

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei
Materiali Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Chimica e dei Processi Sostenibili

Tesi di Laurea Magistrale

Studio sull'adeguamento e upgrade della sicurezza su reattori di pre-polimerizzazione poliuretana



**Politecnico
di Torino**

Relatori

Prof. Davide Fissore

Prof.ssa Micaela Demichela

ing. Isabella Miniotti

Candidato

Andrea Giardini

Marzo 2025

INDICE

1	Introduzione	5
2	Chimica del poliuretano	7
2.1	Prepolimeri poliuretatici	7
2.2	Polisocianati	8
2.2.1	Reazione uretanica	11
2.2.2	Reazione con gruppi amminici	12
2.2.3	Reazione con acqua	12
2.2.4	Reazione di dimerizzazione	13
2.3	Polioli	13
2.3.1	Poliesteroli	14
2.3.2	Polieteroli	15
2.4	Reazione poliuretanic	15
2.5	Numero di OH	18
2.6	Additivi e catalizzatori	19
2.7	Prodotti poliuretatici finiti	20
3	Impianto e processo produttivo	22
3.1	Storia dello stabilimento	22
3.2	Lo stabilimento produttivo	23
3.3	Reparti e sistema di produzione	25
3.3.1	Reparto A – Miscela polioliche	25
3.3.2	Reparto B – Prepolimeri	26
3.4	Ricetta di un prepolimero	28
4	Gestione e controllo di processo	31
4.1	Sistema di automazione	31

5	Sicurezza di processo	35
5.1	Matrice di rischio	35
5.1.1	Nuova matrice di rischio secondo la procedura G-R-PRS-006	36
5.1.2	Caratterizzazione e controllo di processo dei prepolimeri	39
5.1.3	Gap analysis per l'adeguamento dei reattori	40
5.1.4	Analisi dei Rischi e Misure di Mitigazione per il Reattore RA4	42
5.1.5	Analisi dei Rischi e Misure di Mitigazione per il Reattore RA3	45
6	Ricerca e installazione dei misuratori di portata	49
6.1	Misuratori di portata	50
6.2	Dimensionamento	53
6.3	Installazione	71
6.3.1	Risoluzione problematiche con flusso bifasico	72
7	Adeguamento degli interblocchi di sicurezza	74
7.1	Differenze tra blocchi D e SIL1	74
7.1.1	Blocco sulla temperatura di avvio dei reattori (Tstart)	75
7.1.2	Blocco del sensore di giri dell'agitatore	77
7.1.3	Blocco D sull'alto livello (in assenza del disco di rottura)	79
7.2	Calcolo della PFD_{avg} per i loop di sicurezza	81
7.2.1	Loop di Temperatura (Tstart)	81
7.2.2	Loop di Temperatura (Sipart)	82
7.2.3	Loop di Livello con Sensore <i>E+H FTL51B</i>	82
7.2.4	Loop di Livello con Sensore <i>E+H FEL54</i>	83
7.2.5	Loop del Sensore di Giri	83
7.2.6	Analisi dei Loop di Sicurezza	84
7.3	Analisi dei tempi e dei costi delle soluzioni	85
7.4	Implementazione della soluzione 1	86

8	Conclusioni	89
9	Lista dei simboli	91
10	Riferimenti bibliografici	92

1 Introduzione

Questa tesi nasce dall'esigenza di garantire un elevato livello di sicurezza funzionale nel processo di produzione dei prepolimeri poliuretanicici presso lo stabilimento BASF di Villanova d'Asti, con particolare riferimento al reattore RA3. L'obiettivo principale è stato l'analisi, la verifica e l'implementazione di Safety Instrumented Functions (SIF) e Safety Instrumented Systems (SIS), in conformità con la normativa G-R-PRS 006, con particolare attenzione ai criteri di indipendenza delle barriere di sicurezza.

Uno dei primi passaggi fondamentali del lavoro è stato lo studio del calore di reazione e della gestione dell'acidità dell'ambiente di reazione. L'aggiornamento delle metodologie di calcolo di queste due variabili è stato necessario per una corretta classificazione delle ricette di produzione secondo la procedura BASF:

- Categoria 1: ricette intrinsecamente sicure, in cui il calore di reazione e l'acidità sono sotto controllo senza necessità di ulteriori misure di mitigazione.
- Categoria 2 e 3: ricette con potenziali rischi di instabilità termica o chimica, che richiedono interventi specifici per la loro gestione in sicurezza.

Lo studio del calore di reazione è stato essenziale per valutare il rischio di runaway termico nelle reazioni di prepolimerizzazione. Attraverso analisi termodinamiche e il confronto con le specifiche di sicurezza, è stato possibile determinare le condizioni operative ottimali e identificare i parametri critici da monitorare. Parallelamente, la valutazione dell'acidità dell'ambiente di reazione ha permesso di verificare la necessità di aggiustamenti nelle formulazioni chimiche per garantire una maggiore stabilità e compatibilità con i dispositivi di misura e controllo.

Successivamente, è stata condotta una Gap Analysis per individuare le discrepanze tra le misure di sicurezza esistenti e quelle richieste dal nuovo framework normativo. Questa analisi ha evidenziato la necessità di migliorare la strumentazione di monitoraggio e protezione, con particolare attenzione alla gestione dei blocchi di sicurezza di Classe D e all'implementazione di interblocchi SIL1 per garantire una riduzione adeguata del rischio.

Il reattore RA3 è stato scelto come unità di studio e implementazione in quanto in fase di messa in opera, rendendo più semplice l'esecuzione di modifiche impiantistiche senza interrompere la produzione. L'analisi ha portato alla decisione di integrare un misuratore di portata massica Coriolis Promass Q300 di Endress+Hauser, installato all'interno di un blocco di sicurezza di

Classe D. Questa scelta è stata supportata dal calcolo della PFD_{avg} , che ha confermato la coerenza del dispositivo con i requisiti di sicurezza richiesti.

L'implementazione del Promass Q300 ha permesso di ottenere diversi vantaggi, tra cui:

- Miglioramento della precisione nella misura della portata massica, fondamentale per la gestione sicura delle ricette di Categoria 2 e 3.
- Riduzione delle perdite di carico grazie al design a passaggio pieno, che minimizza l'impatto sul processo produttivo.

Il risultato finale della tesi è un sistema di sicurezza ottimizzato, conforme alle normative BASF, che garantisce una maggiore protezione del processo e del personale, riducendo il rischio di scenari incidentali critici. L'analisi condotta dimostra come una corretta implementazione della strumentazione di sicurezza, supportata da uno studio approfondito delle reazioni chimiche e delle condizioni operative, possa migliorare significativamente l'affidabilità operativa, assicurando il rispetto degli standard più elevati nel settore della sicurezza funzionale di processo.

2 Chimica del poliuretano

Nella categoria dei poliuretani (PU) rientra un'ampia gamma di prodotti finiti, i quali differiscono molto per caratteristiche sia fisiche (e.g. durezza, densità, porosità) che chimiche (e.g. composizione, reattività, resistenza all'invecchiamento).

La chimica dei prepolimeri poliuretani evolve a partire dalla reazione tra polioli e polisocianati (chiamati nella maggior parte dei casi solo isocianati), condotta in eccesso di questi ultimi, portando alla formazione del prepolimero. Tuttavia, anche altre reazioni possono avvenire, influenzando negativamente la qualità del prodotto e rappresentando una possibile problematica per la process safety.

2.1 Prepolimeri poliuretani

I prepolimeri poliuretani appartengono alla classe degli oligomeri uretani, ottenuti attraverso una reazione di poliaddizione tra isocianati e polioli. Il termine *prepolimero* sottolinea il fatto che il processo chimico non si completa interamente all'interno del reattore. Il poliuretano finale, infatti, è un materiale solido dalle proprietà chimico-fisiche estremamente variabili, mentre il prepolimero resta in fase liquida.

Durante la prepolimerizzazione, la reazione tra isocianato e poliolo avviene in condizioni non stechiometriche, ossia con un rapporto tra i reagenti tale da impedire la completa conversione in poliuretano. Questo approccio consente di ottenere un prodotto con una viscosità controllata e caratteristiche specifiche, funzionali ai successivi processi di trasformazione. Il processo è rappresentato schematicamente nella Figura 2.1.1.

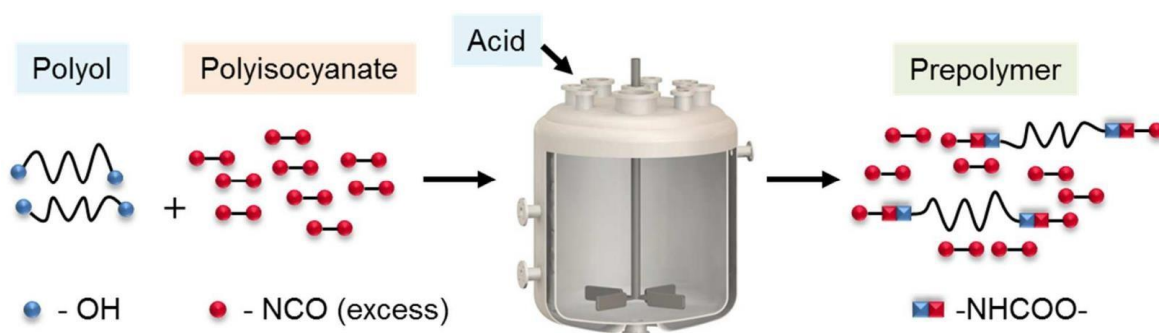


Figura 2.1.1 – Rappresentazione schematica del processo di prepolimerizzazione

Nel processo di prepolimerizzazione, il poliolo viene introdotto in quantità inferiore rispetto

all'isocianato, in modo da lasciare la reazione incompleta. La polimerizzazione viene successivamente completata presso il sito del cliente, dove il poliuretano solido viene formato all'interno di stampi dedicati. Di conseguenza, il prepolimero risultante conterrà sia isocianati oligomerizzati, sia una frazione di monomeri liberi non ancora reagiti.

I polioli impiegati nella sintesi di questi materiali appartengono principalmente a due classi: i polieteroli (PEOL) e i poliesteroli (PESOL), scelti in base alle proprietà richieste per l'applicazione finale.

Nei paragrafi successivi verranno analizzati in dettaglio i due reagenti fondamentali coinvolti nella sintesi del prepolimero e, più in generale, nella produzione dei poliuretani.

2.2 Polisocianati

I polisocianati sono composti chimici caratterizzati dalla presenza di più gruppi isocianato ($-N=C=O$) all'interno della loro struttura molecolare. La loro classificazione avviene in base alla natura chimica della catena a cui questi gruppi sono legati, distinguendo tra polisocianati alifatici, aromatici, cicloalifatici e policiclici.

La reattività dei polisocianati è influenzata dall'elettronegatività del gruppo funzionale a cui l'isocianato è legato. In particolare, i polisocianati aromatici risultano i più reattivi, motivo per cui sono anche i più impiegati nell'industria dei poliuretani. La produzione industriale di questi materiali si basa principalmente su due polisocianati bifunzionali di natura aromatica: il toluene diisocianato (TDI) e il difenilmetano diisocianato (MDI), che possono essere utilizzati singolarmente o in miscela.

Il TDI si presenta come un liquido a bassa viscosità ed è generalmente una miscela di due isomeri, 2,4-TDI e 2,6-TDI, presenti in proporzioni variabili, tipicamente 80:20 o 65:35. La diversa disposizione strutturale di questi due isomeri è illustrata nella Figura 2.2.1.

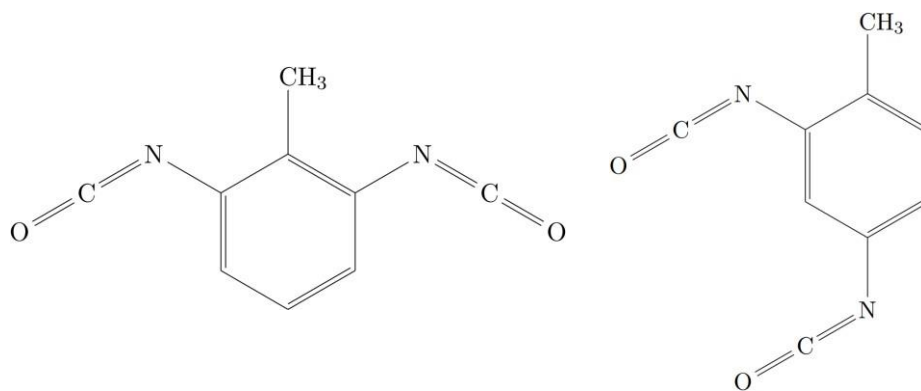


Figura 2.2.1 – struttura chimica del 2,6-TDI a destra e del 2,4-TDI a sinistra

Sebbene la produzione dell'MDI sia più complessa rispetto a quella del TDI e il suo utilizzo sia stato introdotto successivamente, esso rappresenta oggi il polisocianato più diffuso nell'industria dei poliuretani. Questa predominanza è legata a due fattori principali: da un lato, i poliuretani derivati dall'MDI offrono una maggiore versatilità nella formulazione dei prodotti finali; dall'altro, la minore volatilità dell'MDI rispetto al TDI ne migliora il profilo di sicurezza nei processi industriali, riducendo il rischio di esposizione e aumentando il livello di process safety. Il termine MDI può riferirsi a diverse varianti, tra cui il MDI polimerico (PMDI), noto anche come MDI grezzo. Questa tipologia consiste in una miscela di poli-isocianati, comprendente gli isomeri del difenilmetano diisocianato e il polifenilene diisocianato, ottenuta dalla reazione tra formaldeide e anilina. Il PMDI, caratterizzato da un colore giallo-bruno, è talvolta denominato isocianato scuro. La sua struttura è illustrata nella Figura 2.2.2.

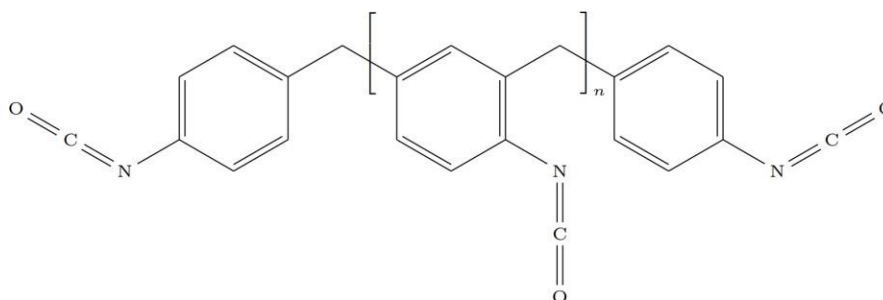


Figura 2.2.2 – struttura chimica del PMDI, n assume solitamente valori compresi tra 0 e 4

Un'altra variante dell'MDI è il MDI monomerico puro (MMDI), ottenuto per distillazione dal PMDI. Questo composto è costituito principalmente dall'isomero 4,4'-difenilmetano

diisocianato, con una presenza minore dell'isomero 2,4'-difenilmetano diisocianato, entrambi rappresentati nella Figura 2.2.3.

Gli isocianati aromatici, tra cui l'MMDI, mostrano una tendenza spontanea alla dimerizzazione e trimerizzazione in specifici intervalli di temperatura, tramite processi esotermici. La dimerizzazione, in particolare, rappresenta una criticità nello stoccaggio, poiché può determinare un degrado della materia prima, sebbene in alcuni casi reversibile.

L'MMDI si presenta come solido fino a 38°C e, al di fuori di un ristretto intervallo di temperatura compreso tra 40°C e 45°C, tende a dimerizzare rapidamente. Questa caratteristica comporta una finestra operativa particolarmente limitata, influenzando le condizioni di manipolazione e conservazione del materiale^[1].

A livello visivo, l'MMDI viene spesso denominato isocianato chiaro, in quanto presenta un colore più tenue rispetto al PMDI.

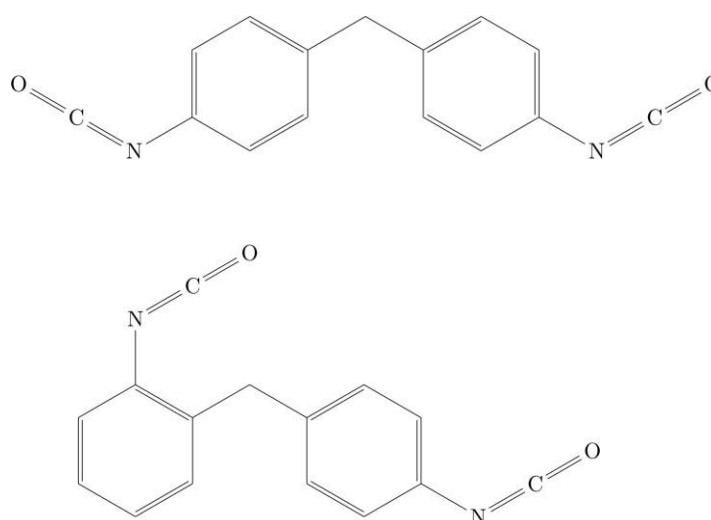


Figura 2.2.3 – strutture chimiche dei due isomeri del MMDI (4,4'-MDI sopra e 2,4'-MDI sotto)

Un'ulteriore variante è l'MDI modificato, ottenuto a partire dall'MMDI mediante l'aggiunta di stabilizzanti. Questi additivi ne consentono lo stoccaggio a temperatura ambiente in forma liquida, eliminando il rischio di dimerizzazione.

Come evidenziato dal grafico sottostante, l'intervallo di temperatura in cui l'MDI non modificato deve essere mantenuto per minimizzare la formazione di dimeri è estremamente ristretto, inferiore ai 10°C. Questa limitazione operativa rappresenta una criticità nella gestione e nella conservazione del materiale, rendendo necessarie soluzioni di stabilizzazione per garantirne un utilizzo più agevole (vedi Figura 2.2.4).

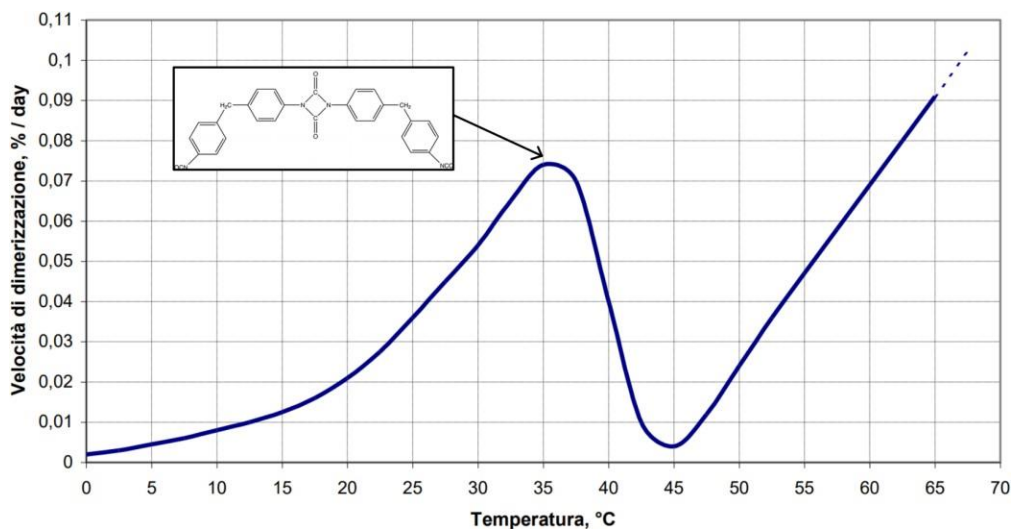


Figura 2.2.4 – rappresentazione grafica della velocità di dimerizzazione in funzione della temperatura dell'MDI

Le reazioni che possono avere luogo sono presentate nei seguenti sottoparagrafi. Il gruppo isocianato (-NCO) è caratterizzato da una marcata elettrofilia, conferendo agli isocianati un'elevata reattività nei confronti di composti nucleofili, quali acqua, alcoli e ammine. Questa proprietà ha implicazioni rilevanti dal punto di vista della sicurezza industriale, in quanto influisce direttamente sulla configurazione degli impianti destinati alla gestione di tali sostanze.

Per prevenire reazioni indesiderate, le apparecchiature che contengono isocianati devono essere progettate per evitare il contatto con l'acqua. Lo stato dell'arte nel settore impone che i reattori per la produzione di prepolimeri siano termoregolati mediante olio diatermico, mentre per i miscelatori contenenti esclusivamente miscele polioliche si utilizza un sistema di termoregolazione ad acqua^[2].

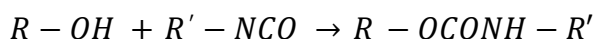
2.2.1 Reazione uretanica

La reazione tra il gruppo isocianato (-NCO) e il gruppo ossidrilico (-OH), nota come reazione uretanica, è il processo fondamentale alla base della prepolimerizzazione, in quanto porta alla formazione del gruppo uretano.

Questa reazione è esotermica, con un'entalpia di reazione di circa $\Delta H_e = -100$ kJ/mol NCO e

un'energia di attivazione pari a $E_a = 42 \text{ kJ/mol NCO}$ [3]. L'elevato rilascio di calore e la necessità di un controllo preciso delle condizioni di reazione rendono essenziale un'adeguata gestione termica del processo.

La reazione generale può essere rappresentata come segue:

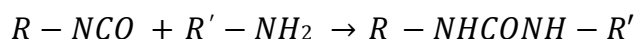


e verrà approfondita nel paragrafo 2.4.

2.2.2 Reazione con gruppi amminici

La reazione tra un gruppo isocianato (-NCO) e un'ammina (-NH₂) porta alla formazione di uree disostituite. Anche questo processo è esotermico, e la sua velocità di reazione è direttamente influenzata dalla nucleofilicità dell'ammina. In particolare, le ammine alifatiche risultano più reattive rispetto a quelle aromatiche, reagendo con maggiore rapidità.

Nel settore dei poliuretani, le diammine vengono comunemente utilizzate come agenti indurenti ed estensori di catena, contribuendo a modificare le proprietà meccaniche e strutturali del materiale finale. Al contrario, le ammine terziarie, non possedendo idrogeni attivi, non partecipano direttamente alla reazione, ma svolgono un ruolo fondamentale come catalizzatori nella reazione tra il gruppo isocianato (-NCO) e il gruppo ossidrilico (-OH).



2.2.3 Reazione con acqua

La reazione tra un gruppo isocianato (-NCO) e l'acqua avviene attraverso due distinti meccanismi, entrambi già analizzati nei sottoparagrafi precedenti.

Nel primo stadio, l'acqua attacca nucleofilicamente l'isocianato, portando alla formazione di un acido carbammico. Questo intermedio è tuttavia instabile e tende a decomporsi spontaneamente, rilasciando anidride carbonica (CO₂) e generando un'ammina.

Successivamente, l'ammina così formata reagisce con un'ulteriore molecola di isocianato, dando origine a un'urea disostituita. Complessivamente, il processo comporta il consumo di due molecole di isocianato per la formazione di una molecola di urea disostituita e CO₂.



2.2.4 Reazione di dimerizzazione

Come precedentemente evidenziato, l'MDI monomero tende spontaneamente a dimerizzare durante il periodo di stoccaggio. Sebbene la velocità di questa reazione sia relativamente lenta, nel lungo termine il fenomeno diventa significativo e non può essere trascurato.

Dal punto di vista della sicurezza di processo, la dimerizzazione dell'MDI non rappresenta un rischio critico. Tuttavia, può avere implicazioni negative sulla qualità del prodotto finito, provocando intorbidimento della materia prima e generando problematiche operative. Un'eccessiva formazione di dimero può infatti portare alla saturazione frequente dei filtri installati a monte di alcune apparecchiature, con conseguenti interruzioni del processo produttivo. La rimozione del dimero, eseguita manualmente, comporta un rallentamento della produzione, rendendo necessario un controllo accurato delle condizioni di stoccaggio per minimizzare tale inconveniente.

La reazione di dimerizzazione è rappresentata nella Figura 2.2.5 [4].

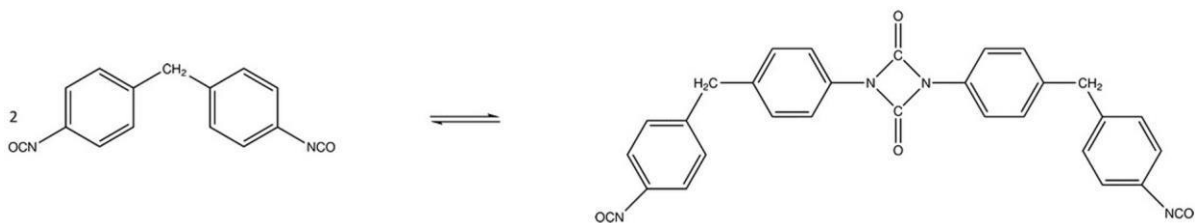


Figura 2.2.5 – Schematizzazione della reazione di dimerizzazione del MDI monomero [4]

2.3 Polioli

L'altra categoria di reagenti fondamentali nella sintesi del prepolimero è rappresentata dai polioli, composti ad alto peso molecolare caratterizzati dalla presenza di gruppi ossidrilici (-OH), generalmente in un numero compreso tra 2 e 8 per molecola. Questo parametro, noto come funzionalità, gioca un ruolo chiave nella determinazione delle proprietà del polimero finale.

I polioli utilizzati nella sintesi dei prepolimeri possono appartenere a due principali classi: i polieteroli (PEOL) e i poliesteroli (PESOL). Le caratteristiche strutturali di queste molecole influenzano direttamente le proprietà del poliuretano ottenuto. In particolare, la funzionalità è un aspetto determinante:

- I polioli bifunzionali (dioli), con due gruppi -OH, danno origine a strutture lineari

poco ramificate. I poliuretani derivati presentano caratteristiche termoplastiche, risultando elastici e adatti a processi di estrusione e stampaggio;

- I polioli con funzionalità superiore a due generano invece strutture reticolate, portando alla formazione di polimeri termoindurenti. All'aumentare del grado di reticolazione, le catene polimeriche acquisiscono maggiore rigidità, limitando la mobilità molecolare e conferendo al materiale un comportamento sempre più rigido e strutturato.

