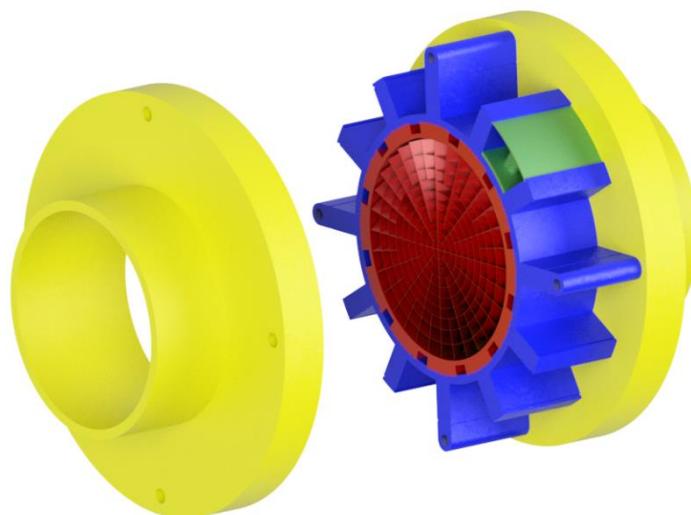


Figura 26: render pompa ITEG

Il dispositivo ITEG (Integrated Turbine Electric Generator) è anch'esso un dispositivo elaborato e brevettato dal professor Farnè e dal Dott. Lavanga che consiste in un dispositivo capace di pompare fluido, o produrre energia sfruttando il movimento del flusso, utilizzandolo come turbina, sfruttando un sistema rotore e statore e quindi con un azionamento magnetico attraverso magneti permanenti disposti sullo statore. ITEG non presenta palettature per effettuare l'azione di pompaggio del fluido, utilizzate nelle classiche pompe, alle quali si sostituisce un rotore che presenta una struttura alveolare che si avvolge attorno all'asse del dispositivo, grazie alla quale viene utilizzata l'intera superficie disponibile e non solamente quella correlata ai due terzi della lunghezza delle pale, come avviene nelle pompe tradizionali. Il rotore è mantenuto in equilibrio 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, e che comporterebbe una azione di manutenzione più assidua e difficoltosa.

Sfruttando il vantaggio di ITEG in cui quasi la totalità della superficie circolare del rotore sarà utile al processo di pompaggio, l'ingombro radiale della pompa sarà di poco superiore al diametro delle tubazioni collegate ad essa. Inoltre, non presenta ingombranti sistemi di avviamento che renderebbero più difficile l'utilizzo. È economico e poco invasivo, infatti non sono presenti ingombranti motori o sistemi di riduzione, presenta un'elevata facilità di installazione e adattabilità di progetto.

Si è scelto di utilizzare ITEG in MHLM come pompa di circolazione che oltre a mettere in moto il fluido effettua la maggior parte del lavoro di miscelazione. La maggior parte dei componenti costituenti ITEG, rotore, statore e testate, possono essere realizzate tramite stampaggio 3D, una tecnica relativamente recente che sfrutta la manifattura additiva per realizzare componenti concreti precedentemente realizzati con software di modellazione 3D. Anche questo aspetto si

trova in linea con la volontà degli ideatori di progettare dispositivi destinati, oltre che alla semplificazione dei processi, anche all'abbattimento dei costi.

La progettazione di una pompa ITEG consiste sulla determinazione del volume che il fluido può occupare nel rotore, facilmente calcolabile moltiplicando la superficie messa a disposizione del rotore e la lunghezza assiale di quest'ultimo.

$$V = S * L$$

Ponendo S uguale alla superficie del tubo a cui la pompa è collegata, e considerando il 90% di questo risultato per tenere conto della superficie minore disponibile a causa delle pareti che formano i cavedi del rotore (a cui si attribuisce il 10% del totale) si può manipolare il termine della lunghezza L in modo da avere un volume desiderato considerando anche gli altri parametri presenti nella formula della portata, riportata di seguito.

La formula della portata

$$Q = V * \frac{n}{60} * \frac{1}{p} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

con n : numero di giri [giri/min]

p : passo, rotazioni complete compiute dallo sviluppo elicoidale
del cavedio

moltiplica il volume precedentemente calcolato o stabilito per il numero di giri e il coefficiente $\frac{1}{p}$ per tenere conto delle rotazioni dell'elicoide attorno all'asse di rotazione che influiscono sulla quantità di volume fluido uscente dall'rotore per ogni rotazione completa dell'rotore.

Avendo calcolato precedentemente la potenza utile che la pompa deve mettere in gioco per vincere le perdite, supponendo una certa portata da garantire, si potrebbe procedere in modo inverso calcolando il volume dalla formula della portata e poi la lunghezza che il rotore dovrà avere per rispettare il volume calcolato, avendo supposto l'area utile circa uguale a quella del tubo collegato.

2.2.4 Efficienza energetica e della miscelazione

I rendimenti energetici di MHLM sono da attribuire all'impianto ed essenzialmente alla pompa scelta.

Utilizzando la pompa ITEG come in questo caso si abbassano ulteriormente i consumi dovuti solamente alla creazione del campo magnetico, come un piccolo motore elettrico di bassa potenza.

Per quanto riguarda l'efficienza del processo di miscelazione sarebbe molto utile una simulazione fluidodinamica CFD per poter stimare tale parametro. Come si ritiene siano di buona rilevanza considerando il moto dei flussi e la possibilità di effettuare tale processo in modo localizzato.

2.2.5 Rappresentazione dei carichi MHLM

Il percorso che un "filetto fluido" percorre all'interno del dispositivo può essere riassunto come segue.

- Collettore in depressione (aspirazione)

La pressione p_0 che risuccherà il fluido, applicata all'uscita del primo collettore, risentirà delle perdite continue per cui non sarà costante lungo l'asse del tubo. Considerando il collettore posto nel fluido, i fori in basso presenteranno già una pressione entrante data quella idrostatica, via via decrescente verso l'alto, per cui conviene posizionare il tubo di aspirazione nella parte in alto del tubo, per applicare il massimo dell'aspirazione. In più la depressione sarà via via minore dai fori inferiori a quelli superiori, più precisamente

$$p_n = p_0 + \Delta p_{perdite}$$

Con p_n : pressione foro n-esimo

Le pressioni aumenteranno quindi lungo la lunghezza del tubo e all'aumentare della profondità di aspirazione del foro.

- Tubo di circolazione

Il tubo di circolazione è un semplice tubo non forato che presenta curve a 90°. Data la pressione di aspirazione a monte della pompa, essa verrà modificata nel corso del tubo per via delle perdite di carico, distribuite e concentrate. Può essere rappresentato con l'equazione di Bernoulli

$$p_{asp} + \rho gh = p_0 + \Delta p_{perdite} + \rho gh$$

Successivamente il fluido entrerà nella pompa in cui subirà le cadute di pressione proprie della pompa per poi uscire con una pressione di mandata. Conoscendo quest'ultima si può calcolare sempre con Bernoulli come questa pressione decresca lungo il secondo tubo di circolazione per arrivare al collettore di uscita. Quindi

$$p_{man} + \rho gh = p_u + \Delta p_{perdite} + \rho gh$$

- Collettore in pressione

Il fluido allora entrerà nel collettore di mandata con una pressione p_u precedentemente calcolata. Essa dovrà essere sufficiente affinché anche l'ultimo foro sia in pressione. Il tubo forato verticale avrà l'ingresso in basso (in opposizione a quello del collettore di aspirazione, per avere ritorno inverso). Ogni foro quindi sarà soggetto alla pressione fornita dalla pompa depurata dalle perdite e dalla pressione idrostatica (in questo caso contraria a quella di fuoriuscita del fluido)

$$p_m = p_u - \Delta p_{perdite}$$

Considerando la zona con i due collettori affacciati, per poter creare un flusso laminare la differenza delle pressioni, tra punti affacciati coppia per coppia lungo l'asse dei tubi, dovrà essere uguale affinché ci sia una distribuzione uniforme, lungo l'altezza, delle pressioni.

Quindi $p_m - p_n = \text{cost}$

$$p_m - p_n = (p_u - p_0) - \frac{\rho \lambda v^2}{2d} (L + L')$$

Per esempio, considerando la coppia 4-4 la formula precedente diventa

$$p_4 - p_4 = (p_u - p_0) - \frac{\rho \lambda v^2}{2d} (L_4 + L'_4)$$

Ma $(L_4 + L'_4) = L$ (con L = lunghezza del tubo forato) e quindi

$$p_m - p_n = (p_u - p_0) - L \left(\frac{\rho \lambda v^2}{2d} \right)$$

con il termine a destra uguale costante.

Il ragionamento dimostra quindi l'omogeneità dei carichi che fa sì che si crei un flusso laminare tra i due collettori.

