

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**DOTTORATO DI RICERCA IN**

**INGEGNERIA CHIMICA, DELL'AMBIENTE  
E DELLA SICUREZZA**

Ciclo XXVII

**Settore Concorsuale di afferenza:** 09/D3

**Settore Scientifico disciplinare:** ING-IND/25

**SVILUPPO DI METODOLOGIE INNOVATIVE  
DI SUPPORTO DECISIONALE ALLA PROGETTAZIONE  
BASATE SU INDICATORI DI PRESTAZIONE**

**Presentata da:** Jacopo PIANI

**COORDINATORE DOTTORATO:**

Chiar.ma Prof.ssa Ing. Serena BANDINI

**RELATORE:**

Chiar.mo Prof. Ing. Valerio COZZANI

**CORRELATORI:**

Prof. Ing. Alessandro TUGNOLI

Dott. Ing. Manuel PIANAZZI

**Esame finale anno 2015**



# INDICE

1.	INTRODUZIONE .....	1
2.	SISTEMI DI SUPPORTO DECISIONALE .....	3
2.1.	Caratteristiche .....	3
2.2.	Sistemi d'indicatori di prestazione di supporto alla decisione .....	6
2.2.1.	Indicatori di sostenibilità .....	6
2.2.1.1.	Schema di processo .....	8
2.2.1.2.	Albero degli impatti .....	9
2.2.1.3.	Normalizzazione ed aggregazione .....	10
2.2.1.4.	Semplificazione e quantificazione .....	13
2.3.	Bottleneck indicators .....	14
2.3.1.	Process effectiveness .....	15
2.3.2.	Equipment effectiveness .....	17
2.4.	Area hazard indicators .....	21
2.4.1.	Emissioni fuggitive .....	21
2.4.2.	Healthiness of fugitive emissions .....	23
2.4.3.	Flammability of fugitive emissions .....	25
2.4.4.	Integrazione nel modello esistente .....	27
2.4.5.	Ventilation model .....	29
3.	APPROCCIO ALLA QUANTIFICAZIONE DELLE EMISSIONI FUGGITIVE .....	31
3.1.	Valutazione delle emissioni fuggitive: stato dell'arte .....	31
3.1.1.	Sorgenti di perdita .....	31
3.1.2.	Metodi sperimentali .....	33
3.1.2.1.	Metodo 21 .....	33
3.1.2.2.	Leak Detection And Repair .....	36
3.1.2.3.	Smart LDAR .....	42
3.1.3.	Metodi previsionali .....	43
3.1.3.1.	Metodo a fattori medi d'emissione .....	46
3.1.3.2.	Metodo a fattori di perdita .....	49
3.1.3.3.	Metodo con curve di correlazione .....	52
3.1.3.4.	Metodo con correlazioni specifiche .....	55
3.2.	Modello emissioni fuggitive .....	57
3.2.1.	Sorgenti di perdita .....	58
3.2.1.1.	Organi d'intercettazione .....	58
3.2.1.2.	Macchine per movimentazione fluidi .....	63

3.2.1.3.	Connessioni di processo .....	66
3.2.1.4.	Organi di sicurezza .....	68
4.	APPLICAZIONE DEI SISTEMI DI SUPPORTO DECISIONALE E RISULTATI.....	73
4.1.	Caso di studio.....	73
4.1.1.	Le problematiche.....	74
4.2.	Analisi di sbottigliamento .....	78
4.2.1.	Alternativa I .....	78
4.2.1.1.	Condensatore K603-W5 .....	80
4.2.1.2.	Colonna di distillazione K603 .....	81
4.2.1.3.	Colonna di distillazione K605 .....	82
4.2.1.4.	Equipment effectiveness alternativa I.....	83
4.2.2.	Alternativa II.....	84
4.2.2.1.	Colonna di distillazione K607 .....	87
4.2.2.2.	Equipment effectiveness alternativa II .....	88
4.2.3.	Alternativa III.....	89
4.2.3.1.	Colonna di distillazione K608 .....	91
4.2.3.2.	Equipment effectiveness alternativa III.....	92
4.3.	Indicatori di sostenibilità.....	94
4.3.1.	Scelta dell'alternativa sostenibile.....	95
4.3.1.1.	Valutazione dei KPI di sostenibilità .....	96
4.3.1.2.	Normalizzazione ed aggregazione dei KPI di sostenibilità .....	101
5.	CONCLUSIONI.....	105
	BIBLIOGRAFIA .....	109
	APPENDICE A.....	113

# 1. INTRODUZIONE

L'industria chimica moderna ha oramai preso piena coscienza dell'importanza di considerare la sostenibilità di un processo nel suo complesso non soffermandosi unicamente sugli aspetti economici. Infatti oggi lo sviluppo sostenibile è uno dei traguardi fondamentali delle attività industriali. Quindi non è importante considerarlo unicamente nella progettazione di nuovi impianti produttivi, ma deve essere preso come metro di giudizio anche in tutte le attività di miglioramento degli impianti esistenti. È pertanto necessario individuare e sviluppare adeguati sistemi di supporto decisionale, da impiegare già nelle primissime fasi di progettazione, al fine di quantificare adeguatamente tutti gli aspetti della sostenibilità di un impianto.

Questo non significa che fino ad oggi l'industria chimica avesse ignorato questi aspetti — esistono varie leggi e normative a riguardo — ma non era prevista una visione d'insieme che permettesse di ottimizzarle contemporaneamente. Anzi il costante aggiornamento della legislazione in relazione ai progressi tecnologici, nel corso degli anni ha comportato la necessità di approfondire sempre nuovi aspetti della sostenibilità che prima non erano considerati. Un esempio è dato dalle emissioni fuggitive: queste particolari tipologie d'emissione, un tempo trascurate per via della loro entità, sono diventate d'interesse poiché, a seguito della significativa riduzione delle emissioni convogliate e diffuse, rilevanti al fine di determinare la quantità di sostanza pericolosa rilasciata da un impianto.

La carenza d'indicazioni precise per la quantificazione di tali emissioni, già nelle primissime fasi progettuali, impone lo sviluppo di nuove metodologie atte alla stima previsionale accurata delle portate rilasciate, basandosi su di un limitato numero d'informazioni, relative alla tipologia di componentistica, dei loro meccanismi di perdita e della loro criticità.

Uno strumento di supporto decisionale non è utile unicamente nella determinazione della sostenibilità di un'alternativa progettuale ma è molto importante anche per comprendere le necessità di miglioramento di un impianto. Molto spesso, infatti, i classici monitoraggi permettono di riscontrare la presenza di problematiche e comprendere la loro tipologia, ma per determinarne le cause sono necessarie dispendiose analisi perché molto spesso richiedono informazioni

non reperibili dalla normale strumentazione di processo ma unicamente da apposite e complesse simulazioni fluidodinamiche.

In funzione di queste considerazioni il presente lavoro si è focalizzato sullo sviluppo di metodologie innovative di supporto decisionale basate su indicatori di prestazione, sia per permettere un'analisi dei problemi degli impianti dovuti ai colli di bottiglia, sia per consentire la corretta quantificazione della sostenibilità globale in tutti i suoi aspetti più attuali, basandosi unicamente su di un numero estremamente limitato d'informazioni, reperibili in qualunque fase progettuale si vogliono impiegare tali strumenti.

Inoltre si è debitamente approfondito il tema della stima previsionale delle portate delle emissioni fuggitive in fase progettuale, con l'obiettivo di sviluppare una metodologia accurata ed attendibile.

## 2. SISTEMI DI SUPPORTO DECISIONALE

### 2.1. Caratteristiche

Lo svolgimento di una qualunque attività, dalla più semplice a quella più complessa, — caratterizzata da tre fasi distinte ma inscindibili fra loro: la pianificazione strategica, il controllo gestionale ed il controllo operativo<sup>[3]</sup> — comporta necessariamente uno o più momenti in cui si compie una scelta strategica, determinando la migliore fra le alternative possibili per raggiungere l'obiettivo prefissato, mediante un'analisi comparativa delle stesse.

Questo è il processo decisionale. Esso presenta diversi gradi di complessità in funzione della natura stessa della questione da analizzare, andando da problemi decisionali facilmente risolvibili, chiamati «problemi strutturati» in quanto è possibile giungere ad una soluzione mediante un algoritmo, a problemi che per la loro natura non programmabile, detti «non-strutturati», risultano di più complessa risoluzione; passando per i problemi «semi-strutturati» così chiamati poiché presentano aspetti di entrambe le categorie precedenti<sup>[42][44]</sup>.

Fin dagli inizi degli anni '50 il processo decisionale è stato oggetto di analisi e ricerche sia dal punto di vista teorico al Carnegie Institute of Technology, per comprendere i meccanismi insiti nell'attività, sia con lavori pratici al MIT<sup>[41][43]</sup>. Nell'ambito dei lavori al MIT, Scott Morton negli anni '60 sviluppò un algoritmo per supportare i manager nelle decisioni chiave per la pianificazione delle attività industriali che fu applicato nell'ambito di un progetto di produzione di una nuova lavatrice<sup>[41]</sup>. Da questo primo lavoro è nata la teoria dei sistemi di supporto decisionale (DSS); con questo termine, coniato nel 1971 da Scott Morton stesso, s'intendono tutte quelle tecniche di ausilio che possono essere impiegate in tutti gli ambiti del *problem solving* — sia per problemi strutturati che, soprattutto, per quelli non-strutturati — al fine di consentire al responsabile di prendere decisioni più razionali incrementando l'efficacia con cui si prendono e l'efficienza delle stesse<sup>[40][41][43]</sup>.

Già nel 1980 la letteratura scientifica<sup>[2]</sup> riguardante questo argomento aveva determinato le sette categorie a cui possono appartenere i sistemi di supporto decisionali, di seguito descritte a complessità crescente:

- *file drawer system*: è la tipologia più semplice di sistema di supporto che fornisce unicamente accesso ai dati sui quali deve essere presa una decisione, lasciando la loro analisi all'utilizzatore;
- *data analysis system*: tipologia di DSS che oltre a permettere l'accesso ai dati ne consente la manipolazione in modo adeguato alle esigenze del problema esaminato;
- *analysis information system*: sono sistemi di supporto che garantiscono l'accesso, l'utilizzo ed il confronto dei dati provenienti da diversi database mediante un modello d'analisi semplice;
- *accounting model*: sono modelli decisionali che calcolano le conseguenze finanziarie delle azioni che è possibile intraprendere senza però tener conto delle incertezze insite in esse;
- *representational model*: sono strumenti che permettono di stimare le conseguenze delle azioni mediante un modello di simulazione previsionale tenendo conto delle incertezze;
- *optimisation system*: è uno strumento che offre la possibilità di stimare gli effetti delle differenti alternative decisionali, basandosi su di un modello d'ottimizzazione che comprende le incertezze, individuando la migliore soluzione nel rispetto dei vincoli;
- *suggestion system*: è un modello che analizza i dati e, prevedendo i possibili scenari di sviluppo, suggerisce le migliori decisioni da prendere sia per problemi strutturati che non.

Nonostante questa varietà e complessità, tutti i sistemi di supporto decisionale sono contraddistinti da cinque caratteristiche basilari teorizzate da Little<sup>[38]</sup>:

- semplicità: questo strumento deve essere semplice in quanto facilita la comprensione. Per questo è indispensabile che vengano introdotte unicamente le informazioni rilevanti così da evitare il sovraccarico di dettagli che complicherebbero l'interpretazione;
- robustezza: lo strumento deve essere realizzato in modo da rendere difficile fornire cattive risposte all'utilizzatore, grazie ad una struttura che assegni in maniera intrinseca valori opportuni alle risposte;
- facilità: l'utente deve essere in grado sia di conoscere le correlazioni che legano cause ed effetti sia di utilizzare con comodità lo strumento;

- adattività: lo strumento deve essere capace di adattarsi alle nuove informazioni disponibili che gli vengono fornite;
- completezza: lo strumento deve avere una struttura completa nei dettagli importanti, senza che ciò infici la semplicità.

Tutti i sistemi di supporto decisionale così strutturati, in definitiva, sono in grado di rispondere alle fasi del processo decisionale<sup>[42]</sup>:

- raccolta: ovvero la raccolta di tutte le informazioni sui problemi o sulle opportunità in un determinato ambito;
- progettazione: analisi dei problemi o delle opportunità e generazione delle possibili alternative;
- scelta: identificazione della migliore alternativa possibile.

Uno dei più importanti ed utilizzati sistemi di supporto decisionale è rappresentato dagli indicatori di prestazione (KPI). Infatti questo strumento consente di quantificare numericamente qualunque aspetto d'interesse e pertanto garantisce un conforto obiettivo fra le alternative.

In realtà l'utilizzo dei KPI non elimina la soggettività nell'analisi, in quanto essa è insita nella scelta e definizione degli indicatori per lo studio. Pertanto un KPI deve essere selezionato con attenzione così come il suo riferimento, se fossero fuorvianti si comprometterebbero la decisione, fino ad optare per quella errata.

Per questo motivo i KPI devono essere definiti secondo un criterio appropriato; il più completo è quello denominato S.M.A.R.T. Esso prende il nome dalle iniziali delle cinque caratteristiche indispensabili per un KPI ottimale:

- *specific*: il KPI deve essere specifico per l'aspetto analizzato fornendo una chiara indicazione circa il suo andamento rispetto all'obiettivo;
- *measurable*: ovviamente un indicatore deve essere misurabile, ovvero deve essere possibile assegnare un valore numerico all'aspetto;
- *achievable*: l'indicatore deve essere realizzabile, ovvero si deve basare su dati reperibili con facilità e misurare effettivamente una variazione rispetto all'obiettivo prefissato;
- *relevant*: si devono introdurre gli indicatori che descrivono gli aspetti essenziali del problema, evitando quelli non d'interesse;
- *time phase*: infine i KPI devono essere definiti temporalmente in un determinato periodo di tempo ed aggiornati costantemente.

## 2.2. Sistemi d'indicatori di prestazione di supporto alla decisione

Uno degli aspetti più significativi da considerare quando è necessario scegliere fra le alternative di progetto è la sostenibilità.

Negli ultimi trent'anni, infatti, l'industria chimica e di processo si è impegnata in una costante riduzione del proprio impatto sul pianeta con processi sempre più attenti agli aspetti sociali, ambientali ed economici.

Diventa quindi fondamentale, già nelle primissime fasi progettuali, investigare la sostenibilità delle alternative così da poter orientare la scelta della soluzione ottimale considerando questi aspetti nella loro interezza.

Per facilitare l'implementazione del concetto di sostenibilità già in fase di progettazione di base, esiste in letteratura<sup>[49][51]</sup> un'adeguata metodologia di stima e valutazione che si basa sull'utilizzo d'indicatori di prestazione.

### 2.2.1. Indicatori di sostenibilità

Con sostenibilità, o meglio con sviluppo sostenibile s'intendono una moltitudine di aspetti ed attività che concorrono a far sì che un processo «soddisfi le esigenze di benessere dell'attuale generazione senza compromettere quelle delle generazioni future» come definito dal rapporto Brundtland<sup>[65]</sup>.