Le proprietà risultanti dai diversi tipi di polioli sono riassunte nella Tabella 2.3.1 ^[5].

PROPRIETÀ	PU TERMOPLASTICI	PU TERMOINDURENTI
Peso Molecolare [kg/kmol]	1000 - 6500	150 - 1600
Funzionalità [-]	2-3	3-8
N° OH [gKOH/kg]	28-160	250 - 1000

Tabella 2.3.1 – Range delle proprietà dei polioli utilizzati nella produzione di poliuretani ^[5]

2.3.1 Poliesteroi

I poliesteroi (PESOL) sono molecole che, oltre ai gruppi ossidrilici (-OH), presentano all'interno della loro struttura anche gruppi esterei (-COO-). Il loro peso molecolare varia generalmente tra 300 e 3000 g/mol, influenzando le proprietà finali del poliuretano ottenuto.

Un aspetto critico dei poliesteroi è la loro sensibilità all'idrolisi. In presenza di elevata umidità e temperature elevate, la catena poliesterea può subire una scissione, accelerando il processo di invecchiamento del materiale. Di conseguenza, i poliuretani derivati da PESOL risultano più vulnerabili al degrado rispetto a quelli basati su polieteroli (PEOL), che offrono una maggiore stabilità chimica.

Dal punto di vista reattivo, i poliesteroi mostrano una velocità di reazione superiore rispetto ai polieteroli durante la polimerizzazione con gli isocianati. Questo aspetto riveste un ruolo cruciale nel monitoraggio del calore di reazione, influenzando il controllo del processo produttivo.

La struttura generale di una molecola di poliestero è rappresentata nella Figura 2.3.1.

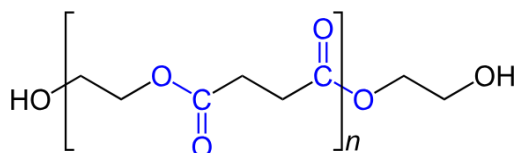


Figura 2.3.1 – Struttura di un generico poliolo poliesteri (PESOL)

2.3.2 Polieteroli

Analogamente ai poliesteroli, i polieteroli (PEOL) sono composti poliossidrilici che contengono gruppi eterici (-O-) all'interno della loro struttura molecolare. Come evidenziato in precedenza, i poliuretani derivati da PEOL offrono una maggiore resistenza all'invecchiamento, risultando più stabili in condizioni di elevata umidità e temperatura rispetto a quelli a base PESOL.

Dal punto di vista del processo di reazione, i polieteroli presentano una reattività inferiore nei confronti degli isocianati. Di conseguenza, la fase di polimerizzazione, durante la quale viene rilasciato calore di reazione, avviene in modo più graduale rispetto ai sistemi basati su poliesteroli, consentendo un maggiore controllo termico del processo.

La struttura molecolare generica di un polieterolo è illustrata nella Figura 2.3.2.

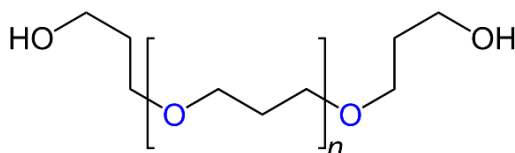


Figura 2.3.2 – Struttura di un generico poliolo polietere (PEOL)

2.4 Reazione poliuretanic

La reazione uretanica è il processo di riferimento nei reattori di prepolymerizzazione, in quanto coinvolge i gruppi ossidrilici (-OH) dei polioli e i gruppi isocianato (-NCO). Questa reazione prende il nome dalla formazione del gruppo uretano, rappresentando il meccanismo fondamentale alla base della sintesi del prepolymero.

Si tratta di una reazione esotermica, caratterizzata da un'entalpia di reazione di circa

$$\Delta H_e = -100 \text{ kJ/mol NCO}$$

e da un'energia di attivazione pari a

$$E_a = 42 \text{ kJ/mol NCO.}$$

Poiché i gruppi NCO^[3] e OH reagiscono in rapporto stechiometrico 1:1, l'entalpia di reazione può essere espressa indifferentemente per mole di NCO o di OH. Tuttavia, nei calcoli successivi verrà riferita alle moli di OH, in quanto il poliolo rappresenta il reagente limitante nel processo.

La velocità di reazione dipende dalla natura del gruppo ossidrilico coinvolto: gli ossidrili primari reagiscono più rapidamente rispetto ai secondari, mentre quelli terziari presentano una reattività significativamente inferiore. Il meccanismo della reazione uretanica è una semplice addizione nucleofila catalizzata, schematizzata nella Figura 2.4.1.

Dal punto di vista operativo, la reazione di prepolimerizzazione è teoricamente condotta in un intervallo di temperatura compreso tra 20°C e 110°C. Tuttavia, nella pratica industriale, la finestra operativa è più ristretta, con temperature del prodotto generalmente comprese tra 40°C e 75°C, al fine di garantire il controllo del calore di reazione e ottimizzare la qualità del prepolimero ottenuto.

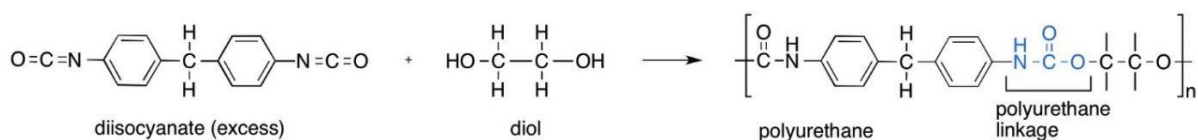


Figura 2.4.1 – Schematizzazione della reazione poliuretanic

Il rapporto molare tra polioli e isocianati è un parametro fondamentale nella sintesi del prepolimero, in quanto determina la quantità di unità monomeriche di isocianato presenti nella miscela finale. Questo rapporto influisce direttamente sulle proprietà chimico-fisiche del prepolimero, tra cui la viscosità e il contenuto di NCO residuo.

Il contenuto di NCO a fine reazione rappresenta la quantità di isocianato non reagito e costituisce un indicatore chiave della qualità del prodotto. Per garantire il rispetto degli standard di qualità, questo parametro viene analizzato in laboratorio per ogni lotto di produzione. Il test sul contenuto di NCO è considerato la principale verifica effettuata sul prepolimero prima della fase di confezionamento.

Durante la reazione, possono verificarsi reazioni parassite, che portano alla formazione di sottoprodotti indesiderati, tra cui allofanati (che influenzano il Melt Flow Index, MFI), carbodiimmidi, uretdioni, uretonimine e poliisocianurati (PIR). Questi ultimi si formano attraverso un processo di trimerizzazione dell'isocianato, illustrato nella Figura 2.4.2.

Alcune di queste reazioni indesiderate possono rappresentare un rischio significativo per la sicurezza di processo, poiché possono alterare la stabilità termica del sistema o generare composti

con proprietà diverse da quelle previste. Nella tabella sottostante vengono descritte nel dettaglio le principali reazioni secondarie che possono verificarsi durante la produzione del prepolimero.

REAZIONE	T [°C]	CATALIZZATORE	ΔH	RISCHIO
Uretanica	< 100	Ammine terziarie	< 0	Critico
Formazione Allofanati	> 140	Basi	< 0	Non critico
Formazione Biuret	> 140	Basi	< 0	Non critico
Dimerizzazione	Variabili	-	< 0	Non critico
Formazione Carbodiimmidi	> 190	-	= 0	Critico
Trimerizzazione	> 190	KOH	< 0	Critico

Tabella 2.4.1 – Elenco di reazioni chimiche che possono occorrere nel processo di prepolymerizzazione.

Oltre alla reazione uretanica, che pur presentando alcuni rischi costituisce il meccanismo principale alla base del processo di polimerizzazione, esistono altre due reazioni che richiedono particolari precauzioni per garantire la sicurezza del processo.

Una di queste è la trimerizzazione degli isocianati, rappresentata nella Figura 2.4.2, che porta alla formazione di poliisocianurati (PIR). Questa reazione è altamente esotermica ed è catalizzata da composti a base di potassio, come l'idrossido di potassio (KOH).

In alcuni casi, la trimerizzazione può essere volutamente indotta, ad esempio nella produzione di schiume autoestinguenti, in cui la presenza di PIR conferisce proprietà ignifughe al materiale finale. Tuttavia, quando questa reazione avviene in modo indesiderato, può rappresentare un rischio significativo per la sicurezza di processo, poiché il forte rilascio di calore può portare a un aumento incontrollato della temperatura, potenzialmente oltre i valori critici.

Un ulteriore elemento di criticità è il fatto che tracce di KOH possono essere presenti in alcuni polioli come residuo del processo produttivo. Questa contaminazione, anche in quantità minime, può favorire l'innesco della trimerizzazione, rendendo necessario un controllo accurato delle materie prime per prevenire eventi indesiderati.

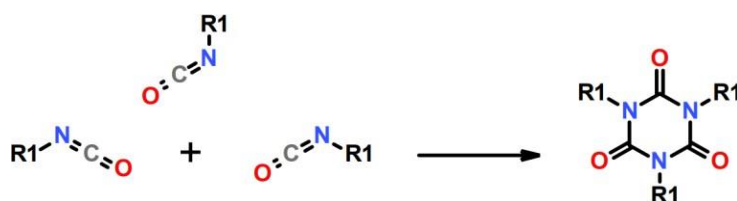


Figura 2.4.2 – Reazione di trimerizzazione di una molecola contenente gruppi isocianati NCO

Un'ulteriore reazione da considerare è la formazione di carbodiimmidi, che avviene attraverso un processo di dimerizzazione degli isocianati, accompagnato dal rilascio di anidride carbonica (CO₂) e da un incremento della viscosità della soluzione.

A differenza della formazione degli allofanati, che comporta un aumento della viscosità e una riduzione della scorrevolezza del fluido, la reazione di carbodiimmidizzazione ha l'effetto opposto, contribuendo a migliorare la fluidità del sistema. Tuttavia, il rilascio di gas può influenzare le caratteristiche reologiche del materiale e richiede un monitoraggio accurato per evitare variazioni indesiderate nella qualità del prodotto finale.

Il meccanismo di questa reazione è illustrato nella Figura 2.4.3.

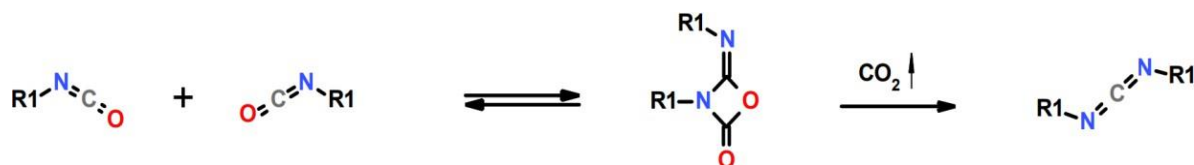


Figura 2.4.3 – Reazione di dimerizzazione con formazione di carbodiimmidi e conseguente sviluppo di gas

2.5 Numero di OH

Una delle caratteristiche più rilevanti dei polioli utilizzati nella sintesi dei poliuretani è la loro funzionalità, ovvero il numero di gruppi ossidrilici (-OH) presenti per molecola. Come già evidenziato, questa proprietà, insieme alla lunghezza della catena poliossidrilica, influisce significativamente sulle proprietà meccaniche e strutturali del poliuretano ottenuto.

Un parametro fondamentale per caratterizzare un poliolo è il numero di OH, che viene comunemente espresso in grammi di KOH equivalenti per chilogrammo di poliolo. Questo valore rappresenta la massa di idrossido di potassio (KOH) equivalente, espressa in grammi, che contiene lo stesso numero di gruppi -OH presenti in un chilogrammo di poliolo.

La relazione matematica per il calcolo del numero di OH di una determinata specie chimica “x” è la seguente:

Secondo questa definizione, il KOH puro presenta un numero di OH pari a 1000, mentre per l'acqua il valore si aggira intorno a 6300. Questo parametro riveste un ruolo cruciale nella determinazione delle configurazioni impiantistiche delle principali apparecchiature coinvolte nel processo di prepolimerizzazione.

Oltre alla sua influenza sulle caratteristiche chimico-fisiche del prepolimero, il numero di OH è un parametro determinante nella stima del fingerprint teorico della reazione, che si basa sulla quantità teorica di calore sviluppato durante la sintesi. In particolare, si ipotizza che il calore di reazione della prepolimerizzazione sia direttamente proporzionale alla concentrazione dei gruppi ossidrilici presenti nel poliolo.

Dal punto di vista della sicurezza di processo (process safety), il numero di OH assume un ruolo centrale, in quanto il suo valore rispetto a una soglia critica determina la classificazione della produzione all'interno delle categorie di rischio definite (Categoria 1, 2 o 3). Questa categorizzazione consente di stabilire il livello di pericolosità del processo e di implementare le misure di sicurezza adeguate^{[1][6]}.

2.6 Additivi e catalizzatori

Al termine del caricamento del primo reagente, che nei reattori è sempre un isocianato, vengono aggiunti, se previsti dalla ricetta, eventuali catalizzatori e/o additivi. Questi composti svolgono un ruolo chiave sia nel controllo delle variabili di processo, sia nell'ottimizzazione delle caratteristiche finali del prodotto.

I catalizzatori sono composti chimici che accelerano le reazioni abbassandone l'energia di attivazione, favorendo percorsi di reazione più efficienti attraverso la formazione di intermedi ad elevata reattività. Essi non vengono consumati nel corso del processo e si suddividono principalmente in due categorie:

- Ammine terziarie;
- Sali organici di metalli, preferiti per la loro minore volatilità, caratteristica che li rende intrinsecamente più sicuri dal punto di vista della process safety.

Gli additivi vengono impiegati per conferire proprietà specifiche al prepolimero o per migliorare il controllo del processo. A seconda della loro funzione, si suddividono nelle seguenti categorie:

- Acidificanti: utilizzati per ridurre l'alcalinità presente in alcune materie prime, dovuta a residui di produzione come l'idrossido di potassio (KOH). Il controllo dell'alcalinità è essenziale per prevenire runaway reactions, come la trimerizzazione indesiderata degli isocianati con formazione di poliisocianurati (PIR). Non tutte le formulazioni richiedono acidificanti, ma nelle ricette in cui sono necessari si impiegano comunemente DIBIS o BzCl. Tuttavia, l'azienda sta progressivamente riducendone l'uso, poiché sono composti difficili e pericolosi da maneggiare.

- Agenti espandenti: impiegati per ridurre la densità del prodotto finale, aumentandone la porosità. Possono essere di due tipologie:
 1. Espandenti fisici, ovvero composti basso-bollenti o gassosi (ad esempio idrofluorocarburi), generalmente introdotti mediante miscelatori statici.
 2. Espandenti chimici, che reagiscono con il prepolimero liberando CO₂.
- Coloranti: utilizzati per scopi estetici.
- Estensori di catena: solitamente costituiti da polioli e poliammine a basso peso molecolare, reagiscono con l'isocianato per allungare le catene polimeriche, conferendo al poliuretano maggiore rigidità, un incremento della temperatura di transizione vetrosa e un miglioramento del modulo elastico.
- Reticolanti: utilizzati per incrementare la rigidità del materiale, aumentando il numero di legami covalenti tra catene polimeriche vicine. Sono impiegati in formulazioni di schiume rigide e semi-rigide.
- Ritardanti di fiamma: composti a base di azoto, fosforo o alogeni, progettati per rallentare la propagazione delle fiamme nel caso in cui il poliuretano venga esposto al fuoco.
- Stabilizzanti: fondamentali per rallentare il degrado del poliuretano, proteggendolo dalla rottura delle catene polimeriche dovuta a processi di idrolisi, ossidazione o esposizione ai raggi UV.
- Tensioattivi: favoriscono il miscelamento di reagenti con scarsa compatibilità fisica, contribuendo a ridurre la formazione di schiume e regolare il grado di apertura delle celle nel materiale espanso.

2.7 Prodotti poliuretanicici finiti

Come precedentemente evidenziato, i prodotti finiti ottenibili dalla lavorazione del poliuretano sono estremamente diversificati, grazie alla versatilità di questo materiale. Una prima classificazione può essere effettuata in base alla densità (ρ_{PU}):

- 1) Poliuretano compatto se $\rho_{PU} > 900 \text{ kg/m}^3$
- 2) Poliuretano espanso se $\rho_{PU} < 900 \text{ kg/m}^3$

Il poliuretano espanso trova applicazione nella produzione di cuscini, materassi e materiali per

coibentazione termica, grazie alla sua leggerezza e capacità isolante.

Il poliuretano compatto, invece, è ampiamente utilizzato nei settori footwear e automotive, dove sono richieste proprietà meccaniche superiori e una maggiore resistenza all'usura.

3 Impianto e processo produttivo

3.1 Storia dello stabilimento

Lo stabilimento di Villanova d'Asti fu fondato nel 1964 con la denominazione Elastollan Italiana S.p.A. (ELIT). Inizialmente, l'impianto era dedicato alla produzione di granulato termoplastico e componenti per il settore footwear. Tuttavia, dopo soli cinque anni, la produzione si orientò quasi interamente verso i sistemi poliuretanici, ampliando così il campo di applicazione in diversi settori industriali.

Nel 1971, l'azienda costruì un nuovo stabilimento produttivo, e quattro anni dopo, nel 1975, fu acquisita da Elastogran GmbH, entrando ufficialmente a far parte del gruppo BASF. Durante gli anni '80, in risposta alla crescita e all'espansione dell'azienda, il sito produttivo subì un significativo ampliamento. Nel 1981, oltre alla vendita di sistemi poliuretanici, l'azienda avviò la commercializzazione di materie prime BASF per il settore, rafforzando così ulteriormente la propria presenza sul mercato.

Nel 1987, BASF acquisì anche Resines Synthetiques Routtand S.p.A., situata a Zingonia di Verdellino (BG) e specializzata nella produzione di resine poliestere. L'anno successivo, la società fu fusa con Elastogran Italia S.p.A., consolidando ulteriormente la posizione dell'azienda nel settore footwear.

Dal 1997, il sito di Villanova d'Asti è stato riconosciuto a livello europeo come competence center per la produzione di sistemi poliuretanici per soles a base poliestere. Nel corso degli anni, lo stabilimento ha ottenuto diverse certificazioni di qualità e ambientali:

- 2002 – Certificazione del Sistema Qualità ISO 9001:2000.
- 2003 – Certificazione ISO 14001:1996 per la gestione ambientale.
- 2005 – Inclusione nella certificazione a matrice della casa madre BASF per le norme ISO 9001 e ISO 14001, con certificazione rilasciata dall'ente tedesco DQS.
- 2006 – Certificazione ISO TS 16949, per rispondere alle crescenti richieste del mercato automotive.

Dal 2010, BASF PU Italia è diventata l'unica sede in Europa per la produzione di polioli caricati, ovvero polioli contenenti elevate concentrazioni di cariche solide in polvere.



Figura 3.1.1 – Marchi di materiali in poliuretano posseduti da BASF e relative applicazioni

Attualmente, BASF detiene e commercializza diversi marchi registrati di poliuretani brevettati, sviluppati per applicazioni specifiche in vari settori industriali. Tra i più noti si annoverano CosyPUR®, Elastopir®, Elastoflex®, Elastan®, Elastopan®, Elastollan® e Cellasto®.

3.2 Lo stabilimento produttivo

Tutti i processi realizzati presso lo stabilimento BASF di Villanova d’Asti seguono un approccio discontinuo (batch). La produzione di poliuretani può avvenire secondo due diverse configurazioni di processo:

1. Processo monostadio: prevede la miscelazione diretta dei reagenti principali, isocianato e poliolo, in rapporto stechiometrico, con l’eventuale aggiunta di additivi. Questo porta alla formazione diretta del poliuretano solido finito.
2. Processo multistadio con prepolimero: la reazione avviene in due fasi. In un primo stadio, una quantità inferiore a quella stechiometrica di poliolo viene fatta reagire con l’isocianato, ottenendo un prepolimero liquido. Questo intermedio viene poi venduto al cliente insieme alla frazione rimanente di poliolo, che verrà miscelata in loco per completare la polimerizzazione. La reazione finale avviene generalmente all’interno di stampi, conferendo al poliuretano la forma desiderata.

Il sito BASF di Villanova d’Asti adotta esclusivamente il processo multistadio con prepolimero, una soluzione ampiamente diffusa nel settore per i suoi vantaggi rispetto al processo monostadio:

- Efficienza logistica: il trasporto di prepolimeri liquidi (in fusti o cubi) risulta più economico rispetto ai prodotti finiti. Il poliuretano solido ha una densità inferiore e quindi un volume specifico maggiore, aumentando i costi di spedizione per unità di massa.
- Ottimizzazione della produzione: la spedizione del prepolimero consente di evitare la gestione di stampi specifici per ciascun cliente, riducendo gli investimenti in capitale (CapEx) e la complessità operativa. Inoltre, il processo di stampaggio richiederebbe attrezzature dedicate e sarebbe difficilmente automatizzabile.
- Maggiore controllo del processo: suddividere la reazione in più fasi consente di limitare la generazione di calore in ogni step, prevenendo aumenti eccessivi di temperatura. Questo migliora la sicurezza di processo, riducendo il rischio di runaway reactions, un aspetto critico nei sistemi poliuretanici. Inoltre, il prepolimero ha un peso molecolare superiore rispetto ai singoli reagenti, riducendone la volatilità e rendendolo più sicuro da manipolare.

Lo stabilimento di Villanova d'Asti produce e commercializza componenti per sistemi poliuretanici, basati sulla combinazione di due elementi principali:

- Componente A: miscela poliolica contenente polietere e/o poliestere, catalizzatori e additivi.
- Componente B: il prepolimero, prodotto nella prima fase del processo.

Il cliente completa la polimerizzazione miscelando i due componenti, ottenendo così il poliuretano finito. In alcuni casi, i catalizzatori vengono venduti separatamente come "componente C", ma nella maggior parte delle formulazioni essi sono già incorporati nel componente A per semplificare la gestione del processo da parte del cliente.

Lo stabilimento è organizzato in due reparti distinti, identificati con un codice colore per garantire la sicurezza operativa:

- Reparto A (colore blu): destinato alla preparazione delle miscele polioliche. Gli isocianati non devono essere presenti in questo reparto per evitare contaminazioni indesiderate.
- Reparto B (colore rosso): dedicato alla produzione di prepolimeri e dotato dei reattori necessari al processo.

Gli impianti di produzione sono equipaggiati con reattori, agitatori, sistemi di carico e scarico

per garantire il corretto avanzamento del processo. Una caratteristica distintiva di molte unità è la presenza di un'apertura sull'intero fondo superiore, che consente di effettuare operazioni di pulizia approfondite. Questo accorgimento è essenziale per evitare contaminazioni tra produzioni successive, data la possibile incompatibilità tra le diverse formulazioni chimiche impiegate.

3.3 Reparti e sistema di produzione

3.3.1 Reparto A – Miscele polioliche

La produzione del componente A avviene attraverso l'utilizzo di miscelatori industriali, identificati con la sigla MXX (ad esempio M01, M06), nei quali vengono caricati e miscelati polioli (sia polieteroli - PEOL che poliesteroli - PESOL), catalizzatori ed eventuali additivi. Ogni miscelatore è un vessel in acciaio inox, dotato di una camicia esterna per la termostatazione e di un isolamento termico in lana di roccia per ridurre le dispersioni di calore.

Ogni vessel è equipaggiato con:

- Boccaporto, utilizzato per il carico delle materie prime e le ispezioni manutentive. Inoltre, molti impianti dispongono di un'apertura dell'intero fondo superiore per consentire pulizie approfondite ed evitare contaminazioni tra produzioni incompatibili.
- Agitatori, fondamentali per garantire un'adeguata miscelazione degli ingredienti.
- Sistemi di carico e scarico, progettati per ottimizzare la gestione delle materie prime e del prodotto finito.
- Imbuti e specola, per il controllo visivo dell'interno del miscelatore.
- Connessioni ai fluidi di servizio, tra cui azoto e aria compressa, essenziali per mantenere condizioni operative ottimali.
- Valvole di sicurezza collegate al sistema di blowdown, che garantiscono lo scarico di emergenza in caso di sovrappressione.

Il fluido utilizzato per la regolazione della temperatura è acqua demineralizzata, che circola in un circuito chiuso. Il controllo della temperatura avviene tramite due scambiatori di calore:

1. Scambiatore per il riscaldamento: utilizza olio diatermico caldo in una serpentina esterna per evitare il contatto diretto tra acqua e isocianato, prevenendo reazioni indesiderate, e per consentire il raggiungimento di temperature superiori a 130°C.
2. Scambiatore per il raffreddamento: impiega acqua glicolata fredda proveniente dal chiller per abbassare la temperatura in modo controllato.

Il caricamento dei polioli nei miscelatori avviene con un controllo preciso rispetto al set point,

grazie all'impiego di celle di carico che misurano la quantità di materiale introdotto nel vessel, confrontandola con il valore predefinito. Sono disponibili due modalità principali di carico:

1. Carico da tubo (CDT): le materie prime in bulk, stoccate nei serbatoi, vengono convogliate nei miscelatori attraverso un sistema di piping dedicato. Il carico è regolato da celle di carico per garantire precisione.
2. Carico manuale con pompa (CP2) - Modalità semi-automatica: l'operatore posiziona il pescante nel fusto o cubo e apre una valvola manuale, mentre l'automazione gestisce il resto del processo:
 - (i) Apertura automatica delle altre valvole.
 - (ii) Avvio della pompa volumetrica.
 - (iii) Confronto del peso con il set point.
 - (iv) Arresto automatico della pompa e chiusura delle valvole al raggiungimento della quantità desiderata.

I fusti in alluminio contengono circa 200 kg di prodotto, mentre i cubi in polietilene hanno una capacità di circa 1000 kg.

Le formulazioni contenenti agenti espandenti vengono lavorate in miscelatori dotati di miscelatore statico, installato su una specifica linea di carico. Questo dispositivo consente una miscelazione omogenea del gas nel liquido prima dell'ingresso nel miscelatore, minimizzando l'evaporazione degli agenti espandenti, che sono generalmente composti volatili.

I miscelatori predisposti per questa lavorazione includono M01, M06, M14, M16 e M17.

L'intero processo si svolge in leggera sovrappressione, condizione necessaria per garantire la stabilità operativa e la sicurezza degli impianti.