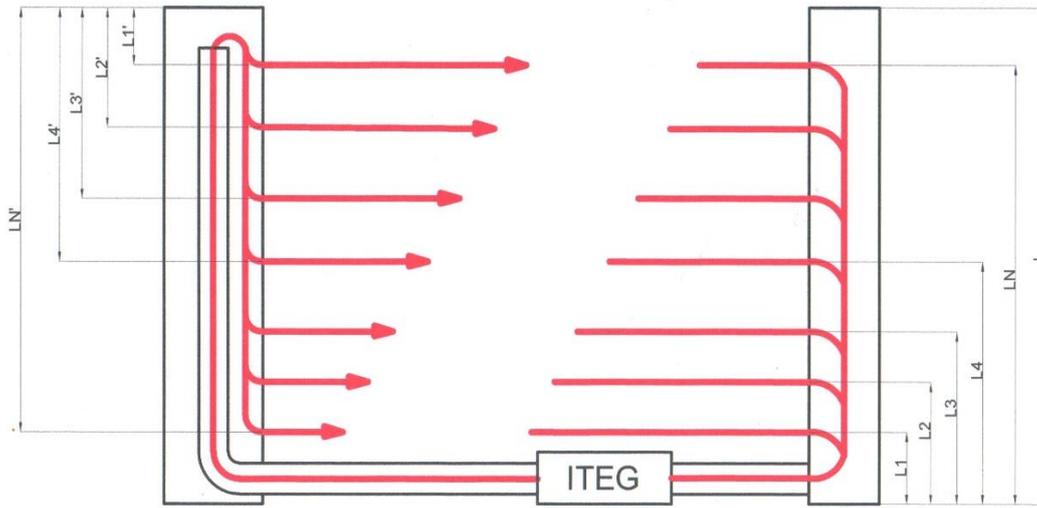


Figura 27: rappresentazione grafica dei flussi del miscelatore MHLM

3. Capitolo 3: applicazioni e confronti con dispositivi simili

3.1 Applicazione di MHLM e GSMF a un mini-impianto biogas MBGC

La necessità di trovare una fonte alternativa di energia unita alla filosofia “green”, ha fatto sì che energie rinnovabili (solare, termico, eolico, energia da biomasse ecc.) prendessero piede nel mercato globale. In particolare, è sempre più diffuso l’utilizzo delle biomasse, come scarti umidi sia domestici che agricoli, per la produzione di biogas. Questo processo può essere attuato attraverso una digestione anaerobica delle biomasse.

3.1.2 La digestione anaerobica

La digestione anaerobica è un processo di tipo biochimico che avviene in totale assenza di ossigeno. Il processo avviene tramite la demolizione delle sostanze organiche per mezzo di microrganismi che producono un gas (biogas) costituito per il 50-70 % da metano e per la restante parte da anidride carbonica.

Il biogas può essere utilizzato per la produzione di energia elettrica in cogeneratori, dove il calore di scarico del motore è convenientemente utilizzato per mantenere a livello ideale la temperatura del digestore.

Al termine del processo di fermentazione si conservano integri nell'affluente i principali elementi nutritivi già presenti nella materia prima, favorendo così la mineralizzazione dell'azoto organico. In questo modo il digestato residuo risulterà un ottimo fertilizzante nel quale l'azoto è in forma direttamente assimilabile dagli organismi vegetali. Può anche essere usato per proteggere i suoli contro l'erosione. Inoltre, grazie alla digestione anaerobica, si ottiene un notevole abbassamento dell'impatto odorigeno: attraverso misurazioni si è notato come l'odore possa essere ridotto fino all'80%. La digestione anaerobica causa anche la disattivazione di diverse specie di semi, funghi, parassiti, virus e batteri come la Salmonella Escherichia coli, Listeria. Questo rende l'uso del digestato potenzialmente non nocivo.

In letteratura esistono molti impianti preposti allo scopo, più o meno efficienti, la maggior parte dei quali richiede strutture impiantistiche grandi e costose e poco efficienti energeticamente.

Un mini-impianto biogas in regime continuo (MBGC) viene presentato nel paragrafo seguente, in cui sarà lampante la sua efficienza energetica e il possibile utilizzo dei dispositivi in questa oggetto di questa tesi per garantire alti rendimenti energetici e ambientali.

3.1.3 Il mini-impianto biogas continuo MBGC (Mini BioGas Continuous)

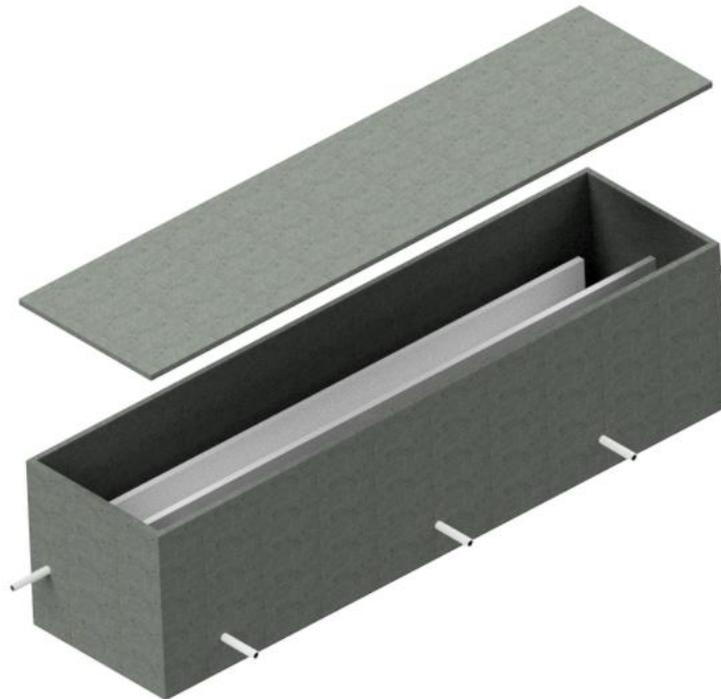


Figura 28: render del mini-biogas MBGC

Il MBGC (Mini BioGas Continuous) è un sistema integrato e soprattutto compatto che si va ad integrare alle piccole aziende agro-alimentari e agli insediamenti urbani abitativi. La peculiarità di questo impianto è che andrà a sfruttare risulite organiche di queste strutture tramite degli appositi sistemi idraulici che avranno la funzione di prelevare ed immettere nell'impianto il materiale refluo.

Anch'esso è un brevetto ideato e studiato dal professor Farnè e dal dott. Lavanga studiato e analizzato da Ragy Youssef Abdou nella sua tesi di laurea, *"Progettazione di dettaglio di un impianto mini-biogas e suo interfacciamento con un impianto di produzione di microalghe"*, Università di Pavia.

Il principale obiettivo di questo impianto è quello di recuperare più energia possibile dal materiale organico di scarto e di riutilizzare il sottoprodotto della digestione anaerobica in maniera tale da massimizzare il rendimento.

L'affluente, consistente in biomasse proveniente da scarti o reflui urbani o da aziende del settore agroalimentare o che comunque producano rifiuti umidi organici, seguirà un percorso all'interno di una vasca opportunamente dimensionata e divisa in comparti in cui il materiale organico sarà sottoposto a reazioni chimiche, diverse lungo il percorso generando netti aloclini caratterizzanti specifiche fasi biochimiche, che porterà alla produzione dei prodotti sopracitati. Il contenitore coibentato è un parallelepipedo a chiusura stagna. Il MBGC è suddiviso in 3 macro-volumi mediante due setti di altezza pari a $2/3$ dell'altezza totale. I primi due volumi sono posti in comunicazione attraverso un passaggio "naturale" fornito dal varco verticale lasciato dalla

lunghezza del primo setto mentre per collegare il secondo ed il terzo volume si usa un sistema più ingegnoso utile a filtrare il composto che ormai ha finito la digestione e, almeno per quanto riguarda il contributo energetico dato dal biogas, non ha più nulla da offrire. Il terzo volume è diviso in tre sotto-volumi che lo coprono in larghezza e sono tenuti ad una appropriata distanza, utile a far sì che si possano depositare, in tre stadi differenti, diverse tipologie di sali. I sali verranno poi prelevati tramite pompe posizionate agli angoli dove presumibilmente questi ultimi andranno a depositarsi.

In alcune zone di questo dispositivo, lungo il percorso del substrato, è fondamentale effettuare una miscelazione del composto in modo che l'affluente sia il più omogeneo possibile affinché le reazioni possano essere facilitate nel loro avvenire e possano interessare uniformemente la parte di volume soggetta a tali trasformazioni. Inoltre, essendo il flusso del liquido in vasca continuo, non c'è separazione fisica tra uno stadio di digestione e l'altro caratterizzati solo da specifici aloclini che consentono azioni specifiche, per cui è importante che la miscelazione avvenga solo per una porzione di digestato senza intaccare le porzioni successive, già avanti col processo di digestione, o con le porzioni precedenti impegnate in altre trasformazioni chimico-fisiche.

In questo contesto trova un perfetto utilizzo il miscelatore MHLM oggetto di questa tesi.

Più in particolare MHLM potrebbe trovare un ottimo utilizzo nella prima parte della vasca, zona in cui avviene l'immissione delle biomasse e dell'acqua necessari al processo di digestione anaerobica, e in cui è necessario creare uniformità di concentrazione delle varie sostanze presenti nel refluo affinché le reazioni chimiche determinanti la prima fase, chiamata idrolitica, possano avvenire in modo omogeneo nel volume voluto. Un'altra posizione in cui MHLM potrebbe trovare utilità è nella parte di transizione dal primo al secondo volume in cui, tramite un dispositivo a fibra ottica si cerca di ridurre la quantità di acido solfidrico, dannoso se arriva agli apparati di combustione interna e se presente in grandi quantità.