La totalità di questi aspetti da considerare, può essere classificata nelle tre macro-categorie di sostenibilità sociale, ambientale ed economica.

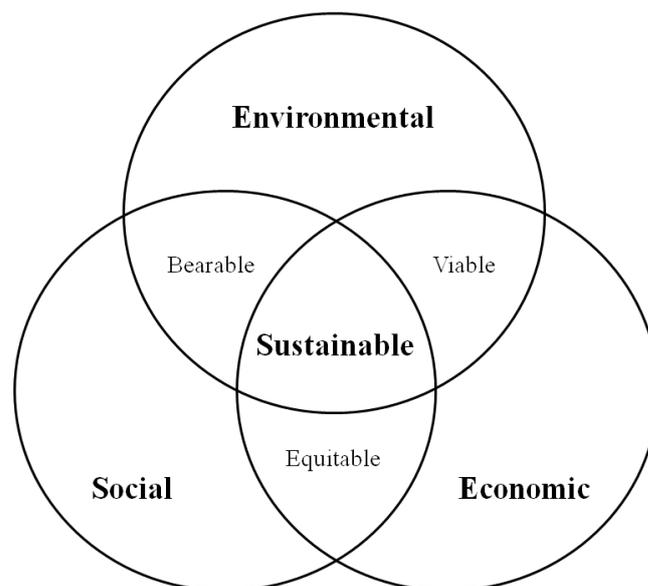


Figura 2-1 – Aspetti fondamentali della sostenibilità

Appare chiaro che per determinare la sostenibilità di un'alternativa processuale in fase di progettazione è necessario valutare questi aspetti generali, ovvero quantificare e dare il giusto peso ai singoli impatti primari che li determinano. Il metodo presente in letteratura <sup>[49][51]</sup> è stato sviluppato per essere utilizzato come supporto decisionale già dalle primissime fasi di progettazione — per questo si basa sulle poche informazioni del processo disponibili inizialmente — al fine sia d'identificare la migliore alternativa che d'individuare le criticità in relazione alla sostenibilità globale. Per farlo quantifica i singoli impatti primari di tutte le sfere della sostenibilità utilizzando appositi indicatori, proposti in letteratura<sup>[51]</sup>, sviluppati per poter impiegare i dati disponibili in fase di progettazione. Nella scelta fra le alternative è poi necessario comparare ed aggregare gli indici degli impatti quantificati mediante una serie di criteri sviluppati sulla base delle condizioni specifiche di localizzazione del sito dove è realizzato il processo produttivo. Schematicamente questo modello è composto da cinque fasi, come illustrato in Figura 2–2.

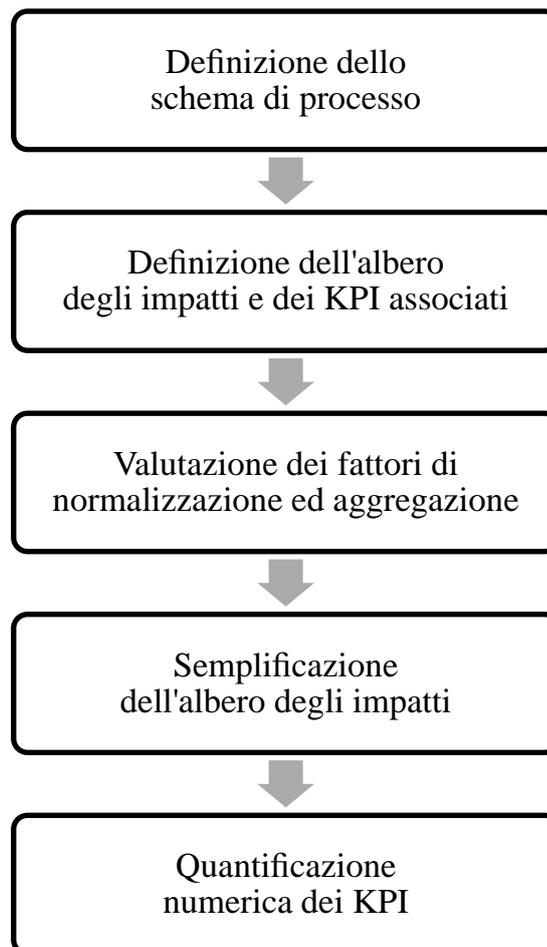


Figura 2–2 – Diagramma di flusso della procedura del metodo

### 2.2.1.1. Schema di processo

Il punto di partenza della procedura è la definizione, la caratterizzazione ed il reperimento dei dati necessari all'analisi delle alternative processuali. Infatti per una corretta comparazione delle varie alternative è necessario confrontarle fissando dei confini di processo comuni e riferendosi ad eguali potenzialità.

Solitamente la potenzialità è definita in relazione alla sostanza principale trattata, come il prodotto d'interesse o i rifiuti smaltiti. Per quanto riguarda i confini di processo comuni, sono definiti per contemplare le linee d'interesse presenti nel sito, ovvero il processo produttivo e le sue *utilities*, escludendo tutte le operazioni sul prodotto non realizzate nel sito dove è localizzata la linea.

I dati necessari sono molteplici e si possono dividere in economici e di processo. Il dato fondamentale che deve essere reperito e che è alla base di tutti gli altri è lo schema di processo (PFD) in cui sono evidenziate tutte le apparecchiature e le correnti di materia ed energia della linea produttiva.

Definite qualitativamente le correnti e le apparecchiature è necessario reperire i dati quantitativi. I primi sono quelli relativi ai flussi di materia; è necessario stimare, molto spesso con simulatori<sup>[5][12]</sup>, la portata, la composizione e le condizioni di temperatura e pressione delle singole correnti individuate nello schema di processo, considerando materie prime, prodotti, sottoprodotti e reflui. Oltre a queste devono essere considerate anche le emissioni non controllate, in altre parole quelle fuggitive, mediante appositi metodi di stima<sup>[1][58]</sup>.

Ovviamente la seconda informazione da reperire sulle correnti del processo è relativa al flusso d'energia. È necessario stimare, come quelli di massa, i flussi termici ed elettrici scambiati nel processo in esame.

Oltre ai dati sopra elencati, per tutte le sostanze individuate è necessario valutare le caratteristiche di pericolosità, così da poter determinare gli impatti d'interesse. Analogamente ai flussi di materia ed energia delle correnti di processo, in relazione alle apparecchiature è necessario stimare le condizioni operative e la quantità di sostanza in esse contenuta durante il normale esercizio. Queste ultime informazioni, insieme alla tipologia d'apparecchiatura, risultano indispensabili per l'analisi della sicurezza intrinseca<sup>[48][50]</sup>.

Infine è necessario reperire tutte le informazioni dei flussi economici, ovvero gli investimenti ed i costi operativi di tutte le alternative analizzate.

### 2.2.1.2. Albero degli impatti

La seconda fase è necessaria per l'identificazione degli indicatori atti alla quantificazione degli impatti sulla sostenibilità del processo.

In primo luogo è indispensabile definire quali siano gli impatti primari che influenzano la sostenibilità globale. Per questo il metodo introduce il così detto albero degli impatti, Figura 2-3. Esso è una struttura gerarchica, indipendente dalla tipologia di processo, che esplicita la dipendenza della sostenibilità globale dai singoli impatti primari.

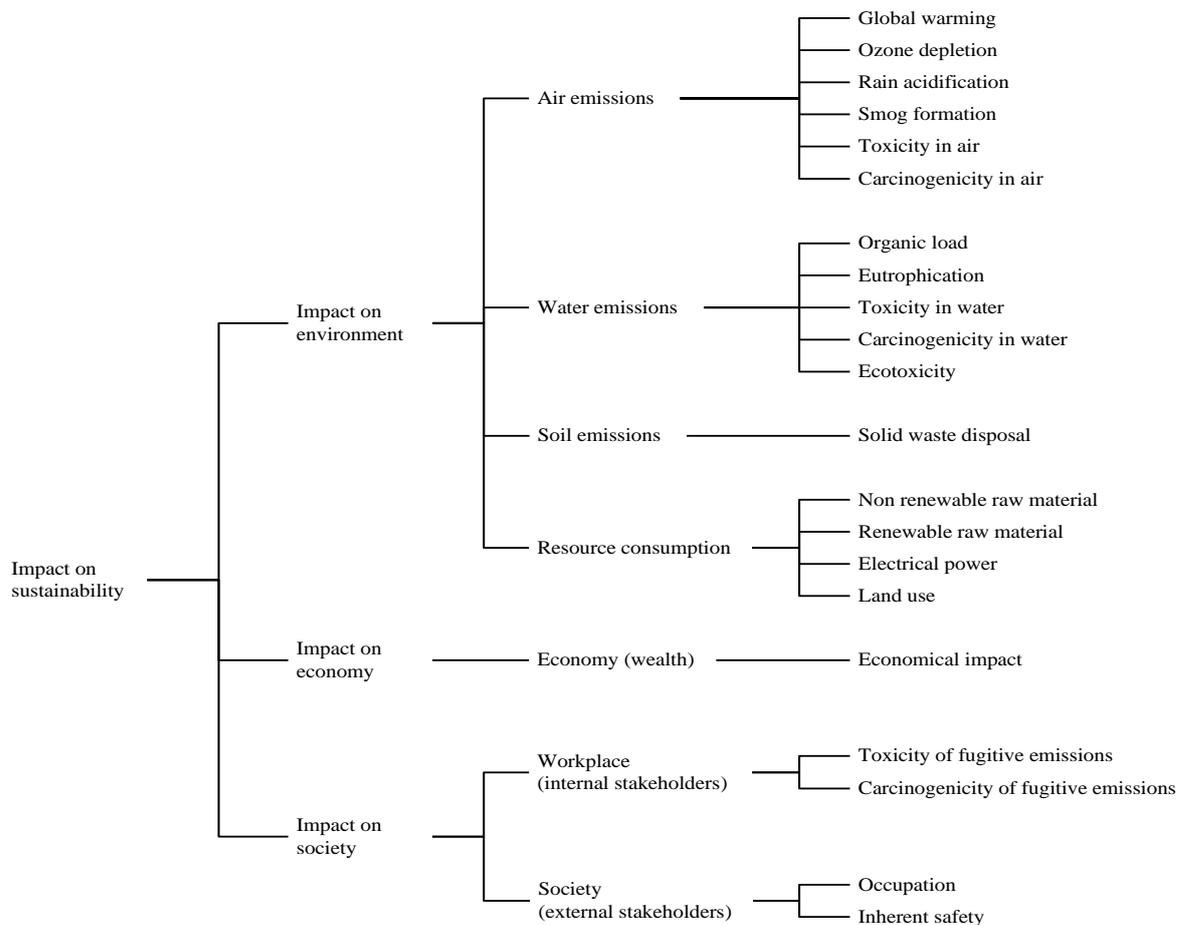


Figura 2-3 – Albero degli impatti

L'albero proposto in letteratura<sup>[51]</sup>, presenta quattro livelli; la radice rappresenta la sostenibilità globale del processo che viene specificata nei suoi tre aspetti classici ovvero sociale, economico ed ambientale, secondo livello.

Il terzo livello distingue gli impatti in funzione del bersaglio ed infine il quarto livello esplicita gli impatti primari che sono rilevanti per la sostenibilità.

A questi ultimi sono associati i KPI che, sfruttando i dati ricavati in precedenza, ne permettono la quantificazione numerica.

I KPI concernenti la sostenibilità ambientale, ad esempio, dipendono dalla portata di materia od energia attraverso i confini di processo e dal *potential impact factor* (PIF), che rappresenta la capacità di causare danni in relazione ad una specifica caratteristica, secondo l'equazione 2-2.1.

$$I_{i,k} = \sum_j PIF_{i,j} \cdot \dot{m}_{j,k} \quad 2-2.1$$

Analogamente l'impatto economico dipende dal flusso relativo al processo in esame, ovvero al valore attuale netto (NPV) secondo l'equazione 2-2.2.

$$NPEI = -NPV = -I + \sum_t \frac{A_{c,t}}{(1+i)^t} \quad 2-2.2$$

Mentre per quanto riguarda l'impatto sulla sicurezza intrinseca, esso è misurato tramite il KPI *inherent hazard index*<sup>[50]</sup>, che si basa sulle distanze di danno ( $h_{i,k}$ ), calcolate in funzione del quantitativo di sostanza contenuto nell'apparecchiatura, e sulla credibilità d'accadimento ( $c_{f_{i,j}}$ ) dell'evento, secondo l'equazione 2-2.3.

$$IS = \sum_j \sum_i h_{i,j}^2 \cdot c_{f_{i,j}} \quad 2-2.3$$

Le espressioni di tutti i KPI proposti dalla letteratura ed impiegati nel presente lavoro sono riportate in appendice A.

### 2.2.1.3. Normalizzazione ed aggregazione

Gli indicatori introdotti per ciascuna tipologia d'impatto consentono di comparare i diversi aspetti delle alternative, ma è anche necessario effettuare una valutazione del contributo relativo che le alternative hanno sull'impatto globale nel territorio in cui è situato l'impianto produttivo. Questo è possibile grazie al fattore di normalizzazione, che è anche indispensabile per la successiva aggregazione e per una corretta interpretazione dei risultati.

Nello studio<sup>[51]</sup> i fattori di normalizzazione sono valutati in relazione all'area soggetta alle conseguenze dell'impatto. In particolare sono calcolati secondo l'equazione 2-2.4, e rappresentano l'impatto per unità d'area delle singole categorie definite nell'albero. Questo consente di comprendere se le alternative si collocano o meno in un contesto fortemente critico per la sostenibilità.

$$NF_i = \frac{\sum_{s \in A_{rif}} E_{s,i}}{A_{rif}} \quad 2-2.4$$

In Tabella 2–1 sono riportati i valori del fattore di normalizzazione, definiti in letteratura<sup>[51]</sup>, di alcuni dei singoli impatti primari, prendendo a riferimento la zona industriale di una città dell'Italia settentrionale.

	<b>Impatto</b>	<b>Fattore di normalizzazione</b>
Environment	Global warming	$1.16 \cdot 10^6 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$
	Rain acidification	$4.83 \cdot 10^3 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$
	Smog formation	$5.53 \cdot 10^3 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$
	Toxicity in air	$3.77 \cdot 10^5 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$
	Carcinogenicity in air	$1.01 \cdot 10^2 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$
	Organic load	$1.79 \cdot 10^7 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$
	Toxicity in water	$2.80 \cdot 10^2 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$
	Solid waste disposal	$2.32 \cdot 10^5 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$
	Raw materials	$3.51 \cdot 10^5 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$
	Electrical power	$1.10 \cdot 10^6 \text{ kWh}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$
	Land use	$2.34 \cdot 10^{-5} \text{ y}^{-1}$
Economy	NPEI	$3.40 \cdot 10^7 \text{ €/km}^2$
Society	Toxicity of fugitive emissions	$3.77 \cdot 10^5 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$
	Carcinogenicity of fugitive emissions	$1.01 \cdot 10^2 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$
	Occupation	$7.92 \cdot 10^1 \text{ people/km}^2$
	Inherent safety	$6.00 \cdot 10^{-6} \text{ y}^{-1}$

Tabella 2–1 – Fattori di normalizzazione per alcuni impatti primari

L'elevato numero d'impatti da analizzare è indispensabile per descrivere correttamente le alternative di processo ma per una migliore e più immediata comprensione delle differenze è necessario limitarne il numero. Per questo motivo, dopo la normalizzazione, il metodo proposto in letteratura prevede l'aggregazione degli impatti primari normalizzati ( $NI_{i,k}$ ) di ogni categoria, seguendo la gerarchia definita con l'albero degli impatti, assegnando ad ognuno un peso ( $W_i$ ), secondo l'equazione 2–2.5.

$$I_{agg,k} = \sum_i W_i \cdot NI_{i,k} = \sum_i W_i \frac{I_{i,k}}{NF_i} \quad 2-2.5$$

L'aggregazione si basa su fattori che esprimono l'importanza relativa dei singoli impatti primari afferenti alla medesima categoria. Pertanto i fattori d'aggregazione quantificano l'influenza delle politiche di sostenibilità sulla riduzione dello specifico impatto e risultano indipendenti dalle alternative.