3.3.2 Reparto B – Prepolimeri

Il reparto B rappresenta l'area di maggiore interesse all'interno dello stabilimento BASF di Villanova d'Asti, poiché ospita i reattori nei quali avviene il processo di prepolimerizzazione. Tali reattori possono anche essere impiegati per la preparazione di miscele di isocianati senza polioli, operando quindi come miscelatori, ma distinti da quelli del reparto A.

I processi adottati sono di tipo discontinuo (batch), e l'isocianato principalmente utilizzato è l'MDI, considerato intrinsecamente più sicuro rispetto al TDI.

Nel reparto B si osserva uno scale-up dei reattori, che vanno dai reattori pilota da circa 0,2 m³ fino al reattore più grande da 22 m³. I reattori sono identificati con la sigla RXY, dove X può assumere i valori 0 o A e Y varia da 1 a 4.

REATTORE	VOLUME [m ³]
RA1	22,0
RA2	14,6
RA3	5,5
RA4	3,4
R01	0,2
R02	0,2

Tabella 3.3.1 – Elenco dei reattori presenti in reparto B e rispettiva capacità in m³

I reattori dello stabilimento BASF di Villanova d’Asti sono progettati per operare in pressione e sono costituiti da un guscio in acciaio inox. Per garantire un controllo termico efficiente, ogni reattore è dotato di un semitegolo esterno che avvolge la parte cilindrica e la base, consentendo una regolazione ottimale della temperatura. Inoltre, per minimizzare le dispersioni termiche, i reattori sono coibentati con lana di roccia.

Ogni reattore è equipaggiato con i seguenti componenti:

- Agitatore meccanico a pale, con velocità regolabile, per garantire una miscelazione uniforme e prevenire stratificazioni.
- Sistemi di carico e scarico, che possono essere manuali o automatici in base alla tipologia di processo.
- Sistema di sfiato, collegato al servizio di abbattimento dei vapori di isocianato per il controllo delle emissioni e la protezione ambientale.
- Sistema di scarico di emergenza per sovrappressione, costituito da dischi di rottura e valvole di sicurezza connesse al sistema di blowdown, per garantire la sicurezza in caso di eccessivo accumulo di pressione.
- Imbuto per piccoli carichi di acidi o additivi, con capacità tra 0,5 kg e 2 kg.
- Specole di ispezione, per il monitoraggio visivo dell’interno del reattore.
- Sistemi di controllo delle variabili di processo, tra cui:
 - (a) Temperatura, monitorata da termoresistenze PT100 installate a diverse altezze per un controllo preciso.
 - (b) Pressione, rilevata da pressostati posizionati in testa al serbatoio.
 - (c) Peso del prodotto, misurato tramite celle di carico per un monitoraggio accurato della quantità di materiale.

I reattori sono termoregolati mediante olio diatermico, che circola all'interno di una serpentina esterna per:

- Prevenire il contatto tra acqua e isocianato in caso di cricche nell'acciaio, evitando reazioni indesiderate.
- Raggiungere temperature superiori a 130°C per il fluido riscaldante, impossibili da ottenere con acqua demineralizzata.

Il controllo della temperatura avviene attraverso la regolazione di due flussi di olio diatermico:

1. Olio diatermico caldo, proveniente dalla centrale termica, il cui flusso viene regolato per mantenere la temperatura entro i limiti di sicurezza.
2. Olio diatermico ricircolato, prelevato dall'uscita della camicia del reattore e reintrodotta nel circuito per ottimizzare il consumo energetico.

Quando il processo richiede un raffreddamento del prodotto, la temperatura dell'olio diatermico viene abbassata attraverso uno scambiatore di calore a fascio tubiero, dove l'olio viene raffreddato per mezzo di acqua glicolata. Questo sistema consente di raggiungere temperature minime dell'olio di circa 11°C, garantendo un controllo affidabile del processo.

3.4 Ricetta di un prepolimero

Tutte le produzioni, sia delle miscele polioliche sia dei prepolimeri, seguono ricette predefinite. L'obiettivo è garantire la ripetibilità e l'affidabilità dei processi produttivi.

All'interno dell'azienda, i prodotti e i reagenti sono identificati da codici univoci a otto cifre:

- Codici 5 → assegnati ai reagenti
- Codici 10 → assegnati ai prodotti finiti

Quando deve essere effettuata la produzione di un prodotto con uno specifico codice 5, il personale dell'ufficio produzione carica manualmente la relativa ricetta nel middleware di gestione della produzione.

Le ricette sono composte da step di processo, identificati da una sigla di tre lettere, che possono variare in base alla produzione specifica, ma seguono sempre una logica comune:

1. CDT/CP1 – Carico di isocianati tramite tubo (automatizzato, modalità più utilizzata) o tramite pompa (manuale, eseguito dall'operatore).
2. CDI – Carico di acidi ed eventuali additivi tramite imbuto.
3. CDT/CP2 – Carico di polioli tramite tubo o con pompa, semi-automatico.

4. RZN – Fase di reazione e controllo della temperatura: i reagenti vengono riscaldati tra 50°C e 90°C e mantenuti a questa temperatura per un tempo variabile tra 30 e 120 minuti.
5. Controllo qualità – Test di laboratorio su un campione prelevato da presa campione (non formalmente parte della ricetta, ma obbligatorio prima del confezionamento).
6. INM/INA – Scarico del prodotto in fusti o cubi, manualmente o in modalità semi-automatica (solo per RA1, il reattore più grande).

La reazione ha inizio nel momento in cui il primo poliolo viene caricato nel reattore, dove è già presente l'isocianato (step 3). Il tempo necessario per il completamento della reazione è variabile e dipende da diversi fattori, tra cui:

- Dimensione del reattore → A parità di prodotto, una reazione in RA1 richiede più tempo rispetto a RA4, poiché il volume di RA1 è quattro volte superiore.
- Viscosità del sistema → Un fluido con maggiore viscosità e MFI (Melt Flow Index) elevato comporta una miscelazione più lenta, rallentando di conseguenza la reazione.
- Temperatura del fluido termoregolante → Temperature più elevate dell'olio diatermico in camicia riducono la viscosità del fluido reagente, aumentando la velocità di reazione e riducendo i tempi di processo.
- Tipologia di poliolo → I poliesteri (PESOL) reagiscono più velocemente rispetto ai polieteroli (PEOL), influenzando i tempi di completamento della reazione.
- Modalità di carico del poliolo →
 - Il carico da tubo (CDT) avviene in pochi secondi grazie a portate elevate e tubazioni di diametro maggiore, eliminando ritardi dovuti all'intervento umano.
 - Il carico semi-automatico con pompa (CP2) è più lento. Inoltre, se sono necessari più fusti o cubi, il tempo di caricamento aumenta a causa della necessità di rimozione e sostituzione manuale dei contenitori.

In condizioni ottimali, la reazione impiega circa 25-30 minuti per ciascun poliolo poliesteri, mentre per i polieteroli il tempo è più variabile a seconda della reattività della molecola impiegata.

Per evitare contaminazioni tra diverse tipologie di polioli, polieteroli e poliesteri vengono caricati attraverso linee separate. Inoltre, il reattore RA4 dispone di due linee di carico distinte per gli isocianati:

- Una dedicata agli isocianati scuri (PMDI)
- Una dedicata agli isocianati chiari (MMDI)

Questa suddivisione è necessaria per evitare contaminazioni tra prodotti con caratteristiche chimico-fisiche differenti. Inoltre, quando si passa da una produzione a base polietere a una a base poliestere (o viceversa), viene eseguita una procedura di lavaggio con isocianato per pulire il reattore e le tubazioni condivise.

Gli step descritti in precedenza rappresentano una semplificazione del processo reale, che può includere operazioni aggiuntive come:

- Flussaggi con gas inerte (azoto) per spurgare le linee di carico.
- Carichi multipli di reagenti, specialmente nelle produzioni che prevedono l'utilizzo di miscele di polioli o la combinazione di polioli preparati direttamente nel Reparto B.

Considerata la varietà di formulazioni possibili, una distinzione chiave nella classificazione dei prepolimeri è basata sulla tipologia di poliolo impiegato:

- Prepolimeri a base polietere (PEOL)
- Prepolimeri a base poliestere (PESOL)
- Prepolimeri a base mista (combinazione di PEOL e PESOL)

Questa suddivisione identifica in modo più preciso le proprietà del prepolimero e la sua reattività, ottimizzando le condizioni di processo e garantendo la qualità del prodotto finale.

4 Gestione e controllo di processo

4.1 Sistema di automazione

Lo stabilimento BASF di Villanova d'Asti è dotato di un avanzato sistema di automazione e controllo del processo, basato su un'infrastruttura di Programmable Logic Controller (PLC), progettata per garantire una gestione ottimale delle apparecchiature principali, come reattori e miscelatori.

I PLC sono computer industriali programmabili che eseguono algoritmi di controllo per regolare le operazioni produttive. Questi dispositivi ricevono segnali digitali e analogici da sensori di campo, elaborano i dati in tempo reale e determinano le azioni da applicare agli attuatori, come valvole di regolazione e pompe.

L'architettura del sistema di automazione è suddivisa in tre livelli principali, integrati tra loro in modo verticale:

- SAP – Software di gestione aziendale per inserire e tracciare gli ordini di produzione.
- PUR-MES – Middleware di gestione della produzione che assegna le ricette ai batch e verifica la disponibilità delle risorse.
- PCS7 – Sistema di controllo del processo che esegue le operazioni sulla base dei parametri impostati.

Questa struttura gerarchica consente un monitoraggio e controllo efficiente del processo produttivo, garantendo la tracciabilità dei materiali e l'ottimizzazione delle risorse.

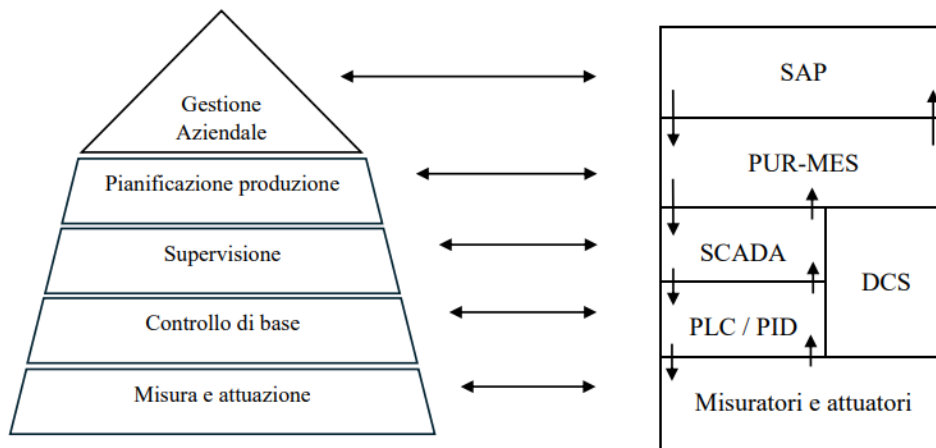


Figura 4.1.1 – Rappresentazione dell'integrazione verticale e della comunicazione tra i vari livelli di software interni ^[7].

Uno degli aspetti chiave della gestione dello stabilimento è il monitoraggio in tempo reale, reso possibile dall'integrazione tra PLC e monitor sinottici, installati nei punti strategici ^[7]:

- Reparto A (miscele polioliche)
- Reparto B (prepolimeri e isocianati)
- Ufficio produzione
- Sala controllo
- Sala automazione

I monitor sinottici permettono agli operatori di visualizzare lo stato degli impianti e monitorare parametri chiave come temperatura, pressione e stato delle apparecchiature (valvole, pompe, agitatori). Gli operatori possono selezionare una specifica apparecchiatura per ottenere informazioni dettagliate in tempo reale, consentendo interventi tempestivi in caso di anomalie e prevenendo interruzioni del processo.

L'architettura di automazione prevede l'uso di diversi PLC dedicati a funzioni specifiche:

- PLC Siemens → Controllano il processo produttivo.
- PLC Hitachi → Gestiscono le utilities, come il controllo della temperatura.
- SPLC HIMA → Utilizzati esclusivamente per funzioni di sicurezza ad alta affidabilità, certificate secondo i più elevati standard industriali.

La rete industriale è isolata, il che significa che non è possibile accedere alla rete dei PLC da un

computer qualsiasi connesso alla rete aziendale. Questa configurazione garantisce un elevato livello di sicurezza informatica, prevenendo accessi non autorizzati o interferenze con il controllo del processo.

I protocolli di comunicazione utilizzati nel sistema includono:

- Profibus
- 4-20mA
- HART
- Profinet (in fase di studio per l'aggiornamento di PCS7 alla versione più recente di Siemens, che implementa il protocollo di comunicazione più evoluto).

La gestione della produzione avviene in tre fasi principali:

1. Caricamento dell'Ordine

- a. L'ordine di produzione viene inserito nel sistema SAP, che assegna un numero di batch univoco.
- b. L'ufficio produzione verifica la disponibilità delle materie prime in magazzino, compresi eventuali materiali avanzati da batch precedenti o recuperi da lavaggi.

2. Middleware PUR-MES

- a. Il sistema assegna la ricetta di produzione al batch e verifica la disponibilità delle risorse.
- b. L'ufficio produzione valida la ricetta e ne effettua un controllo prima della trasmissione al sistema di controllo.

3. Esecuzione della Produzione con PCS7

- a. PCS7 gestisce il controllo del processo, eseguendo gli step della ricetta e regolando le variabili operative.
- b. Gli operatori seguono la produzione tramite monitor sinottici, verificando lo stato delle apparecchiature e i parametri di processo.

Durante il caricamento delle materie prime, gli operatori effettuano un controllo incrociato tra il codice richiesto dalla ricetta e il codice del materiale caricato.

Il sistema di controllo esegue automaticamente le operazioni impostate, come:

- Apertura e chiusura delle valvole
- Regolazione delle temperature
- Controllo delle portate massiche

Il laboratorio di controllo qualità verifica ogni batch prima della produzione, confrontando il prodotto da realizzare con quello precedentemente prodotto per individuare eventuali incompatibilità tra le formulazioni. In caso di incompatibilità, vengono definiti specifici cicli di lavaggio per evitare contaminazioni.

Inoltre, il laboratorio recupera materiali dai lavaggi per ridurre gli scarti e ottimizzare l'uso delle materie prime.

Una volta completata la produzione, PCS7 comunica i dati di produzione a PUR-MES, che aggiorna i consumi effettivi rispetto ai valori previsti. Queste informazioni vengono poi trasmesse a SAP per aggiornare le giacenze di magazzino e ottimizzare la gestione delle risorse.

L'infrastruttura di PLC, middleware e sistemi di controllo consente di ottenere:

- Precisione e ripetibilità del processo
- Monitoraggio in tempo reale delle apparecchiature
- Sicurezza operativa avanzata
- Riduzione degli scarti e ottimizzazione delle risorse
- Tracciabilità completa dei prodotti e delle materie prime

L'adozione di un sistema di automazione integrato e altamente specializzato permette allo stabilimento BASF di Villanova d'Asti di gestire in modo efficiente la produzione, garantendo elevati standard di qualità, sicurezza e ottimizzazione dei processi industriali.

5 Sicurezza di processo

5.1 Matrice di rischio

La gestione della sicurezza negli impianti chimici, specialmente in processi complessi come la prepolimerizzazione del poliuretano, richiede un approccio strutturato e scientificamente validato per valutare i rischi. In questo contesto, la Matrice di Rischio ^{[12][13]} è uno strumento fondamentale che consente di categorizzare e mitigare i pericoli attraverso un'analisi basata su probabilità e severità degli eventi dannosi.

In questo approfondimento verrà trattata in modo dettagliato la metodologia della Matrice di Rischio, con particolare riferimento alla normativa interna di BASF (G-R-PRS-006), confrontandola con standard internazionali come IEC 61511 e discutendo la gestione della tollerabilità del rischio.

La Matrice di Rischio è un metodo semi-quantitativo che permette di classificare un evento pericoloso in funzione di:

- Probabilità (P): Frequenza stimata con cui un evento si verifica, che può essere determinata attraverso dati storici, esperienze operative o modelli predittivi.
- Magnitudo (M) o Severità (S): Impatto potenziale dell'evento sulle persone, sull'ambiente e sugli impianti.

L'intersezione di questi due valori in una matrice bidimensionale fornisce una classificazione del rischio, solitamente in basso, medio o alto.

Nella Matrice di Rischio BASF, la severità è divisa in quattro livelli (S1-S4), mentre la frequenza è classificata da P0 (evento improbabile) a P4 (evento frequente). I colori utilizzati nella matrice rappresentano i diversi livelli di rischio:

- A/B – Rischio critico, richiede azioni immediate.
- C/D – Rischio moderato, necessita di mitigazione.
- D/E – Rischio accettabile con monitoraggio.
- F – Rischio trascurabile.

BASF Risk Matrix				
BASF	Risk Matrix			
	Severity			
	Frequency	S 1	S 2	S 3
P 0	A	B	D	E
P 1	A/B	B	E	E
P 2	B	C	E	F
P 3	C	D	F	F
P 4	E	F	F	F

Figura 5.1.1 - Matrice di rischio BASF^[1]

5.1.1 Nuova matrice di rischio secondo la procedura G-R-PRS-006

Nella gestione della sicurezza industriale, BASF ha aggiornato nel 2020 il suo approccio alla valutazione del rischio (G-R-PRS-006), allineandolo agli standard internazionali come IEC 61511 per i Sistemi di Sicurezza Strumentati (SIS).

IEC 61511		BASF until 2019		BASF starting 2020/22		
RRF	E&I Measure	BASF Risk Class	G-P-EI 201M	RRF	BASF Risk Class	G-R-PRS 006
> 10.000 to ≤ 100.000	SIL4	A	Process or Design Change	10.000	A	Process or Design Change
> 1.000 to ≤ 10.000	SIL 3	B	SIL 3	1.000	B	SIL 3
> 100 to ≤ 1.000	SIL 2	C	SIL 2	100	C	SIL 2
> 10 to ≤ 100	SIL1	Not used		10	D	SIL1
≤10	BPCS Protection Layer	D	Monitoring Device incl. Test	~10	D	Class D Safety Interlock
		E	Monitoring Device	-	E	Monitoring Device
		F		-	F	

Figura 5.1.2 - Evoluzione della matrice di rischio BASF

Le misure di mitigazione variano a seconda del livello di rischio:

- **Controllo di processo di base:** regolazione e controllo operativo ordinario.
- **Allarmi automatici e interventi manuali:** sistemi che avvisano gli operatori delle anomalie per consentire interventi tempestivi.
- **SIS (Safety Interlock System):** sistemi automatici indipendenti, progettati per intervenire automaticamente in situazioni critiche.
- **Dispositivi fisici di protezione:** come valvole di sicurezza e dischi di rottura, che offrono una barriera passiva contro eventi pericolosi.

Un concetto essenziale per i SIS è quello delle SIF (Safety Instrumented Function), cioè funzioni di sicurezza che rispondono automaticamente a segnali di allarme, attivando misure protettive (ad esempio, chiudendo valvole). Ogni SIF ha un determinato livello di affidabilità, definito come SIL (Safety Integrity Level), basato sulla probabilità che il sistema possa fallire.

Nell'ambito industriale, esistono quattro livelli SIL principali:

- **SIL4**: massima affidabilità, utilizzato per impianti che presentano rischi elevati per la comunità esterna.
- **SIL3**: prevede l'utilizzo di sensori e attuatori ridondati con un PLC di sicurezza dedicato.
- **SIL2**: utilizza sensori, attuatori e SPLC (Safety PLC) dedicati.
- **SIL1**: utilizza sensori e SPLC dedicati, mentre gli attuatori possono essere condivisi con il sistema di controllo di processo [8].

Con l'aggiornamento, BASF ha introdotto anche il blocco di sicurezza di classe D, che rappresenta un'alternativa al blocco SIL1 in particolari condizioni. In questo caso, il sensore di sicurezza è dedicato, ma l'attuatore può essere condiviso anche con il controllo di processo e il segnale viene gestito dal DCS (Distributed Control System), non da un PLC di sicurezza.

Un parametro chiave per classificare i livelli SIL è il PFD_{avg} (Probability of Failure on Demand Average), che indica la probabilità che un sistema di protezione possa fallire quando richiesto. Anche se uno strumento è intrinsecamente affidabile, potrebbe non essere sufficiente da solo a garantire il livello SIL necessario; in questi casi, è fondamentale prevedere la ridondanza degli strumenti per raggiungere l'affidabilità richiesta.

Low Demand Mode of Operation			
Function	SIL	PFD _{avg}	Achievable Risk Reduction
SIF	3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	>1,000 to $\leq 10,000$
SIF	2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	>100 to $\leq 1,000$
SIF	1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	>10 to ≤ 100
Class D safety interlock	-	-	~10

Figura 5.1.3 - Classificazione dei livelli SIL con relative probabilità di fallimento e capacità di riduzione del rischio ottenibili in modalità a bassa richiesta.

L'aggiornamento della procedura G-R-PRS-006 ha comportato una revisione significativa della matrice di rischio utilizzata da BASF, ridefinendo criteri e modalità per l'assegnazione delle misure di sicurezza. Prima dell'aggiornamento, i blocchi SIL1 erano spesso implementati senza una netta distinzione tra controllo e sicurezza, con una potenziale sovrapposizione delle funzioni. La nuova procedura stabilisce chiaramente che, per nuovi impianti, i blocchi SIL1 devono essere gestiti tramite un PLC di sicurezza indipendente, assicurando così l'assoluta indipendenza tra funzioni di controllo e sicurezza. Per impianti già esistenti, invece, è ancora possibile utilizzare i blocchi di classe D, a patto che vengano rispettate tre condizioni fondamentali:

1. Il DCS non deve essere l'evento che innesca l'anomalia.
2. Il blocco di sicurezza D deve essere indipendente da altre protezioni.
3. Il DCS deve essere valutato affidabile mediante analisi periodiche e una manutenzione rigorosa.

Questo cambiamento introduce anche una chiara distinzione formale per il rischio di classe D, posizionandolo come un livello intermedio tra il controllo di processo (BPCS) e il sistema strumentato di sicurezza (SIS). Ad esempio, per scenari di rischio specifici come P3xS2 e P0xS3, la protezione può essere implementata tramite blocco D su un DCS indipendente o, nel caso di loop critici, con un sistema SIL1 cablati o gestito da un PLC di sicurezza.

Infine, l'adeguamento degli impianti alla nuova matrice di rischio richiede un'accurata revisione degli interblocchi esistenti, con analisi dettagliate del PFDavg e delle soluzioni tecniche da adottare per garantire conformità e massima sicurezza operativa.

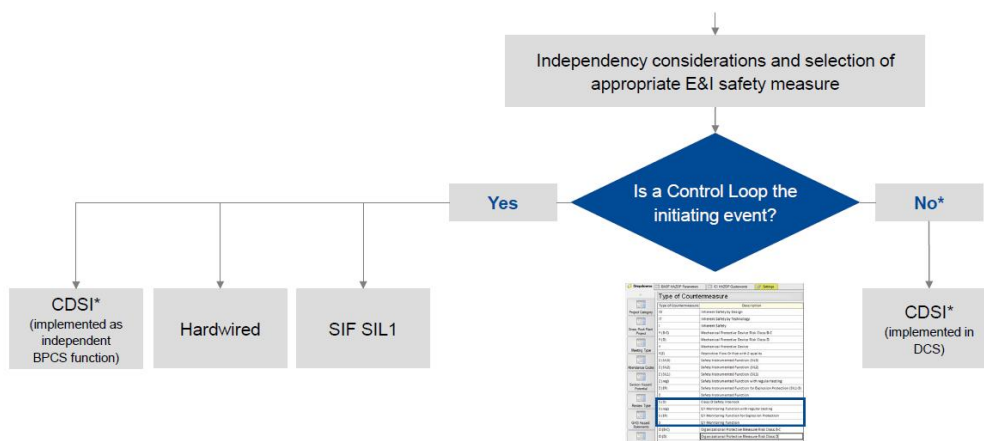


Figura 5.1.4 - Diagramma decisionale per la selezione dei blocchi di sicurezza (SIL1 o Classe D) in base all'indipendenza del loop di controllo rispetto all'evento iniziatore [8].

Control Loop Initiating Event	Solution A: SIL1 – Interlock Loop moved to Safety PLC (SPLC) as a SIL1 interlock
	Solution B: SIL1 – Interlock Loop moved to Trip Amplifier as a SIL1 interlock
	Solution C: SIL1 – Interlock Loop moved to Hardwired System as a SIL1 interlock
	Solution D: SIL1 – Interlock Loop moved to Integrated Safety Controller* (Delta V / PCS7) as a SIL1 interlock
	Solution E: CDSI – Interlock Loop moved to separate PLC or DCS as an interlock
* These integrated SPLCs are only allowed to be utilized for D-Risk – Not for use for SIL2	
Control Loop NOT Initiating Event	Solution F: CDSI – Interlock Loop remains as Class D Safety Interlock in DCS

Figura 5.1.5 - Tabella riassuntiva delle soluzioni di interblocco per scenari in cui il loop di controllo sia o meno l'evento iniziatore, secondo la procedura G-R-PRS-006 [8].

CAMPO BASF	CLASSE DI RISCHIO	RRF	CONTROMISURA
P0 x S3 P3 x S2	D	Circa 10	<p>Se il loop di controllo che causa l'evento è implementato a DCS:</p> <ul style="list-style-type: none"> → SIL 1 → Hardwired → Blocco D su DCS separato e indipendente da quello di processo <p>Se il loop che causa l'evento è indipendente da DCS:</p> <ul style="list-style-type: none"> → Blocco D su DCS

5.1.2 Caratterizzazione e controllo di processo dei prepolimeri

Per garantire la sicurezza funzionale nella produzione dei prepolimeri poliuretanicici è necessario monitorare attentamente le condizioni di conservazione e di reazione, con particolare attenzione al controllo della temperatura. Questo monitoraggio è fondamentale per prevenire instabilità chimiche e reazioni indesiderate che potrebbero compromettere la qualità del prodotto e mettere a rischio la sicurezza dell'impianto.