Inoltre, in diversi punti della struttura, nella fase di riciclo al termine del secondo volume e per tutta la durata del terzo volume, si ricorre alla separazione gravimetrica del fluido. Viene operata, al termine del secondo volume, per dividere la parte oleica e proteica da quella ideale al proseguimento del ciclo: in questo modo è possibile riciclarle. Al termine di questa sezione, terminata la digestione anaerobica, il fluido avrà idealmente tre fasi distinte: una più proteica sul fondo, una più oleica nella parte alta e quella ideale a continuare il ciclo, quasi esclusivamente composta da "cenere" (cioè i sali e microparticelle, entrambe sospese in soluzione, non avendo più caratteristiche di consistenza per gravitare significativamente) e acqua, nel centro. Inoltre, una configurazione modificata di GSMF ma sfruttante lo stesso principio risulta utile per attuare e agevolare la separazione del biogas prodotto, separando l'anidride carbonica, più pesante, e il metano, più leggero, in modo che possano essere riutilizzati soddisfacendo le concentrazioni richieste dagli scopi che andranno a mirare.

Nel terzo volume, mediante due setti divisori, la separazione gravimetrica è utilizzata per avere una divisione dal fluido in tre differenti tipologie di sali NPKx.

Per cui, anche il separatore gravimetrico GSMF risulta essere particolarmente comodo affinché l'efficienza energetica e ambientale, caratterizzante il mini-biogas trattato, sia garantita.

3.1.4 MHLM nel mini-impianto MBGC

Lo scopo per cui MHLM è stato progettato risulta perfetto per rispondere alla necessità di miscelare il refluo immesso nel separatore per renderlo omogeneo all'interno del volume occupato.

Il corretto funzionamento del digestore MBGC implica che la percentuale dei solidi totali del substrato sia circa il 10% (WET=10% significa che la matrice in circolo ha il 90% di acqua e 10% di ST (solidi totali); quest'ultimo a sua volta è composto da cenere al 20% e all'80% da SV (solidi volatili)): questo implica che il substrato entrante venga miscelato con un quantitativo ideale di acqua per avere il risultato voluto. Risulta quindi evidente la necessità di miscelare la quantità immessa rendendola uniforme.

Per l'immissione, vengono prelevati dalla precedente vasca di accumulo (Imhoff di primo conferimento dagli impianti di scarico) 1000 litri di refluo di cui il 20% di solidi totali, ripartiti in 700 litri di frazione proteica prelevate da parte bassa e 300 lt di frazione oleica prelevata da parte alta della vasca Imhoff, e vengono inviate tramite una condotta all'ingresso del MBGC, da cui è rilasciata in verticale e lungo la generatrice del tubo, qui inizia ad imprimere il moto laminare, poi sostenuto dall'assetto geometrico predefinito. Essendo in regime di vasi comunicanti se all'ingresso della vasca vi è una pressione idrostatica allora essa (in base al volume e al perimetro bagnato) tenderà ad espellere quello che c'è alla fine della stessa. A mezza altezza della fase liquida nel terzo volume verranno espulsi 1000 litri.

Per massimizzare il rendimento, verrà messa in ricircolo tutta quella parte non completamente digerita, realizzando un ricircolo interno. In base a risultati di un BMP test (test che valuta il potenziale metanigeno di una certa matrice), dopo 10 giorni si sarà digerita circa l'80% della massa. Al decimo giorno di processo verranno prelevati dalla fine del secondo volume circa 100 litri dal basso e 100 litri dall'alto, dove sono presenti frazioni proteiche e frazioni oleiche, rispettivamente, prelevate quindi in egual misura, unitamente a 800 litri dal fondo del terzo volume, questo prelevamento potrebbe avvenire grazie a un dispositivo GSMF come spiegato nel paragrafo successivo.

Per rendere i volumi derivanti dal ricircolo interno i più omogenei possibile con la massa entrante, quest'ultimi verranno immessi a metà del volume entrante (che impegnerà i primi circa 1,5m, dei preposti circa 3m), saranno immessi a circa 0,8 m dall'inizio (sia i 100+100 di V2 che gli 800 di V3). Per massimizzare la miscelazione del substrato, verranno ulteriormente resi omogenei, nei primi 3 metri del percorso, tramite un miscelatore MHLM, con i tubi drenanti disposti in verticale a 0,1 m e 2,9 m. Dopo la prima parte di processo giornaliero per facilitare l'assestamento delle concentrazioni, inizierà la parte di processo giornaliero di riscaldamento contestuale a quella di miscelazione. Questo processo avverrà per circa 15 minuti al giorno e la temperatura di riscaldamento sarà di circa 50°C, garantita da uno scambiatore di calore allocato in questa prima parte del processo.

Per cui, considerando che il dispositivo dovrà trattare un volume di 2000 litri ($2 m^3$), 1000 litri di immissione e 1000 litri di ricircolo interno, in un tempo di circa 15 minuti, si può calcolare la portata da garantire

$$Q_0 = \frac{V}{t} = \frac{2}{15 * 60} = 0,0022 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Tale portata dovrà essere garantita dalla pompa di circolazione (ITEG in questo caso o qualsivoglia altro dispositivo adatto allo scopo).

Supponendo che la lunghezza del rotore di ITEG sia 0,5 m e il diametro sia 0,07 m, come la condotta a cui è collegato, si ottiene un volume del rotore

$$V_{tot} = S * L = \frac{0,07^2 * \pi}{4} * 0,5 = 0,0019 \text{ [m}^3\text{]}$$

A cui va poi moltiplicato un fattore 0,9 per eliminare la parte di superficie destinata ai supporti radiali e alle corone circolari (vedere par. 2.2.2) ottenendo

$$V = V_{tot} * 0,9 = 0,00171 \text{ [m}^3\text{]}$$

Con questo volume disponibile del rotore la pompa, e quindi il miscelatore, può trattare una portata di

$$Q = V * \frac{n}{60} * \frac{1}{p} = 0,036 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Con

$n = 2500$ giri/min, valore scelto per il calcolo progettuale ma che nella pratica verrà variato in funzione allo scopo mirato

$p = 2$, si è scelto un numero maggiore di 1 per garantire un tempo maggiore all'interno del rotore e per non diminuire eccessivamente l'angolo dell'elicoide.

La portata calcolata con i dati di progetto risulta essere 16 volte superiore a quella necessaria nel caso l'intero volume sia trattato in 15 minuti, garantendo che il volume venga trattato più volte dal miscelatore aumentando l'efficienza del processo.

Un ulteriore miscelatore MHLM può essere predisposto nel tratto curvo tra il primo e il secondo volume. Qui avviene il passaggio del substrato, in assetto laminare, nel secondo volume in cui variano le reazioni chimiche, da idrolitica e acida, del primo setto, ad acida e metanigena, e in cui si andrà a dividere la parte oleica, proteica e quella composta da cenere (sali) e acqua. Per cui è importante che nel tratto di transizione tra questi due volumi sia effettuata un'azione miscelante affinché il substrato proveniente dal tratto precedente sia uniforme e omogeneo per agevolare l'azione dei batteri presenti in questo tratto. Inoltre, in questa zona di transizione può essere presente un sistema che dissolva l'acido solfidrico (H_2S), in azoto semplici o acidi simili, tramite un'azione di desolforazione che può avvenire in diverse modalità, ad esempio con l'azione della luce creata da fibre ottiche che generino una fotosintesi anossigenica, per cui è necessario un fluido di concentrazione omogenea.

Per assicurare una miscelazione uniforme e considerando che essa deve essere garantita lungo una superficie curva MLHM dovrà essere costituito da tubi drenanti curvi affacciati al profilo di miscelazione voluto.

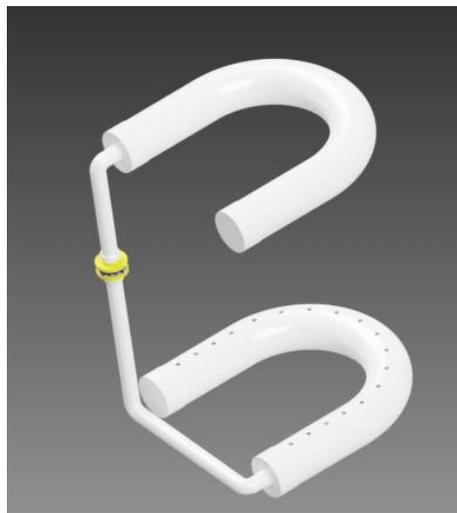


Figura 29: miscelatore MHLM in assetto per profilo della superficie miscelata curva