Il metodo propone per la valutazione numerica dei fattori d'aggregazione la formula 2-2.6, dalla quale emerge che ogni fattore dipende dal tasso di riduzione degli impatti ( $r_i$ ) primari considerati rispetto alla sommatoria di tutti i tassi di riduzione degli impatti afferenti alla medesima categoria.

$$W_i = \frac{r_i}{\sum r_i} \quad 2-2.6$$

In Tabella 2-2 sono riportati i valori dei fattori d'aggregazione per alcuni degli impatti primari definiti in letteratura<sup>[51]</sup>.

	<b>Impatto</b>	<b>Fattore d'aggregazione</b>
Environment	Global warming	0.051
	Rain acidification	0.066
	Smog formation	0.049
	Toxicity in air	0.095
	Carcinogenicity in air	0.168
	Organic load	0.020
	Toxicity in water	0.095
	Carcinogenicity in water	0.168
	Solid waste disposal	0.030
	Non renewable raw materials	0.044
	Renewable raw material	0.004
	Electrical power	0.064
	Land use	0.058
Economy	NPEI	1
Society	Toxicity of fugitive emissions	0.36
	Carcinogenicity of fugitive emissions	0.64
	Occupation	0.20
	Inherent safety	0.80

**Tabella 2-2 – Fattori d'aggregazione per alcuni impatti primari**

#### 2.2.1.4. Semplificazione e quantificazione

Le ultime fasi del metodo sono dedicate alla valutazione e quantificazione degli indicatori specifici per le alternative da analizzare.

Gli impatti discussi in precedenza e fissati nell'albero sono, come detto, necessari alla corretta descrizione di un generico processo, ma molto spesso risulta difficile la loro totale applicazione. Infatti non tutti i processi presentano caratteristiche che comportino impatti in tutte le categorie primarie individuate dal metodo; ad esempio un processo che produce unicamente rifiuti solidi intrinsecamente non può avere impatti sull'ambiente acquatico.

Oltre all'impossibilità, per via delle caratteristiche del processo, di causare determinati impatti primari, è possibile che alcuni di questi siano predominanti rispetto ad altri. Questo, ovviamente, perché gli impatti primari concorrono in modo differente alla sostenibilità globale del processo.

Per questi motivi il metodo, opportunamente, suggerisce di eseguire una semplificazione dell'albero in modo da escludere gli impatti non pertinenti al processo esaminato. Inoltre suggerisce di effettuare una stima di massima degli impatti così da determinarne l'ordine di grandezza. Confrontandolo con l'ordine di grandezza del fattore di normalizzazione è possibile valutare gli impatti più rilevanti per la sostenibilità. Questo permette di compiere un'ulteriore scrematura così da valutare nel dettaglio solo i KPI degli impatti significativi, garantendo una riduzione dei costi d'analisi, senza inficiarne l'affidabilità.



Figura 2-4 – Fasi della semplificazione dell'albero degli impatti

### 2.3. Bottleneck indicators

Il metodo di valutazione della sostenibilità presente in letteratura è applicabile in qualunque frangente di scelta fra più alternative tecniche per la soluzione ad un problema, anche in fase di sbottigliamento d'impianto, ma non permette di comprendere se esso è necessario o meno.

Con sbottigliamento s'intendono tutte quelle azioni migliorative su di una linea produttiva che consentono l'individuazione e la sostituzione di quelle apparecchiature che, proprio come il collo della bottiglia di Coca-Cola da cui trae il nome l'attività, limitano il flusso di materia verso il prodotto finito, come illustrato schematicamente in Figura 2-5.

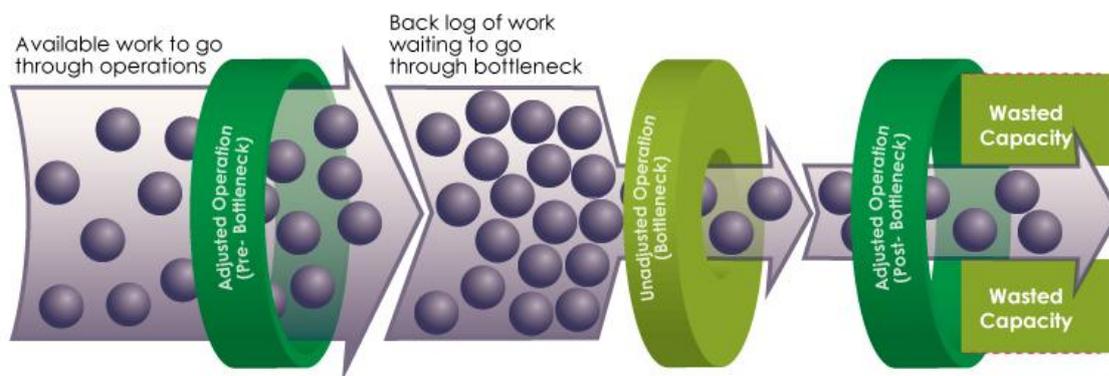


Figura 2-5 – Effetti dei colli di bottiglia sul flusso produttivo in una linea

Normalmente questa attività prevede lo studio di dettaglio, con simulazioni termo-fluidodinamiche, dell'intera linea di processo e delle singole apparecchiature per determinare lo stato d'utilizzo ed i margini d'incremento dello sfruttamento, ovvero quali siano le apparecchiature cui possono essere imputati i limiti di produttività. Ciò necessariamente comporta sostenere elevati costi per il reperimento e l'elaborazione dei dati che spesso non si tramutano in vantaggi concreti nell'ottica dell'incremento delle potenzialità produttive.

Risulta pertanto opportuno introdurre degli indici a supporto di tale analisi per avere un'indicazione di massima sulla necessità di sbottigliare la linea. Indici che si devono basare su dati facilmente reperibili e che, pertanto, consentono d'interpretare semplicemente il funzionamento di un'apparecchiatura o di una linea dal punto di vista dell'analisi dei colli di bottiglia, e determinare quando sia realmente necessario un approfondimento del processo mediante le simulazioni fluidodinamiche, riducendole all'essenziale.

### 2.3.1. Process effectiveness

Il primo punto fondamentale in un'analisi di sbottigliamento è capire lo sfruttamento di una linea produttiva, in altre parole determinare quale sia la reale potenzialità utilizzata in confronto a quella massima.

Con potenzialità utilizzata ( $m_{cpr}$ ) s'intende la quantità di sostanza prodotta in un determinato intervallo da una linea produttiva. Questa ovviamente può non essere, e non lo è quasi mai, uguale alla sua massima capacità ( $m_{cpm}$ ), ovvero alla quantità di sostanza che la linea è in grado di produrre operando ininterrottamente alla sua massima produttività per un determinato periodo. Massima produttività che è calcolata su base giornaliera come media di sette giorni consecutivi di produzione ottimale, così da minimizzare le incertezze.

Lo sfruttamento della linea quindi viene valutato mediante l'indicatore denominato *process effectiveness* (PE), definito in equazione 2–3.1.

$$PE = \frac{m_{cpr}}{m_{cpm}} \quad 2-3.1$$

Grazie a questo indice si può determinare lo stato di salute di una linea produttiva; infatti il complemento ad uno di tale KPI rappresenta il peso complessivo delle perdite che causano la mancata produzione.

Nell'ottica dello sbottigliamento è utile analizzare nel dettaglio queste perdite poiché sono loro a determinare uno sfruttamento inadeguato della linea.

Poiché le perdite sono molteplici e di varia natura, è opportuno ai fini dello studio suddividerle in macro-categorie prima d'analizzarle in dettaglio.

Le perdite possono essere classificate in funzione della loro prevedibilità in perdite attese, ovvero di cui si può ragionevolmente supporre l'insorgenza da dati storici e quindi possono essere pianificate, e in perdite inaspettate, vale a dire che sono causate da tutti quegli imprevisti tecnici, operativi o di qualità non verosimili dall'analisi dei dati storici.

L'altra classificazione delle perdite è effettuata in base alla localizzazione delle cause di mancato funzionamento. Queste possono essere di natura endogena, ovvero sia verificarsi all'interno della linea analizzata, oppure esogena, cioè avvenire in un'altra linea, come le *utilities*, e ripercuotersi sulla linea in esame.

Sono pertanto proposte quattro categorie di classificazione con relativi indicatori di prestazioni secondo le seguenti equazioni:

- pianificate interne: equazione 2–3.2;
- pianificate esterne: equazione 2–3.3;
- inaspettate interne: equazione 2–3.4;
- inaspettate esterne: equazione 2–3.5.

$$EXP_{int} = \frac{m_{sd,int}}{m_{cpm}} \quad 2-3.2$$

$$EXP_{ext} = \frac{m_{sd,ext}}{m_{cpm}} \quad 2-3.3$$

$$UNE_{int} = \frac{m_{un,int}}{m_{cpm}} \quad 2-3.4$$

$$UNE_{ext} = \frac{m_{un,ext}}{m_{cpm}} \quad 2-3.5$$

Grazie a questa suddivisione è possibile individuare le cause primarie di mancata produzione andando ad analizzare unicamente quelle rilevanti e ciò permette di comprendere cosa è realmente necessario per un efficace ed efficiente sbottigliamento senza necessità di studi dispersivi. Infatti si individua quali siano le linee su cui soffermarsi nell'approfondire l'indagine e quali siano le competenze tecniche da acquisire o approfondire per trovare le soluzioni.

Un altro aspetto estremamente importante è legato alla manutenzione. In fase d'analisi è infatti molto significativo comprendere il peso della manutenzione sulle perdite. Per farlo si introduce un ulteriore indice che, in funzione della quantità di sostanza non prodotta per interventi manutentivi ( $m_{mtz}$ ) realizzati sulla linea, fornisce l'indicazione circa l'incidenza sulla produzione della necessità di effettuare la manutenzione, equazione 2–3.6, evidenziando così se sono presenti malfunzionamenti significativi delle apparecchiature.

$$MTZ = \frac{m_{mtz}}{m_{cpm}} \quad 2-3.6$$

### 2.3.2. Equipment effectiveness

L'indice proposto precedentemente permette di comprendere le cause che impediscono il completo sfruttamento della linea, ma non consente d'individuare il collo di bottiglia; risentendone unicamente la presenza giacché determina la massima capacità produttiva raggiungibile dalla linea.

Infatti nel caso si voglia effettuare un incremento di capacità, oltre la massima prevista, l'indice così strutturato non permette un'adeguata analisi.

È necessario, infatti, studiare non solo il comportamento della linea nel suo insieme ma soffermarsi anche ad analizzare le prestazioni delle singole apparecchiature che la compongono, per comprendere quali siano quelle che limitano la capacità produttiva.

S'introduce, pertanto, un secondo indice adatto allo studio di sbottigliamento. Esso serve per quantificare lo sfruttamento delle singole apparecchiature rispetto alle caratteristiche di progettazione fluidodinamica, basandosi sulla portata realmente processata ( $\dot{m}_R$ ) e quella teorica ( $\dot{m}_T$ ) per la quale è stata costruita l'apparecchiatura. L'indice così definito è chiamato *equipment effectiveness* (EE) ed assume la forma dell'equazione 2-3.7.

$$EE = \frac{\dot{m}_R}{\dot{m}_T} \quad 2-3.7$$

Come risultato questo indice fornisce lo stato di salute delle singole apparecchiature indicando se sono più o meno sfruttate rispetto alla progettazione, ma non esprime nulla in merito all'adeguatezza dell'apparecchiatura in relazione alla linea in esame.

Questo invece è un aspetto fondamentale in quanto un'apparecchiatura può essere un collo di bottiglia non solo perché è sovra sfruttata per le sue potenzialità ma anche perché limita le potenzialità delle altre apparecchiature.

Al fine di comprendere lo stato di salute delle singole apparecchiature in relazione alla linea produttiva nelle quali sono installate e, quindi, la capacità di sbottigliamento dell'intero processo, è necessario introdurre l'indice *equipment effectiveness* medio, equazione 2-3.8, che permette di comprendere se un'apparecchiatura sia sfruttata nell'ottica della linea produttiva.

$$\overline{EE} = \frac{\sum_i EE_i}{N_A}$$

2-3.8

Il valore di questo indice, insieme al valore unitario, rappresenta il termine di confronto degli *equipment effectiveness* delle singole apparecchiature. Infatti se da una parte indici superiori all'unità indicano apparecchiature che trattano portate superiori a quelle di progetto e quindi sono colli di bottiglia assoluti, apparecchiature con indici superiori all'indice medio sono si adeguate all'impiego ma rappresentano un ostacolo allo sfruttamento delle potenzialità delle altre apparecchiature e quindi sono colli di bottiglia relativi.

Il confronto degli indici delle singole apparecchiature con quello medio consente altresì di comprendere se una linea è ben progettata.

Una linea, soprattutto se ha già subito opere di sbottigliamento, non può essere caratterizzata da apparecchiature progettate perfettamente per la portata prevista, inoltre ognuna di esse presenta margini di sicurezza differenti a seconda dell'operazione unitaria e della tipologia costruttiva. Per questo motivo non è possibile attendere che abbiano il medesimo indice, ma è importante che i valori di *equipment effectiveness* per ogni apparecchiatura siano prossimi all'indice medio, come da Grafico 2-1. Una distribuzione prossima all'indice medio, infatti, significa che tutte le apparecchiature sono adeguate all'impiego.