Tra i parametri più importanti da controllare ci sono:

- **T24**: è la temperatura massima alla quale un prodotto può restare stabile termicamente per almeno 24 ore. Superando questa soglia, aumenta sensibilmente il rischio di

decomposizione, con un potenziale rilascio incontrollato di calore. Questo è particolarmente critico per componenti come poliisocianati e polioli, essenziali nella sintesi dei prepolimeri poliuretani, poiché una decomposizione incontrollata può generare fenomeni di runaway termico, difficili da gestire. Per questo motivo, nelle procedure di sicurezza è stabilito che la T24 deve essere inferiore a 100°C, così da mantenere un margine di sicurezza adeguato ed evitare reazioni pericolose.

- **Tstart**: indica la temperatura iniziale della reazione tra isocianati e polioli e definisce le condizioni iniziali dell'intero processo. Questa temperatura varia a seconda delle specifiche formulazioni e delle caratteristiche dell'impianto, ed è generalmente compresa tra 20°C e 110°C. Poiché la reazione è esotermica, è essenziale un controllo preciso per evitare innalzamenti eccessivi della temperatura, che potrebbero causare decomposizioni o incrementi di pressione pericolosi, specialmente in presenza di rapporti equimolari tra i gruppi isocianati e i gruppi OH.
- **Tmax**: è il limite massimo assoluto di temperatura che non deve essere superato durante la reazione. Oltre questa soglia, definita sotto i 140°C per i prepolimeri poliuretani, si verifica un runaway termico praticamente garantito, con conseguenze potenzialmente molto gravi per la sicurezza dell'intero impianto ^[1].

Le normative di sicurezza industriale enfatizzano la necessità di mantenere sempre queste temperature entro limiti rigorosi, al fine di prevenire efficacemente situazioni pericolose e assicurare un ambiente di lavoro sicuro.

5.1.3 Gap analysis per l'adeguamento dei reattori

La Gap Analysis è un metodo di valutazione sistematica utilizzato nell'industria chimica per identificare le discrepanze tra le condizioni operative attuali di un impianto e gli standard di sicurezza o di prestazione richiesti. Questo approccio è fondamentale per garantire che gli impianti produttivi, come quelli coinvolti nella sintesi di prepolimeri poliuretani, rispettino le normative di sicurezza e ottimizzino le condizioni operative. L'obiettivo principale della Gap Analysis è individuare aree di miglioramento e implementare misure correttive, con un focus particolare sulla prevenzione di rischi chimici e termici, come il runaway termico nei reattori.

Nel contesto della produzione di prepolimeri poliuretani, la Gap Analysis è stata applicata ai reattori RA3 e RA4 per valutare la loro conformità ai requisiti previsti per la Categoria 3, ossia quella caratterizzata da un alto rilascio di calore durante la reazione di poliuretanicizzazione.

L'analisi è stata strutturata attraverso un confronto tra le prestazioni attuali dei reattori e le best practice industriali, concentrandosi su variabili critiche come temperatura, pressione, dosaggio dei reagenti e strategie di controllo della reazione.

Nel caso del reattore RA3, l'analisi ha portato all'installazione di un massico, studiato e dimensionato all'interno della tesi, con l'obiettivo di migliorare il controllo del flusso dei reagenti e la gestione termica della reazione. Questo intervento ha permesso di ottimizzare la distribuzione dei componenti reattivi, garantendo una miscelazione più uniforme e riducendo il rischio di accumuli locali di calore, che potrebbero portare a reazioni incontrollate.

Questa analisi ha permesso di determinare con precisione le modifiche necessarie per garantire che entrambi i reattori operassero in condizioni di sicurezza ottimali, prevenendo scenari di runaway termico e migliorando l'affidabilità del processo.

Come illustrato nei capitoli precedenti, i prepolimeri poliuretanicici vengono classificati in tre categorie principali a seconda del calore adiabatico rilasciato durante la reazione di poliuretanicizzazione:

- **Categoria 1:** comprende prepolimeri definiti intrinsecamente sicuri. In questo caso, il calore sviluppato durante la reazione rimane al di sotto della soglia critica di 140°C. Questo consente una gestione stabile del processo senza bisogno di controlli avanzati nelle modalità di dosaggio e gestione della reazione.
- **Categoria 2:** include prepolimeri con calore di reazione intermedio. Questi richiedono una gestione più accurata dei parametri operativi, come il controllo attento della velocità di dosaggio e delle condizioni di reazione, oltre a misure di sicurezza aggiuntive.
- **Categoria 3:** racchiude prepolimeri caratterizzati da un alto rilascio termico durante la reazione. Tali prepolimeri necessitano di importanti interventi strutturali e impiantistici e di un monitoraggio continuo, per evitare il rischio di fenomeni di runaway termico e altre deviazioni potenzialmente pericolose ^[1].

Ogni categoria definisce specifici requisiti di sicurezza, oltre a prevedere misure comuni obbligatorie, che devono essere analizzate e implementate per garantire conformità con gli standard di sicurezza. La valutazione dei rischi tramite l'uso della matrice di rischio consente di identificare i potenziali pericoli e determinare le migliori azioni preventive.

5.1.4 Analisi dei Rischi e Misure di Mitigazione per il Reattore RA4

Nell'ambito della Gap Analysis condotta sul reattore RA4, sono stati analizzati i principali scenari di rischio associati alle tre categorie di prepolimeri poliuretanicici, definendo le contromisure necessarie per garantire la conformità ai requisiti di sicurezza. Lo studio ha permesso di individuare sia le misure di sicurezza già presenti, sia quelle che richiedono interventi migliorativi, descritti dettagliatamente nei prossimi capitoli tramite esempi concreti di installazione e adeguamento.

Categoria 1

- **Gap individuati:** Mancano interblocchi di sicurezza SIL2 sulle sonde di temperatura e sul dosaggio delle materie prime.
- **Interventi necessari:** Implementare un blocco di sicurezza SIL2 con sistema HIMA, che interrompa automaticamente il dosaggio in caso di superamento della temperatura critica (>140°C) o in presenza di errori nella composizione delle materie prime.

Categoria 2

- **Gap individuati:** Assenza di interblocco sul dosaggio del poliolo gestito da HIMA, nonostante siano già installati misuratori di portata.
- **Interventi necessari:** Configurare il sistema HIMA per gestire direttamente gli interblocchi sul dosaggio, prevenendo così l'accumulo di calore indesiderato e garantendo un intervento automatico tempestivo in caso di deviazioni operative.

Categoria 3

- **Gap individuati:** Mancano connessioni tra il PLC di sicurezza (SPLC) e sensori SIL2 per il monitoraggio della temperatura e della velocità di agitazione (RPM), oltre alla mancanza di attuatori SIL2 per l'intercettazione del dosaggio.
- **Interventi necessari:** Integrare sonde di temperatura, sensori RPM e valvole di intercettazione conformi SIL2 con il sistema HIMA, implementando una logica di sicurezza che attivi automaticamente le funzioni di sicurezza SIF in caso di anomalie^[8].

In questo studio viene prestata particolare attenzione all'ottimizzazione del controllo del processo per i prepolimeri di Categoria 2, con un focus specifico sulla selezione e installazione dei misuratori di portata massica, conformemente alla procedura G-R-PRS-006. Pur non richiedendo

un loop SIL2 completo, è cruciale che il dosaggio sia monitorato attraverso sensori altamente affidabili, conformi agli standard BASF per SIL1 e predisposti per eventuali future integrazioni SIL2.

A differenza della Categoria 3, dove è obbligatorio implementare interblocchi di sicurezza completamente indipendenti, per la Categoria 2 l'utilizzo del blocco CDSI rappresenta una soluzione adeguata a mantenere il processo sotto controllo e prevenire deviazioni pericolose nei dosaggi.

CATEGORY	SCENARIO	HAZARD / CONSEQUENCE	Risk Class	COUNTERMEASURE	STATUS
GENERAL	A1. Non-acidic reaction conditions	Too high alkalinity of the reaction mixture / Alkalinity of the reaction mixture (e.g. KOH from PEOs) catalyzes PIR formation at low temperatures. This leads to viscosity increase as well as strong temperature rise which can trigger further decomposition reactions along with gas formation.	P3 x S1 = C	The addition of correct type (DIBIS, Benzoylchloride, phosphoric acid or another approved material) and correct amount of acid must be safeguarded in risk class C quality by organizational or technical measures. Quantity and kind of acid must be safeguarded in class C: Organizational: training with high quality procedure with 4-eye principle (G-P-PRS-001 Annex 2) Acid environment should be applied to all recipes	YES 4-eyes principles procedures with double signature on the O&P for Dibis/BzCl weighting and dosing YES Acidic environment compliant
	A2. Water ingress in reactor	Not applicable at ELIT: reactors do not have water jackets	-	-	-
	A3. Overfilling	Overfilling of reactor can be caused by deviations in dosing procedure, deviations in the process chain or control loop failure.	P1 x S3 = E	Overfilling protection in risk class E.	YES Risk class D implemented (rupture disks installed)
	A4. Thermal expansion of liquids	Thermal expansion of trapped liquids can cause serious damage of process equipment due to the pressure increase over design pressure of the equipment and release of hazardous material.	P3 x S2 = D	Reactors: rupture disk implemented Piping: pumps have internal or external safety valve	YES
	A5. Raw material identification	Dosing of wrong raw material by misidentification / By dosing of wrong raw materials (e.g. wrong polyols) the desired recipe and therefore the related safety category might be wrong By dosing e.g., a polyol with a higher OHv as anticipated the theoretical adiabatic temperature rise of the reaction can be higher as expected. This might trigger reactions with further temperature increase and gas formation.	P3 x S1 = C	Ensure correct identity of polyols according to risk class C. Training of personal/staff with a high-quality standard operation procedure with four eyes principle. (G-P-PRS-001 Anexo 2)	YES Alcalinity, water and OH checked according with 4-eyes principles procedures with double signature on the inspection plan in place. Automation crosscheck for unloading of raw material with inhibition of polyetherol dosing until the analysis are over. "Small prepolymer" reaction checks for polyetherol in place.
CAT. 1	B1. Too high temperature: Loss of	Exceeding T24 value of 140°C of the polyisocyanate by external heating.	P3 x S1 = C	External heating circuit of the prepolymer reactor must be safeguarded to max.	YES HIMA SPLC and temperature sensor from

Figura 5.1.6 - Tabella riepilogativa della Gap Analysis effettuata sul reattore RA4, evidenziando i rischi, le contromisure e lo stato di implementazione per le varie categorie.

CATEGORY	SCENARIO	HAZARD / CONSEQUENCE	Risk Class	COUNTERMEASURE	STATUS
	temperature control in the heating circuit	Start of decomposition reactions of the polyisocyanate template with temperature increase and gas formation leading to reactor disruption		temperature of 140°C or below in risk class C quality.	standard list (E+H TR13) constitutes SIL2 loop with voting 1oo2 on maximum temperature in place.
	B2. Too high starting temperature: T_{start} (defined between 20 to 110°C)	If polyol and isocyanate are dosed equimolar and the starting temperature is too high, the combination of starting temperature and adiabatic temperature rise from the reaction can lead to temperatures above 140°C of the reaction mixture. Start of decomposition reactions of the prepolymer mixture with further temperature increase and gas formation.	$P3 \times S2 = D$	The maximum starting temperature of T_{start} (defined between 20 to 110°C) must be safeguarded in risk class D quality.	YES Temperature sensors already from standard list (E+H TR13), loop implemented on DCS and checked every 1 year.
	B3. Composition of polyol mixtures	Wrong composition of polyol mixture containing polyols with $OH_v > OH_{vmax}$ resulting in an overall $OH_{vmix} > OH_{vmax}$ If one or more components of the polyol mixture is above OH_{vmax} , and the composition of the mixture is wrong leading to mixture with $OH_{vmix} > OH_{vmax}$ the dosing of the polyol mixture could lead to a theoretical adiabatic temperature rise $>140^\circ C - T_{start}$. This can lead to reaction mixture temperatures of $>140^\circ C$ and therefore triggering decomposition reactions and gas formation	$P3 \times S1 = C$	Final OH_{vmix} of the polyol mixture must be checked prior to dosing to polyisocyanate compound in risk class C quality	YES 4-eyes principles procedures with double signature on the inspection plan

Figura 5.1.7 - Tabella riepilogativa della Gap Analysis per i prepolimeri di Categoria 1

CATEGORY	SCENARIO	HAZARD / CONSEQUENCE	Risk Class	COUNTERMEASURE	STATUS
CAT. 2	C1. Polyisocyanate quantity too low	Dosed polyisocyanate amount too low; targeted recipe not matched; Too low heat sink due to missing "inert" polyisocyanate.	$P3 \times S2 = D$	Minimum quantity of polyisocyanate must be safeguarded in risk class D quality.	NO Mass flow meters missing in reactor safety interlocks, just need to be installed
		Recipe is missed. Lower amount of polyisocyanate might lead to a real adiabatic temperature increase value of $\Delta T_{ad, recipe} > 140^\circ C - T_{start}$ (T_{start} is defined between 20 to 110°C). This might lead to reaction temperatures $>140^\circ C$ triggering decomposition reactions and gas formation.		The minimum quantity of polyisocyanate acts as interlock for the start of the polyol dosing in risk class D quality.	NO Mass flow meters missing in reactor safety interlocks, just need to be installed
	C2. Polyol quantity too high	Dosed polyol quantity too high; targeted recipe not matched /	$P3 \times S2 = D$	Maximum quantity of polyol must be safeguarded in risk class D quality.	NO Mass flow meters missing in reactor safety interlocks, just need to be installed
		The recipe is missed. Higher amount of polyol might lead to a real adiabatic temperature increase value $\Delta T_{ad, recipe} > 140^\circ C - T_{start}$. (T_{start} is defined between 20 to 110°C). This might lead to reaction temperatures $>140^\circ C$ triggering decomposition reactions and gas formation.		Polyol dosing devices must be interlocked if maximum polyol quantity is exceeded in risk class D quality.	NO Mass flow meters missing in reactor safety interlocks, just need to be installed
C3. Composition of polyol mixtures	Wrong composition of polyol mixture containing the wrong ratio of polyols resulting in an overall $OH_{vmix} > OH_{vmax}$ In case of dosing of polyol mixture with wrong composition ($OH_{vmix} > OH_{vmax}$) a theoretic adiabatic temperature rise $>140^\circ C - T_{start}$ is possible. This can lead to reaction mixture temperatures of $>140^\circ C$ and therefore triggering decomposition reactions and gas formation	$P3 \times S1 = C$	Final OH_{vmix} of the polyol mixture must be checked prior to dosing to polyisocyanate compound in risk class C quality.	YES Same as Category 1 -B3 Organized procedures (4-eyes principles procedures with double signature on the inspection plan)	
C4. Mixing	No mixing of the reaction mixture during dosing and reaction /	Development of an inhomogeneous reaction mixture with the potential to generate local hot spots with temperatures $>140^\circ C$. These might initiate decomposition reactions with further temperature increase and gas formation leading to reactor disruption. Leakage to the outside no explosion.	$P3 \times S2 = D$	Good inspection program to check the mechanical integrity of the equipment	YES Same as Category 1 -B2 (SIL inductive sensor connected to HIMA, already in operation)
				Monitoring stirrer speed in risk class D quality (included in the PCS7 new software)	
				Regular Inspection program of stirrer/blade integrity is recommended.	YES Already in maintenance plan

Figura 5.1.8 - Tabella riepilogativa della Gap Analysis per i prepolimeri di Categoria 2

CATEGORY	SCENARIO	HAZARD / CONSEQUENCE	Risk Class	COUNTERMEASURE	STATUS
CAT. 3	D1. Loss of cooling capacity	Heat of reaction cannot be dissipated anymore Reaction mixture temperature can rise above 140°C and trigger decomposition reactions and gas formation	P2 x S2 = C	Maximum temperature in the reactor must be safeguarded below 140°C in risk class C quality. Safety interlock (TZ+) with trip point at 20°C above desired reaction temperature, but below* 140°C, should be in place. Interlock function closes all raw material dosing valves above trigger point temperature in risk class C quality. Monitoring stirrer speed in risk class C quality	NO Monitoring stirrer speed is in class D , need connection to SPLC. Lacks interlock with sensors (already SIL2) Needs interlock SIL2 on SPLC and actuators. ALL FROM STANDARD LIST
	D2. Too fast dosing of polyol component	Heat of reaction cannot be dissipated; Accumulation occurs According to recipe the reaction mixture temperature can rise above 140°C (with ΔT_{ad} , recipe > 140°C - Tstart). This can trigger decomposition reactions and gas formation	P2 x S2 = C	Cooling capacity, technical max. polyol dosing speed and reaction heat development must be assessed. If necessary maximum polyol dosing speed must be limited in risk class C quality to avoid any accumulation. All measures are additionally to D1.	NO Mass flowmeter to be connected to SPLC and SIL2 actuators from standard list. Evaluation of heat development due to speed.
	D3. Temperature	Tstart Too low → accumulation of reactants (polyols). During external heating the reaction can start with 100% accumulation (worst case) Temperature can rise above 140°C. This can trigger decomposition reactions and gas formation	P2 x S2 = C	The minimum temperature in the reactor must be safeguarded in risk class C quality. See also 3.6. To be able to measure the temperature adequately the stirrer must work properly and needs to be safeguarded in the same risk class.	NO Monitoring stirrer speed is in class D , need connection to SPLC. SIL2 temperature probe to be connected to SPLC (minimum block) with SIL2 actuators. If it goes below or the stirrer gets stuck, what to do? Alarm and procedures?

Figura 5.1.9 - Tabella riepilogativa della Gap Analysis per i prepolimeri di Categoria 3

5.1.5 Analisi dei Rischi e Misure di Mitigazione per il Reattore RA3

La Gap Analysis condotta sul reattore RA3 si è focalizzata sull'identificazione e correzione delle criticità legate alla gestione della reazione di poliuretanicizzazione, con particolare attenzione alla prevenzione di scenari di runaway termico e al miglioramento della precisione nei dosaggi delle materie prime. L'analisi è stata eseguita seguendo una metodologia strutturata che ha permesso di valutare il livello di conformità del reattore rispetto agli standard di sicurezza richiesti per la Categoria 3, individuando le modifiche necessarie per garantire un funzionamento sicuro e stabile.

Uno degli aspetti chiave della Gap Analysis ha riguardato l'installazione del massico, un dispositivo studiato e dimensionato all'interno della tesi, con l'obiettivo di ottimizzare il dosaggio delle materie prime e migliorare il controllo delle condizioni di reazione. Questo intervento è stato fondamentale per garantire un'accurata regolazione del flusso di reagenti, evitando eccessi o carenze di polioli e poliisocianati, che avrebbero potuto portare a deviazioni critiche della temperatura di reazione.

Un'area critica identificata riguarda la corretta identificazione delle materie prime. Un errore nella selezione dei reagenti potrebbe comportare variazioni impreviste della temperatura di reazione, con un potenziale aumento del calore adiabatico sviluppato. Per mitigare questo rischio, sono state implementate procedure di verifica avanzate, basate sul principio dei "4 occhi"

(double-check da parte di due operatori), che rappresentano una misura di sicurezza fondamentale per BASF, con un fattore di riduzione del rischio RRF pari a 10^2 , sufficiente per mitigare un rischio di classe C.

Per quanto riguarda la gestione del controllo termico, la Gap Analysis ha evidenziato la necessità di un miglioramento nella regolazione della temperatura iniziale (T_{start}), che rappresenta un parametro critico nel processo di prepolimerizzazione. Temperature di avvio troppo elevate possono innescare decomposizioni termiche indesiderate, portando alla formazione di gas e a un rapido aumento della temperatura. Per contrastare questo rischio, è stata proposta l'installazione di sensori di temperatura ad alta precisione, collegati al sistema di controllo distribuito (DCS), per monitorare e garantire che la T_{start} rimanga entro i limiti di sicurezza. Questa misura è già stata implementata in parte, ma è necessario un ulteriore miglioramento attraverso la calibrazione dei sensori e il rafforzamento delle logiche di interblocco per la regolazione automatica della temperatura.

Un'altra criticità individuata riguarda il rischio legato alla quantità di poliisocianato dosata. Una quantità insufficiente di questo componente può compromettere la stabilità della reazione, portando a temperature superiori ai 140°C e al possibile innesco di reazioni secondarie di decomposizione. Per risolvere questa problematica, è stata prevista l'installazione di misuratori di flusso di massa per garantire un dosaggio preciso e un controllo più efficace della quantità minima di poliisocianato necessaria. Tuttavia, questa misura non è ancora stata implementata e richiede il collegamento al PLC di controllo per consentire il blocco automatico del dosaggio in caso di deviazioni dai parametri impostati.

Analogamente, anche un dosaggio eccessivo di poliolo può portare a una variazione indesiderata del rapporto stechiometrico, con conseguente alterazione della temperatura di reazione e instabilità del processo. La soluzione individuata prevede la limitazione della quantità massima di poliolo attraverso dispositivi di interblocco e monitoraggio del flusso. Anche in questo caso, l'installazione dei misuratori di flusso non è ancora stata completata e necessita del relativo aggiornamento software per il collegamento al sistema di automazione.

Infine, la Gap Analysis ha evidenziato la necessità di migliorare il controllo sulla composizione delle miscele di polioli, poiché una miscela errata può portare a un aumento dell' OH_{vmax} , incrementando il valore del calore adiabatico sviluppato oltre i limiti di sicurezza. Per mitigare questo rischio, è stato introdotto un sistema di verifica dell'OH finale della miscela prima della dosatura, con l'obbligo di doppia firma sull'ispezione dei parametri di reazione.

Il capitolo successivo approfondirà la scelta e l'installazione dei misuratori di portata massica più adatti, analizzando le opzioni disponibili in funzione delle proprietà fisiche dei fluidi, dell'accuratezza richiesta e delle modalità di integrazione con il sistema di controllo. Verranno anche descritte le procedure di installazione, calibrazione e validazione necessarie a garantire misurazioni stabili e affidabili, prevenendo errori di dosaggio e assicurando la conformità ai requisiti di sicurezza per i prepolimeri di Categoria 2 e 3.

CATEGORY	SCENARIO	HAZARD / CONSEQUENCE	Risk Class	COUNTERMEASURE	STATUS
GENERAL	A1. Non-acidic reaction conditions	Too high alkalinity of the reaction mixture / Alkalinity of the reaction mixture (e.g. KOH from PEOLs) catalyzes PIR formation at low temperatures. This leads to viscosity increase as well as strong temperature rise which can trigger further decomposition reactions along with gas formation.	P3 x S1 = C	The addition of correct type (DIBIS, Benzoylchloride, phosphoric acid or another approved material) and correct amount of acid must be safeguarded in risk class C quality by organizational or technical measures. <i>Quantity and kind of acid must be safeguarded in class C: Organizational: training with high quality procedure with 4-eye principle (G-P-PRS-001 Annex 2)</i> <i>Acid environment should be applied to all recipes</i>	YES 4-eyes principles procedures with double signature on the OQP for Dibis/BzCl weighting and dosing YES Acidic environment compliant
	A2. Water ingress in reactor	Not applicable at ELIT: reactors do not have water jackets	-	-	-
	A3. Overfilling	Overfilling of reactor can be caused by deviations in dosing procedure, deviations in the process chain or control loop failure.	P1 x S3 = E	Overfilling protection in risk class E.	YES Risk class D implemented (rupture disks installed)
	A4. Thermal expansion of liquids	Thermal expansion of trapped liquids can cause serious damage of process equipment due to the pressure increase over design pressure of the equipment and release of hazardous material.	P3 x S2 = D	Reactors: rupture disk implemented Piping: pumps have internal or external safety valve	YES
	A5. Raw material identification	Dosing of wrong raw material by misidentification / By dosing of wrong raw materials (e.g. wrong polyols) the desired recipe and therefore the related safety category might be wrong By dosing e.g., a polyol with a higher OHv as anticipated the theoretical adiabatic temperature rise of the reaction can be higher as expected. This might trigger reactions with further temperature increase and gas formation.	P3 x S1 = C	Ensure correct identity of polyols according to risk class C. Training of personal/staff with a high-quality standard operation procedure with four eyes principle. (G-P-PRS-001 Anexo 2)	YES Alkalinity, water and OH checked according with 4-eyes principles procedures with double signature on the inspection plan in place. Automation crosscheck for unloading of raw material with inhibition of polyetherol dosing until the analysis are over. "Small prepolymer" reaction checks for polyetherol in place.
CAT. 1	B1. Too high temperature: Loss of	Exceeding T24 value of 140°C of the polyisocyanate by external heating.	P3 x S1 = C	External heating circuit of the prepolymer reactor must be safeguarded to max.	YES HIMA SPLC and temperature sensor from

Figura 5.1.10 - Tabella riepilogativa della Gap Analysis per i prepolimeri di Categoria 1

CATEGORY	SCENARIO	HAZARD / CONSEQUENCE	Risk Class	COUNTERMEASURE	STATUS
	temperature control in the heating circuit	Start of decomposition reactions of the polyisocyanate template with temperature increase and gas formation leading to reactor disruption		temperature of 140°C or below in risk class C quality.	standard list (E+H TR13) constitutes SIL2 loop with voting 1oo2 on maximum temperature in place.
	B2. Too high starting temperature; T_{start} (defined between 20 to 110°C)	If polyol and isocyanate are dosed equimolar and the starting temperature is too high, the combination of starting temperature and adiabatic temperature rise from the reaction can lead to temperatures above 140°C of the reaction mixture. Start of decomposition reactions of the prepolymer mixture with further temperature increase and gas formation.	P3 x S2 = D	The maximum starting temperature of T_{start} (defined between 20 to 110°C) must be safeguarded in risk class D quality. To be able to measure the temperature adequately the stirrer must work properly – and safeguarded in the same risk class.	YES Temperature sensors already from standard list (E+H TR13) loop implemented on DCS and checked every 1 year. YES Inductive sensors installed to count RPM with PCS7 logic installed.
	B3. Composition of polyol mixtures	Wrong composition of polyol mixture containing polyols with $OH_v > OH_{vmax}$ resulting in an overall $OH_{vmix} > OH_{vmax}$ If one or more components of the polyol mixture is above OH_{vmax} and the composition of the mixture is wrong leading to mixture with $OH_{vmix} > OH_{vmax}$ the dosing of the polyol mixture could lead to a theoretical adiabatic temperature rise $>140^\circ\text{C} - T_{start}$. This can lead to reaction mixture temperatures of $>140^\circ\text{C}$ and therefore triggering decomposition reactions and gas formation	P3 x S1 = C	Final OH_{vmix} of the polyol mixture must be checked prior to dosing to polyisocyanate compound in risk class C quality	YES 4-eyes principles procedures with double signature on the inspection plan