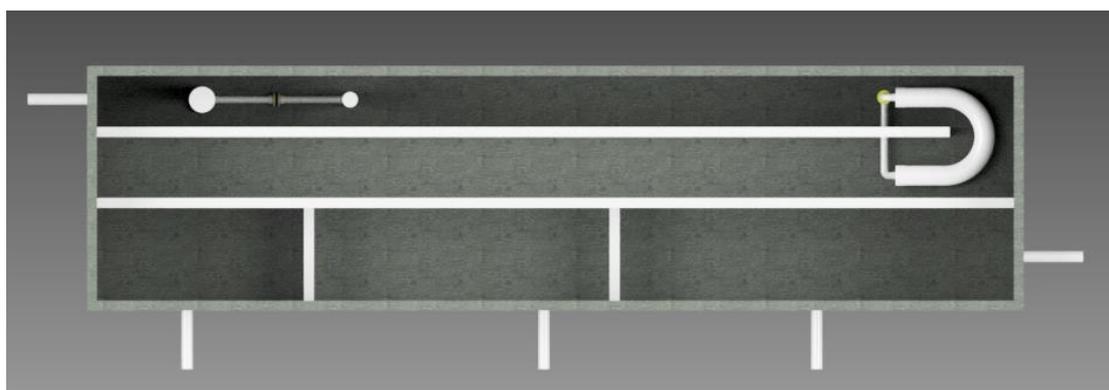


Figura 30: render del dispositivo MBGC con i due miscelatori MHLM

Il digestore MBGC può essere anche realizzato in assetto circolare con setti divisori concentrici. Esso emulerebbe la dinamica lineare del digestore MBGC presentato in precedenza, ma con fasi concentriche. Esso potrebbe essere realizzato in grandi impianti da circa 3000 m^3 con raggi da 14/18 m e altezza dei setti di 6/7 m. L'immissione avverrebbe nella zona centrale per poi fluire in direzione radiale man mano che variano le reazioni chimiche coinvolte, idrolitica, acida, acetica e metanigena. A questo punto il fluido sarà arrivato al cilindro interno. Qui tramite la spinta idrostatica proveniente dall'immissione giornaliera entrerebbero nel cilindro più esterno per iniziare un moto circolare lungo la circonferenza, emulando la terza fase di MBGC con dinamica lineare, per separare i sali. Questo percorso viene anche migliorato rispetto all'assetto lineare visto il maggior percorso effettuato dal fluido.

In questo contesto si potrebbe ulteriormente sfruttare la versatilità del miscelatore MHLM che potrebbe comunque garantire una miscelazione omogenea del substrato predisponendo i tubi drenanti a forma circolare.

Vengono predisposti quattro miscelatori MHLM in assetto circolare con diametri dei tubi drenanti sempre maggiori ipotizzando di inserire ognuno a metà della fase interessata, tra quelle citate in precedenza. Ciò esalta molto il vantaggio fondamentale caratterizzante MHLM di poter miscelare porzioni di volume in un volume maggiore solo tramite la particolare disposizione dei tubi. Nell'immagine seguente è presentato un rendering del dispositivo in tale assetto.

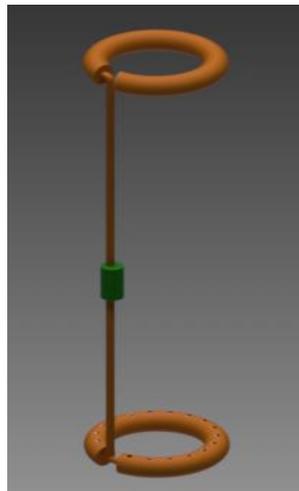


Figura 31: MHLM in assetto per profilo miscelato circolare

Sono anche stati inseriti degli pseudo-MHLM tramite cui effettuare l'azione di ricircolo della fase proteica e oleica, provenienti dalla fine della fase metanigena quindi ai limiti del cilindro interno, insieme all'acqua prelevata dalla fine della fase di separazione dei sali, reimmessi all'entrata. Inoltre, uno di questi si occupa di permettere il passaggio dal cilindro interno a quello esterno della fase a media densità composta da acqua sali e cenere.

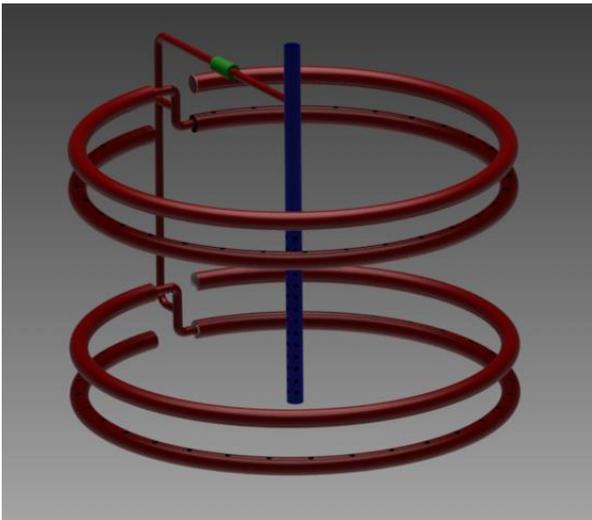


Figura 32: rendering pseudo-MHLM per ricircolo fase oleica e proteica

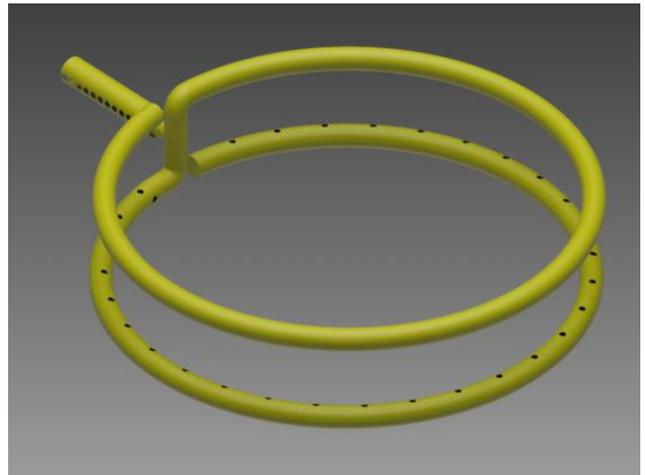


Figura 33: rendering pseudo-MHLM per immissione fase intermedia nel cilindro più esterno per separazione gravimetrica sali

Il risultato è quindi un impianto articolato ma che potrebbe alzare in maniera significativa l'efficienza grazie all'utilizzo di MHLM.

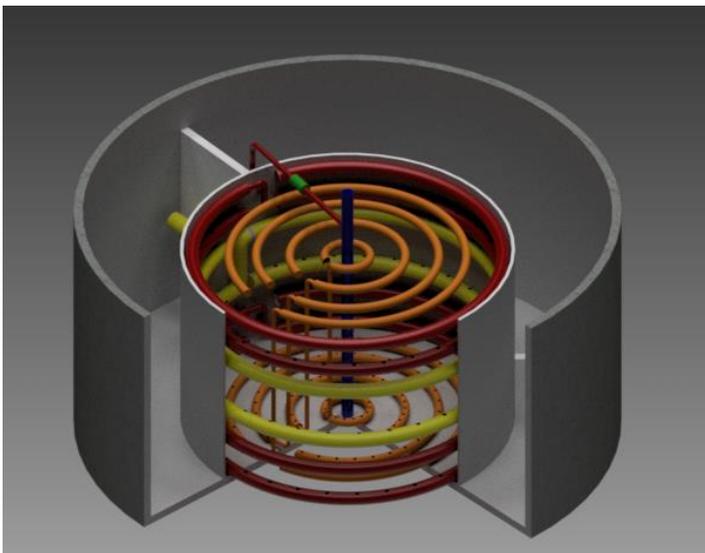


Figura 34: rendering MBGC circolare con miscelatori MHLM e pseudo MHLM

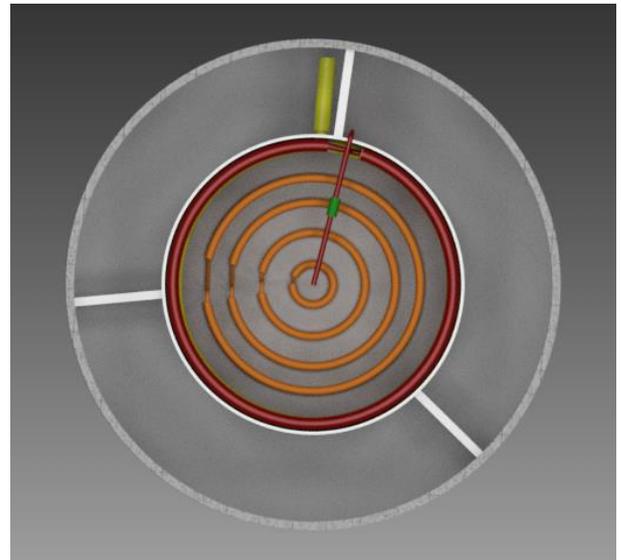


Figura 35: vista dall'alto di MBGC circolare

Dunque, risulta evidente la grande versatilità di MHLM che tramite la variazione della forma dei tubi drenanti è possibile conseguire una moltitudine di superfici miscelate coi i profili più disparati (circolare, segmentato, a sinusoide, ecc..) e che interessino solo una porzione volute del volume a disposizione.

3.1.4.1 *Miscelatori comunemente utilizzati nei digestori anaerobici*

Normalmente, per effettuare una miscelazione nei digestori anaerobici vengono utilizzati dei miscelatori dinamici a palettatura, come presentato nel paragrafo .

Un esempio di questi dispositivi può essere il miscelatore per omogeneizzare i fluidi di un digestore anaerobico serie BG500 prodotto dall'azienda mantovana DODA, COSTRUZIONE MACCHINE AGRICOLE di DODA ALDO & C SNC. Esso è un miscelatore dinamico a palettatura con un robusto telaio per resistere alle vibrazioni e che supporta un montaggio sia laterale che a soffitto. Il suo azionamento è realizzato tramite un motore trifase, che può essere da 15 kW/4poli o 18,5 kW/4poli a 50 Hz. Tutte le parti a contatto col substrato sono realizzate in acciaio inossidabile. La palettatura ha un diametro di 600mm e ruota a 500 giri/min, con il motore a 1450 giri/min ridotto con riduttore a cinghia.