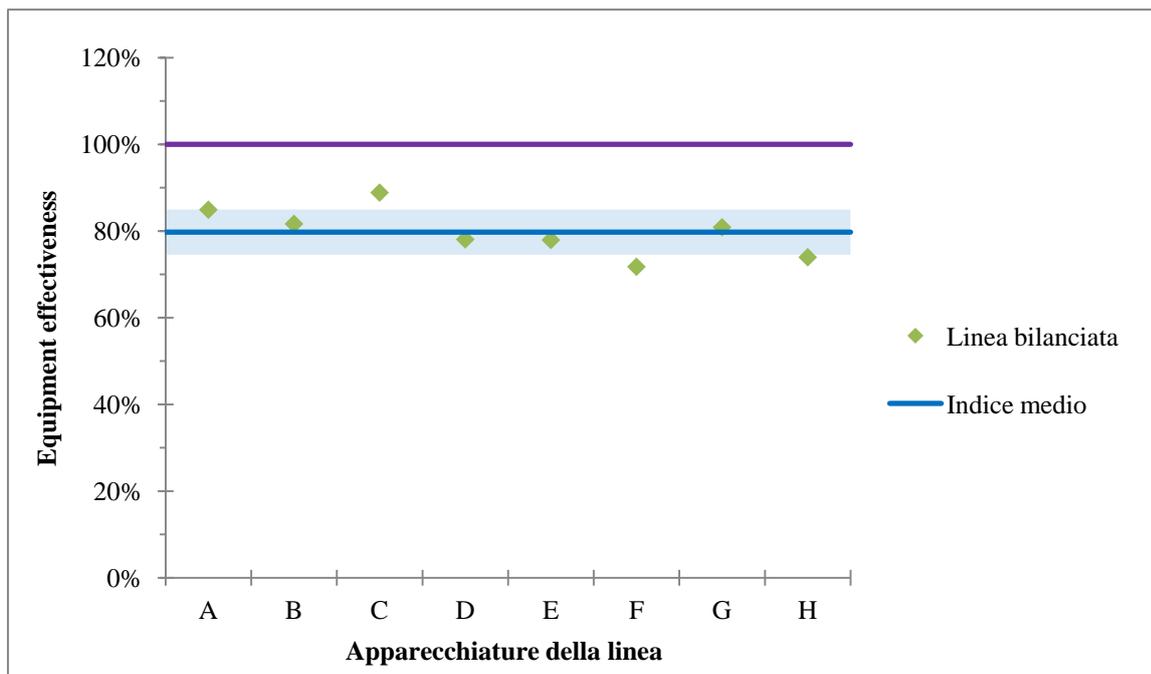


Grafico 2-1 – Linea produttiva bilanciata

Di contro se fosse troppo distante, si avrebbero apparecchi più o meno sfruttati come si può riscontrare nel Grafico 2-2, in cui è rappresentata una linea produttiva con medesimo indice medio di quella bilanciata analizzata nel grafico precedente. In questo caso si evince chiaramente che le apparecchiature non sono ottimizzate in relazione al processo per cui sono impiegate.

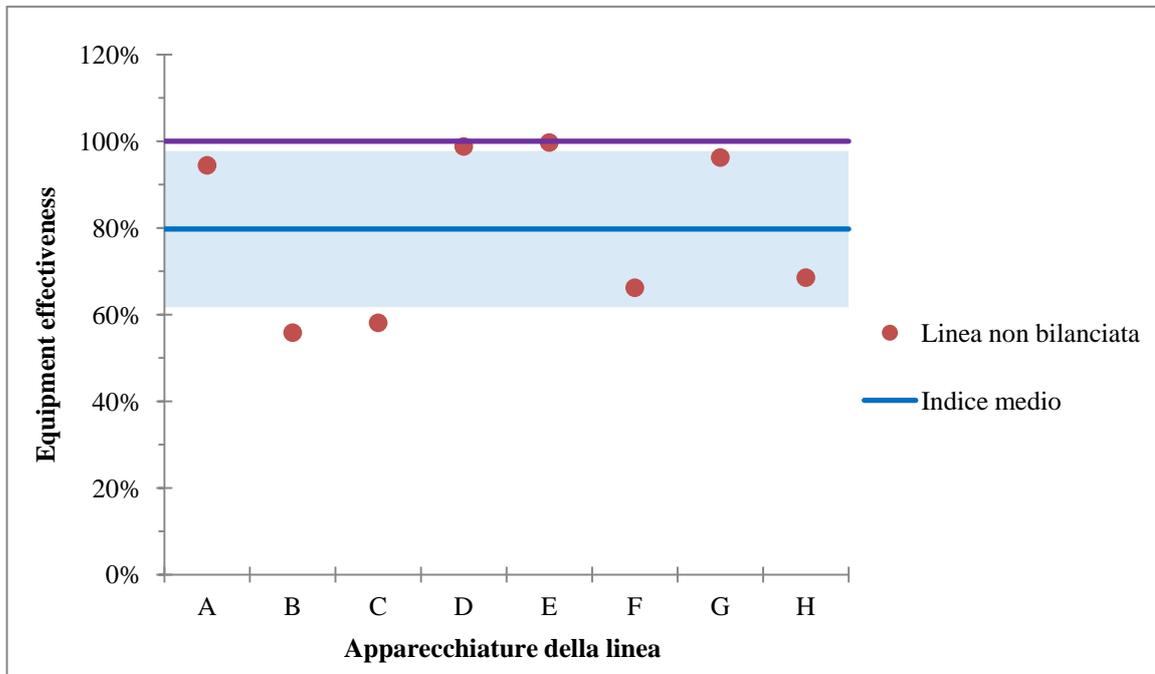


Grafico 2-2 - Linea produttiva non bilanciata

Il bilanciamento di una linea produttiva può essere espresso in relazione all'*equipment effectiveness* mediante l'indice definito con l'equazione 2-3.9.

$$BL = 1 - \sqrt{\frac{\sum_i (EE_i - \overline{EE})^2}{N}}$$
2-3.9

Esso rappresenta il complemento ad uno della deviazione standard degli indici delle apparecchiature. Ciò significa che più quest'indice è prossimo all'unità, minore sarà la differenza di sfruttamento fra le varie apparecchiature.

Un elevato bilanciamento della linea è sinonimo di corretto dimensionamento delle singole apparecchiature per l'applicazione in cui sono impiegate. Da ciò deriva una considerazione d'aspetto economico. Infatti se la linea non fosse bilanciata si avrebbero apparecchiature estremamente sovradimensionate con ingente esborso economico che non vengono sfruttate completamente. Così come si hanno apparecchi prossimi al totale sfruttamento che hanno richiesto un basso investimento, ma non possono sostenere improvvisi picchi produttivi.

Altra indicazione alla corretta progettazione è il valore dell'indice medio stesso, come illustrato nel Grafico 2-3. Esso deve essere alto, valori ottimali sono intorno a 0.7 – 0.8, ma non troppo prossimo all'unità. Questo significa che la linea produttiva è ben sfruttata ma presenta un certo margine che permette d'assorbire picchi di richiesta produttiva. Una linea non deve essere progettata al limite della capacità richiesta né deve essere dimensionata con troppo margine poiché ciò comporta investimenti eccessivi senza un reale ritorno economico.

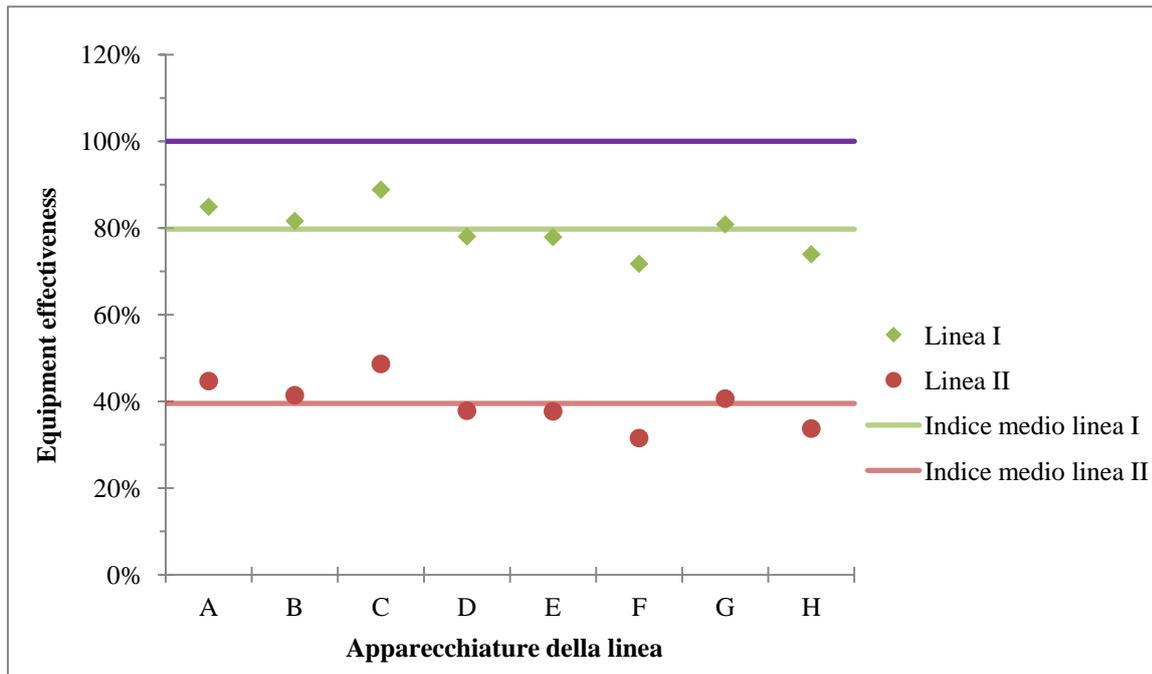


Grafico 2-3 – Linea produttiva sfruttata correttamente (verde) e non (rossa)

L'ultima indicazione ricavabile dall'indice è nuovamente di natura economica; infatti la capacità utilizzata è direttamente correlata agli investimenti richiesti per lo sbottigliamento della linea produttiva. Se un'apparecchiatura presenta un indice molto basso significa che ha ampi margini d'incremento produttivo senza necessitare d'investimenti, o al più essi sono molto ridotti. Di contro quando l'indice è superiore all'unità l'apparecchiatura è inadeguata per l'utilizzo e deve essere necessariamente sostituita con ingenti investimenti economici.

La situazione intermedia si verifica quando un'apparecchiatura presenta un indice elevato, superiore a quello medio ma inferiore all'unità. In questo caso l'investimento dipende da quanto deve essere significativo lo sbottigliamento. Se l'incremento rientra nei margini dell'apparecchiatura, l'investimento sarà contenuto, altrimenti si dovrà provvedere alla sostituzione dell'apparecchiatura con ingenti esborsi economici.

## 2.4. Area hazard indicators

Oggigiorno la riduzione delle emissioni in atmosfera è un tema molto sentito ed è stato affrontato nel corso degli anni da varie convenzioni e protocolli internazionali. Il successo di tali iniziative, molto spesso volontarie, ha portato efficacemente alla drastica riduzione della quantità totale di COV<sup>1</sup> emessi.

Analizzando i risultati è però emerso che le riduzioni sono state apportate unicamente ad una determinata categoria d'emissione, quelle coinvolgiate, facilmente controllabili. Questa selettività nella riduzione ha fatto sì che il peso relativo di una categoria d'emissioni fino a quel momento meno significativa diventasse non più trascurabile nell'ottica della salubrità ambientale. Risulta pertanto di fondamentale importanza approfondire gli impatti specifici di queste emissioni nell'ottica della sostenibilità globale di un processo, integrando questi aspetti nel metodo dei KPI di sostenibilità, descritto nel capitolo 2.2. Questi peculiari rilasci che hanno assunto grande rilevanza sono le emissioni fuggitive.

### 2.4.1. Emissioni fuggitive

Un'emissione, dal punto di vista legale<sup>[16]</sup>, per quanto concerne l'aspetto di valutazione ambientale, è una «qualsiasi sostanza solida, liquida o gassosa introdotta nell'atmosfera che possa causare inquinamento e, per le attività di cui all'articolo 275, qualsiasi scarico, diretto o indiretto, di COV nell'ambiente».

Queste correnti di materia verso l'ambiente, sempre per legge<sup>[16][19]</sup>, sono suddivise in funzione della modalità con cui vengono rilasciate in atmosfera.

Secondo l'articolo 268 del decreto legislativo del 3 aprile 2006, n. 152, l'emissione può essere ripartita in due tipologie:

- convogliata: viene definita, al comma 1 lettera c, come «emissione di un effluente gassoso effettuata attraverso uno o più appositi punti.»;
- diffusa: definita al comma 1 lettera d, come «emissione diversa da quella ricadente nella lettera c); per la lavorazione di cui all'articolo 275 le emissioni diffuse includono anche i COV contenuti negli scarichi idrici, nei rifiuti e nei prodotti [...]».

---

<sup>1</sup> Composto organico volatile

Secondo il decreto ministeriale del 31 gennaio 2005, invece, le emissioni possono essere definite, in modo ingegneristico, in tre categorie:

- convogliate: «emissioni di inquinante nell'ambiente attraverso ogni tipologia di condotto, indipendentemente dalla forma della sezione trasversale. La possibilità di misurare le portate e le concentrazioni è determinante per decidere se un'emissione è convogliata.»;
- diffuse: «emissioni derivanti da un contatto diretto di sostanze volatili e polveri leggere con l'ambiente, in condizioni operative normali di funzionamento. [...] Le fonti di emissioni diffuse possono avere origine puntuale, lineare, di superficie o di volume. I diversi tipi di emissione all'interno di un edificio sono normalmente considerate diffuse, mentre lo scarico da un sistema di ventilazione (aspirazione) viene considerato come emissione convogliata»;
- fuggitive: «emissioni nell'ambiente risultanti da una perdita graduale di tenuta di una parte delle apparecchiature designate a contenere un fluido (gassoso o liquido), questo è causato generalmente da una differenza di pressione e dalla perdita risultante. Esempi di emissioni fuggitive includono perdite da una flangia, da una pompa o da una parte delle apparecchiature e perdita dai depositi gassosi o liquidi».

La particolare classe delle emissioni fuggitive riveste un ruolo fondamentale per chi si occupa della valutazione della sicurezza e salute del luogo di lavoro, nelle sue normali condizioni di funzionamento. Infatti, la portata di sostanza emessa dalla graduale perdita di tenuta comporta un incremento, verso le soglie di massima esposizione per i lavoratori, della sua concentrazione nell'atmosfera degli spazi caratterizzati da una bassa ventilazione all'interno dei fabbricati, che contengono gli impianti industriali. In particolare, questa tipologia di emissioni non convogliate né controllate, influisce sulla formazione di atmosfere esplosive, quando sono rilasciate sostanze infiammabili, e sulla salubrità dell'ambiente di lavoro, quando le sostanze sono tossiche o cancerogene.

Proprio per valutare questi aspetti in maniera oggettiva, s'introducono nuovi indicatori di prestazione che permettono di stabilire effettivamente la potenziale pericolosità di un'emissione fuggitiva e il suo impatto nella sostenibilità globale del processo analizzato.

## 2.4.2. Healthiness of fugitive emissions

Il primo impatto d'interesse per le emissioni fuggitive, riguardante la categoria della sicurezza e salute del luogo di lavoro, non considerato dal metodo degli indicatori, è legato alla pericolosità per la salute umana delle sostanze.

In un impianto industriale, infatti, i lavoratori possono essere esposti a sostanze di varia natura e pericolosità in vari modi, il più probabile dei quali è l'inalazione. La periodica esposizione degli operatori all'atmosfera contaminata dalle emissioni fuggitive può risultare problematica poiché non necessariamente le vie respiratorie sono protette, come pelle od occhi, con appositi dispositivi di protezione individuale durante le normali attività.