Figura 5.1.11 - Tabella riepilogativa della Gap Analysis per i prepolimeri di Categoria 1

CATEGORY	SCENARIO	HAZARD / CONSEQUENCE	Risk Class	COUNTERMEASURE	STATUS
CAT. 2	C1. Polyisocyanate quantity too low	Dosed polyisocyanate amount too low; targeted recipe not matched; Too low heat sink due to missing "inert" polyisocyanate.	P3 x S2 = D	Minimum quantity of polyisocyanate must be safeguarded in risk class D quality.	NO Mass flow meters missing in reactor safety interlocks, just need to be installed
		Recipe is missed. Lower amount of polyisocyanate might lead to a real adiabatic temperature increase value of ΔT_{ad} , recipe $> 140^\circ\text{C} - T_{start}$ (T_{start} is defined between 20 to 110°C). This might lead to reaction temperatures $>140^\circ\text{C}$ triggering decomposition reactions and gas formation.		The minimum quantity of polyisocyanate acts as interlock for the start of the polyol dosing in risk class D quality.	NO Mass flow meters missing in reactor safety interlocks, just need to be installed
	C2. Polyol quantity too high	Dosed polyol quantity too high; targeted recipe not matched /	P3 x S2 = D	Maximum quantity of polyol must be safeguarded in risk class D quality.	NO Mass flow meters missing in reactor safety interlocks, just need to be installed
		The recipe is missed. Higher amount of polyol might lead to a real adiabatic temperature increase value ΔT_{ad} , recipe $> 140^\circ\text{C} - T_{start}$ (T_{start} is defined between 20 to 110°C). This might lead to reaction temperatures $>140^\circ\text{C}$ triggering decomposition reactions and gas formation.		Polyol dosing devices must be interlocked if maximum polyol quantity is exceeded in risk class D quality.	NO Mass flow meters missing in reactor safety interlocks, just need to be installed
C3. Composition of polyol mixtures	Wrong composition of polyol mixture containing the wrong ratio of polyols resulting in an overall $OH_{vmix} > OH_{vmax}$ In case of dosing of polyol mixture with wrong composition ($OH_{vmix} > OH_{vmax}$) a theoretic adiabatic temperature rise $>140^\circ\text{C} - T_{start}$ is possible. This can lead to reaction mixture temperatures of $>140^\circ\text{C}$ and therefore triggering decomposition reactions and gas formation	P3 x S1 = C	Final OH_{vmix} of the polyol mixture must be checked prior to dosing to polyisocyanate compound in risk class C quality.	YES Same as Category 1-B3 Organized procedures (4-eyes principles procedures with double signature on the inspection plan)	
C4. Mixing	No mixing of the reaction mixture during dosing and reaction /	P3 x S2 = D	Good inspection program to check the mechanical integrity of the equipment.	NO Same as Category 1-B2 Missing mass flow meter on CP1, need to be installed. Inductive sensors installed to count RPM with PCS7 logic installed.	
	Development of an inhomogeneous reaction mixture with the potential to generate local hot spots with temperatures $>140^\circ\text{C}$. These might initiate decomposition reactions with further temperature increase and gas formation leading to reactor disruption. Leakage to the outside no explosion.		Monitoring stirrer speed in risk class D quality (included in the PCS7 new software) Regular Inspection program of stirrer/blade integrity is recommended.	YES Already in maintenance plan	

Figura 5.1.12 - Tabella riepilogativa della Gap Analysis per i prepolimeri di Categoria 2

CATEGORY	SCENARIO	HAZARD / CONSEQUENCE	Risk Class	COUNTERMEASURE	STATUS
CAT. 3	D1. Loss of cooling capacity	Heat of reaction cannot be dissipated anymore Reaction mixture temperature can rise above 140°C and trigger decomposition reactions and gas formation.	P2 x S2 = C	Maximum temperature in the reactor must be safeguarded below 140°C in risk class C quality. Safety interlock (TZ4) with trip point at 20°C above desired reaction temperature, but below 140°C, should be in place. Interlock function closes all raw material dosing valves above trigger point temperature in risk class C quality. Monitoring stirrer speed in risk class C quality.	NO Monitoring stirrer speed is in class C, need connection to SPLC. Lacks interlock with sensors (already SIL2). Needs interlock SIL2 on SPLC and actuators. ALL FROM STANDARD LIST
	D2. Too fast dosing of polyol component	Heat of reaction cannot be dissipated. Accumulation occurs According to recipe the reaction mixture temperature can rise above 140°C (with ΔT_{ad} recipe $> 140^\circ\text{C} - T_{start}$). This can trigger decomposition reactions and gas formation	P2 x S2 = C	Cooling capacity, technical max. polyol dosing speed and reaction heat development must be assessed. If necessary maximum polyol dosing speed must be limited in risk class C quality to avoid any accumulation. All measures are additional to D1.	NO Mass flowmeter to be connected to SPLC and SIL2 actuators from standard list. Evaluation of heat development due to speed.
	D3. Temperature	Tstart Too low → accumulation of reactants (polyols). During external heating the reaction can start with 100% accumulation (worst case) Temperature can rise above 140°C. This can trigger decomposition reactions and gas formation	P2 x S2 = C	The minimum temperature in the reactor must be safeguarded in risk class C quality. See also 3.B. To be able to measure the temperature adequately the stirrer must work properly and needs to be safeguarded in the same risk class.	NO Monitoring stirrer speed is in class C, need connection to SPLC. SIL2 temperature probe to be connected to SPLC (minimum block) with SIL2 actuators. If it goes below or the stirrer gets stuck, what to do? Alarm and procedures?

Figura 5.1.13 - Tabella riepilogativa della Gap Analysis per i prepolimeri di Categoria 3

6 Ricerca e installazione dei misuratori di portata

L'analisi prosegue con lo studio delle possibili soluzioni di sensoristica per garantire un monitoraggio affidabile e conforme agli standard di sicurezza di processo richiesti da BASF.

Attualmente, la misurazione della quantità di reagenti nei reattori avviene tramite celle di carico, che determinano la massa presente all'interno del reattore stesso. Tuttavia, questa metodologia presenta margini di errore dovuti alla variabilità delle modalità di caricamento: alcuni reagenti vengono dosati automaticamente tramite tubazioni, altri introdotti in maniera semi-automatica attraverso appositi bocchelli. Questa variabilità compromette l'accuratezza del sistema di misura e rende necessario introdurre un ulteriore dispositivo di monitoraggio diretto della massa immessa, capace di intervenire in caso di errori nel dosaggio dei polioli e degli isocianati.

Per individuare la soluzione migliore è stato condotto uno studio approfondito sulle tecnologie di misurazione della massa, valutando sensori di portata massica come alternativa più affidabile rispetto a misurazioni indirette basate su livello o pressione. L'analisi si è focalizzata in particolare sui dispositivi di Endress+Hauser, azienda leader nel settore, i cui strumenti sono inclusi nella standard list di BASF, consentendo una procedura di installazione semplificata e garantendo la conformità ai requisiti aziendali di sicurezza.

La **Standard List di BASF** ^[8] è una lista ufficiale e approvata dall'azienda che raccoglie e definisce tutti gli strumenti, dispositivi e componenti considerati idonei per l'utilizzo negli impianti industriali BASF. Questa lista include apparecchiature come sensori, trasmettitori, misuratori, valvole e sistemi di sicurezza, che hanno superato una serie di test e valutazioni rigorose per garantire conformità agli standard aziendali e alle normative di sicurezza funzionale.

L'obiettivo principale della Standard List è assicurare che tutti i componenti installati negli impianti siano affidabili, sicuri e facilmente integrabili con i sistemi già esistenti, oltre a semplificare la manutenzione e la gestione del ciclo di vita delle apparecchiature. L'utilizzo di strumenti approvati dalla Standard List facilita inoltre il processo di progettazione, installazione e certificazione degli impianti, poiché questi dispositivi sono già validati e testati secondo le specifiche BASF.

Il prossimo paragrafo analizzerà dettagliatamente le caratteristiche tecniche dei misuratori di portata massica di Endress+Hauser, valutandone l'applicabilità in relazione alle proprietà chimico-fisiche dei reagenti coinvolti nel processo produttivo. Inoltre, sarà considerata la facilità di integrazione con il sistema di controllo attuale e la capacità di garantire un monitoraggio

preciso e affidabile della quantità di materiale introdotto nel reattore, con lo scopo di migliorare il controllo della reazione e prevenire situazioni di rischio legate a deviazioni nei dosaggi.

6.1 Misuratori di portata

Per garantire un controllo accurato della portata nelle linee di dosaggio degli isocianati e dei polioli, è necessario scegliere misuratori che soddisfino criteri rigorosi di affidabilità, precisione e compatibilità con le specifiche condizioni operative del processo. Tra le tecnologie disponibili sul mercato, i misuratori di portata massica di tipo Coriolis rappresentano la soluzione più adatta, grazie alla capacità di misurare direttamente la massa, requisito essenziale nelle procedure di sicurezza definite da BASF.

I misuratori Coriolis offrono diversi vantaggi rispetto ad altre tecnologie. Ad esempio, i misuratori elettromagnetici non possono essere impiegati in quanto richiedono fluidi elettricamente conduttivi, condizione non soddisfatta da isocianati e polioli. I misuratori ad ultrasuoni, pur avendo il vantaggio di non introdurre perdite di carico, forniscono solo informazioni sulla portata, senza misure aggiuntive come densità o temperatura, rendendo incompleto il monitoraggio richiesto. Infine, i misuratori a vortice risultano inadatti poiché richiedono fluidi con basso grado di viscosità e flussi turbolenti stabili, condizioni non sempre presenti nei fluidi in analisi ^[11].

Al contrario, i misuratori Coriolis permettono un monitoraggio completo e dettagliato, fornendo simultaneamente informazioni sulla portata massica e volumica, sulla densità e sulla temperatura del fluido. Questo garantisce un controllo più preciso dei dosaggi e una migliore comprensione delle condizioni operative del processo, il tutto con perdite di carico minime. Un punto critico di questa tecnologia è tuttavia la sensibilità alla presenza di flussi bifasici, che potrebbe causare errori in caso di bolle d'aria o sacche di gas intrappolate nei fluidi.

Per superare questo limite operativo, è stato effettuato un confronto tra due modelli della serie Endress+Hauser Promass: I300 e Q300. In particolare, il modello Promass I300 presenta un design definito full body, caratterizzato dal fatto che il diametro interno del tubo di misura corrisponde a quello della linea su cui viene installato. Questo design contribuisce a ridurre significativamente le perdite di pressione e gestisce il fluido con minore aggressività, diminuendo problemi come la necessità di filtrazione e lo sporco. Inoltre, il modello Promass I300 permette anche la misurazione della viscosità, risultando particolarmente utile per il controllo di fluidi che presentano variazioni di caratteristiche fisiche nel tempo.



Figura 6.1.1 -Misuratore di portata massica Endress+Hauser Promass I300

Il modello Promass Q300, invece, si distingue per la sua capacità di misurare accuratamente la portata anche in presenza di flussi bifasici, evitando gli errori tipici dei misuratori Coriolis tradizionali causati da bolle o sacche di gas intrappolate nel liquido. Questa caratteristica rende il Promass Q300 particolarmente adatto al contesto della produzione di pre-polimeri, dove la presenza di aria nel fluido può compromettere significativamente l'accuratezza delle misurazioni.



Figura 6.1.2 -Misuratore di portata massica Endress+Hauser Promass Q300

La scelta tra i modelli Promass Q300 e Promass I300 dipenderà quindi dalle specifiche condizioni operative del processo. Qualora la presenza di gas nel fluido sia un fattore significativo, il Promass Q300 rappresenta la soluzione più idonea, grazie alla sua capacità di effettuare misure precise anche in condizioni di flusso bifasico difficili. Se, invece, la priorità consiste nel minimizzare le perdite di carico e monitorare accuratamente la viscosità, il Promass I300 può essere preferibile ^{[9][10]}.

Nello stabilimento di Villanova, il fenomeno del flusso bifasico si presenta in modo evidente. Esistono tre tipologie principali di flusso bifasico liquido-gas, con particolare attenzione alla terza tipologia, tipica della produzione batch, in cui una singola sorgente alimenta più destinazioni con direzioni del flusso sia dall'alto verso il basso che viceversa. Questa condizione critica si verifica principalmente nella fase iniziale di carico del reattore, durante la quale si stima che i primi 300 kg di materiale possano essere influenzati dalla presenza di bolle di gas, causando potenziali errori di misurazione.

L'analisi successiva approfondirà quindi le strategie possibili per mitigare questi problemi, concentrandosi sull'ottimizzazione dell'installazione dei misuratori Coriolis e sulla valutazione di eventuali soluzioni tecniche finalizzate a ridurre l'impatto negativo del flusso bifasico nella fase iniziale del processo produttivo.

Flusso a bolle

Bolle d'aria in sospensione continua e omogeneamente distribuite all'interno di un fluido

- Aria introdotta intenzionalmente in panna montata, burro, birra o shampoo
- Emulsioni che trattengono gas
- Aria in fluidi viscosi



Flusso a slug

Tratti di bolle intermittenti, normalmente causate da disturbi durante il processo

- Grosse porzioni di gas naturale
- Perdite nei dispositivi di aspirazione della pompa o guarnizioni difettose
- Gocce di grandi dimensioni in un flusso liquido all'interno dei serbatoi
- Condizioni di vaporizzazione e cavitazione del fluido



Applicazioni batch vuoto-pieno-vuoto

Precisione dell'interfaccia da liquido a gas

- Carico e scarico camion
- Clean-in-Place (CIP) o passaggio del fluido per liberare le linee di processo
- Dopo la sostituzione dell'attrezzatura, a linee aperte
- Smontaggio serbatoi

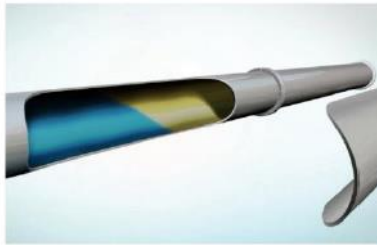


Figura 6.1.3 - Tipologie di flussi bifasici

6.2 Dimensionamento

Per effettuare una scelta ottimale del misuratore di portata massica più adatto, è stato realizzato uno studio dettagliato di dimensionamento, mirato a verificare la compatibilità dei dispositivi selezionati con le caratteristiche chimico-fisiche specifiche dei fluidi trattati, ovvero polioli e isocianati.

L'analisi è stata condotta tramite l'utilizzo dello strumento di dimensionamento fornito da Endress+Hauser, una piattaforma che permette di valutare con precisione l'affidabilità delle misurazioni di portata e densità, tenendo conto delle proprietà dei fluidi coinvolti e delle condizioni operative effettive del processo. Attraverso questo tool è stato possibile confermare se i misuratori scelti garantissero la necessaria accuratezza nelle condizioni operative previste.

Nella fase successiva, è stato individuato il diametro ottimale del misuratore considerando le specifiche portate di fluido trattate dai diversi reattori e la tipologia di carico adottata nel processo produttivo. Per realizzare un dimensionamento accurato, nel tool sono stati inseriti separatamente

i valori rappresentativi di densità e viscosità sia per polioli che per isocianati, effettuando quindi due simulazioni distinte. Sono state inoltre impostate le condizioni operative standard del processo, ovvero temperatura di 50°C e pressione di 6 bar. Infine, è stato selezionato il modello di misuratore Coriolis più idoneo in base ai risultati ottenuti, assicurando così una soluzione tecnica pienamente compatibile con le esigenze operative.

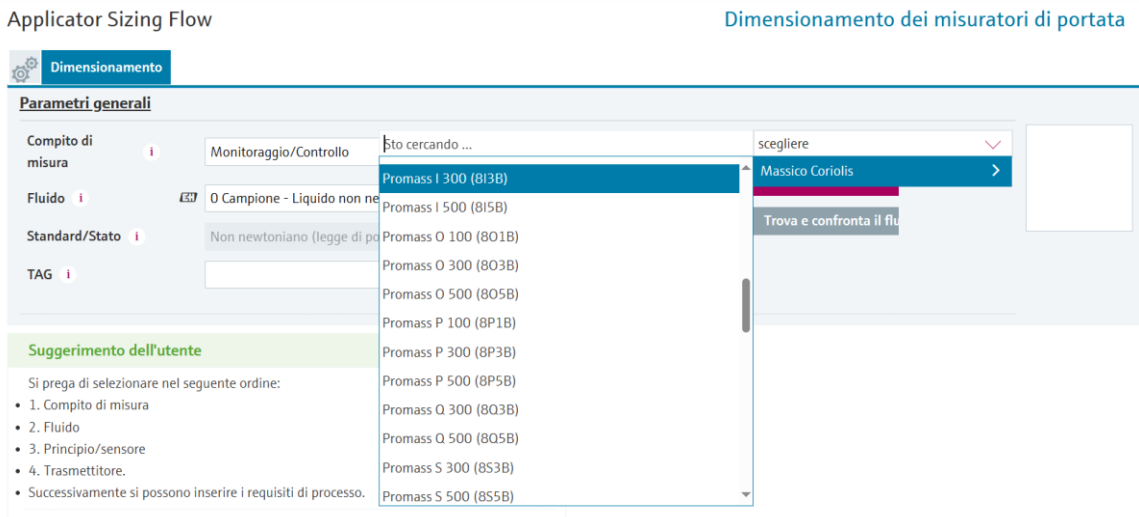


Figura 6.2.1 – Tool di dimensionamento E+H, inserimento dati

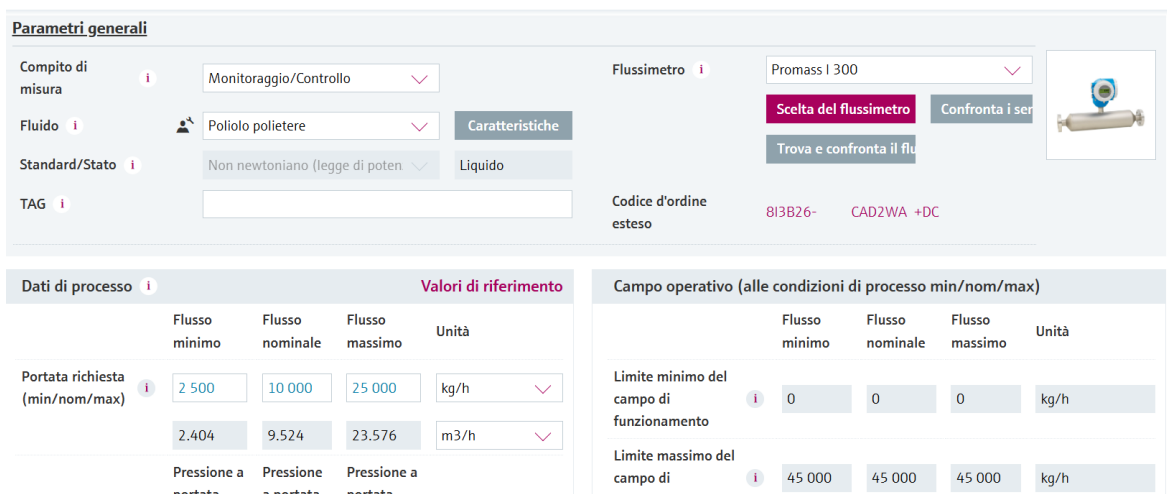


Figura 6.2.2 – Tool di dimensionamento E+H, inserimento parametri

Il dimensionamento del misuratore di portata massica è stato effettuato considerando attentamente quattro fattori principali:

- Il reattore di destinazione (RA4);
- La modalità di caricamento delle materie prime (carico rapido da tubo o carico lento tramite pompa);
- La tipologia dei fluidi coinvolti (isocianati e polioli);

- Il diametro delle tubazioni impiegate.

Per garantire una valutazione completa e accurata delle prestazioni, sono state analizzate portate comprese tra 1000 kg/h e 30000 kg/h, simulando così una vasta gamma di condizioni operative, incluse situazioni caratterizzate da portate sia molto basse che elevate.

Una volta identificati i dispositivi tecnicamente compatibili con le condizioni operative simulate, si è proceduto con un'analisi approfondita delle prestazioni, testando varie dimensioni del diametro nominale dei misuratori per ottimizzare i risultati e prevenire l'insorgere di errori e segnalazioni di avvertimento. Alcuni strumenti, nonostante fossero inizialmente considerati compatibili, si sono rivelati sovradimensionati o sottodimensionati rispetto ai range di portata necessari, generando così imprecisioni significative nella misura o perdite di carico inaccettabili.

In base ai risultati ottenuti dalle simulazioni e ai relativi avvisi generati dal sistema, è stato possibile selezionare il dispositivo con il diametro più adatto alle specifiche esigenze operative. Alcuni dispositivi, infatti, sono stati scartati proprio a causa di dimensionamenti non adeguati alle portate previste.

Tre parametri fondamentali hanno guidato la scelta finale del misuratore:

- Perdite di carico: il valore massimo accettabile è di 6 bar, ma l'obiettivo conservativo è stato di rimanere sotto i 4 bar per evitare criticità operative.
- Errore percentuale di misura: il limite massimo accettato è 1%, ma si è cercato di mantenere l'errore inferiore allo 0,4%, per garantire un'accuratezza elevata.
- Aderenza alla Standard List BASF:

L'analisi ha quindi confrontato i dispositivi Endress+Hauser con quelli presenti nella Standard List BASF, individuando la soluzione più idonea per garantire affidabilità, precisione e conformità alle normative di sicurezza dello stabilimento.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dai dimensionamenti dei misuratori di portata massica Promass Q300 e I300, applicati alle linee di dosaggio di isocianati e polioli:

C.Progetto n°	
Cliente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Poliolo polietere
Stato	Liquido
Caratteristiche	Emulsione
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Non newtoniano
Pressione atmosferica	1.0133 bar_a
Standard	DIN/UNI/ISO (circolare)

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	2 500	10 000	25 000	kg/h
	2.404	9.524	23.576	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	40	50	60	°C
Densità	1 039.8	1 050	1 060.4	kg/m3
Fattore di consistenza, K		1 000		cP^n
Indice della legge di potenza, n		0.8		
Viscosità	n.a.		n.a.	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	40		60	°C

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass I 300	Generazione: 3 /	
		Model: 1	
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis		
Codice ordine esteso	8I3B25-*****CAD2WA**+DC		
Diametro nominale	DN 25		
Materiale (Sensore)*	Titan, Grade 9		
Attacco al processo*	PN 40 EN 1092-1, Titanium, Grade 2 Flangia		
Portata minima	0	0	0 kg/h
Portata massima	18 000	18 000	18 000 kg/h
PED ** :	Nel rispetto delle condizioni di processo selezionate e medie, Applicator classifica questa applicazione come PED Art.4.3. Applicator suggerisce uno strumento senza opzione PED.		