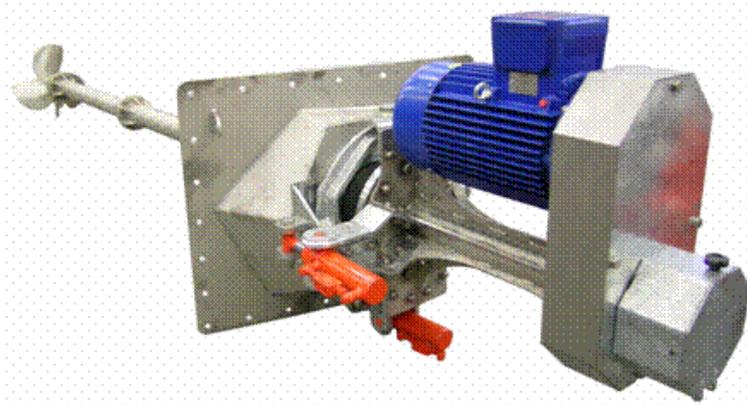


Figura 36: miscelatore dinamico a pale serie BG500 (DODA, COSTRUZIONE MACCHINE AGRICOLE di DODA ALDO & C SNC)

Esso presenta limitazioni sulla parte di volume miscelata, poco controllabile in quanto la profondità di miscelazione è fissata con la scelta di quella di montaggio, eventualmente modificabile tramite l'inclinazione dell'albero. Inoltre la sua efficienza è correlata alla forma della vasca in cui viene montato e presenta un'architettura ingombrante e fragile, visto l'albero di trasmissione in bagno d'olio.

Altri miscelatori adatti ai digestori anaerobici utilizzano un'asta verticale sulla quale sono montati e possono scorrere attuando la miscelazione a diverse profondità. Seppur più vantaggiosi grazie allo scorrimento sull'asta rimane evidente l'eccessivo ingombro e la bassa efficienza di miscelazione, più alta vicino alle pale e sensibilmente minore allontanandosi da esse. Esse infatti effettuano una miscelazione, che seppur circoscritta grazie alle scelte progettuali, coinvolge un volume di substrato che, per esempio nel caso di MBGC, potrebbe diminuirne l'efficienza visto il coinvolgimento di volumi in diversi stadi di trasformazione anaerobica.

Risultano quindi evidenti i vantaggi apportati dal miscelatore MHLM. Esso infatti garantisce una miscelazione localizzata creando superfici di profilo voluto di substrato miscelato richiedendo un bassissimo apporto energetico, necessario solo alla movimentazione della pompa, e un minor tempo perché la miscelazione sia soddisfacente e uniforme.

3.1.5 GSMF nel mini-impianto MBGC

Il funzionamento di MBGC risulta essere molto influenzato dall'utilizzo della separazione gravimetrica. Infatti, essa è sfruttata sia nel secondo volume in cui avviene la separazione della parte oleica, proteica e dei sali, fortemente incentivata nell'ultima parte di questo volume in cui vengono estratte la parte oleica e proteica, non essendo state ancora digerite durante il processo, o ormai talmente microscopiche da non subire predominanti effetti gravimetrici, a fronte della parte a densità media, sali e cenere, che invece proseguirà il percorso nel digestore per arrivare all'ultimo volume; ma anche nel terzo volume, in cui grazie a questo processo, i sali di diversa densità e composizione possono dividersi dall'acqua e depositarsi nei tre diversi micro-volumi creati in base alle loro caratteristiche fisico-chimiche. Ciò avviene tanto per soluzioni con sali disciolti di diverso peso specifico che per microparticelle, che andranno a costituire, con sedimentazioni dinamiche, chemoclini propri dei comparti previsti. Una separazione gravimetrica viene effettuata anche per la separazione del biogas prodotto, in anidride carbonica e metano.

Il separatore GSMF trattato in tesi trova un ideale utilizzo nell'ultima parte del secondo volume in cui, senza l'utilizzo di GSMF il progettista ha dovuto creare una superficie che migliorasse la già naturale propensione della miscela a separarsi ottenendo comunque una separazione poco efficiente.

Esso potrebbe essere collocato negli ultimi 3 metri del secondo volume in cui, vista la larghezza della sezione di 0,8 m, si ha una superficie massima disponibile per il separatore di

$$A = 3 * 0,8 = 2.4 \text{ [m}^2\text{]}$$

Il volume da trattare entrerà nel dispositivo grazie alla spinta idrostatica prodotta dall'immissione di nuovo refluo, compreso quello proveniente dal ricircolo interno, nella vasca. Quindi il volume che il dispositivo dovrà mettere a disposizione è di almeno 2000 litri affinché tutto il volume movimentato possa essere sottoposto a ulteriore separazione gravimetrica in GSMF.

Per cui si può trovare l'altezza da garantire dai pacchi lamellari, poi da ripartire in honeycomb superiore e inferiore in base alle quantità percentuali delle fasi presenti nel fluido.

$$H_{min} = \frac{V}{A} = \frac{2}{2.4} = 0,85 \text{ [m]}$$

Che arrotondo a 0,9 m. Considerando tutta l'altezza disponibile fino alla sommità del setto divisore del primo e secondo volume di 1,67m rimane a disposizione un'altezza di

$$1,67 - 0,9 = 0,77 \text{ [m]}$$

Considerando una pari quantità per le due fasi, oleica e proteica, nella composizione del refluo a questo stadio di trasformazioni l'altezza dedicata agli honeycomb verrà divisa in due per quello inferiore e superiore e la restante altezza sarà divisa tra gli interstizi, predisponendo per l'interstizio centrale il minor spesso possibile in modo da facilitare i processi di separazione nei cavedi verticali.

Il tempo di separazione sarà sicuramente garantito grazie al lungo stazionamento del fluido in questa ultima zona del secondo volume. Infatti, nuovo materiale da separare entrerà

giornalmente nel reattore garantendo circa 24 ore di tempo sicuramente sufficiente per la separazione.

Un altro utilizzo importante della separazione gravimetrica è identificabile nel trattamento della fase gassosa. Il digestato nel primo e secondo volume è sottoposto a reazioni chimiche il cui prodotto è il biogas, come precedentemente affermato, composto da CO_2 (anidride carbonica) e CH_4 (metano), entrambi gas molto utilizzati in svariati ambiti industriali, che quindi devono essere separati e prelevati singolarmente.

Il peso specifico del metano ($0.66 \text{ Kg}/m^3$) è minore di quello dell'aria ($1.18453 \text{ Kg}/m^3$) e minore di quello del CO_2 ($1.68 \text{ Kg}/m^3$), e l'ampia differenza tra i valori di peso specifico per i due gas suggerisce l'utilizzo di un separatore gravimetrico, riducendo notevolmente i costi per l'estrazione dei due gas che non avverrebbe altrimenti all'interno del digestore ma con tecniche in processi separati. Per questo scopo, un separatore riconducibile a GSMF con alcune differenze strutturali e di funzionamento è posizionato sui setti presenti nella vasca occupando l'intera superficie formata dai primi due volumi. Esso è composto da due pacchi di honeycomb, così come GSMF presentato finora. Il primo è realizzato in metallo, eventualmente coadiuvato da aderente serpentina/evaporatore di preposta pompa di calore, in modo da condensare l'umidità inevitabilmente prodotta dalla digestione anaerobica creando goccioline che ricadono all'interno del substrato, realizzando quindi un'azione deumidificante, ed è posizionato e sorretto direttamente dai due setti dividenti la vasca con due diversi distanziatori, sul primo e secondo setto, così da favorire il repentino passaggio di CO_2 verso il relativo preposto punto di prelievo. Si occuperà di eliminare le azioni orizzontali consentendo alla miscela di separarsi, contenendo e recuperando la fase più densa del biogas ovvero la CO_2 . Il secondo invece è posizionato sopra al primo, lasciando un interstizio tra i due necessario alla movimentazione ed estrazione della CO_2 , ed è realizzato in materiale plastico; esso si occuperà di isolare la miscela dai moti orizzontali affinché possa essere recuperata ed estratta la fase più leggera, ovvero il CH_4 .

La differenza sostanziale con GSMF presentato in precedenza, è che l'assetto appena illustrato prevede l'immissione del fluido dal basso attraverso l'intera superficie dell'honeycomb, e non attraverso il tubo drenante d'ingresso dell'interstizio centrale, quindi assente in questa configurazione.

Considerando una larghezza di 1,2 m, data dalla somma della larghezza del primo volume (0,4m) e del secondo (0,8m) e una lunghezza della vasca di 10 m si ottiene una superficie utile di

$$A = 1,2 * 10 = 120 \text{ [m}^2\text{]}$$

e avendo a disposizione dalla cima dei setti divisorii, posta a 1,67 metri, alla parete superiore della vasca un'altezza di

$$H_{max} = 2,5 - 1,67 = 0,83 \text{ [m]}$$

si procederà a dividere quest'ultima coerentemente alle differenti quantità prodotte di metano e anidride carbonica.