Nel modello ad indicatori di sostenibilità sono già considerati gli aspetti di tossicità acuta e cancerogenicità delle emissioni fuggitive, ma il primo si sofferma unicamente sugli effetti immediati dell'interazione fra le sostanze e l'uomo, mentre il secondo approfondisce solamente conseguenze a lungo termine sulla salute umana dell'esposizione a sostanze cancerogene.

Risulta chiaro che è necessario considerare anche l'aspetto della tossicità cronica ovvero gli effetti dell'interazione dell'organismo umano con le sostanze non cancerogene per un'esposizione prolungata ma a concentrazioni inferiori alla soglia di letalità, espressa solitamente mediante la concentrazione letale (LC<sub>50</sub>).

Il problema dell'esposizione prolungata e ripetuta a sostanze è un tema fortemente approfondito e normato; molti enti nazionali, come l'ACGIH<sup>2</sup>, il NIOSH<sup>3</sup> o l'OSHA<sup>4</sup>, forniscono i valori di concentrazione soglia proprio per queste tipologie d'esposizione, il più importante dei quali è il TLV-TWA<sup>5</sup>, ripresi dalle più rilevanti pubblicazioni<sup>[37]</sup>. Il TLV-TWA, infatti, rappresenta il valore di concentrazione alla quale un lavoratore può essere esposto continuativamente nell'arco della vita lavorativa senza subire danni alla salute.

In analogia all'impatto della tossicità acuta (TFE), descritto mediante il KPI riportato in equazione 2–4.1, che esprime la portata di toluene equivalente in funzione del parametro caratterizzante la tossicità acuta — la concentrazione

---

<sup>2</sup> American Conference of Governmental Industrial Hygienists

<sup>3</sup> National Institute for Occupational Safety and Health

<sup>4</sup> Occupational Safety and Health Administration

<sup>5</sup> Threshold Limit Value Time Weighted Average

letale — è possibile definire il KPI *healthiness of fugitive emissions* (HFE) per quantificare l'impatto della tossicità cronica, equazione 2–4.2, considerando l'equivalenza al toluene delle sostanze emesse in funzione del valore limite di soglia TLV-TWA, che per il toluene risulta essere pari a 100 ppm<sub>v</sub>.

$$TFE = \sum_z E_z \frac{LC_{50, \text{toluene}}}{LC_{50, z}} \quad 2-4.1$$

$$HFE = \sum_z E_z \frac{TLV - TWA_{\text{toluene}}}{TLV - TWA_z} \quad 2-4.2$$

L'indice così definito consente di quantificare l'impatto di tutte le emissioni fuggitive di un impianto sulla salute umana per un periodo d'esposizione prolungato, come la vita lavorativa.

Per completezza d'analisi risulta interessante anche poter valutare quale sia la zona di fabbricato che presenta le condizioni d'igiene ambientale peggiori.

Per farlo, a supporto del precedente, si introduce il KPI *healthiness of fugitive emissions concentration* (HFEC) definito come rapporto fra la concentrazione locale ed il valore limite soglia delle sostanza, secondo l'equazione 2–4.3.

$$HFEC_{z,k} = \frac{c_{z,k}}{TLV - TWA_z} \quad 2-4.3$$

Effettuando la sommatoria per tutte le sostanze, secondo l'equazione 2–4.4, tenendo conto dei possibili effetti sinergici ( $\xi_z$ ), è possibile confrontare le prestazioni d'igiene ambientale delle singole zone che compongono il fabbricato, dove è situato l'impianto, e di conseguenza individuarne quali siano quelle che necessitano di un intervento di riduzione della quantità emessa o d'incremento della ventilazione per rispettare gli obiettivi prefissati.

$$HFEC_k = \sum_z \xi_z \frac{c_{z,k}}{TLV - TWA_z} \quad 2-4.4$$

Questi vincoli sono sovente molto più stringenti dei valori di legge così da garantire che nelle normali condizioni di processo si sia estremamente lontano dalle condizioni di pericolo; nel presente lavoro si assumono accettabili soluzioni tecniche che garantiscono zone con indice inferiore a 0.1.

### 2.4.3. Flammability of fugitive emissions

Il secondo impatto delle emissioni fuggitive, che è opportuno considerare nella definizione del metodo degli indicatori di sostenibilità, riguarda la tendenza delle sostanze rilasciate a formare una miscela esplosiva con l'aria.

Negli impianti industriali molto spesso il fattore controllante nel triangolo del fuoco è la presenza del combustibile, infatti il comburente è inevitabilmente sempre presente con l'aria atmosferica, in concentrazioni prossime al 21%, e non si può escludere la presenza d'innesco — le minime energie d'innesco delle sostanze sono estremamente contenute che di frequente è sufficiente lo strofinio di una suola per garantire l'innesco della nube.

Da questo si desume che non unicamente i rilasci di grande entità, a seguito di un evento incidentale, possono generare nubi di sostanze infiammabili in campo d'esplosività, ma in determinate circostanze anche le emissioni fuggitive possono concorrere attivamente a questo scenario.

Questo contributo riveste un ruolo fondamentale nell'ottica della salute e sicurezza del luogo di lavoro ed è di particolare interesse nell'ambito della direttiva europea ATEX<sup>6[20]</sup> per la classificazione delle aree a rischio d'esplosione. Pertanto, dal punto di vista della sostenibilità globale, è opportuno introdurre un impatto che si prefigge di quantificare se i rilasci di sostanze infiammabili, sotto forma di emissioni fuggitive, all'interno di fabbricati, siano sufficienti da poter generare delle potenziali zone d'infiammabilità.

L'impatto così definito può essere valutato mediante un indicatore di prestazione che esprima l'infiammabilità equivalente di tutte le sostanze emesse in un anno.

La sostanza di riferimento scelta è la benzina sia per la sua elevata tendenza all'infiammabilità (LFL = 1.2% in aria<sup>[37]</sup>) sia per il fatto che è uno dei più comuni e diffusi combustibili sul territorio nazionale.

In base a questo il KPI di riferimento, denominato *flammability of fugitive emissions* (FFE), si può esprimere grazie all'equazione 2–4.5.

$$FFE = \sum_z E_z \frac{LFL_{gasoline}}{LFL_z} \quad 2-4.5$$

---

<sup>6</sup> ATmosphères EXplosibles

Dove  $E_z$  rappresenta la portata annua della sostanza infiammabile z-esima rilasciata come emissione fuggitiva nell'impianto d'interesse per l'analisi e  $LFL_z$  il relativo limite inferiore d'infiammabilità in aria.

L'indice così definito fornisce un'indicazione circa la tendenza globale all'infiammabilità delle emissioni fuggitive nell'intero impianto analizzato.

Come nel caso precedente, per una maggiore completezza d'analisi è possibile definire un ulteriore indicatore, a supporto del FFE, che permetta d'individuare le zone del fabbricato che sono più soggette alla formazione localizzata di una miscela all'interno dei limiti d'infiammabilità.

Pertanto, analogamente al precedente indice, questo nuovo indicatore sarà definito come il rapporto fra la concentrazione della sostanza emessa in una determinata zona del fabbricato il suo limite inferiore d'infiammabilità, che per l'appunto è il termine di paragone fra le sostanze infiammabili.

Questo indicatore denominato *flammability of fugitive emissions concentration* (FFEC), assumerà quindi la forma presentata nell'equazione 2-4.6:

$$FFEC_{z,k} = \frac{c_{z,k}}{LFL_z} \quad 2-4.6$$

Mantenendo l'analogia con l'indice introdotto nel precedente paragrafo, anche in questo caso per poter effettuare il confronto fra le differenti zone del fabbricato è necessario provvedere alla sommatoria di tutti i contributi all'infiammabilità delle sostanze emesse, secondo l'equazione 2-4.7, senza considerare gli effetti sinergici in quanto le caratteristiche d'infiammabilità sono semplicemente additive secondo la regola di miscelazione di Le Châtelier<sup>[39]</sup>.

$$FFEC_k = \sum_z \frac{c_{z,k}}{LFL_z} \quad 2-4.7$$

Questo indice permette di individuare tutte quelle zone in cui la combinazione fra l'elevata quantità di sostanza emessa e la bassa ventilazione favorisce il raggiungimento delle condizioni d'infiammabilità della miscela e, quindi, di determinare in fase progettuale quali siano quelle zone su cui apportare variazioni per migliorarne la sostenibilità. Nuovamente si assumono accettabili soluzioni tecniche che garantiscono zone con indice inferiore a 0.1.

## 2.4.4. Integrazione nel modello esistente

In due nuovi impatti relativi alle emissioni fuggitive, precedentemente definiti, vanno ad integrare l'albero degli impatti proposto nel metodo dei KPI di sostenibilità nella categoria *Workplace*, come illustrato in Figura 2-6.

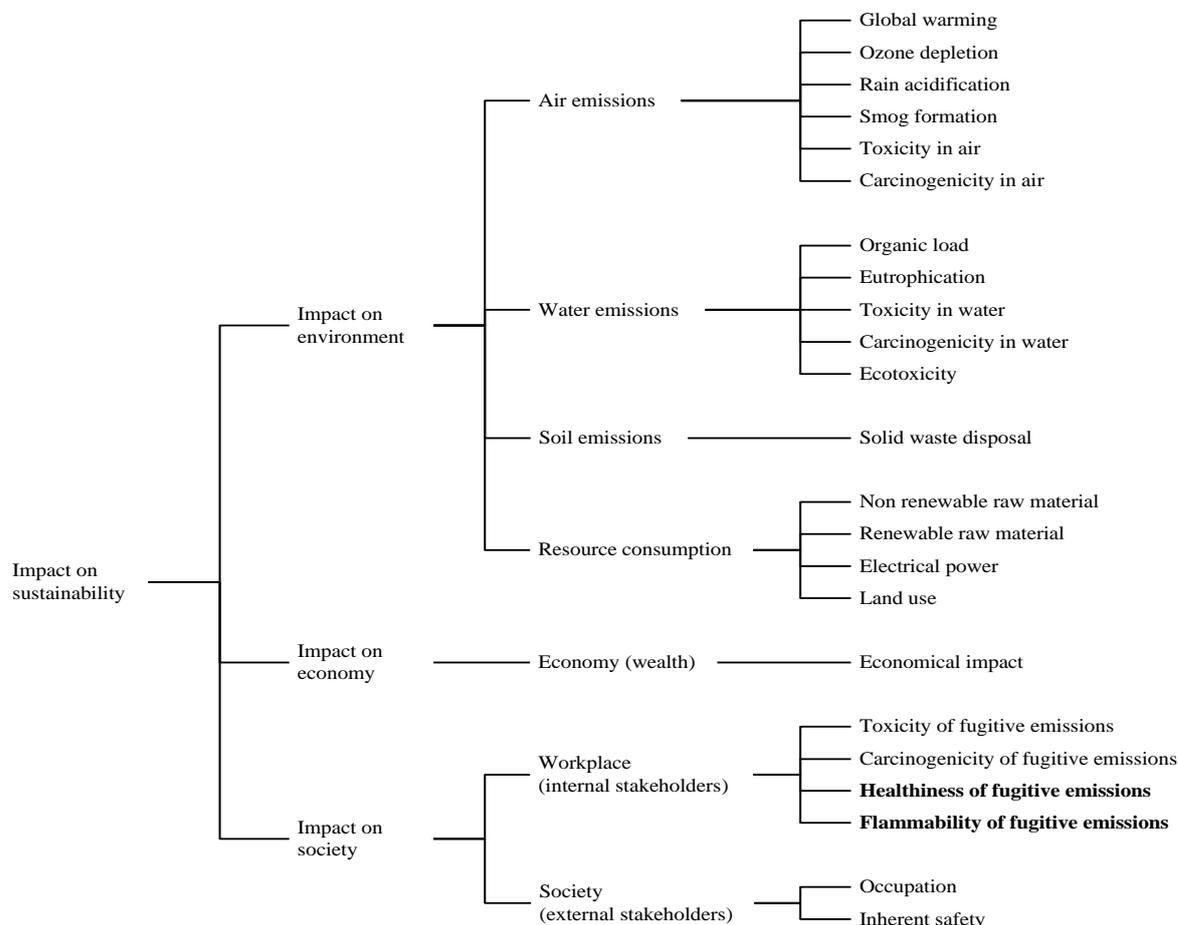


Figura 2-6 – Albero degli impatti modificato con l'introduzione delle nuove categorie

Per la loro applicazione all'interno del modello dei KPI di sostenibilità è necessario introdurre sia i fattori di normalizzazione che permettono il confronto dei risultati ottenuti con le condizioni esistenti nell'area di riferimento dello stabilimento produttivo, sia i fattori d'aggregazione che consentono di pesare l'entità dell'impatto stesso rispetto agli altri presenti nella categoria.

Per quanto riguarda il fattore di normalizzazione, in accordo a quanto presentato nel modello esistente, è opportuno fare riferimento all'intera portata di sostanze infiammabili emessa nell'area dove è localizzato l'impianto produttivo. In questo caso è stata assunta come riferimento l'Italia settentrionale, in quanto l'impianto su cui è stato applicato il metodo è localizzato in quella zona.

Nell'ottica dell'integrazione al modello dei KPI di sostenibilità, per l'aggregazione deve essere sia determinato il fattore per i nuovi impatti in funzione del rateo di riduzione come definito dal modello, equazione 2-2.6, che rivalutato quello degli impatti esistenti poiché, come illustrato precedentemente, i fattori d'aggregazioni degli impatti in una categoria sono interdipendenti. Applicando quanto previsto dal modello, è stato possibile valutare i nuovi fattori, introdotti dalle modifiche proposte, che sono riportati in Tabella 2-3.

<b>Impatto</b>	<b>Fattore di normalizzazione</b>	<b>Fattore d'aggregazione</b>
<i>Toxicity</i> (TFE)	$3.77 \cdot 10^5 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$	0.303
<i>Carcinogenicity</i> (CFE)	$1.01 \cdot 10^2 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$	0.538
<i>Healthiness</i> (HFE)	$4.12 \cdot 10^4 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$	0.051
<i>Flammability</i> (FFE)	$9.39 \cdot 10^4 \text{ kg}_{\text{eq}}/(\text{y} \cdot \text{km}^2)$	0.108

Tabella 2-3 – Fattori di normalizzazione ed aggregazione per le nuove categorie d'impatto

In relazione ai due indicatori di supporto introdotti nei precedenti paragrafi, anch'essi vengono integrati al metodo a KPI di sostenibilità

Come si è evinto dall'analisi di questo modello, infatti, oltre agli indicatori principali che servono a quantificare gli impatti d'interesse è possibile elaborare i dati ottenuti con indicatori supplementari che possono fornire indicazioni importanti ai fini della scelta fra alternative.

L'importanza dell'indicazione fornita dai nuovi indicatori *healthiness of fugitive emissions concentration* (HFEC) e *flammability of fugitive emissions concentration* (FFEC), ha fatto emergere l'opportunità di estendere le considerazioni sulla ricerca delle zone dei fabbricati più soggetta al rischio anche agli aspetti di tossicità acuta e cancerogenicità.