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	2 500	10 000	25 000	kg/h
Velocità	1.047	4.147	10.27	m/s
Velocità del sensore	2.918	11.56	28.62	m/s
Perdita di pressione	379.57	2 193.07	9 000.98	mbar
Viscosità apparente	247.666	188.062	156.881	cP
Errore di misura della portata massica***	0.1	0.1	n.a.	%
Numero di Reynolds	211	1 102	3 269	
Profilo di portata	laminare (Re 1000)	laminare (Re 1000)	di transizione	

Avviso/i

1. Perdita di pressione superiore alla pressione massima. Aumentare la pressione massima, le dimensioni del contatore o scegliere un contatore diverso se non è disponibile una linea di dimensioni maggiori. 2. Portata max. richiesta troppo grande per il misuratore. Selezionare un flussimetro di

* L'utente è responsabile della selezione dei materiali a contatto con il

Figura 6.2.3 – Scheda risultati Promass I300 DN25 con passaggio di poliolo

Dimensionamento di Applicator - condensato (portata)

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Cliente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Poliolo polietere
Stato	Liquido
Caratteristiche	Emulsione
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Non newtoniano
Pressione atmosferica Standard	1.0133 bar_a DIN/UNI/ISO (circolare)

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	2 500	10 000	25 000	kg/h
	2.404	9.524	23.576	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	40	50	60	°C
Densità	1 039.8	1 050	1 060.4	kg/m3
Fattore di consistenza, K		1 000		cP^n
Indice della legge di potenza, n		0.8		
Viscosità	n.a.		n.a.	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	40		60	°C

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass I 300	Generazione: 3 / Model: 1		
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis			
Codice ordine esteso	8I3B50-*****CAD2WA**+DC			
Diametro nominale	DN 50			
Materiale (Sensore)*	Titan, Grade 9			
Attacco al processo*	PN 40 EN 1092-1, Titanium, Grade 2 Flangia			
Portata minima	0	0	0	kg/h
Portata massima	70 000	70 000	70 000	kg/h

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	2 500	10 000	25 000	kg/h
Velocità	0.286	1.134	2.807	m/s
Velocità del sensore	0.67	2.655	6.572	m/s
Perdita di pressione	41.49	154.31	513.73	mbar
Viscosità apparente	385.072	292.4	243.919	cP
Errore di misura della portata massica***	0.21	0.1	0.1	%
Numero di Reynolds	65	340	1 008	
Profilo di portata	laminare	laminare	laminare	

Figura 6.2.4 - Scheda risultati Promass I300 DN50 con passaggio di poliolo

Dimensionamento di Applicator - condensato (portata)

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Cliente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Poliolo polietere
Stato	Liquido
Caratteristiche	Emulsione
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Non newtoniano
Pressione atmosferica	1.0133 bar_a
Standard	DIN/UNI/ISO (circolare)

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
	0.952	4.762	9.524	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	50	50	50	°C
Densità	1 050	1 050	1 050	kg/m3
Fattore di consistenza, K		1 000		cP^n
Indice della legge di potenza, n		0.8		
Viscosità	n.a.		n.a.	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	50		50	°C

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass I 300	Generazione: 3 / Model: 1
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis	
Codice ordine esteso	8I3B80-*****CAD2WA**+DCLK	
Diametro nominale	DN 80	
Materiale (Sensore)*	Titan, Grade 9	
Attacco al processo*	PN 40 EN 1092-1, Titanium, Grade 2 Flangia	

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
Velocità	0.049	0.247	0.495	m/s
Velocità del sensore	0.112	0.559	1.118	m/s
Perdita di pressione	7.46	20.71	37.69	mbar
Viscosità apparente	600.765	435.423	379.057	cP
Errore di misura della portata massica***	1.35	0.27	0.13	%

Figura 6.2.5 - Scheda risultati Promass I300 DN80 con passaggio di poliolo

Dimensionamento di Applicator - condensato (portata)

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Cliente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Isocianato
Stato	Gas
Caratteristiche	Pulito
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Newtoniano
Temperatura di riferimento	0 °C
Pressione di riferimento	1.01325 bar_a
Pressione atmosferica Standard	1.0133 bar_a DIN/UNI/ISO (circolare)

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass I 300	Generazione: 3 /
		Model: 1
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis	
Codice ordine esteso	8I3B25-*****CAD2WA**+DE	
Diametro nominale	DN 25	
Materiale (Sensore)*	Titan, Grade 9	
Attacco al processo*	PN 40 EN 1092-1, Titanium, Grade 2 Flangia	
Portata minima	0 0 0	kg/h
Portata massima	1 124.17 1 100.09 1 077.77	kg/h
PED ** :	Nel rispetto delle condizioni di processo	

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
	89.58	466.99	971.39	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	40	50	60	°C
Densità	11.163	10.707	10.295	kg/m3
Fattore Z	0.9103	0.9197	0.9279	
Viscosità	0.0089	0.00915	0.0094	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	40		60	°C
Velocità sonora	244.5	249.4	254.2	m/s

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
Velocità	39.01	203.3	423	m/s
Velocità del sensore	108.7	566.8	1 179	m/s
Perdita di pressione	665.2	16 912.1	69 905.9	mbar
Errore di misura della portata massica***	0.5	n.a.	n.a.	%
Numero di Reynolds	2 328 722	1.E+7	2.E+7	

Avviso/i

1. Perdita di pressione superiore alla pressione nominale. Aumentare la

Figura 6.2.6 - Scheda risultati Promass I300 DN25 con passaggio di isocianato

Dimensionamento di Applicator - condensato (portata)

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Cliente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Isocianato
Stato	Gas
Caratteristiche	Pulito
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Newtoniano
Temperatura di riferimento	0 °C
Pressione di riferimento	1.01325 bar_a
Pressione atmosferica	1.0133 bar_a
Standard	DIN/UNI/ISO (circolare)

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
	89.58	466.99	971.39	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	40	50	60	°C
Densità	11.163	10.707	10.295	kg/m3
Fattore Z	0.9103	0.9197	0.9279	
Viscosità	0.0089	0.00915	0.0094	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	40		60	°C
Velocità sonora	244.5	249.4	254.2	m/s

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass I 300	Generazione: 3 / Model: 1		
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis			
Codice ordine esteso	8I3B50-*****CAD2WA**+DELK			
Diametro nominale	DN 50			
Materiale (Sensore)*	Titan, Grade 9			
Attacco al processo*	PN 40 EN 1092-1, Titanium, Grade 2 Flangia			
Portata minima	0	0	0	kg/h
Portata massima	4 895	4 790.14	4 692.97	kg/h
PED ** :	Misuratore classificato per Cat. II. Dispositivi			

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
Velocità	10.67	55.61	115.7	m/s
Velocità del sensore	24.97	130.2	270.8	m/s
Perdita di pressione	24.61	620.11	2 557.27	mbar
Errore di misura della portata massica***	0.53	n.a.	n.a.	%
Numero di Reynolds	1 115 982	5 426 220	1.E+7	

Avviso/i

1. Velocità superiore a 0.5 della velocità sonica del gas alla portata

Figura 6.2.7 - Scheda risultati Promass I300 DN50 con passaggio di isocianato

Dimensionamento di Applicator - condensato (portata)

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Ciente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Isocianato
Stato	Gas
Caratteristiche	Pulito
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Newtoniano
Temperatura di riferimento	0 °C
Pressione di riferimento	1.01325 bar_a
Pressione atmosferica Standard	1.0133 bar_a DIN/UNI/ISO (circolare)

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
	89.58	466.99	971.39	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	40	50	60	°C
Densità	11.163	10.707	10.295	kg/m3
Fattore Z	0.9103	0.9197	0.9279	
Viscosità	0.0089	0.00915	0.0094	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	40		60	°C
Velocità sonora	244.5	249.4	254.2	m/s

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass I 300	Generazione: 3 / Model: 1
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis	
Codice ordine esteso	8I3B80-*****CAD2WA**+DELK	
Diametro nominale	DN 80	
Materiale (Sensore)*	Titan, Grade 9	
Attacco al processo*	PN 40 EN 1092-1, Titanium, Grade 2 Flangia	
Portata minima	0 0 0	kg/h
Portata massima	11 628.13 11 379.02 11 148.19	kg/h
PED ** :	Misuratore classificato per Cat. II. Dispositivi in questa categoria richiedono certificazione CE	

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
Velocità	4.655	24.27	50.48	m/s
Velocità del sensore	10.51	54.8	114	m/s
Perdita di pressione	3.6	90.34	371.91	mbar
Errore di misura della portata massica***	1.35	0.5	0.5	%
Numero di Reynolds	724 067	3 520 619	6 852 282	

Avviso/i

Figura 6.2.8 - Scheda risultati Promass I300 DN80 con passaggio di isocianato

Dimensionamento di Applicator - condensato (portata)

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Cliente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Poliolo polietere
Stato	Liquido
Caratteristiche	Emulsione
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Non newtoniano
Pressione atmosferica Standard	1.0133 bar_a DIN/UNI/ISO (circolare)

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
	0.952	4.762	9.524	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	50	50	50	°C
Densità	1 050	1 050	1 050	kg/m3
Fattore di consistenza, K		1 000		cP^n
Indice della legge di potenza, n		0.8		
Viscosità	n.a.		n.a.	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	50		50	°C

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass Q 300	Generazione: 3 /
		Model: 1
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis	
Codice ordine esteso	8Q3B25-*****SAD6SA**+DC	
Diametro nominale	DN 25	
Materiale (Sensore)*	acciaio inox 1.4404/316L, temp. est.	
Attacco al processo*	PN 40 EN 1092-1 D, 1.4404/316L Flangia con solcatura	
Portata minima	n	kg/h

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
Velocità	0.539	2.695	5.389	m/s
Velocità del sensore	0.729	3.645	7.29	m/s
Perdita di pressione	162.23	857	1 956.33	mbar
Viscosità apparente	319.355	231.462	201.499	cP
Errore di misura della portata massica***	0.1	0.1	0.1	%
Numero di Reynolds	36	251	577	

Figura 6.2.9 - Scheda risultati Promass Q300 DN25 con passaggio di poliolo

Dimensionamento di Applicator - condensato (portata)

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Cliente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Poliolo polietere
Stato	Liquido
Caratteristiche	Emulsione
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Non newtoniano
Pressione atmosferica Standard	1.0133 bar_a DIN/UNI/ISO (circolare)

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
	0.952	4.762	9.524	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	50	50	50	°C
Densità	1 050	1 050	1 050	kg/m3
Fattore di consistenza, K		1 000		cP^n
Indice della legge di potenza, n		0.8		
Viscosità	n.a.		n.a.	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	50		50	°C

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass Q 300	Generazione: 3 / Model: 1
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis	
Codice ordine esteso	8Q3B50-*****SAD6SA**+DC	
Diametro nominale	DN 50	
Materiale (Sensore)*	acciaio inox 1.4404/316L, temp. est.	
Attacco al processo*	PN 40 EN 1092-1 D, 1.4404/316L Flangia con solcatura	
Portata minima	0	0
	0	0
		kg/h

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
Velocità	0.135	0.674	1.347	m/s
Velocità del sensore	0.215	1.074	2.148	m/s
Perdita di pressione	43.51	182.8	383.28	mbar
Viscosità apparente	460.747	333.94	290.712	cP
Errore di misura della portata massica***	0.13	0.1	0.1	%
Numero di Reynolds	14	95	217	
Profilo di portata	laminare	laminare	laminare	

Figura 6.2.10 - Scheda risultati Promass Q300 DN50 con passaggio di poliolo

Dimensionamento di Applicator - condensato (portata)

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Cliente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Poliolo polietere
Stato	Liquido
Caratteristiche	Emulsione
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Non newtoniano
Pressione atmosferica	1.0133 bar_a
Standard	DIN/UNI/ISO (circolare)

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
	0.952	4.762	9.524	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	50	50	50	°C
Densità	1 050	1 050	1 050	kg/m3
Fattore di consistenza, K		1 000		cP^n
Indice della legge di potenza, n		0.8		
Viscosità	n.a.		n.a.	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	50		50	°C

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass Q 300	Generazione: 3 /
		Model: 1
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis	
Codice ordine esteso	8Q3B80-*****SAD6SA**+DCLK	
Diametro nominale	DN 80	
Materiale (Sensore)*	acciaio inox 1.4404/316L, temp. est.	
Attacco al processo*	PN 40 EN 1092-1 D, 1.4404/316L Flangia con solcatura	
Portata minima	0	0
	0	0
		kg/h

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
Velocità	0.053	0.263	0.526	m/s
Velocità del sensore	0.091	0.453	0.907	m/s
Perdita di pressione	10.89	41.86	87.72	mbar
Viscosità apparente	596.834	432.573	376.577	cP
Errore di misura della portata massica***	0.44	0.1	0.1	%
Numero di Reynolds	7	47	109	
Profilo di portata	laminare	laminare	laminare	

Figura 6.2.11 - Scheda risultati Promass Q300 DN80 con passaggio di poliolo

Dimensionamento di Applicator - condensato (portata)

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Cliente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Poliolo polietere
Stato	Liquido
Caratteristiche	Emulsione
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Non newtoniano
Pressione atmosferica	1.0133 bar_a
Standard	DIN/UNI/ISO (circolare)

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
	0.952	4.762	9.524	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	50	50	50	°C
Densità	1 050	1 050	1 050	kg/m3
Fattore di consistenza, K		1 000		cP^n
Indice della legge di potenza, n		0.8		
Viscosità	n.a.		n.a.	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	50		50	°C

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass Q 300	Generazione: 3 / Model: 1		
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis			
Codice ordine esteso	8Q3B1H-*****SAD5SA**+DC			
Diametro nominale	DN 100			
Materiale (Sensore)*	acciaio inox 1.4404/316L, temp. est.			
Attacco al processo*	PN 16 EN 1092-1 D, 1.4404/316L Flangia con solcatura			
Portata minima	0	0	0	kg/h

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
Velocità	0.034	0.168	0.337	m/s
Velocità del sensore	0.035	0.177	0.355	m/s
Perdita di pressione	3.61	13.3	23.64	mbar
Viscosità apparente	790.859	573.198	498.998	cP
Errore di misura della portata massica***	1.15	0.23	0.12	%
Numero di Reynolds	3	22	51	
Profilo di portata	laminare	laminare	laminare	

Figura 6.2.12- Scheda risultati Promass Q300 DN100 con passaggio di poliolo

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Ciente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	

Parametri generali

Fluido	Isocianato
Stato	Gas
Caratteristiche	Pulito
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Newtoniano
Temperatura di riferimento	0 °C
Pressione di riferimento	1.01325 bar_a
Pressione atmosferica Standard	1.0133 bar_a DIN/UNI/ISO (circolare)

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass Q 300	Generazione: 3 / Model: 1		
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis			
Codice ordine esteso	8Q3B25-*****SAD6SA**+DE			
Diametro nominale	DN 25			
Materiale (Sensore)*	acciaio inox 1.4404/316L, temp. est.			
Attacco al processo*	PN 40 EN 1092-1 D, 1.4404/316L Flangia con solcatura			
Portata minima	0	0	0	kg/h
Portata massima	1 744.53	1 744.53	1 744.53	kg/h



Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
	93.398	466.99	933.98	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	50	50	50	°C
Densità	10.707	10.707	10.707	kg/m3
Fattore Z	0.9197	0.9197	0.9197	
Viscosità	0.00915	0.00915	0.00915	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	50		50	°C
Velocità sonora	249.4	249.4	249.4	m/s

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
Velocità	52.85	264.3	528.5	m/s
Velocità del sensore	71.49	357.4	714.9	m/s
Perdita di pressione	172.69	3 730.51	14 245.8	mbar
Errore di misura della portata massica**	0.25	n.a.	n.a.	%
Numero di Reynolds	1 271 592	6 357 960	1.E+7	

Avvisoi

1. Perdita di pressione superiore alla pressione massima. Aumentare la

Figura 6.2.13 - Scheda risultati Promass Q300 DN25 con passaggio di isocianato

Dimensionamento di Applicator - condensato (portata)

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Cliente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Isocianato
Stato	Gas
Caratteristiche	Pulito
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Newtoniano
Temperatura di riferimento	0 °C
Pressione di riferimento	1.01325 bar_a
Pressione atmosferica Standard	1.0133 bar_a DIN/UNI/ISO (circolare)

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
	93.398	466.99	933.98	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	50	50	50	°C
Densità	10.707	10.707	10.707	kg/m3
Fattore Z	0.9197	0.9197	0.9197	
Viscosità	0.00915	0.00915	0.00915	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	50		50	°C
Velocità sonora	249.4	249.4	249.4	m/s

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass Q 300	Generazione: 3 / Model: 1
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis	
Codice ordine esteso	8Q3B50-*****SAD6SA**+DELK	
Diametro nominale	DN 50	
Materiale (Sensore)*	acciaio inox 1.4404/316L, temp. est.	
Attacco al processo*	PN 40 EN 1092-1 D, 1.4404/316L Flangia con solcatura	
Portata minima	0	0 kg/h
Portata massima	5 919.79	5 919.79 kg/h

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
Velocità	13.21	66.07	132.1	m/s
Velocità del sensore	21.07	105.3	210.7	m/s
Perdita di pressione	21.27	455.06	1 732.7	mbar
Errore di misura della portata massica***	0.25	0.25	n.a.	%
Numero di Reynolds	690 293	3 451 464	6 902 928	

Avviso/i

Figura 6.2.14 - Scheda risultati Promass Q300 DN50 con passaggio di isocianato

Dimensionamento di Applicator - condensato (portata)

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Cliente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Isocianato
Stato	Gas
Caratteristiche	Pulito
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Newtoniano
Temperatura di riferimento	0 °C
Pressione di riferimento	1.01325 bar_a
Pressione atmosferica	1.0133 bar_a
Standard	DIN/UNI/ISO (circolare)

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
	93.398	466.99	933.98	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	50	50	50	°C
Densità	10.707	10.707	10.707	kg/m3
Fattore Z	0.9197	0.9197	0.9197	
Viscosità	0.00915	0.00915	0.00915	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	50		50	°C
Velocità sonora	249.4	249.4	249.4	m/s

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass Q 300	Generazione: 3 / Model: 1
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis	
Codice ordine esteso	8Q3B80-*****SAD6SA**+DELK	
Diametro nominale	DN 80	
Materiale (Sensore)*	acciaio inox 1.4404/316L, temp. est.	
Attacco al processo*	PN 40 EN 1092-1 D, 1.4404/316L Flangia con solcatura	
Portata minima	0	0 kg/h
Portata massima	14 026.35	14 026.35 kg/h

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
Velocità	5.161	25.81	51.61	m/s
Velocità del sensore	8.891	44.46	88.91	m/s
Perdita di pressione	2.57	53.52	202.25	mbar
Errore di misura della portata massica***	0.44	0.25	0.25	%
Numero di Reynolds	448 450	2 242 250	4 484 500	

Avviso/i

Figura 6.2.15 - Scheda risultati Promass Q300 DN80 con passaggio di isocianato

Dimensionamento di Applicator - condensato (portata)

Progetto

Progetto	
C.Progetto n°	
Cliente:	
Tag	---
Data/Ora	---
numero review	---
Numero d'ordine di vendita	
Contattare utente	
e-mail:	
Telefono	
Fax	



Parametri generali

Fluido	Isocianato
Stato	Gas
Caratteristiche	Pulito
Abrasività	Non abrasivo
Gruppo fluidi	Fluido pericoloso (Fluido di gruppo 1)
Tipo di fluido	Newtoniano
Temperatura di riferimento	0 °C
Pressione di riferimento	1.01325 bar_a
Pressione atmosferica Standard	1.0133 bar_a DIN/UNI/ISO (circolare)

Condizioni operative

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
	93.398	466.99	933.98	m3/h
Pressione	6	6	6	bar_a
Temperatura	50	50	50	°C
Densità	10.707	10.707	10.707	kg/m3
Fattore Z	0.9197	0.9197	0.9197	
Viscosità	0.00915	0.00915	0.00915	cP
Pressione di progetto (min/max)	6		6	bar_a
Temperatura (min/max)	50		50	°C
Velocità sonora	249.4	249.4	249.4	m/s

Misuratore di portata

Misuratore di portata	Promass Q 300	Generazione: 3 / Model: 1		
Principio di Misura della Portata	Massico Coriolis			
Codice ordine esteso	8Q3B1H-*****SAD5SA**+DELK			
Diametro nominale	DN 100			
Materiale (Sensore)*	acciaio inox 1.4404/316L, temp. est.			
Attacco al processo*	PN 16 EN 1092-1 D, 1.4404/316L Flangia con solcatura			
Portata minima	0	0	0	kg/h
Portata massima	35 844.99	35 844.99	35 844.99	kg/h

Risultati di calcolo e dimensionamento

	minimo	nominale	massimo	
Portata richiesta	1 000	5 000	10 000	kg/h
Velocità	3.303	16.52	33.03	m/s
Velocità del sensore	3.479	17.4	34.79	m/s
Perdita di pressione	0.44	8.73	32.18	mbar
Errore di misura della portata massica***	1.15	0.25	0.25	%
Numero di Reynolds	280 525	1 402 627	2 805 254	

Avviso/i

Figura 6.2.16 - Scheda risultati Promass Q300 DN100 con passaggio di isocianato

Nell'analisi comparativa tra le diverse categorie di misuratori di portata massica Promass di Endress+Hauser, sono stati considerati esclusivamente i modelli I300 e Q300, senza distinguere tra carico da tubo o da pompa. Il confronto è stato condotto valutando l'errore percentuale sulla portata massica e le perdite di carico (ΔP), al fine di individuare la soluzione più adatta alle condizioni operative del reattore RA3.

Dai risultati ottenuti, si conferma che Promass I300 e Q300 offrono prestazioni ottimali in termini di accuratezza di misura e contenimento delle perdite di carico, rispettando i limiti imposti dallo stabilimento. Al contrario, altre categorie di Promass sono state escluse per motivi specifici:

- Promass A: inadatto per via delle dimensioni troppo ridotte

- Promass E: errore percentuale superiore all'1%, oltre il limite accettabile.
- Promass H: oltre ad avere un errore elevato, le perdite di carico superano il valore limite di 6 bar.
- Promass O e X: progettati per diametri molto grandi (DN300), incompatibili con le linee esistenti.
- Promass P e S: non soddisfano contemporaneamente entrambi i criteri di errore di misura e ΔP sotto i limiti.

Durante l'analisi dei risultati, per alcune configurazioni è stato riportato il valore "n.a." (not applicable), il quale indica che il misuratore non può operare correttamente in quelle condizioni di esercizio. Questo può essere dovuto a diversi fattori:

- Il diametro nominale selezionato non è compatibile con la portata richiesta, generando velocità del fluido troppo elevate o troppo basse, fuori dai range operativi del dispositivo.
- Perdite di carico eccessive che superano il limite imposto di 6 bar, rendendo il misuratore impraticabile per l'applicazione.
- Il sensore non è progettato per gestire flussi bifasici, il che lo rende inadeguato in presenza di bolle d'aria o sacche di gas, che potrebbero falsare la misura.
- Instabilità della misura in determinate condizioni operative, con errori percentuali superiori ai limiti imposti dallo stabilimento.

REATTORE RA4	PROMASS I300								PROMASS Q300							
	DN25		DN50		DN80		DN100		DN25		DN50		DN80		DN100	
	Errore (%)	ΔP (bar)	Errore (%)	ΔP (bar)	Errore (%)	ΔP (bar)	Errore (%)	ΔP (bar)	Errore (%)	ΔP (bar)	Errore (%)	ΔP (bar)	Errore (%)	ΔP (bar)	Errore (%)	ΔP (bar)
POLIOLI	0,1	0,8	0,1	0,15	0,27	0,4	n.a.	n.a.	0,1	0,8	0,1	0,18	0,1	0,08	0,23	0,01
ISOCIANATI	n.a.	16	n.a.	0,6	0,5	0,09	n.a.	n.a.	n.a.	3,7	0,25	0,4	0,25	0,05	0,25	0,008

Figura 6.2.17 – Risultati dimensionamento dei misuratori di portata

Un estratto di questi dati è riportato in **Figura 6.2.17**, dove vengono messe in evidenza le combinazioni che rispettano i criteri di selezione e quelle che, invece, presentano limitazioni tali da renderle inadatte all'applicazione.

Dall'analisi dei risultati emerge che i misuratori Promass Q300 rappresentano la scelta più efficace per tutte le linee di alimentazione di un determinato reattore. Questa soluzione offre un

duplice vantaggio: da un lato, garantisce il rispetto dei limiti operativi, con un errore percentuale di misura ridotto e perdite di carico (ΔP) contenute rispetto ad altre categorie di misuratori; dall'altro, permette una misurazione accurata anche in presenza di flussi bifasici, evitando le imprecisioni che potrebbero compromettere il controllo del processo.

6.3 Installazione

Per garantire un'installazione ottimale del misuratore di portata massica e preservarne nel tempo la massima accuratezza, è fondamentale valutare con attenzione il posizionamento dello strumento e le eventuali modifiche necessarie all'impianto. Secondo le indicazioni contenute nel manuale tecnico del dispositivo, non sono richieste misure particolari come supporti speciali o sezioni rettilinee prima e dopo il sensore, grazie alla sua struttura interna che permette di assorbire le forze esterne. Tuttavia, per evitare imprecisioni nella misura causate dalla presenza di bolle d'aria, è necessario non posizionare il misuratore nel punto più alto delle tubazioni né immediatamente prima di un tubo con scarico libero. In caso di installazione su tubazioni verticali aperte, l'utilizzo di una restrizione del diametro o di un orifizio di sezione ridotta permette di prevenire condizioni di funzionamento a vuoto del sensore, garantendo così un flusso stabile e affidabile.

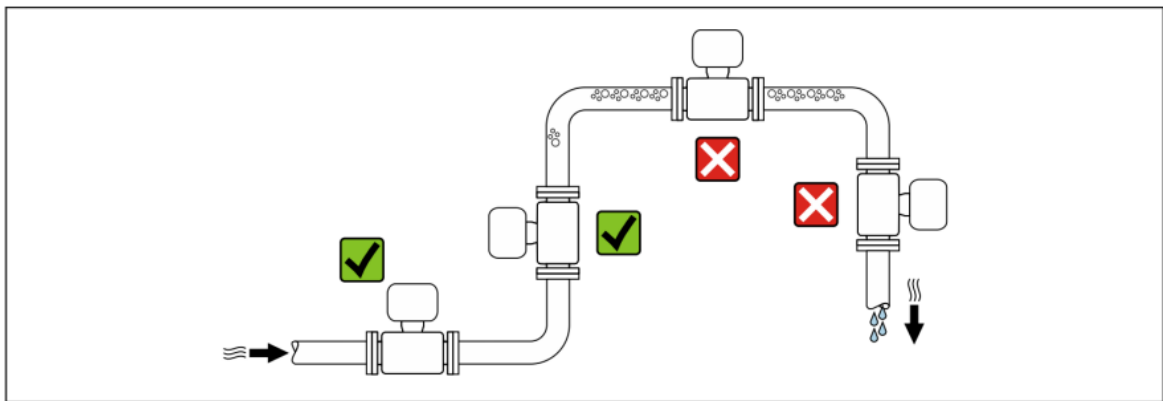


Figura 6.3.1 - Installazioni possibili per un massico di Coriolis ^[1]

L'orientamento del sensore è un altro aspetto cruciale: la direzione del fluido deve seguire la freccia indicata sulla targhetta per assicurare il corretto auto-drenaggio. Inoltre, in applicazioni con basse temperature di processo, l'installazione in posizione verticale aiuta a mantenere la temperatura ambiente entro i limiti di tolleranza del trasmettitore. Al contrario, in condizioni di alte temperature, è preferibile un orientamento che impedisca il surriscaldamento del sensore. Se il dispositivo presenta un tubo di misura curvo ed è montato orizzontalmente, è necessario adattarne la posizione alle proprietà del fluido, evitando accumuli di gas o depositi solidi, che potrebbero compromettere la precisione della misura.