Predisponendo $\cong 7$ cm per gli interstizi, sia ha a disposizione 0,60 m rimanenti per i pacchi di honeycomb.

Dal sito www.arpae.it (dell'agenzia regionale prevenzione e ambiente dell'Emilia Romagna) si riporta una quantità di metano nel biogas, con potere calorifico medio di $23 \frac{MJ}{Nm^3}$ proveniente da digestori anaerobici, di 65-70%, il restante è da attribuire all'anidride carbonica e altri gas in minore quantità dipendenti dal tipo di biomasse digestate.

Le altezze dei pacchi di honeycomb potrebbero rispettare questa proporzione, risultando

honeycomb superiore -> $h_s = 60 * 0,65 \cong 40$ cm

honeycomb inferiore -> $h_i = 60 * 0,35 \cong 20$ cm

3.2 Cattura di CO2 da insediamenti antropici e processi di combustione

È noto come i gas ad effetto serra siano tra le principali cause del riscaldamento globale, ed il loro meccanismo di azione è stato studiato molto nel recente passato. Sebbene essi siano naturalmente presenti in atmosfera, la loro eccessiva concentrazione è direttamente imputabile all'attività dell'uomo (dalla seconda rivoluzione industriale ad oggi), poiché la produzione di tali gas avviene ad un ritmo certamente più elevato di quanto la natura ne emetta e di quanto essa stessa sia capace di assorbire senza conseguenze. A livello mondiale si stima che il 40% delle emissioni di anidride carbonica abbia origine antropica e sia riconducibile alla produzione di energia termoelettrica. La CO2 è emessa, infatti, principalmente dalla combustione di combustibili fossili, sia in impianti che producono energia, sia in spazi più ristretti come le caldaie. Tali emissioni provengono principalmente da processi industriali e di estrazione di risorse.

Una delle azioni possibili per la mitigazione e la stabilizzazione delle concentrazioni di gas serra nell'atmosfera è la Carbon dioxide Capture and Storage (CCS), ovvero un insieme di tecnologie e di processi che consistono nella separazione della CO2 da fonti di emissione puntuali di tipo industriale, nel trasporto fino a un punto di raccolta e nell'isolamento dall'atmosfera sul lungo periodo per la loro commercializzazione e ulteriore utilizzo. Attualmente la CO2 tipicamente viene rimossa per purificare altri gas industriali, ma nella maggior parte dei casi viene emessa in atmosfera senza un trattamento dei fumi.

I processi di cattura sono usati anche per ottenere significative quantità di CO2 ad uso commerciale, a partire da gas di scarico generati dalla combustione del carbone o di gas naturali. È nota anche la sua importanza utilizzata per produrre fertilizzanti e per gasare l'acqua.

La CCS andrebbe meglio applicata a fonti di emissioni di grandi dimensioni, come impianti di potenza e processi industriali per i costi elevati difficilmente sostenibili da realtà di minor dimensione.

3.2.2 Configurazioni di processo della CCS (Carbon dioxide Capture and Storage)

Esistono tre approcci principali per la cattura dell'anidride carbonica proveniente dal processo di combustione di un combustibile fossile primario (carbone, gas naturale o olio), da biomassa o da una miscela di entrambi.

- Il primo è costituito dagli impianti con cattura in post-combustione, ovvero sistemi che separano anidride carbonica dai gas prodotti dalla combustione di combustibile primario in aria.

Essi utilizzano un solvente liquido per catturare la piccola frazione di CO₂ (3-5% del volume) presente in un gas di scarico, del quale il maggior costituente è l'azoto. Per una centrale o un impianto a ciclo combinato, il sistema a post-combustione utilizza un solvente organico, tipicamente la monoetanolamina (MEA).

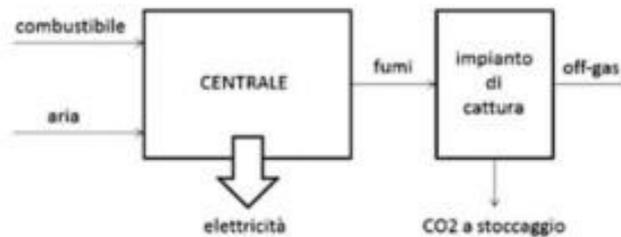


Figura 37: Schema generale di impianti con cattura post-combustione

La cattura della CO₂ in post-combustione è applicata principalmente ad impianti di potenza a carbone, ma può essere anche applicata a turbine a combustione a gas.

In una tipica centrale elettrica a carbone, il combustibile brucia con aria in una caldaia per produrre vapore, che mette in moto una turbina che genera elettricità. I fumi che escono dalla caldaia (gas di scarico) sono costituiti principalmente da azoto, CO₂, O₂, vapor acqueo e tracce di impurità.

La separazione tra la CO₂ e questo flusso gassoso è difficoltosa poiché l'anidride è presente in bassa concentrazione e a bassa pressione. In più, le impurità, materiale particolato, (diossido di zolfo e ossido di azoto) nel gas esausto possono degradare le sostanze assorbenti e ridurre l'efficacia di alcuni processi della cattura di CO₂.

Poiché la pressione parziale della CO₂ nel gas esausto che esce da un impianto di potenza a combustibili fossili è bassa, le tecnologie condotte ad alte pressioni parziali di CO₂, come solventi fisici o membrane, non sono applicabili per la cattura in post-combustione. Alle pressioni parziali tipiche di un impianto di potenza a carbone, solo i solventi chimici mostrano una capacità di assorbimento adeguata.

- Gli impianti con cattura in pre-combustione sono, invece, sistemi che processano il combustibile primario in un reattore con vapore e aria o ossigeno per produrre un gas di sintesi costituito principalmente da monossido di carbonio e idrogeno.

La tecnologia di pre-combustione si basa sulla conversione del combustibile in Syngas. Il Syngas è una miscela di CO e di H₂, ed è prodotto da un'ossidazione parziale del carbone in un gassificatore. Per aumentare l'ammontare di idrogeno viene utilizzato un reattore di scambio, che converte l'acqua e il monossido di carbonio (H₂O e CO) in idrogeno ed anidride carbonica (H₂ e CO₂). Prima che il combustibile raggiunga il bruciatore, la CO₂ è

separata dall'idrogeno e, quest'ultimo, è successivamente bruciato per produrre il calore necessario a generare vapore, costituendo una risorsa energetica priva di carbonio.

Anche se gli step iniziali di conversione sono più elaborati e costosi, l'alta concentrazione di CO₂ prodotta dal secondo reattore e l'alta pressione rendono più semplice la separazione della stessa.

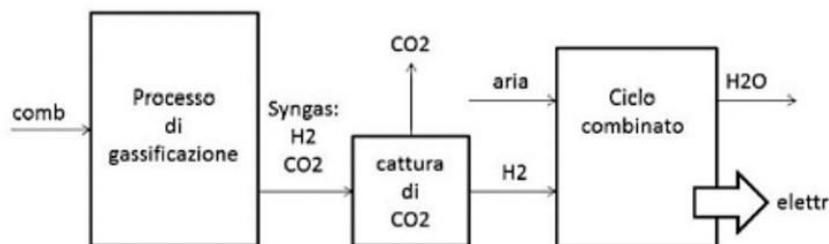


Figura 38: Schema generale di impianti con cattura pre-combustione

Attualmente le tecnologie che operano in post e pre-combustione per impianti di potenza possono catturare dall'85 al 95% di anidride carbonica prodotta. Sarebbero possibili anche rendimenti di cattura più elevati, ma questo implicherebbe un aumento di dimensioni, costi e dispendio energetico per la fase di separazione.

- Infine, ci sono configurazioni che utilizzano l'ossicombustione.

Sono sistemi, in pre-combustione che utilizzano l'ossigeno al posto dell'aria per la combustione dei combustibili primari, per produrre un gas combusto costituito principalmente da vapor acqueo ed un'alta concentrazione di CO₂. Il vapor acqueo viene poi rimosso raffreddando e comprimendo il flusso gassoso.

L'ossicombustione richiede la separazione dell'ossigeno dall'aria, a monte del processo, per avere O₂ puro al 95-99%. Il gas combusto può poi richiedere successivi trattamenti, quali la rimozione di inquinanti ed azoto, prima che la CO₂ sia stoccata. Questo sistema è ancora in fase dimostrativa.

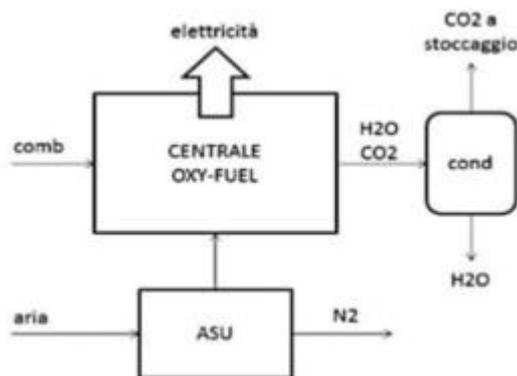


Figura 39: Schema generale di impianti con cattura tramite ossicombustione

3.2.3 Syngas

La gassificazione è un processo chimico che permette di convertire materiale ricco di carbonio, quale ad esempio carbone, petrolio o biomassa, in monossido di carbonio, idrogeno e altre sostanze gassose (costituenti il Syngas).