Per farlo si introducono gli indici *toxicity of fugitive emissions concentration* (TFEC), equazione 2-4.8 e *carcinogenicity of fugitive emissions concentration* (CFEC), equazione 2-4.9, con riferimento rispettivamente la dose letale (LC<sub>50</sub>) ed il *cancer slope factor* (CSF) per il confronto delle sostanze.

$$TFEC_k = \sum_z \frac{c_{z,k}}{LC_{50,z}} \quad 2-4.8$$

$$CFEC_k = \sum_z c_{z,k} \cdot CSF_z \quad 2-4.9$$

## 2.4.5. Ventilation model

La valutazione delle condizioni di salubrità del luogo di lavoro richiede la conoscenza del valore di concentrazione delle sostanze pericolose. Essa dipende dalla portata rilasciata come emissione fuggitiva  $E_{z,k}$ , che causa l'accumulo delle sostanze, e dalla ventilazione  $\dot{V}_{aria,k}$ , che ha il compito di disperderle, come descritto nell'equazione 2-4.10.

$$C_{z,k} = \frac{E_{z,k}}{\dot{V}_{aria,k}} \quad 2-4.10$$

Da ciò si deduce che la salubrità di una determinata zona può essere garantita non solo dalla riduzione delle quantità emesse ma anche favorendo il naturale ricambio d'aria in tutte le zone del fabbricato.

In fase progettuale è quindi molto importante considerare questo aspetto, oltre a quello di garantire un'adeguata dissipazione termica per ottenere un microclima favorevole, nella scelta del rateo di ventilazione del fabbricato.

La struttura costruttiva dell'edificio, ad esempio il numero di finestre, la loro disposizione o la presenza d'ostacoli, determina il rateo di ventilazione e, se dall'analisi risulta inadeguato, modificandola permette la sua variazione.

Per una stima nelle fasi iniziali del progetto, se non si ha a disposizione il rateo di ventilazione specifico per l'edificio, si può fare affidamento per una valutazione preliminare ai valori di rateo generici per tipologia di fabbricato, reperibili in letteratura<sup>[11]</sup> e riportati in Figura 2-7.

Locations	Air Changes per Hour
Bakery	12-60
Boiler Room	15-60
Brewery	8-30
Chemical Storage	6-15
Class Room	10-15
Dry Cleaner	10-60
Engine Room	30-60
Factory, light	6-20
Factory, heavy	10-60
Forge	30-60
Foundry	20-60
Auto Garage	6-30
Glass Plant	12-40
Kitchen	20-60
Machine Shop	10-20
Paper Mill	8-30
Plutonium Lab	7-20
Offices	6-20
Restrooms	12-30
Warehouse	4-6

Figura 2-7 – Ratei di ventilazione per alcuni tipi di edifici

Determinato il rateo ( $f$ ) è quindi possibile calcolare la portata d'aria sostituita dalla ventilazione, noto il volume d'aria contenuto nel fabbricato ( $V_{aria,k}$ ) ovvero il volume occupato ( $V_{occ,k}$ ), secondo l'equazione 2-4.11

$$\dot{V}_{aria,k} = f \cdot V_{aria,k} = f \cdot V_k \cdot \left( 1 - \frac{V_{occ,k}}{V_k} \right) \quad 2-4.11$$

Come per il rateo anche il volume d'aria contenuto in un edificio può non essere noto con precisione, infatti bisogna conoscere il volume totale delle apparecchiature e delle tubazioni installate nell'edificio stesso ( $V_{occ,k}$ ) che va a sottrarre spazio all'aria nel volume totale del fabbricato ( $V_k$ ).

Se da un canto il volume delle apparecchiature è facilmente noto in fase progettuale — o approssimabile a quello di un cilindro qualora non fosse stato effettuato il dimensionamento di dettaglio ma fossero note unicamente le dimensioni principali — la vera incognita risulta essere il volume della rete di tubazioni a corredo delle apparecchiature. Essa infatti nei classici impianti industriali occupa un volume non trascurabile ma non completamente noto fino all'installazione. Per tale motivo in questo modello si è deciso di riportare questo valore al volume dell'apparecchiatura per la quale le tubazioni sono installate, secondo l'equazione 2-4.12, mediante un fattore empirico, detto *piping coefficient* ( $\eta$ ), che tiene conto della congestione delle tubazioni.

$$V_{occ,k} = \sum_{app} V_{app,k} (1 + \eta_a) \quad 2-4.12$$

La congestione, espressa mediante il *piping coefficient* in Tabella 2-4, è spesso direttamente correlata alla complessità dell'operazione unitaria per la quale sono impiegate le tubazioni.

Congestione	$\eta$
Nessuna	0
Molto bassa	0.2
Bassa	0.3
Media	0.5
Alta	0.7
Molto alta	0.8

Tabella 2-4 – Coefficiente di congestione delle tubazioni

### **3. APPROCCIO ALLA QUANTIFICAZIONE DELLE EMISSIONI FUGGITIVE**

#### **3.1. Valutazione delle emissioni fuggitive: stato dell'arte**

Come si è evinto dal precedente capitolo, la stima delle emissioni fuggitive è molto importante per valutare alcuni aspetti di sostenibilità, per i processi produttivi nell'industria chimica. Quindi stabilire un metodo di stima accurato è indispensabile per poter disporre di dati affidabili su cui poter prendere decisioni strategiche nella scelta delle alternative progettuali.

Esistono due differenti possibilità di stima delle emissioni fuggitive; la prima è di tipo sperimentale e prevede la misura diretta delle emissioni sull'impianto funzionante — normata a livello sia nazionale che internazionale<sup>[14][33][58]</sup> —, mentre la seconda è di tipo previsionale e si prefigge di quantificare la portata d'emissione fuggitiva anche per impianti non ancora realizzati, basandosi su analisi storiche d'impianti analoghi a quelli d'interesse.

##### **3.1.1. Sorgenti di perdita**

Un'accurata quantificazione della portata delle emissioni fuggitive in un impianto industriale è intrinsecamente legata alle potenziali sorgenti di perdita che le originano. All'interno dell'industria chimica e negli impianti d'interesse IPPC<sup>[21]</sup> queste sono molteplici e sono rappresentate da tutti quei componenti che hanno parti assemblate, sia in movimento reciproco fra loro che stazionarie. In generale le sorgenti di perdita, considerate nei metodi attualmente proposti, vengono comunemente classificate<sup>[52]</sup> in sette macro-categorie:

- Agitatori: sono i componenti utilizzati per il mescolamento delle sostanze. Il punto di perdita preferenziale è in prossimità della tenuta dell'organo rotante che isola l'ambiente di processo da quello esterno.
- Pompe: sono i componenti impiegati per la movimentazione di liquidi durante le fasi di processo e possono essere di varie tipologie. Le pompe centrifughe rappresentano la varietà più diffusa nell'ambito dell'industria chimica, a cui si affiancano altre soluzioni quali le

pompe volumetriche, le pompe alternative e le pompe a membrana. I fluidi trasferiti possono fuoriuscire dal punto di contatto tra l'albero mobile e l'elemento stazionario, come nel caso dell'agitatore.

- **Compressori:** sono i componenti che forniscono la forza motrice per il trasporto di gas, così come le pompe la forniscono ai liquidi. In genere sono azionati mediante elementi rotanti analoghi alle pompe. Pertanto anche i meccanismi di perdita sono i medesimi.
- **Flange:** sono i componenti, presenti in maggior numero in un impianto produttivo, utilizzati per unire sezioni di tubazioni fra loro o con le apparecchiature. In genere l'accoppiamento è ottenuto mediante dadi e l'isolamento dall'ambiente esterno con una guarnizione di materiale adeguato. Solitamente la perdita è determinata da un'errata installazione o dal deterioramento della guarnizione a causa dello stress termico, dei cicli di pressione o dell'età.
- **Valvole:** sono i componenti più comuni e numerosi dell'industria chimica e petrolchimica, seconde solo alle flange. Ne esistono di varie tipologie ma in genere presentano uno stelo che opera per restringere la sezione di passaggio e consentire il flusso o meno del fluido all'interno della tubazione. Le emissioni fuggitive si verificano in prossimità dello stelo in caso di deterioramento dell'organo di tenuta, che tipicamente è un premistoppa o un *O-ring*.
- **Valvole di sicurezza:** sono i dispositivi di sicurezza comunemente usati nell'industria chimica e petrolchimica, in alternativa ai dischi di rottura, per evitare che le pressioni all'interno delle apparecchiature superino i limiti costruttivi. Per questa tipologia di componenti s'intende emissione il rilascio che si verifica a causa dell'usura o del danneggiamento della tenuta dell'otturatore non quelli causati dal corretto funzionamento del dispositivo; quindi i rilasci causati dalle sovrappressioni non sono da considerarsi perdite.
- **Altri componenti:** esistono ovviamente una moltitudine di altri elementi, quali specole visive, valvole di ritegno, filtri di linea, dreni, prese campione, soggetti a perdite, nei loro punti di tenuta caratteristici, con conseguente rilascio in atmosfera delle sostanze ivi

contenute. A causa della rarità del loro utilizzo all'interno di un classico impianto industriale si è soliti raggrupparli e trattarli in un'unica categoria associata al rilascio.

Dall'analisi sulle sorgenti di perdita si può dedurre che la causa principale delle emissioni fuggitive è da ricercare nell'incapacità del sistema di tenuta di mantenere isolato l'ambiente di processo da quello esterno. Da ciò derivano due importanti concetti basilari nell'ambito delle emissioni fuggitive, ovvero: tutti quegli elementi che non presentano organi di tenuta, come le pompe a trascinamento magnetico, le pompe peristaltiche o le pompe a membrana, non possono contribuire alla generazione di emissioni fuggitive in atmosfera. L'altro è che per garantire la riduzione delle quantità di sostanze emesse in atmosfera come emissione fuggitiva è necessario garantire un adeguato isolamento tra l'ambiente di processo e quello esterno, utilizzando un sistema di tenuta appropriato ed assicurando una manutenzione efficiente ed efficace.

### **3.1.2. Metodi sperimentali**

Attualmente in letteratura<sup>[14][58]</sup> esistono due protocolli d'individuazione, stima e riduzione delle emissioni fuggitive che sono stati sviluppati nell'ottica di miglioramento della qualità dell'aria. Per farlo si prefiggono di ridurre la quantità di sostanza emessa mediante un opportuno piano di manutenzione e riparazione dei componenti rilevati in perdita<sup>[54][55]</sup>, basandosi per la stima sulla procedura d'indagine proposta dall'EPA<sup>7</sup> e chiamata "metodo 21"<sup>[56]</sup>.

#### **3.1.2.1. Metodo 21**

Il documento fondamentale per la misura puntuale delle emissioni è il protocollo "*Method 21 – Determination of volatile organic compound leaks*"<sup>[56]</sup> dell'EPA; in questo documento vengono definiti sia i metodi di rilevazione delle sostanze sia i punti su cui tale rilevazione deve essere effettuata sulle varie tipologie di sorgenti di perdita per determinare l'emissione.

La rilevazione della concentrazione, detta *sniffing*, viene effettuata mediante l'uso di rilevatori a fotoionizzazione (PID), di cui un esempio è riportato in

---

<sup>7</sup> United States Environmental Protection Agency

Figura 3–1. Per sorgenti di perdita stazionarie è possibile impiegare anche una soluzione saponifera, qualora la temperatura superficiale non sia superiore al punto d'ebollizione o sia inferiore al punto di congelamento della stessa.

In questa circostanza la perdita è presente nel caso in cui si formino bolle sulla superficie dell'elemento trattato con la soluzione.



Figura 3–1 – Rilevatore a fotoionizzazione

Da protocollo la rilevazione della concentrazione della sostanza volatile deve essere effettuata solamente nei punti in cui è possibile ed è prevedibile un rilascio. Anche la distanza di rilevamento è fissata dalla procedura in funzione della staticità o meno della possibile sorgente di perdita. In particolare, per i componenti con tenuta statica il punto di rilevazione deve essere direttamente sull'interfaccia di perdita mentre per le apparecchiature con le parti di tenuta in movimento, quali pompe, compressori o agitatori, deve essere collocata a circa 1 cm dal potenziale punto di rilascio.

Come definito nel paragrafo 3.1.1, le potenziali sorgenti di perdita sono differenti a seconda del componente analizzato.

Per tutte le tipologie di valvole, sia quelle con movimento assiale che rotativo, il punto di perdita preferenziale è in prossimità del punto di tenuta fra lo stelo — adibito alla trasmissione del movimento dall'esterno all'otturatore — ed il corpo della valvola, nel quale la guarnizione è costituita da un *O-ring* in materiale elastomerico, come si può evincere dalla Figura 3–2.

Come per le valvole anche per tutti i componenti atti alla movimentazione dei fluidi, quali pompe, compressori o agitatori, il punto di perdita preferenziale per le sostanze è localizzato nei pressi della tenuta, come schematizzato nello spaccato di una tenuta meccanica semplice riportato in Figura 3–3.

A motivo della complessità costruttiva delle tenute impiegabili in queste applicazioni è suggerito dal metodo di effettuare anche un campionamento sui restanti punti di giunzione presenti nel corpo della tenuta.

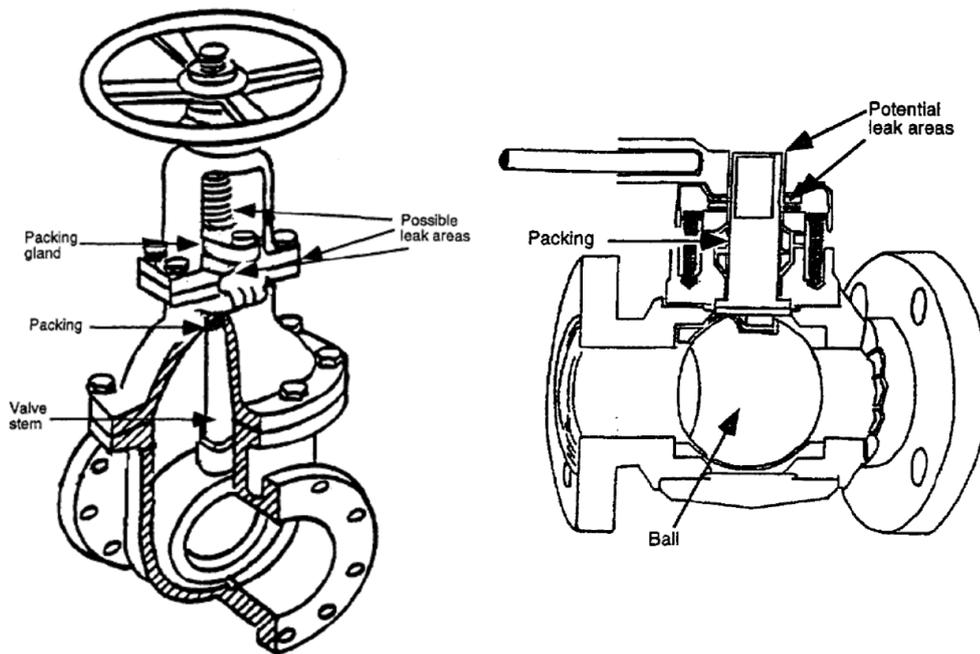


Figura 3–2 – Punti di perdita preferenziale per valvole con movimento assiale e rotativo dello stelo

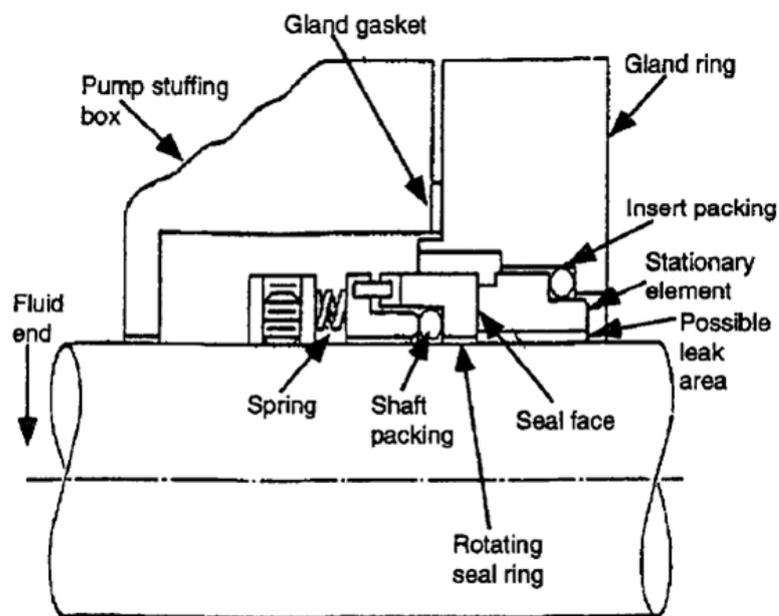


Figura 3–3 – Punti di perdita preferenziale per tenute

### 3.1.2.2. Leak Detection And Repair

Il principale programma che permette d'identificare i componenti in perdita, la cui riparazione consente una riduzione sostanziale delle emissioni fuggitive, è il *Leak detection and repair* (LDAR)<sup>[54][55]</sup>. Un componente soggetto a tale programma deve sia essere monitorato, secondo le procedure definite dal “metodo 21”<sup>[56]</sup>, ad intervalli regolari al fine di rilevare eventuali perdite, per poi essere riparato o sostituito entro un lasso di tempo specifico<sup>[58]</sup> qualora rilevato in perdita durante il suddetto monitoraggio.