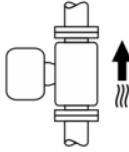
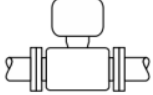
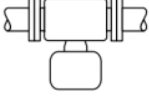

Orientamento			Raccomandazione
A	Orientamento verticale	 A0015591	☑☑ ¹⁾
B	Orientamento orizzontale, trasmettitore in alto	 A0015589	☑☑ ²⁾ Eccezioni: → 📄 22, 📄 55
C	Orientamento orizzontale, trasmettitore in basso	 A0015590	☑☑ ³⁾ Eccezioni: → 📄 22, 📄 55
D	Orientamento orizzontale, trasmettitore laterale	 A0015592	☒

Figura 6.3.2 - Orientamenti ipotetici per un massico di Coriolis^[11]

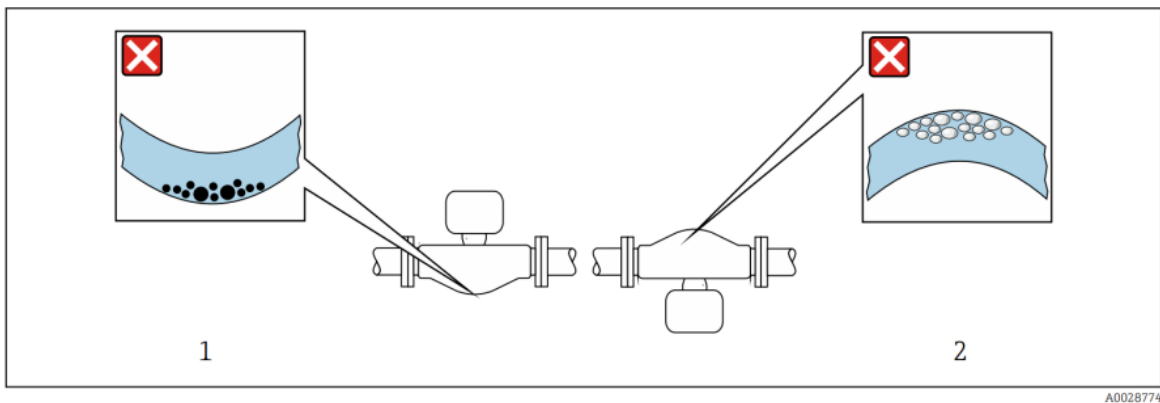


Figura 6.3.3 - Errate installazioni per un massico di Coriolis^[11]

Un ulteriore vantaggio della posizione verticale è la possibilità di svuotare completamente il tubo di misura, riducendo il rischio di incrostazioni e depositi che si formano per l'esposizione all'umidità durante i periodi di fermo impianto. Infine, il dispositivo è già tarato in fabbrica e non necessita di regolazioni in campo, a meno di condizioni operative particolarmente critiche, come fluidi molto viscosi o temperature estreme, dove un azzeramento mirato può migliorare l'accuratezza della misura.

6.3.1 Risoluzione problematiche con flusso bifasico

Per garantire un'accurata misurazione della portata massica, la calibrazione iniziale del misuratore rappresenta un passaggio cruciale. Durante la fase di avvio, viene eseguita una regolazione dello zero, rilevando il valore di riferimento con fluido fermo. Questo procedimento permette di correggere

eventuali deviazioni strumentali, stabilendo così una base affidabile per il monitoraggio continuo. Inoltre, un controllo periodico dello zero, idealmente mensile, consente di rilevare eventuali incrostazioni o fenomeni corrosivi all'interno del tubo di misura. La variazione della frequenza di vibrazione del sensore è infatti indicativa dello stato del dispositivo: una diminuzione di frequenza può segnalare l'accumulo di depositi, mentre un aumento può indicare fenomeni erosivi con conseguente perdita di materiale.

Per ridurre l'accumulo di residui nel misuratore, è utile mantenere sempre pieno il tubo del sensore. Tuttavia, questa strategia presenta alcune criticità nel contesto produttivo batch, poiché l'uso di diverse materie prime in sequenza potrebbe causare contaminazioni incrociate, compromettendo così la qualità del prodotto finale. Per superare questa problematica, è consigliabile implementare un sistema di bypass dedicato ai reagenti di Categoria 1 (CAT1), consentendo così di mantenere il misuratore pieno tra produzioni simili e prevenire contaminazioni indesiderate. Al contrario, nel caso di introduzione di una nuova ricetta con sostanze di Categoria 2 (CAT2), sarà necessario svuotare completamente il misuratore prima del nuovo caricamento. Per gestire al meglio questa operazione, è possibile integrare un sensore di livello che segnali quando effettuare lo svuotamento.

Un'ulteriore criticità nella misurazione della portata massica riguarda la presenza di flussi bifasici, frequente nello stabilimento BASF di Villanova d'Asti a causa della natura batch dei processi produttivi, dove è comune l'alternanza di fasi liquide e gassose. Durante il caricamento, residui di polioli e isocianati possono infatti rimanere nelle tubazioni, creando sacche di gas che interferiscono con la misurazione al riavvio del flusso. Questo fenomeno è accentuato dalla configurazione impiantistica caratterizzata da tubazioni alte e ramificate, che facilitano l'accumulo di aria nelle parti superiori e il conseguente ritorno di liquido quando la pompa viene arrestata.

In questo contesto, il design a forma di "U" del tubo di misura del Promass Q300 permette una migliore distinzione tra fase liquida e fase gassosa, garantendo così una misurazione precisa e affidabile della portata massica effettiva, anche in presenza di flussi bifasici.

7 Adeguamento degli interblocchi di sicurezza

Dopo aver selezionato il misuratore di portata massica più adatto alle esigenze operative, ovvero il modello Promass Q300 di Endress+Hauser, particolarmente efficace nell'eliminare errori causati da flussi bifasici, è fondamentale assicurarsi che il sistema di sicurezza strumentato rispetti pienamente la recente linea guida G-R-PRS-006. In questo contesto, la corretta gestione degli interblocchi di sicurezza di Classe D rappresenta una fase cruciale per integrare efficacemente il nuovo dispositivo e garantire la conformità agli elevati standard di sicurezza funzionale.

7.1 Differenze tra blocchi D e SIL1

L'adeguamento degli interblocchi di Classe D è indispensabile poiché, secondo la nuova procedura, devono soddisfare requisiti più rigorosi di indipendenza operativa e affidabilità. A tal proposito, sono state identificate due possibili strategie di implementazione:

1. **Indipendenza dei blocchi di sicurezza rispetto al controllo di processo:** Attualmente, alcuni interblocchi di Classe D sono integrati nel sistema di controllo distribuito (DCS), con il rischio che eventuali guasti del sistema compromettano la sicurezza operativa. Per garantire la necessaria indipendenza, è possibile separare il blocco di sicurezza dal DCS tramite un'interfaccia dedicata che riceva direttamente il segnale dal misuratore Promass Q300. In questo modo, il blocco può intervenire autonomamente in presenza di condizioni anomale, migliorando significativamente la robustezza e l'affidabilità del sistema.
2. **Passaggio da blocco di Classe D a SIL1:** In alternativa, una soluzione più strutturata prevede l'upgrade degli interblocchi di Classe D a livello SIL1. Questa opzione comporta l'implementazione di un PLC di sicurezza dedicato, che garantisce una gestione degli interblocchi più affidabile, con una minore probabilità di guasti e una risposta più rapida ed efficace in caso di emergenza. Il livello SIL1 offre un maggiore fattore di riduzione del rischio (Risk Reduction Factor, RRF), aumentando ulteriormente la sicurezza complessiva dell'impianto e assicurando una piena conformità ai requisiti più avanzati della normativa.

L'adozione di una di queste due soluzioni è indispensabile per sfruttare appieno le capacità del Promass Q300, garantendo così una misurazione precisa e affidabile della portata anche in presenza di flussi bifasici. Senza una revisione e un adeguamento degli interblocchi di Classe D, infatti, l'integrazione del nuovo strumento non sarebbe sufficiente a garantire un livello di

sicurezza funzionale adeguato secondo le nuove direttive BASF. La scelta tra le due opzioni dovrà tenere conto di diversi aspetti, come i costi di implementazione, l'impatto sulle operazioni correnti dell'impianto e il livello di protezione richiesto dalle specifiche condizioni del processo.

7.1.1 Blocco sulla temperatura di avvio dei reattori (Tstart)

L'obiettivo principale è garantire la completa separazione della funzione di sicurezza rispetto alle logiche di controllo di processo, assicurando così la piena conformità alle nuove normative definite dalla procedura G-R-PRS-006 e superando le criticità individuate nella Gap Analysis precedentemente condotta.

Soluzione 1 – Adeguamento come blocco D:

Per raggiungere tale indipendenza operativa, si propone di utilizzare il segnale della sonda di temperatura già installata (TT44B), dividendolo in due segnali distinti. Uno di questi segnali continua ad alimentare il sistema di controllo Sipart esistente, mentre l'altro viene inviato a un PLC separato e dedicato esclusivamente alla gestione della sicurezza. Come illustrato in Figura, questo PLC indipendente implementa direttamente il blocco di sicurezza di Classe D mediante l'utilizzo di valvole solenoidi separate, garantendo così che la funzione di sicurezza sia completamente isolata dalle logiche di processo.

Questa soluzione offre un adeguamento efficace, evitando modifiche invasive all'architettura attuale e assicurando allo stesso tempo che le funzioni di sicurezza siano gestite in maniera autonoma e conforme alle richieste della nuova normativa BASF.

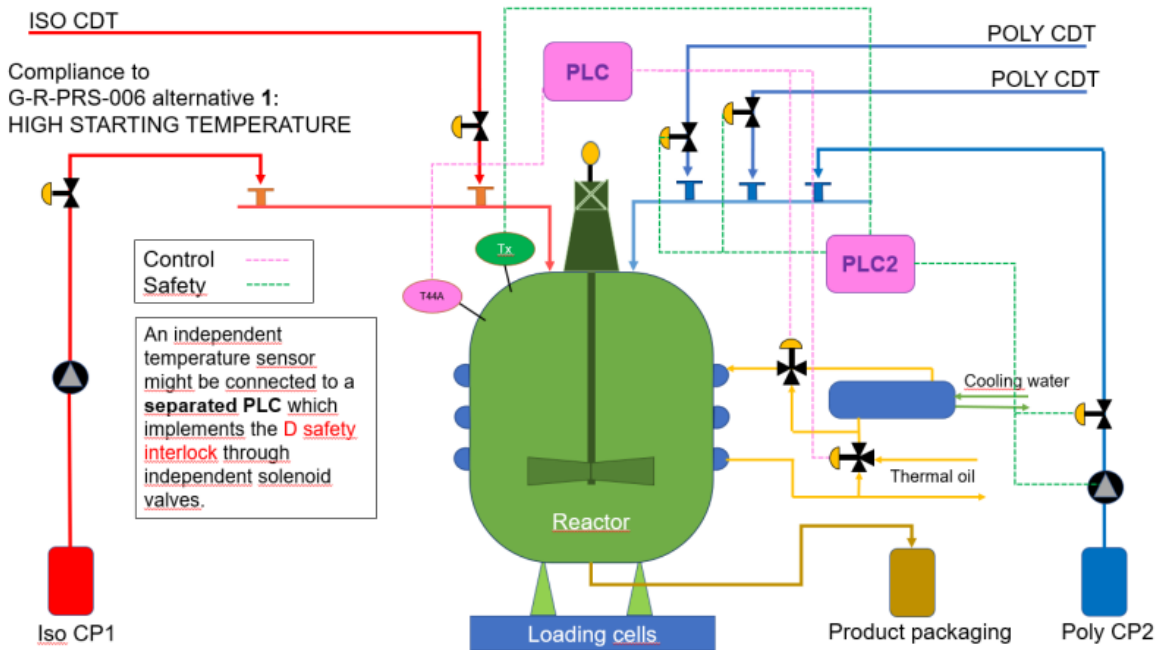


Figura 7.1.1 - Soluzione 1 blocco di temperatura

Soluzione 2 – Upgrade del blocco D a SIL1:

Per implementare questa soluzione più strutturata, il trasmettitore di temperatura TT44B viene collegato direttamente a un PLC di sicurezza dedicato (SPLC HIMA). Questo PLC gestisce la sicurezza operativa mediante elettrovalvole di sicurezza SIL indipendenti, che agiscono come dispositivi di intercettazione taglia-aria, garantendo un intervento rapido ed efficace in caso di situazioni di emergenza.

I trasmettitori di temperatura impiegati, forniti da Endress+Hauser (E+H), sono inclusi nella Standard List di BASF (SDL), e risultano pertanto pienamente idonei per essere utilizzati in sistemi strumentati di sicurezza (SIS). Questo garantisce la conformità agli standard aziendali e la massima affidabilità del sistema.

Questa soluzione assicura un elevato livello di protezione funzionale (SIL1), migliorando significativamente l'affidabilità e la robustezza della sicurezza dell'intero impianto, in accordo con i più recenti standard di sicurezza definiti da BASF.

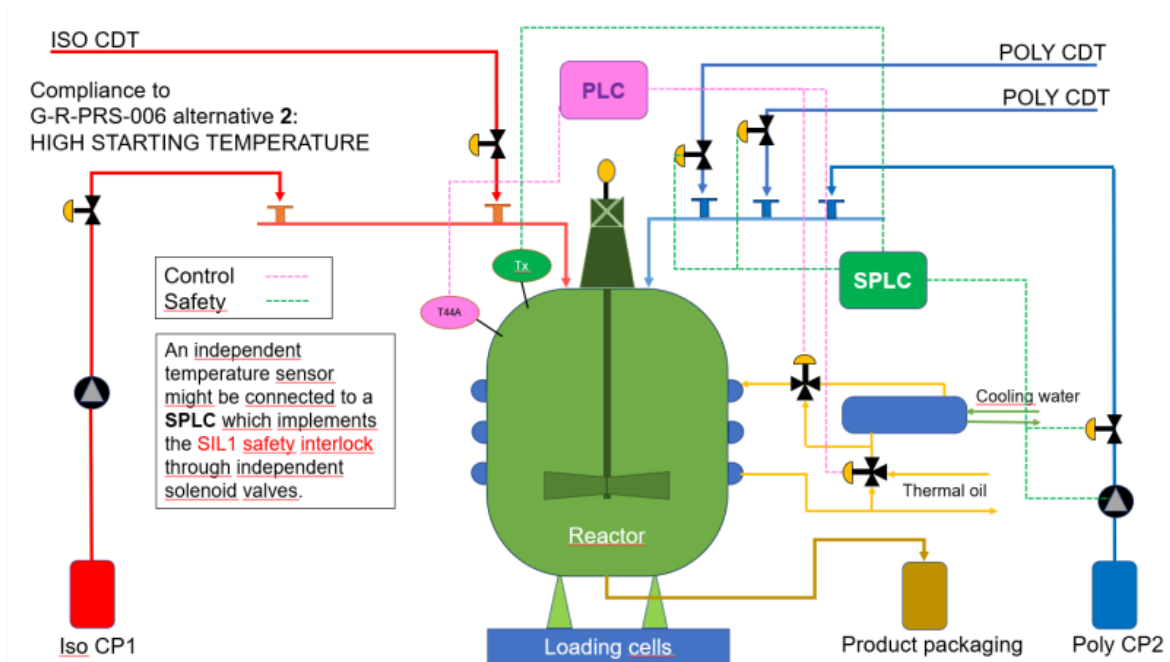


Figura 7.1.2 - Soluzione 2 blocco di temperatura

7.1.2 Blocco del sensore di giri dell'agitatore

Per garantire la sicurezza operativa in conformità alla procedura G-R-PRS-006 e risolvere le criticità identificate durante la Gap Analysis, sono state valutate due possibili soluzioni relative all'interblocco basato sul sensore di velocità dell'agitatore.

Soluzione 1 – Adeguamento come blocco di Classe D:

In questa soluzione, il sensore di prossimità (prossimetro) attualmente installato sull'agitatore viene collegato direttamente a un PLC dedicato e separato da quello utilizzato per il controllo del reattore. Questo PLC indipendente effettua autonomamente il calcolo della velocità di rotazione dell'agitatore (rpm). Nel caso vengano rilevate anomalie o deviazioni rispetto ai parametri operativi prestabiliti, il PLC interrompe automaticamente la sequenza di processo attraverso elettrovalvole indipendenti, garantendo così l'efficacia e l'indipendenza della funzione di sicurezza.

Tuttavia, il sensore di prossimità in uso non è presente nella Standard List di BASF (SDL), pertanto è necessario effettuare una verifica specifica della probabilità media di guasto su richiesta (PFDavg). Questa verifica permette di confermare l'adeguata affidabilità del sensore e assicurarne la conformità agli standard di sicurezza richiesti per il suo impiego in un Sistema Strumentato di Sicurezza (SIS).

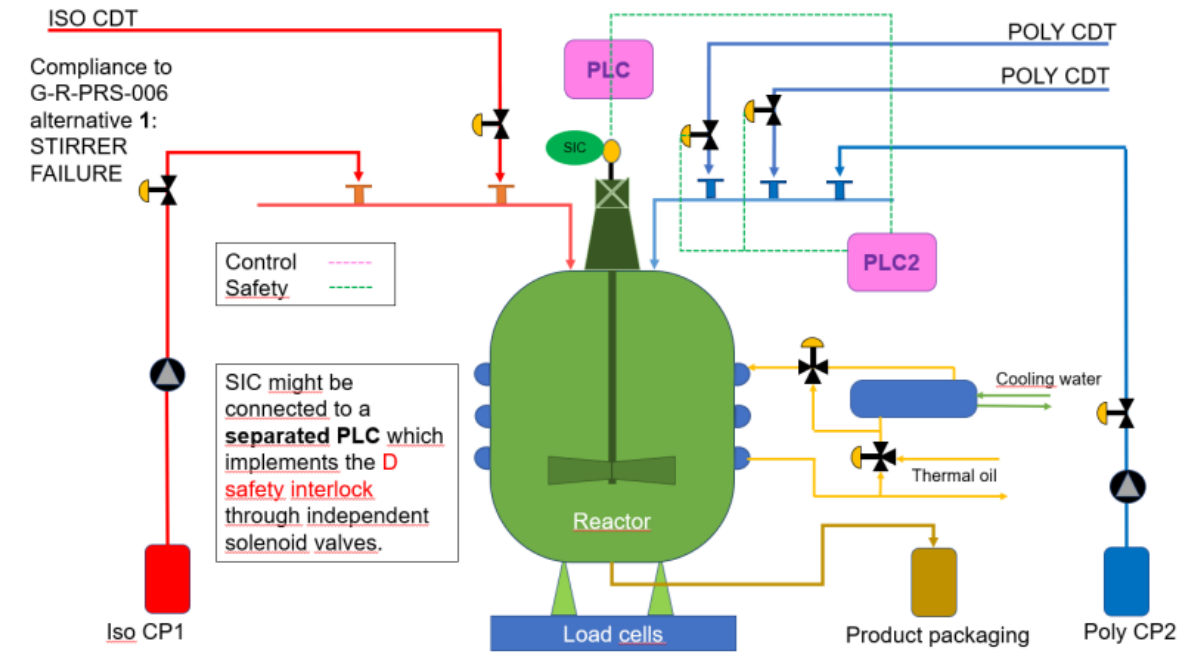


Figura 7.1.3 - Soluzione 1 blocco del sensore di giri

La seconda soluzione proposta per garantire il rispetto dei requisiti di sicurezza funzionale definiti dalla procedura G-R-PRS-006 consiste nell'upgrade dell'interblocco esistente dalla Classe D al livello SIL1. Questa soluzione implica la sostituzione dell'attuale sensore di velocità di rotazione dell'agitatore con un sensore certificato SIL presente nella Standard List di BASF (SDL). Nello specifico, viene utilizzato il modello P+F KFD DWB-1. D, caratterizzato da elevata affidabilità e conformità agli standard richiesti per applicazioni di sicurezza.

Il nuovo sensore certificato viene quindi collegato direttamente a un PLC di sicurezza dedicato (SPLC HIMA), che gestisce autonomamente il blocco SIL1. Questa configurazione garantisce una completa indipendenza del sistema di sicurezza rispetto alle logiche di controllo del processo, assicurando una risposta immediata e affidabile in presenza di anomalie operative.

La presenza di elettrovalvole SIL taglia-aria indipendenti permette di intervenire rapidamente in caso di malfunzionamento dell'agitatore, interrompendo automaticamente il dosaggio delle materie prime e mettendo l'impianto in condizioni di sicurezza.

L'implementazione del sensore P+F KFD DWB-1. D e del sistema SPLC dedicato (HIMA) rappresenta un significativo upgrade tecnologico, migliorando l'affidabilità e la sicurezza complessiva del reattore RA3 in conformità ai requisiti stabiliti dalla nuova procedura G-R-PRS-006.

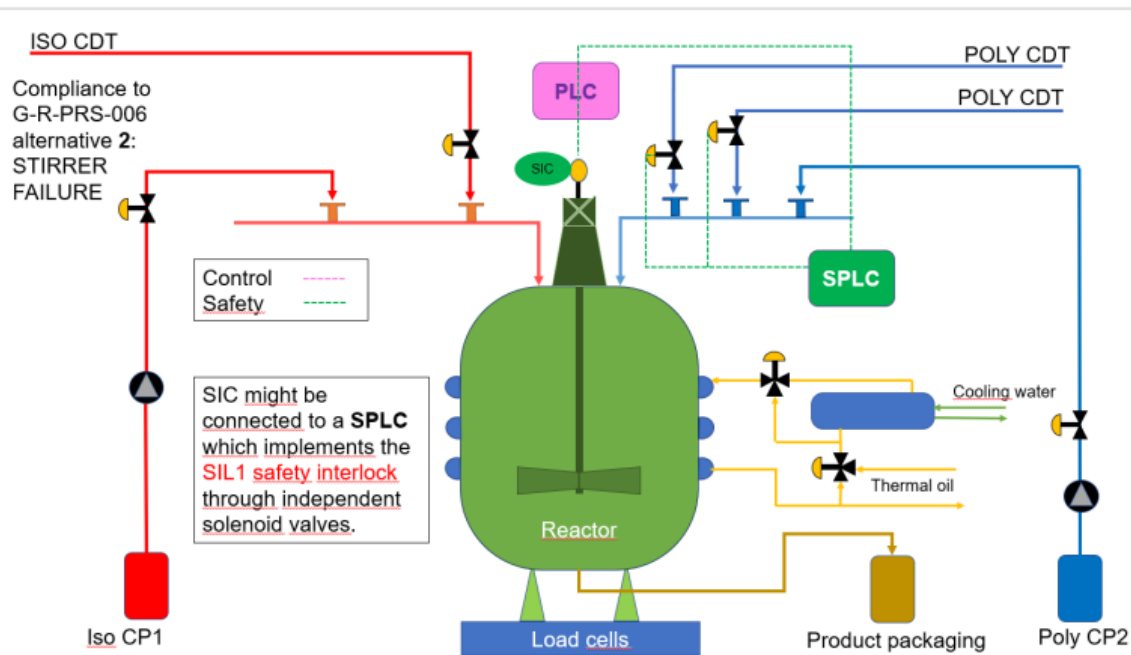


Figura 2.1.4 - Soluzione 2 blocco del sensore di giri

7.1.3 Blocco D sull'alto livello (in assenza del disco di rottura)

Per garantire la sicurezza in caso di rischio di overfilling e rispettare i requisiti definiti dalla procedura G-R-PRS-006, sono state individuate due soluzioni alternative in base alla strategia di gestione della sicurezza adottata.

Soluzione 1 – Adeguamento come blocco di Classe D:

Questa soluzione prevede di collegare il livellostato esistente (LS) a un PLC dedicato esclusivamente alla gestione della sicurezza, separato e indipendente rispetto al PLC utilizzato per il controllo del reattore. In caso di rilevamento di un livello elevato all'interno del reattore, il PLC indipendente interviene attivando elettrovalvole taglia-aria dedicate che interrompono automaticamente il caricamento delle materie prime, garantendo una protezione efficace contro il rischio di sovrariempimento.

La scelta di questa soluzione permette di mantenere l'architettura del blocco di Classe D, assicurando al contempo una completa indipendenza del sistema di sicurezza dalle logiche di controllo del processo. Tale configurazione risponde pienamente ai criteri di affidabilità e robustezza richiesti dalla nuova procedura BASF.

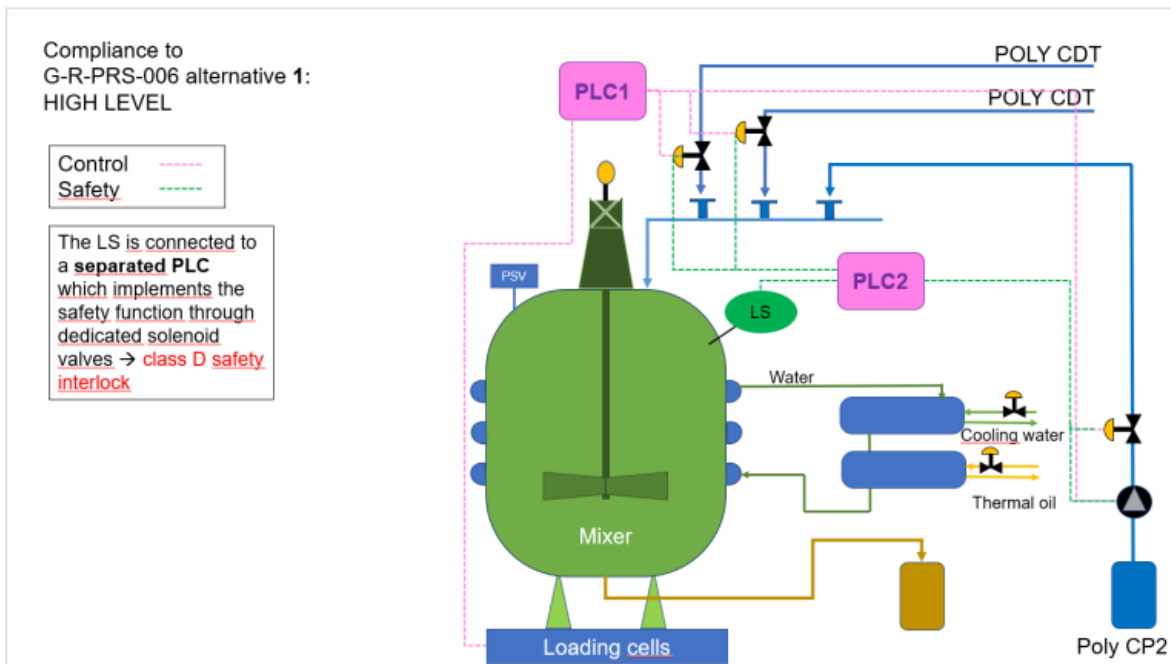


Figura 7.1.5 - Soluzione 1 blocco sull'alto livello

Soluzione 2 – Upgrade a SIL1:

In questa soluzione, il livellostato esistente viene collegato direttamente a un PLC di sicurezza dedicato (SPLC HIMA), che permette una gestione più avanzata e affidabile della funzione di sicurezza. In caso di rilevamento di un livello elevato nel reattore, il sistema interviene immediatamente chiudendo direttamente le valvole di carico attraverso elettrovalvole SIL dedicate. Questo approccio garantisce un livello superiore di protezione operativa, migliorando significativamente l'affidabilità del sistema.