Il processo di degradazione termica avviene a temperature elevate (superiori a 700-800 °C), in presenza di una percentuale sotto-stechiometrica di un agente ossidante, tipicamente aria (ossigeno) o vapore. La miscela gassosa risultante costituisce quello che viene definito gas di sintesi e rappresenta essa stessa un combustibile. La gassificazione è un metodo per ottenere energia da differenti tipi di materiali organici e trova anche applicazione nel trattamento termico dei rifiuti e viene utilizzato sfruttando un sistema detto gassificatore.

L'uso del processo di gassificazione per la produzione di calore presenta alcuni vantaggi rispetto alla combustione diretta, a prezzo, tuttavia, dell'introduzione di alcune complicazioni impiantistiche. Il Syngas può essere bruciato direttamente in motori a combustione interna, o utilizzato per produrre metanolo o idrogeno, o convertito in combustibile sintetico. Ad oggi, tuttavia, sono assai poco numerosi gli impianti che producono combustibili sintetici da gassificazione e quelli esistenti utilizzano principalmente il carbone come materia prima. La gassificazione, infatti, può anche utilizzare materie prime altrimenti poco utili quali combustibili, come i rifiuti organici. Inoltre, il processo di gassificazione permette di togliere con le ceneri elementi altrimenti problematici per la successiva fase di combustione, quali ad esempio cloro e potassio, consentendo la conseguente produzione di un gas molto pulito.

La combustione dei combustibili fossili è attualmente ampiamente utilizzata su scala industriale per produrre energia elettrica. Però, considerato che quasi ogni tipo di materiale organico può essere utilizzato quale materia prima per la gassificazione, come il legno, la biomassa, o persino la plastica, questa può essere una tecnologia utile nell'ambito dell'incremento del contributo fornito dall'energia rinnovabile. Al processo di gassificazione della biomassa, come agli altri processi di combustione, potrebbero venire applicate tecnologie per la cattura e il sequestro delle emissioni di anidride carbonica.

Vista l'utilità del Syngas per abbattere le emissioni di CO₂ durante la combustione per la creazione di energia elettrica, e anche per la sua versatilità di materie dai cui viene creato, si potrebbe prevedere l'inserimento del separatore gravimetrico trattato in questa tesi (GSMF). Esso agevolerebbe la separazione delle diverse fasi costituenti il syngas così da trarre la maggiore efficienza da questo combustibile, potendo servire i diversi scopi garantendo il riciclo e utilizzo dei gas combusti.

Considerando una potenziale composizione del syngas prodotto durante un processo di decomposizione pirolitica (tabella sottostante) si evidenziano tre lotti differenziati da pesi molecolari diversi

- Anidride carbonica (CO₂)
- Idrogeno e metano e altri gas inerti (H₂ e CH₄)
- Monossido di carbonio e azoto (CO e N₂)

Questa differenza di pesi molecolari suggerisce la potenzialità di utilizzo del separatore gravimetrico GSMF.

La sua progettazione può iniziare considerando un volume a disposizione di 50 m³ (volume di un container 2500x2500x8000 mm) e progettando le dimensioni degli honeycomb e degli interstizi secondo la composizione del Syngas.

Considerando l'assetto con gli honeycomb adiacenti alla superficie interna di ingresso del separatore, si può calcolare la superficie disponibile per gli honeycomb, ottenendo

$$A = 2,5 * 8 = 20 [m^3]$$

I tre lotti considerati occupano una certa percentuale della miscela iniziale da trattare

- Anidride carbonica (CO₂) -> 16%
- Monossido di carbonio e azoto (CO e N₂) -> 72%
- Idrogeno e metano (H₂ e CH₄) e altri gas inerti -> 12%

COMPONENTI DEL SYNGAS	PESO MOLECOLARE [u]	COMPOSIZIONE PER GASSIFICATORE UPDRAFT (%)
Monossido di carbonio (CO)	28	20
Idrogeno (H ₂)	2	5
Metano (CH ₄)	16	4
Anidride carbonica (CO ₂)	44	16
Azoto (N ₂)	28	52
Altri gas inerti	-	3

Tabella 2: componenti del Syngas

Dividendo l'altezza in due, metà per il tratto di honeycomb e metà per quello degli interstizi in modo che possano fungere da serbatoi dove aumentare la concentrazione delle sostanze, si ottiene 1,25m per entrambe le porzioni. Si decide di considerare 1,5 m per il tratto di honeycomb, così da sovradimensionarli per poter beneficiare maggiormente della loro azione sui moti orizzontali, e di 1 m per il tratto di honeycomb.

Il tratto di honeycomb sarà costituito da due pacchi lamellari alti 0,6 m quello in alto e 0,9 m quello in basso (in modo da tenere in considerazione la differenza percentuale tra la fase "leggera" e quella "pesante")

È dunque possibile calcolare il tempo di ritenzione minimo affinché avvenga la separazione gravimetrica considerando una portata di progetto di 100 l/min (0,1 m³/min)

$$t_{sep} = \frac{L * B * H_{min}}{Q} = \frac{8 * 2,5 * 1,25}{0,1} = 250 \text{ [min]}$$

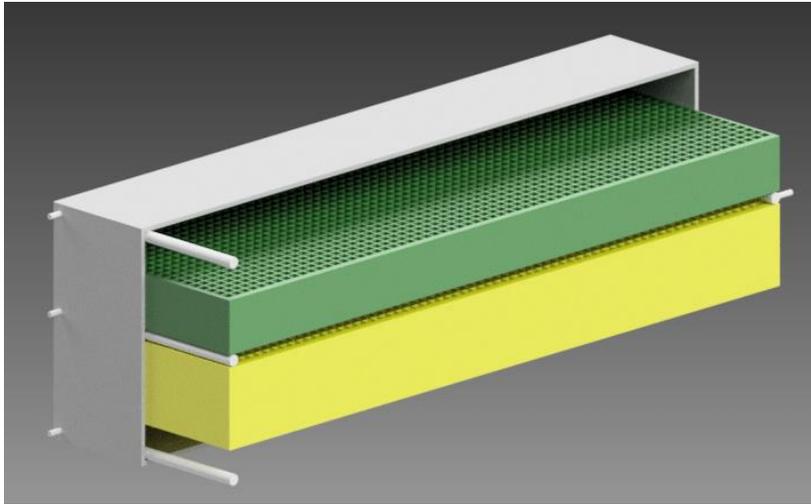


Figura 40: render GSMF per Syngas

3.3 Cattura di CO₂ dall'aria

La cattura della CO₂, oltre che nei processi di combustione nelle centrali termoelettriche o negli insediamenti urbani esposti nel paragrafo precedente, può avvenire per rimuovere la CO₂ in eccesso libera nell'aria. Essa può implicare metodi naturali, ad esempio impiantando foreste di grandi dimensioni, o metodi artificiali che utilizzano proprietà dell'anidride carbonica per essere estratta.

Nel mondo sono già presenti impianti preposti allo scopo e la prima a idearne e realizzarne uno è stata la società Svizzera *Climeworks*, con sede a Zurigo, che nel 2017 ha inaugurato il primo impianto per cattura di CO₂ direttamente dall'aria. Il progetto sfrutta dei filtri appositamente progettati e riutilizzabili migliaia di volte, composti da granuli porosi modificati con ammine (sostanze con presenza di azoto), che fanno in modo che l'anidride carbonica si leghi all'umidità dell'aria separandosi da essa. Una volta saturo il filtro sarà riscaldato a una temperatura di 100 °C in modo da rilasciare l'anidride carbonica per essere stoccata ed utilizzata per altri scopi, come la produzione di fertilizzante, per rendere gassate le bevande o per essere convogliata in serre per riscaldarle. I vari filtri separatori sono disposti in modo da creare grandi batterie formando una grande superficie di raccolta dell'aria, come mostrato in *Fig.41*.



Figura 41: configurazione del dispositivo di cattura della CO₂ dall'aria con disposizione in batterie

Questo primo impianto si trova sul tetto di un impianto di incenerimento di rifiuti fuori Zurigo, così che il calore necessario alla separazione della CO₂ dal filtro venga ottenuto direttamente da quello residuo dell'impianto.

Anche in Italia è presente un impianto della società, oltre che in Svizzera e Islanda, inaugurata nel 2018 a Troia, in provincia di Foggia, che si propone di catturare 150 tonnellate di CO₂ annue.

Il problema di queste tecnologie è che devono estrarre una sostanza fortemente diluita nell'aria (essendo presente in percentuali dello 0,03-0,04%) con la necessità quindi di enormi impianti per trattare una quantità sufficiente di aria per estrarre tonnellate di CO₂. Infatti, il progetto si

propone di estrarre l'uno per cento della quantità annualmente emessa in atmosfera, pari ad alcune decine di miliardi di tonnellate, entro il 2024. Ciò implica un'enorme quantità di anidride carbonica da estrarre che considerati i costi, dichiarati da un co-fondatore di Climeworks, Christoph Gebald, di circa 400 dollari a tonnellata di CO₂ catturata, rende chiara la necessità di enormi quantità di denaro per finanziare il progetto e il grande numero di impianti simili, circa 250.000, da dover costruire nel mondo per sostenere gli scopi preposti.