Dunque, il programma LDAR è l'insieme delle buone pratiche tecniche, riconosciuto come BAT<sup>8</sup> dalla normativa IPPC<sup>[21]</sup>, che richiedono d'eseguire ispezioni per la verifica delle perdite sulle apparecchiature e sui componenti, selezionati in base alle principali sorgenti descritte nel paragrafo 3.1.1, nei punti in cui è probabile che esse avvengano, come riportato in Tabella 3-1.

Componenti	Punti di monitoraggio
Pompe, compressori ed agitatori	Tenuta dell'albero
Valvole	Tenuta dello stelo
Flange	Guarnizione
Prese campione	Tenuta del punto di prelievo
Valvole di sicurezza	Tenuta dell'otturatore

Tabella 3-1 – Componenti e punti di monitoraggio

L'implementazione di un piano di monitoraggio LDAR, nonostante il notevole impegno necessario alla realizzazione, consente di ricavare indubbi benefici.

In termini concreti, consente un generale miglioramento delle condizioni di sicurezza e igiene degli ambienti di lavoro presenti in impianto, sia per il personale operante che per gli eventuali visitatori. Inoltre permette di ridurre i rischi dovuti alle rotture delle apparecchiature ed alla formazione di zone con potenziale atmosfera esplosiva. Da questi punti di perdita infatti, in un tipico impianto chimico, possono essere emesse fino a 700 tonnellate annue di composti organici volatili (VOC)<sup>[54]</sup> ai quali i lavoratori non devono essere esposti oltre le soglie limite in quanto possono presentare caratteristiche di tossicità, acuta e cronica, cancerogenicità ed infiammabilità.

<sup>8</sup> Best Available Techniques

Quando la metodologia LDAR venne sviluppata, l'EPA stimò una riduzione potenziale dell'emissioni fuggitive del 63% per le raffinerie e del 56% per l'industria chimica se debitamente applicata.

Attualmente, in funzione dell'intervallo di monitoraggio e della soglia di rilevazione per considerare un componente in perdita, implementando il programma LDAR è possibile garantire un'elevata riduzione delle emissioni fuggitive in funzione dei differenti componenti, come riportato in Tabella 3–2

<b>Componenti tipologia e servizio</b>	<b>Intervallo mensile (10000 ppm<sub>v</sub>)</b>	<b>Intervallo trimestrale (10000 ppm<sub>v</sub>)</b>	<b>Intervallo mensile (500 ppm<sub>v</sub>)</b>
<b>Industria chimica</b>			
<i>Valvole gas</i>	87%	67%	92%
<i>Valvole liquido</i>	84%	61%	88%
<i>Pompe</i>	69%	45%	75%
<i>Connettori</i>	—	—	93%
<b>Raffineria</b>			
<i>Valvole gas</i>	88%	70%	96%
<i>Valvole liquido</i>	76%	61%	95%
<i>Pompe</i>	68%	45%	88%
<i>Connettori</i>	—	—	81%

Tabella 3–2 – Percentuali di riduzione per tipologia di componente implementando il programma LDAR<sup>[54]</sup>

I requisiti previsti per l'attuazione dei piani di monitoraggio e manutenzione, in particolare relativamente alla definizione della soglia per la quale un componente è considerato in perdita e deve essere riparato, variano in funzione delle normative vigenti nello stato in cui sarà realizzato il programma LDAR. In Italia, ad oggi, le modalità di attuazione dei piani di monitoraggio sono definite dall'ISPRA<sup>9</sup> mediante un proprio protocollo<sup>[33]</sup> che si riconduce ai metodi di individuazione e riparazione proposti dall'EPA<sup>[53][56]</sup>.

Indipendentemente dalla normativa vigente, le migliori pratiche disponibili<sup>[54][55]</sup> per il programma LDAR prevedono cinque fasi fondamentali, come schematizzati in Figura 3–4, che opportunamente integrati con le metodologie proposte da EPA<sup>[56]</sup> per la quantificazione delle portate d'emissioni fuggitive, permettono di individuare, stimare e ridurre le perdite.

<sup>9</sup> Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale

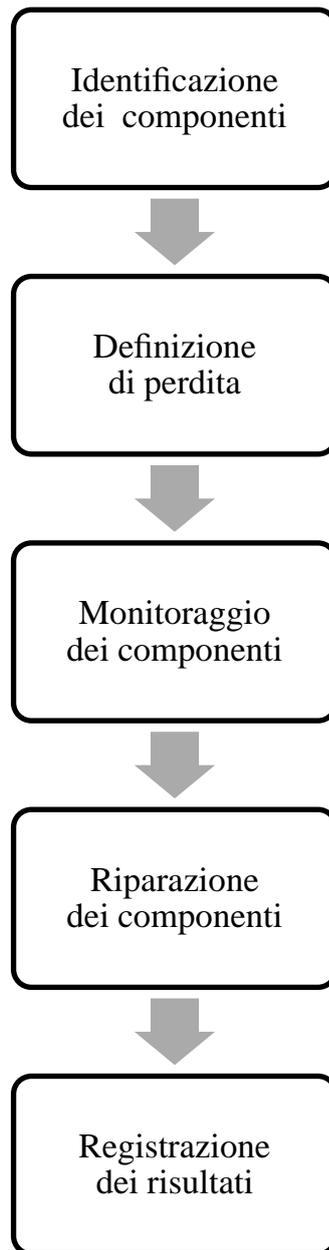


Figura 3-4 – Fasi fondamentali della procedura LDAR

### ***Identificazione dei componenti***

Nella prima fase del programma di monitoraggio LDAR è necessario redigere un inventario dettagliato delle potenziali sorgenti di perdita, suddividendole in funzione della tipologia costruttiva, dello stato fisico e della composizione della sostanza presente, delle dimensioni del componente da monitorare e dalla sua collocazione nell'impianto in esame. Una volta suddivisi i componenti è necessario identificarli in maniera inequivocabile e chiara sia in impianto, mediante opportune targhette, sia sulla documentazione di processo a disposizione mediante apposito codice identificativo.

Questo per facilitare la realizzazione di un sistema di gestione informatizzato in cui confluiranno tutti i dati del monitoraggio, che garantisca la corretta implementazione del programma di verifica e manutenzione periodica.

Proprio per questi motivi è indispensabile che la documentazione di processo impiegata in questa fase sia aggiornata e corrisponda alla perfezione con quanto realmente è presente in impianto.

### ***Definizione di perdita***

La seconda fase del monitoraggio LDAR prevede la definizione di perdita espressa in parti per milione volumetriche in quanto il metodo di quantificazione delle perdite<sup>[56]</sup>, integrato nel programma LDAR, richiede che le emissioni dei composti organici volatili siano misurate in ppm<sub>v</sub> equivalenti di metano.

Le definizioni di perdita variano in base alle normative, al tipo di componente, al servizio per cui sono impiegati, all'intervallo di monitoraggio ed alla pericolosità della sostanza monitorata; in funzione di ciò la definizione di perdita può variare da 100 a 10000 ppm<sub>v</sub>.

Seguendo gli adempimenti operativi dell'ISPRA<sup>[33]</sup> rivolti a tutti i gestori d'impianto per il rilascio ed il rinnovo dell'autorizzazione integrata ambientale (AIA), i limiti di definizione di perdita variano in funzione del tipo di componente e della tipologia di pratica, come riportato in Tabella 3-3:

<b>Componenti</b>	<b>Prima AIA</b>	<b>Rinnovi successivi</b>
Pompe	10000	5000
Compressori	10000	5000
Valvole	10000	3000
Flange	10000	3000

**Tabella 3-3 – Definizione operativa di perdita**

Inoltre, sempre secondo quanto riportato<sup>[33]</sup>, si considera perdita «qualunque emissione che all'ispezione risulta visibile, odorabile e/o udibile indipendentemente dalla concentrazione o che si possa individuare utilizzando una soluzione di sapone».

### ***Monitoraggio dei componenti***

Redatto l'inventario e definita la soglia di perdita per ogni tipologia di componente, la terza fase del protocollo è il loro monitoraggio.

Questa è la fase cruciale in quanto rappresenta il fulcro del metodo LDAR per il raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni fugitive. Pertanto devono essere eseguite correttamente tutte le procedure proposte dal “metodo 21”<sup>[56]</sup>. Infatti la fase di rilevazione delle perdite è molto delicata poiché è dimostrato<sup>[53]</sup> che, se non condotte nel modo corretto, le procedure di *sniffing* sono soggette ad errori tali da falsare i risultati del monitoraggio.

In questa fase è necessario rispettare anche gli intervalli di monitoraggio stabiliti dalla normativa, ovvero la frequenza con la quale l’ispezione del singolo componente deve essere effettuata. Tali intervalli possono essere estesi o ridotti sia in relazione alla percentuale dei componenti in perdita individuati, come mostrato in Figura 3–5, che in funzione della pericolosità della sostanza.

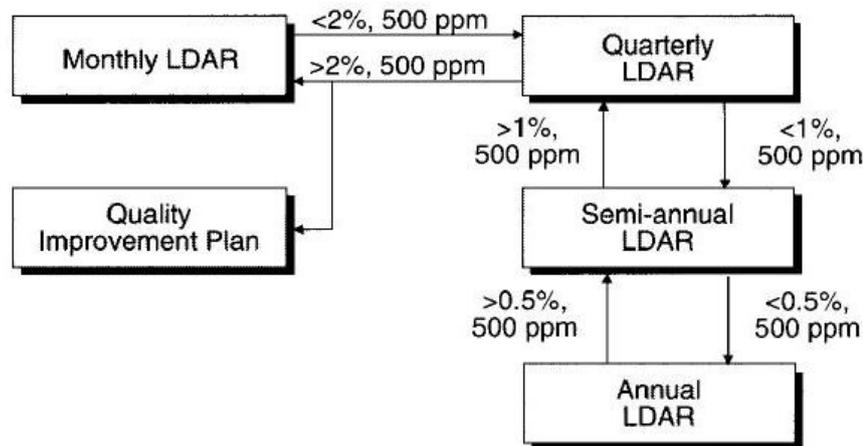


Figura 3–5 – Intervalli di monitoraggio in funzione della percentuale di componenti in perdita

In un corretto piano di monitoraggio è inoltre prevista l’ispezione visiva su base settimanale dei componenti più critici quali pompe, agitatori e compressori migliorando le prestazioni generali del programma.

Questa è la fase in cui si può procedere con l’ottimizzazione del programma per raggiungere più facilmente gli obiettivi di riduzione delle emissioni; in primo luogo incrementando la frequenza di monitoraggio rispetto a quella prescritta dalle normative. L’altra principale pratica d’ottimizzazione, che può essere implementata sempre in questa fase, è la definizione di una procedura di controllo qualità da applicare per verificare l’accuratezza, la completezza e la consistenza del piano di monitoraggio e per appurare che si sia svolto rispettando tutte le prescrizioni e si sia provveduto a registrare tutti i dati necessari in un opportuno sistema informatizzato per facilitarne la successiva consultazione.

Un'ultima accortezza per ottimizzare il processo di rilevamento è quella di verificare la presenza di ostacoli di varia natura che non permettono il corretto monitoraggio dei componenti e predisporre la rimozione di questi impedimenti così da garantire nei monitoraggi successivi la corretta accessibilità.

### ***Riparazione dei componenti***

Il metodo alla fase di monitoraggio fa seguire la fase di riparazione dei componenti in perdita, nel più breve lasso di tempo possibile, consentendo l'effettiva riduzione delle emissioni fuggitive.

Solitamente questa operazione consiste nel ripristino del corretto grado di tenuta di ogni singolo componente in perdita e pertanto, soprattutto quando il loro numero è molto elevato, è necessario sviluppare un piano efficiente per la riparazione e per il successivo monitoraggio così da valutare l'efficacia della manutenzione realizzata.

L'ISPRA, oltre alla riparazione, prevede la sostituzione di tutti quei componenti, definiti «emettitori cronici», che vengono rilevati in perdita due volte su quattro trimestri consecutivi di monitoraggio<sup>[33]</sup>.

### ***Registrazione dei risultati***

L'ultima fase del programma LDAR consiste nella catalogazione ed archiviazione di tutte le informazioni ricavate durante lo svolgimento del piano di monitoraggio, in particolare degli interventi manutentivi, così da fornire gli elementi necessari per la valutazione dello stato di un impianto, per l'individuazione dei componenti critici e per l'implementazione di azioni correttive efficaci.

Per incrementare la qualità delle informazioni registrate è necessario predisporre un programma di controllo qualità, parallelo a quello per il corretto reperimento delle informazioni, sui metodi di registrazione e sui registri stessi, che dovrebbero essere periodicamente revisionati sia internamente che certificati da enti terzi per garantirne la conformità.

Inoltre, in questa fase è sempre indispensabile verificare l'aggiornamento delle normative vigenti in materia di monitoraggio delle emissioni così da garantire il rispetto dei limiti prescritti.

### 3.1.2.3. Smart LDAR

Negli anni, il miglioramento delle tecnologie per il rilevamento delle perdite ha consentito l'introduzione di dispositivi ottici per l'individuazione delle emissioni, come la termocamera riportata in Figura 3-6.