I livellostati utilizzati presso lo stabilimento di Villanova fanno parte della Standard List di BASF (SDL) e presentano un livello di affidabilità certificato almeno SIL1, risultando quindi pienamente idonei per essere implementati in un Sistema Strumentato di Sicurezza (SIS). Questa soluzione risponde così ai requisiti più stringenti della normativa BASF e rappresenta un notevole potenziamento della sicurezza funzionale dell'impianto.

Compliance to
G-R-PRS-006 alternative 2:
HIGH LEVEL

Control ---
Safety ---

The LS is connected to a SPLC which implements the safety function through dedicated solenoid valves → SIL1 safety interlock

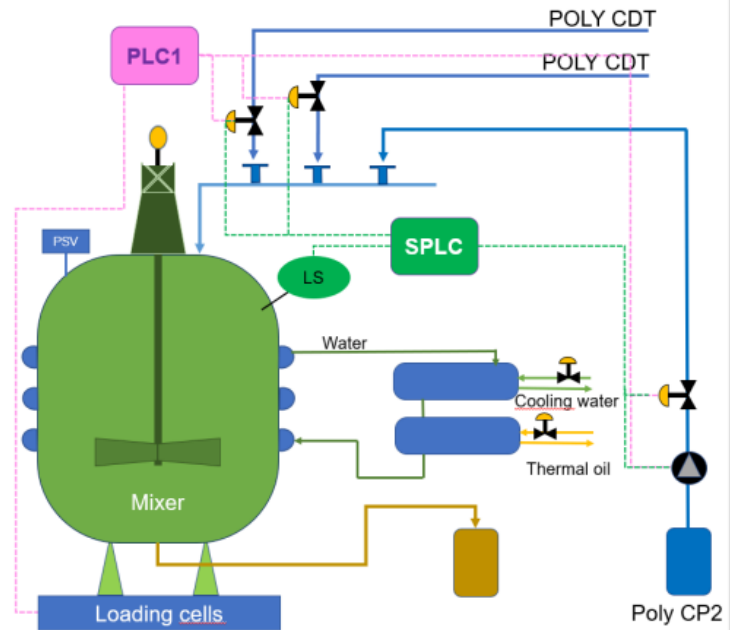


Figura 7.1.6 – Soluzione 2 blocco sull'alto livello

7.2 Calcolo della PFD_{avg} per i loop di sicurezza

7.2.1 Loop di Temperatura (Tstart)

- Configurazione: *Voting 1oo1*
- Componenti e tassi di guasto (λ_{DU})
 - o Sensore: *E+H TMT82* → $0,00035 [y^{-1}]$
 - o PLC: *Siemens Simatic S7* → $0,001 [y^{-1}]$
 - o Attuatore:
 - Standard: $0,1 [y^{-1}]$ (valore da letteratura)
 - Certificato SIL3: $0,002 [y^{-1}]$
 - o Elettrovalvola: $0,000045625 [y^{-1}]$
 - o Tempo di ispezione (TI): 1 [anno]
- PFD_{avg} calcolata:
 - o Con attuatore standard → $0,050698$ (SIL1)
 - o Con attuatore certificato SIL3 → $0,001698$ (SIL2)

7.2.2 Loop di Temperatura (Sipart)

- Configurazione: *Voting 1oo2*
- Componenti e tassi di guasto (λ_{DU})
 - Sensore: *E+H TMT82* → 0,00035 [y^{-1}]
 - SIPART (PLC) → 0,005952 [y^{-1}]
 - Attuatore:
 - Standard: 0,1 [y^{-1}] (valore da letteratura)
 - Certificato SIL3: 0,002 [y^{-1}]
 - Elettrovalvola: 0,000045625 [y^{-1}]
 - Tempo di ispezione (TI): 1 [anno]
 - Fattore di correlazione (β): 0,1
- PFDavg calcolata:
 - Con attuatore standard → 0,050350 (SIL1)
 - Con attuatore certificato SIL3 → 0,001350 (SIL2)

7.2.3 Loop di Livello con Sensore *E+H FTL51B*

- Configurazione: *Voting 1oo1*
- Componenti e tassi di guasto (λ_{DU}):
 - Sensore: *E+H FTL51B* → 0,000298 [y^{-1}]
 - PLC: *Siemens Simatic S7* → 0,001 [y^{-1}]
 - Attuatore:
 - Standard: 0,1 [y^{-1}] (valore da letteratura)
 - Certificato SIL3: 0,002 [y^{-1}]
 - Elettrovalvola: 0,000045625 [y^{-1}]
 - Tempo di ispezione (TI): 1 [anno]
- PFDavg calcolata:
 - Con attuatore standard → 0,050672 (SIL1)

- Con attuatore certificato SIL3 → 0,001672 (SIL2)

7.2.4 Loop di Livello con Sensore *E+H FEL54*

- Configurazione: *Voting Iool*
- Componenti e tassi di guasto (λ_{DU}):
 - Sensore: *E+H FEL54* → 0,0011 [y^{-1}]
 - PLC: *Siemens Simatic S7* → 0,001 [y^{-1}]
 - Attuatore:
 - Standard: 0,1 [y^{-1}] (valore da letteratura)
 - Certificato SIL3: 0,002 [y^{-1}]
 - Elettrovalvola: 0,000045625 [y^{-1}]
 - Tempo di ispezione (TI): 1 [anno]
- PFDavg calcolata:
 - Con attuatore standard → 0,051073 (SIL1)
 - Con attuatore certificato SIL3 → 0,002073 (SIL2)

7.2.5 Loop del Sensore di Giri

- Configurazione: *Voting Iool*
- Componenti e tassi di guasto (λ_{DU}):
 - Scheda: *P+F KFD-DWB-1. D* → 0,00116 [y^{-1}]
 - PLC: *Siemens Simatic S7* → 0,001 [y^{-1}]
 - Attuatore:
 - Standard: 0,1 [y^{-1}] (valore da letteratura)
 - Certificato SIL3: 0,002 [y^{-1}]
 - Elettrovalvola: 0,000045625 [y^{-1}]
 - Tempo di ispezione (TI): 1 [anno]
- PFDavg calcolata:
 - Con attuatore standard → 0,051103 (SIL1)

- Con attuatore certificato SIL3 → 0,002103 (SIL2)

7.2.6 Analisi dei Loop di Sicurezza

Al fine di garantire il corretto livello di sicurezza funzionale richiesto dalla normativa G-R-PRS-006, è stata condotta un'analisi approfondita delle configurazioni dei sistemi strumentati di sicurezza per i loop di temperatura e livello.

Loop di temperatura:

- È stata adottata una configurazione ridondata 1oo2 (un sensore e un Sipart), assicurando così una maggiore affidabilità nella rilevazione della temperatura. La presenza di un sensore ridondante aumenta la robustezza del sistema, diminuendo significativamente il rischio di guasto su richiesta.

Loop di livello:

- È stata adottata una configurazione 1oo1, valutando due diverse tipologie di livellostati:
 - Livellostato standard (valore di riferimento basato sulla letteratura);
 - Livellostato certificato SIL, con un livello minimo di affidabilità SIL1.

Loop di velocità dell'agitatore:

- Configurazione 1oo1 con analisi di diverse alternative:
 - Prossimetro standard, con un tasso di guasto stimato di 0,1 (valore di riferimento da letteratura);
 - Sensore di velocità certificato SIL (Pepperl+Fuchs), per confrontare la differenza in termini di affidabilità.

Dall'analisi condotta sulla PFDavg, è emerso che tutte le configurazioni testate garantiscono almeno il livello di sicurezza SIL1 con un intervallo di manutenzione annuale. L'impiego di attuatori certificati SIL3 ha consentito di migliorare significativamente l'affidabilità complessiva del sistema, permettendo il raggiungimento del livello SIL2 in tutte le configurazioni analizzate.

Nello specifico, sebbene alcuni dispositivi come i livellostati standard e i sensori di velocità presentassero valori di PFDavg leggermente superiori rispetto a quelli certificati SIL, essi risultano comunque idonei al raggiungimento del livello SIL1 richiesto. Pertanto, i blocchi di Classe D attualmente installati soddisfano pienamente gli standard di affidabilità previsti dalla normativa, eliminando la necessità immediata di effettuare un upgrade a SIL1.

Questa valutazione conferma che, con gli intervalli di manutenzione annuali già stabiliti, i blocchi di sicurezza esistenti possono essere mantenuti nelle condizioni attuali, risolvendo le criticità identificate nella Gap Analysis e garantendo piena conformità agli standard BASF anche con strumentazione non incluso nella Standard List aziendale.

7.3 Analisi dei tempi e dei costi delle soluzioni

Per valutare al meglio le due soluzioni di implementazione individuate per il sistema di sicurezza, è stata svolta un'analisi dettagliata dei costi e dei tempi di realizzazione, considerando attentamente sia le componenti hardware che le attività di installazione e configurazione richieste.

Soluzione 1 – Adeguamento come blocco D con PLC standard:

Questa soluzione prevede l'installazione di un PLC standard Siemens, tipicamente un modello S7-1200 o S7-400, con relativa quadristica, cablaggio e schede I/O aggiuntive nel caso di S7-400. L'installazione richiede circa 40 ore di intervento di un tecnico specializzato Siemens (al costo di 60 €/ora), oltre all'acquisto di circa 35 elettrovalvole di intercettazione taglia aria di marca Waircom (al costo unitario di 20 €). Questa soluzione garantisce un buon livello di sicurezza mantenendo un investimento contenuto e limitando le modifiche all'architettura impiantistica esistente.

Soluzione 2 – Upgrade a SIL1:

La seconda alternativa prevede l'installazione di un PLC di sicurezza HIMA dedicato, con requisiti tecnici e standard di sicurezza più elevati. Anche in questo caso, le attività di installazione elettrica richiedono circa 40 ore, ma con l'intervento di un tecnico HIMA (sempre al costo di 60 €/ora). Le elettrovalvole di intercettazione SIL utilizzate sono del tipo Samson, caratterizzate da un costo significativamente superiore (circa 500 €/pezzo). Inoltre, è necessario l'acquisto di un PLC di sicurezza HIMA e di sensori di velocità di rotazione certificati SIL Pepperl+Fuchs (circa 300 € per unità).

Sebbene la Soluzione 2 (upgrade a SIL1) comporti costi complessivamente superiori rispetto alla prima opzione, essa garantisce una sicurezza funzionale maggiore e una piena conformità ai requisiti più rigorosi stabiliti dalla procedura G-R-PRS-006.

In entrambi i casi, al fine di ottimizzare il cablaggio e facilitare la gestione, gli interblocchi di sicurezza sono stati organizzati suddividendo l'impianto su due PLC distinti: PLC per il reparto A e PLC3 per il reparto B.

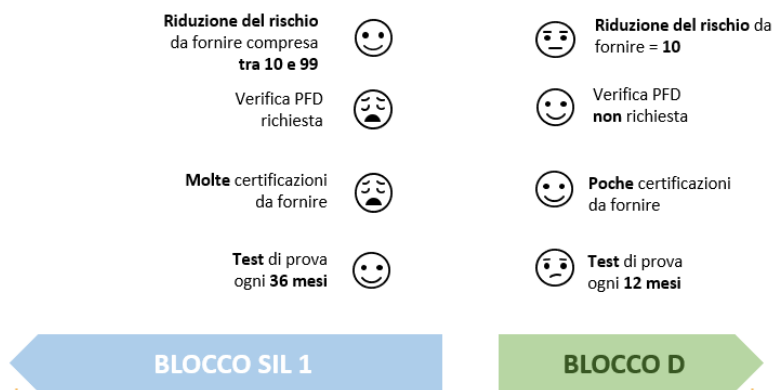


Figura 7.3.1 - Confronto degli aspetti tecnici tra blocco SIL1 e blocco D

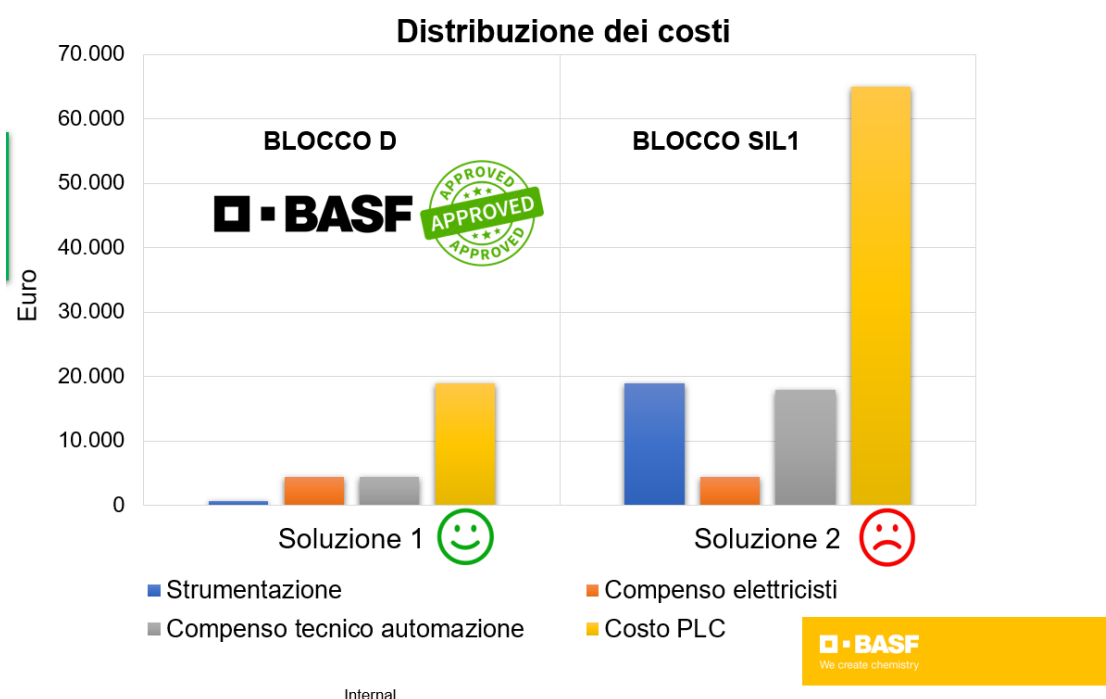


Figura 7.3.2 - Estratto di una mia presentazione in BASF sul confronto dei costi tra i due blocchi di sicurezza

7.4 Implementazione della soluzione 1

Per garantire l'adeguamento dei blocchi di sicurezza di Classe D in conformità con la nuova linea guida G-R-PRS-006, è indispensabile installare un PLC di sicurezza dedicato e separato dal sistema di controllo del processo. Per ottimizzare il cablaggio e semplificare l'installazione, si è deciso di suddividere gli interblocchi di sicurezza in due gruppi distinti: uno gestito da un PLC dedicato al reparto A e l'altro dal PLC3 assegnato al reparto B.

In particolare, per il reattore RA3, i sensori relativi agli interblocchi di Classe D (ad esempio sensori di temperatura, livello e velocità dell'agitatore) saranno collegati direttamente al PLC3, che gestirà autonomamente le logiche di sicurezza. Questo sistema garantisce una gestione

indipendente rispetto alle logiche di processo, migliorando significativamente la robustezza e la risposta in caso di anomalie operative.

Per consentire il corretto coordinamento tra sicurezza e controllo di processo, si è resa necessaria una comunicazione tra il PLC di sicurezza (PLC3) e il PLC utilizzato per il controllo del reattore.

Tra le diverse modalità possibili, sono state valutate due alternative principali:

1. **Cablaggio fisico diretto:** soluzione che comporta un collegamento diretto mediante cablaggi fisici, con maggiore complessità e tempi di installazione superiori.

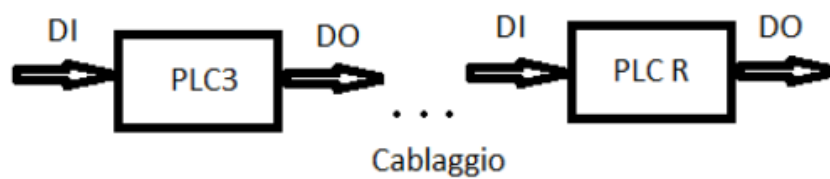


Figura 7.4.1 - cablaggio fisico diretto

Lo schema rappresenta una connessione cablata semplice tra due PLC diversi:

- **PLC3 (PLC di sicurezza)** invia un segnale di sicurezza tramite una sua uscita digitale (DO - Digital Output).
 - Questo segnale arriva come ingresso digitale (DI) al **PLC R (PLC di controllo di processo)**.
 - Il PLC R, a sua volta, può inviare segnali in uscita (DO) verso altre apparecchiature o componenti del processo.
2. **Comunicazione tramite rete:** soluzione preferibile, poiché permette uno scambio di dati flessibile e semplificato, con tempi ridotti per la messa in servizio e minor complessità nella manutenzione.

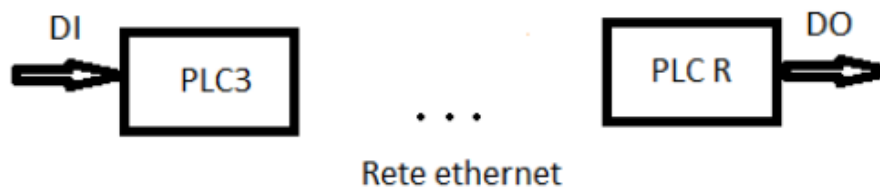


Figura 3.4.2 - Comunicazione tramite rete

Questo schema mostra una comunicazione tramite **rete Ethernet** tra due PLC:

- Il **PLC3 (di sicurezza)** riceve segnali digitali dai sensori (DI - Digital Input).
- I dati acquisiti dal PLC3 vengono inviati tramite rete Ethernet (rete dati industriale) al **PLC R (PLC di controllo)**.
- Il PLC R, ricevute le informazioni, può attivare segnali in uscita (DO - Digital Output) verso altri dispositivi o componenti del processo.

La soluzione scelta per la comunicazione tra i PLC è quella basata sulla rete Ethernet. Questa modalità è preferibile in quanto permette una gestione più rapida e semplice dei segnali, riducendo significativamente la complessità del cablaggio fisico rispetto alla configurazione cablata. Inoltre, garantisce maggiore flessibilità, facilitando eventuali modifiche o ampliamenti futuri del sistema. Pur richiedendo una gestione accurata della rete per assicurare affidabilità e sicurezza delle informazioni trasmesse, i vantaggi offerti in termini di facilità di manutenzione e rapidità di implementazione la rendono la scelta ideale per garantire una comunicazione efficace e integrata tra i sistemi di sicurezza e quelli di controllo del processo.

8 Conclusioni

L'analisi della sicurezza di processo applicata al reattore RA4 ha confermato la necessità di un approccio strutturato e conforme alla procedura G-R-PRS-006, al fine di garantire un efficace controllo del rischio. L'adozione della nuova matrice di rischio BASF ha introdotto criteri più rigorosi per l'implementazione dei blocchi di sicurezza, distinguendo chiaramente tra SIL1 e blocchi di Classe D. Questo aggiornamento ha migliorato la capacità di classificare e mitigare i rischi in modo più preciso, garantendo l'indipendenza tra sistemi di protezione e l'evento iniziatore

La Gap Analysis ha evidenziato alcune aree critiche del sistema di sicurezza del reattore RA4, con particolare attenzione all'integrazione tra sensori di temperatura, interblocchi di sicurezza e attuatori, specialmente per i prepolimeri di Categoria 2 e Categoria 3, che richiedono un controllo più avanzato per evitare runaway termici. L'analisi ha dimostrato che, sebbene il blocco D possa ancora essere utilizzato negli impianti esistenti, deve rispettare precisi requisiti di indipendenza e manutenzione periodica per garantire un adeguato livello di affidabilità

La valutazione del PFDavg ha confermato la necessità di ridondare i sensori e migliorare la gestione della strumentazione per soddisfare i requisiti di sicurezza funzionale. L'analisi delle temperature critiche, come T24 e Tmax, ha rafforzato l'importanza di un controllo preciso del processo per prevenire scenari pericolosi e garantire la stabilità della reazione.

Uno degli aspetti più rilevanti dell'analisi ha riguardato il monitoraggio della massa alimentata ai reattori, attualmente basato su celle di carico che possono introdurre margini di errore a causa della variabilità del caricamento. Per superare queste limitazioni, è stata valutata l'adozione di misuratori di portata massica a effetto Coriolis, che offrono misure dirette della massa senza dipendere da densità o pressione del fluido. Dopo un'analisi comparativa, sono stati selezionati i modelli Promass I300 e Promass Q300 di Endress+Hauser, già inclusi nella standard list BASF, semplificando le procedure di approvazione e implementazione.

L'implementazione di questa tecnologia ha richiesto un'attenta fase di dimensionamento e installazione, evitando il montaggio in punti che potessero introdurre errori di misura, come le sezioni più alte delle tubazioni, e garantendo un corretto autodrenaggio del fluido. È stata anche valutata la necessità di strategie di calibrazione periodica per correggere eventuali deviazioni strumentali e migliorare l'accuratezza della misura. L'adozione di un bypass dedicato è risultata una soluzione efficace per ridurre il rischio di contaminazione tra batch di produzione

L'analisi ha evidenziato inoltre la necessità di adeguare i blocchi di sicurezza di Classe D agli standard più recenti della G-R-PRS-006, migliorando l'indipendenza funzionale e riducendo il rischio di guasti correlati al sistema di controllo. Il confronto tra le strategie di adeguamento ha mostrato che la separazione del blocco D dal DCS migliora l'affidabilità, mentre l'upgrade a SIL1 offre un livello di sicurezza superiore, con un Risk Reduction Factor (RRF) più elevato. L'analisi dei costi e dei tempi di implementazione ha permesso di bilanciare le esigenze di sicurezza con la sostenibilità dell'investimento

Infine, la verifica della PFDavg ha confermato che le configurazioni esistenti, con adeguate misure di aggiornamento, possono garantire il livello minimo SIL1, con possibilità di miglioramento fino a SIL2 adottando componenti certificati. La separazione funzionale dei blocchi di sicurezza dal controllo di processo è risultata essenziale per garantire la conformità alla normativa BASF, prevenendo compromissioni della sicurezza in caso di guasto del sistema di controllo.

9 Lista dei simboli

Simbolo	Significato	Unità di misura
β	Fattore di correlazione dei guasti	-
ΔH_e	Entalpia di reazione	kJ mol^{-1}
ΔP	Perdite di carico	Pa
DN	Diametro nominale	mm
E_a	Energia di attivazione	kJ mol^{-1}
PFD_{avg}	Probabilità media di guasto richiesta	-
RRF	Risk Reduction Factor	-
SIL	Safety Integrity Level	-
TI	Tempo di ispezione	h
T24	Temperatura critica per la stabilità termica	$^{\circ}\text{C}$
Tmax	Temperatura massima consentita	$^{\circ}\text{C}$
Tstart	Temperatura di avvio della reazione	$^{\circ}\text{C}$
λ_{DU}	Tasso di guasto pericoloso non rilevato	h^{-1}
M	Massa	kg
MFI	Melt Flow Index	$\text{g } 10 \text{ min}^{-1}$
ρ_{PU}	Densità del poliuretano	kg m^{-3}

10 Riferimenti bibliografici

- [1] Van Gysel W., Thiele K., Thiemann U., Guffens W., Gutschoven F., Wolff T., 2019, *Prepolymer Safety Concept*. Antwerpen, Lemforde, Ludwigshafen: BASF PU.
- [2] *Global Process Safety Concept Polyurethane Prepolymer Manufacturing at PMU*. Confidential, Owner Dr. Benedikt Crone, Global Technology Coordination PU Systems PM/T.
- [3] Nasuti A. (2005) *Tesi di Laurea Magistrale “Controllo di processo in reattori di prepolimerizzazione”*, Politecnico di Torino, Corso di laurea magistrale in Ingegneria Chimica E Dei Processi Sostenibili.
- [4] Boros, R.Z., Rágyanszki, A., Csizmadia, I.G. et al. (2018) *Industrial application of molecular computations on the dimerization of methylene diphenyl diisocyanate*. *Reac Kinet Mech Cat* 124, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11144-018-1385-1>.
- [5] Sharmin E, Zafar F (2012) *Polyurethane: an introduction*. In: Polyurethane. p 3–16. <https://doi.org/10.5772/51663>
- [6] Miniotti I. (2020) *Tesi di Laurea Magistrale “Sviluppo e implementazione di tecnologie per aumentare la sicurezza in reattori di pre-polimerizzazione”*, Politecnico di Torino, Corso di laurea magistrale in Ingegneria Chimica E Dei Processi Sostenibili.
- [7] Sergi T. (2019) *Tesi di Laurea Magistrale “Monitoraggio della fase di pre-polimerizzazione di un processo per la produzione di poliuretano”*, Politecnico di Torino, Corso di laurea magistrale in Ingegneria Chimica E Dei Processi Sostenibili.
- [8] Materiale interno BASF
- [9] Endress+Hauser. Proline Promass I300. Recuperato da <https://www.it.endress.com/it/panoramica-strumentazione-da-campo/Misura-di-portata/Proline-Promass-I-300?t.tabId=product-overview>
- [10] Endress+Hauser. Proline Promass Q300. Recuperato da <https://www.it.endress.com/it/panoramica-strumentazione-da-campo/Misura-di-portata/Proline-Promass-Q-300?t.tabId=product-overview>
- [11] Endress+Hauser. Panoramica strumentazione da campo. Recuperato da <https://www.it.endress.com/it/panoramica-strumentazione-da-campo>

[12] Duijm, N.J. (2015). *Recommendations on the use and design of risk matrices*. Safety Science, Elsevier.

https://orbit.dtu.dk/files/107807316/Recommendations_on_the_use_and_design_of_risk_matrices_Accepted_Corrected.pdf.

[13] Baybutt, P. (2018). *Guidelines for designing risk matrices*. Process Safety Progress, Wiley.

<https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/prs.11905>.