3.3.1 GSMF per catturare CO₂ dall'aria

In questo ambito può trovare una buona efficacia l'utilizzo del separatore GSMF. Esso, infatti consentirebbe di effettuare una separazione dell'aria permettendo di abbattere i costi, non dovendo realizzare particolari filtri e non necessitando del riscaldamento per l'estrazione della CO₂ da essi. Inoltre, esso consentirebbe anche di catturare dall'aria oltre che l'anidride carbonica, anche l'ossigeno, utilizzabile in altri processi o per aumentare la percentuale di ossigeno in zone in cui esso può essere carente, e dall'azoto, gas inerte immettabile nuovamente in atmosfera o utilizzabile in altri scopi necessari.

Analizzando i pesi molecolari delle sostanze componenti l'aria (tab.2), si possono identificare i tre lotti caratterizzati da un peso specifico differente in cui si vuole dividere l'aria con GSMF (trifase).

COMPONENTI DELL'ARIA	PESO MOLECOLARE [u]	COMPOSIZIONE [%]
Anidride carbonica (CO ₂)	44	0,03
Ossigeno (O ₂)	32	21
Azoto (N ₂)	28	78
Altri gas	-	0,97

Tabella 3: composizione dell'aria

Supponendo delle dimensioni di 1500x450x600 mm per il dispositivo e supponendo un tempo di riferimento, eventualmente da modificare e valutare in base a prove sperimentali con coni di Imhoff o da esperienze precedenti per la separazione gravimetrica dell'aria, di 30 min e una portata di 7 l/min (0,007 m³/min) si trova un'altezza minima da garantire dai pacchi di honeycomb di

$$H_{min} = \frac{t_{sep} * Q}{L * B} = \frac{30 * 0,007}{1,5 * 0,45} = 0,31 \text{ m} = 31 \text{ cm}$$

Essa dovrà essere divisa tenendo conto della differenza sostanziale di composizione tra l'anidride carbonica, più pesante e l'azoto, più leggero.

Si è scelto 5 cm per quello l'honeycomb inferiore, sovradimensionandolo per permettere di avere più superficie a disposizione per la separazione tra l'anidride carbonica e le altre fasi più pesanti, e 30 cm (4 cm in più di quelli minimi a garantire i tempi di separazione per sovradimensionare e

assicurare una migliore separazione visto lo spazio a disposizione) per quello superiore. La restante altezza verrà divisa tra gli interstizi riducendo al minimo l'interstizio centrale e predisponendone una buona parte per stoccaggio dell'azoto predominante in quantità nella miscela.

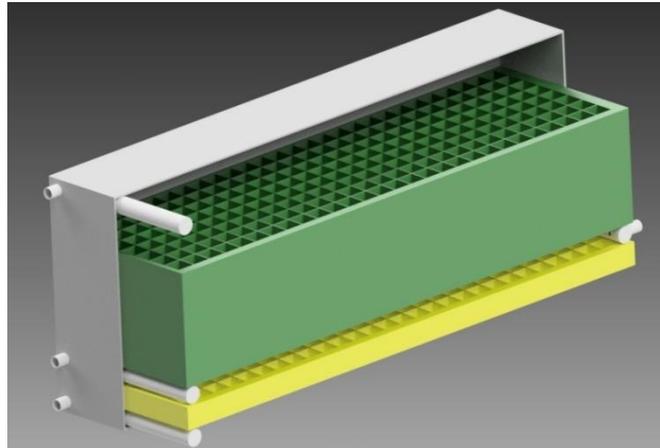


Figura 42: render del dispositivo GSMF per cattura della CO2 dall'aria

3.3.2 Acidificazione degli oceani per catturare CO2 dall'aria

Esistono anche altri modi per catturare l'anidride carbonica dall'aria.

Circa il 30% delle emissioni di CO2 nell'aria viene ad esempio catturata e assorbita dagli oceani ma tale processo può essere aumentato.

Il progetto "Desarc-Maresanus", sviluppato dal Politecnico di Milano, ha studiato un processo di alcalinizzazione dei mari per contrastare allo stesso tempo due problemi ambientali di grandissima rilevanza: l'aumento delle concentrazioni di biossido di carbonio (CO2) in atmosfera e la conseguente acidificazione degli oceani. Il processo consiste nello spargimento di idrossido di calcio sulla superficie del mare che, combinandosi in un processo spontaneo con acqua e CO2 rimossa dall'atmosfera, aumenta la capacità tampone delle acque marine verso l'acidità e permette di contrastare la diminuzione del pH.

Essa richiederebbe un grande sforzo economico, non essendoci ancora navi già esistenti disponenti di tale tecnologia, e una enorme quantità di acqua dolce da mischiare alla calce idrata $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sono stati prodotti due scenari consideranti 100 milioni di tonnellate all'anno e addirittura 200 milioni all'anno. Secondo tali studi, il Mar Mediterraneo potrebbe assorbire 145 milioni di tonnellate all'anno in più di quanto non faccia già adesso.

Ovviamente tale tecnologia dovrà essere da integrare con altre per supportare numeri così elevati di sostanze utilizzate e di numero di zone nel mondo in cui attuare tali processi. Essa dovrà anche fare i conti con gli sviluppi nell'industria della calce e nella difficoltà di utilizzo delle navi già esistenti.

4 Capitolo 4: conclusioni

In conclusione, risulta dunque evidente la potenzialità dei due dispositivi presentati soprattutto nel campo delle energie rinnovabili, come mostrato nell'utilizzo nel digestore biogas (lineare e circolare), nella separazione del Syngas e nella cattura della CO₂ dall'aria. Ovviamente, essendo due dispositivi molto versatili, modificando gli assetti e le dimensioni posso apportare un vantaggio in molti altri campi industriali come l'industria alimentare, per esempio nella produzione dello yogurt, per omogeneizzare il prodotto e le reazioni al suo interno, o nella produzione della birra per uniformare la fermentazione del luppolo.

Possono essere utilizzati in impianti sia di piccole dimensioni che di grandi e richiedono una manutenzione minima, ad esempio per pulire i filtri, predisposti prima dell'entrata in GSMF necessari per garantire una dimensione degli agenti in sospensione adeguata. Comprendono un basso costo di costruzione, visti i materiali facilmente acquistabili sul mercato, ma anche un basso costo di utilizzo. Infatti, soprattutto considerando di usare la pompa ITEG come esposto in questa tesi, il consumo energetico in entrambi i dispositivi è minimo e da attribuire interamente a ITEG e sensori/valvole.

MHLM presenta soprattutto il grande vantaggio di poter miscelare solo una porzione di un dato volume, come risulta molto evidente osservando l'utilizzo di questo miscelatore nel digestore anaerobico MBGC. Esso facilita l'avvento di diverse reazioni biochimiche in diverse zone del reattore senza che una fase del processo intacchi o contami l'altra grazie alla creazione di superficie volute miscelate.

GSMF, grazie alla facilità costruttiva e alla versatilità come separatore gravimetrico N-fasi, può essere progettato e adattato a molte applicazioni industriali. Oltre a quelle esposte in questa tesi esso può trovare utilizzo in tutte quelle casistiche in cui una separazione economica ma precisa è richiesta.

In definitiva, essi presentano una valida alternativa ai molti sistemi di separazione e miscelazione di miscele già presenti ed esistenti contribuendo ad abbattere i costi di costruzione, manutenzione e utilizzo riuscendo comunque a raggiungere alti livelli di separazione o miscelazione grazie alle caratteristiche di ritorno inverso, cruciali in entrambi i dispositivi.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- T. Ahmed, N. Makwashi e M. Hameed, - *A Review of Gravity Three - Phase Separators*, Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS), 2017.
- Charles Ross & Son Company, *Mixing Equipment and Applications in the Food Industry*.
- Baker, J.R., 1991. Motionless mixers stir up new uses. Chem. Eng.Prog. 87, 32–38
- Maurice Stewart e Ken Arnold, *Gas Liquid and Liquid-Liquid Separators*, 2008
- Batchelor, G.K., *The theory of Homogeneous Turbulence*, Cambridge University Press, Cambridge, England 1953
- Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng, Suzanne M. Kresta- *HANDBOOK OF INDUSTRIAL MIXING - Science and practice*, cap. 21-*Mechanical Design of Mixing Equipment*, 2004.
- M. Mostafaiyan, Mohammad Reza Saeb, Alireza Emami Alorizi, Maysam Farahani - *Application of evolutionary computational approach in design of horizontal three-phase gravity separators*, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014
- Elhaj, M. E. M., & Adli, M. G. A. (2014). *Influence of flow characteristics on the design of two-phase horizontal separators*. *Journal of Science and Technology*, 15
- Akram Ghanem, Thierry Lemenand, Dominique Della Valle, Hassan Peerhossaini - *Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods – A review*, *Chemical Engineering Research and Design* 92, 2014, 205–228
- FARNÈ S. - *Macchine. Macchine idrauliche*. Synopsis, Libreria Universitaria Medea.
- www.impianto.it/la-cattura-della-co2
- www.arpae.it – Agenzia regionale prevenzione e ambiente dell’Emilia Romagna
- www.businessinsider.com/in-svizzera-la-prima-centrale-che-cattura-lanidride-carbonica-dallaria-e-la-trasforma-in-prodotti-utili/
- <https://www.ingegneriadellambiente.net/ojs/index.php/ida/article/view/261/360>