Figura 3-6 – ThermaCAM GasFinderIR Series<sup>[82]</sup>

Questi strumenti non sono contemplati da EPA quali alternative al “metodo 21” ma alcuni studi di letteratura<sup>[24]</sup> dimostrano l'equivalenza, nella gestione delle perdite, tra le due tecnologie tanto che oggi sono riconosciuti a livello internazionale dalla direttiva IPPC<sup>[21]</sup> ed approvati a livello nazionale da ISPRA<sup>[33]</sup> che, proprio per questo, estende la definizione di perdita ad «ogni immagine di emissione individuata dal sistema ottico»<sup>[33]</sup> vale a dire quello strumento che «rende visibile l'emissione che altrimenti potrebbe essere invisibile a occhio nudo»<sup>[33]</sup>.



Figura 3-7 – Esempio di emissione rilevabile mediante dispositivo ottico

È quindi definita e proposta una metodologia, chiamata “*smart* LDAR”, che presenta le medesime fasi operative del programma LDAR descritte nel precedente paragrafo, ma a differenza del metodo classico prevede il rilevamento delle perdite mediante termocamera e la quantificazione delle perdite individuate attraverso il “metodo 21”.

Questa metodologia presenta un indubbio vantaggio: nel caso d’impianti di grande estensione o con componenti difficilmente accessibili permette di rilevare rapidamente le sorgenti in perdita senza dover misurare la concentrazione per tutte le componentistiche.

D’altro canto non è possibile impiegare questa metodologia indiscriminatamente in quanto alcune sostanze, come acetone ed ammoniaca, per le loro caratteristiche non possono essere rilevate mediante termocamere.

Inoltre, fino ad oggi non sono disponibili in letteratura, anche se sono stati avviati vari studi <sup>[36]</sup>, dei fattori d’emissione da associare alle componenti di processo per quantificare la perdita impiegando unicamente la tecnologia ottica.

Questo in particolare impone che per la quantificazione delle emissioni fuggitive «nel caso di utilizzo dei sistemi ottici deve essere garantito, su base annuale, uno screening con il Metodo 21 su tutte le apparecchiature che possono determinare perdite significative (i componenti valvole e flange installati su linee con un diametro superiore o uguale a 3 pollici, le pompe con potenza superiore o uguale a 4 kW e tutti i compressori) e su almeno il 50% dei restanti componenti del programma LDAR»<sup>[33]</sup> riducendo, di fatto, la convenienza del suo impiego.

### **3.1.3. Metodi previsionali**

Parallelamente ai metodi sperimentali di quantificazione delle emissioni fuggitive, le normative nazionali<sup>[33]</sup> ed internazionali<sup>[61]</sup> contemplano anche metodi predittivi per la stima della portata rilasciata dalle sorgenti in perdita. Questi hanno come riferimento tecnico l’EPA<sup>[58]</sup> la quale, a partire dagli anni ’90, ha proposto modelli sempre più accurati, a supporto del monitoraggio in impianto, che permettono una stima con diversi livelli di dettaglio<sup>[57]</sup>.

Attualmente EPA ha codificato quattro modelli che vanno dal più semplice e meno accurato metodo a fattori medi (*average emission factors*), che richiede

unicamente il censimento dei componenti impiantistici, in quanto si basa su fattori d'emissione ricavati, per tipologia di componente, da indagini statistiche condotte da EPA negli anni '80 su generici impianti dell'industria, al più complesso e complicato da attuare metodo a correlazioni specifiche (*unit-specific correlation approach*), che per l'applicazione richiede la stima del fattore d'emissione specifico per il sito in esame mediante prove di tenuta dei componenti. Fra i due antipodi sono presenti i metodi a fattori di perdita (*leak/no leak factors*) e a curve di correlazione (*correlation approach*) i quali stimano la quantità emessa mediante delle correlazioni, su intervalli discreti il primo continuo il secondo, che discriminano i valori dei fattori d'emissione in funzione del rilevamento in perdita o meno del componente esaminato secondo i criteri d'investigazione del "metodo 21".

Per ognuno di questi metodi è comunque necessario, come si evince dalla Figura 3–8, effettuare un inventario di tutta la componentistica presente come nel caso di misurazione sperimentale con metodologia LDAR.

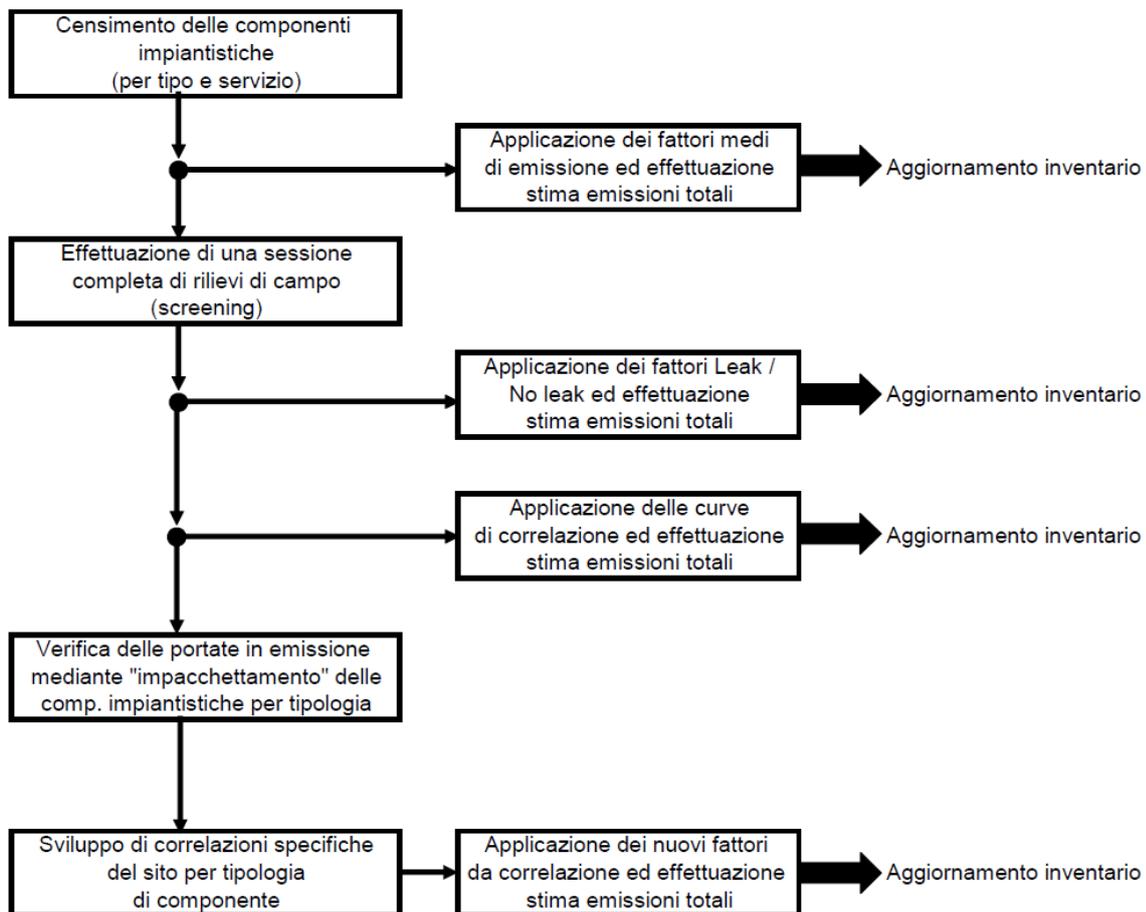


Figura 3–8 – Schema di flusso dei metodi predittivi di stima delle emissioni fuggitive [22]



### 3.1.3.1. Metodo a fattori medi d'emissione

Il modello a fattori medi è il metodo più semplice di stima della portata rilasciata dai componenti e non necessita di effettuare misure dirette in impianto. Infatti, esso quantifica l'emissione, tramite l'equazione 3-1.1, basandosi unicamente su fattori d'emissione specifici per realtà impiantistiche, stimati negli anni '80 dall'EPA, mediante un'imponente campagna di rilevazione su impianti tipici dell'industria di processo.

$$E_{TOC} = EF \cdot \omega_{TOC} \cdot N \quad 3-1.1$$

Dall'equazione 3-1.1 si nota come l'emissione complessiva dei composti organici totali sia dipendente dal suddetto fattore d'emissione EF, dalla composizione in massa,  $\omega_{TOC}$ , della sostanza presente nei componenti e dal loro numero, N, nell'impianto analizzato, ricavato mediante l'inventario.

I fattori d'emissione medi stimati da EPA oltre a dipendere dalla tipologia di componente e dallo stato fisico dalle sostanze presenti, sono fortemente influenzati anche dalla tipologia d'impianto. EPA distingue<sup>[58]</sup> quattro realtà impiantistiche che, per le caratteristiche tecniche dei componenti utilizzati, presentano mediamente un'emissione differente:

- industria chimica organica (SOCMI);
- raffineria;
- *oil & gas*;
- *marketing terminal*.

Equipment type	Service	Emission factor <sup>a</sup> (kg/hr/source)
Valves	Gas	0.00597
	Light liquid	0.00403
	Heavy liquid	0.00023
Pump seals <sup>b</sup>	Light liquid	0.0199
	Heavy liquid	0.00862
Compressor seals	Gas	0.228
Pressure relief valves	Gas	0.104
Connectors	All	0.00183
Open-ended lines	All	0.0017
Sampling connections	All	0.0150

<sup>a</sup>These factors are for total organic compound emission rates.

<sup>b</sup>The light liquid pump seal factor can be used to estimate the leak rate from agitator seals.

Figura 3-10 – Fattori medi d'emissione per l'industria chimica organica<sup>[93]</sup>

Equipment Type	Service <sup>a</sup>	Emission Factor (kg/hr/source) <sup>b</sup>
Valves	Gas	4.5E-03
	Heavy Oil	8.4E-06
	Light Oil	2.5E-03
	Water/Oil	9.8E-05
Pump seals	Gas	2.4E-03
	Heavy Oil	NA
	Light Oil	1.3E-02
	Water/Oil	2.4E-05
Others <sup>c</sup>	Gas	8.8E-03
	Heavy Oil	3.2E-05
	Light Oil	7.5E-03
	Water/Oil	1.4E-02
Connectors	Gas	2.0E-04
	Heavy Oil	7.5E-06
	Light Oil	2.1E-04
	Water/Oil	1.1E-04
Flanges	Gas	3.9E-04
	Heavy Oil	3.9E-07
	Light Oil	1.1E-04
	Water/Oil	2.9E-06
Open-ended lines	Gas	2.0E-03
	Heavy Oil	1.4E-04
	Light Oil	1.4E-03
	Water/Oil	2.5E-04

<sup>a</sup>Water/Oil emission factors apply to water streams in oil service with a water content greater than 50%, from the point of origin to the point where the water content reaches 99%. For water streams with a water content greater than 99%, the emission rate is considered negligible.

<sup>b</sup>These factors are for total organic compound emission rates (including non-VOC's such as methane and ethane) and apply to light crude, heavy crude, gas plant, gas production, and off shore facilities. "NA" indicates that not enough data were available to develop the indicated emission factor.

<sup>c</sup>The "other" equipment type was derived from compressors, diaphragms, drains, dump arms, hatches, instruments, meters, pressure relief valves, polished rods, relief valves, and vents. This "other" equipment type should be applied for any equipment type other than connectors, flanges, open-ended lines, pumps, or valves.

**Figura 3-11 – Fattori medi d'emissione per l'oil & gas<sup>[93]</sup>**

Equipment type	Service	Emission factor (kg/hr/source) <sup>b</sup>
Valves	Gas	0.0268
	Light liquid	0.0109
	Heavy liquid	0.00023
Pump seals <sup>c</sup>	Light liquid	0.114
	Heavy liquid	0.021
Compressor seals	Gas	0.636
Pressure relief valves	Gas	0.16
Connectors	All	0.00025
Open-ended lines	All	0.0023
Sampling connections	All	0.0150

<sup>a</sup>Source: Reference 2.

<sup>b</sup>These factors are for non-methane organic compound emission rates.

<sup>c</sup>The light liquid pump seal factor can be used to estimate the leak rate from agitator seals.

**Figura 3-12 – Fattori medi d'emissione per la raffineria<sup>[93]</sup>**

Equipment type	Service	Emission factor (kg/hr/source) <sup>a</sup>
Valves	Gas	1.3E-05
	Light Liquid	4.3E-05
Pump seals	Gas	6.5E-05
	Light Liquid	5.4E-04
Others (compressors and others) <sup>b</sup>	Gas	1.2E-04
	Light Liquid	1.3E-04
Fittings (connectors and flanges) <sup>c</sup>	Gas	4.2E-05
	Light Liquid	8.0E-06

<sup>a</sup>These factors are for total organic compound emission rates (including non-VOC's such as methane and ethane).

<sup>b</sup>The "other" equipment type should be applied for any equipment type other than fittings, pumps, or valves.

<sup>c</sup>"Fittings" were not identified as flanges or non-flanged connectors; therefore, the fitting emissions were estimated by averaging the estimates from the connector and the flange correlation equations.

**Figura 3-13 – Fattori medi d'emissione per il marketing terminal<sup>[93]</sup>**

Confrontando, ad esempio, i fattori per l'industria chimica (Figura 3-10) con quelli per le raffinerie (Figura 3-12) si può notare che per i medesimi componenti i valori dei fattori d'emissione sono inferiori, anche di un ordine di grandezza, a causa del fatto che in raffineria vengono impiegati componenti meno pregiati e che pertanto presentano una maggiore propensione al rilascio di sostanze durante la loro vita utile in impianto.

L'utilizzo di questo metodo predittivo è, quindi, fortemente influenzato dai valori numerici attribuiti ai singoli fattori d'emissione. I primi coefficienti proposti dall'EPA sovrastimavano di quattro ordini di grandezza la reale portata emessa. Per questi motivi l'EPA nel corso degli anni ha provveduto a realizzare vari studi e prove sperimentali per determinare nuovi e sempre più accurati fattori d'emissione. Gli attuali valori proposti sono stati ricavati da EPA nel corso degli anni effettuando sia analisi in ventiquattro generici impianto dell'industria chimica, durante gli anni '80, che in impianti specifici per la produzione di ossido di etilene e butadiene, durante gli anni '90.

Nonostante ciò, la sovrastima che comporta l'utilizzo di tali fattori è ancora molto elevata, intorno a due ordini di grandezza, tanto che vari autori specialistici<sup>[1][27][28][29][30][31][32]</sup> ed enti nazionali, come il TCEQ<sup>10 [45]</sup>, il BOHS<sup>11 [9]</sup> o il BMUB<sup>12[10]</sup>, si sono dedicati all'approfondimento di tali valori.

<sup>10</sup> Texas Commission on Environmental Quality

<sup>11</sup> British Occupational Hygiene Society

<sup>12</sup> Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Ministero dell'ambiente tedesco

Questi studi hanno portato all'introduzione di fattori di correzione per alcune categorie di componenti, da applicare ai fattori d'emissione proposti dall'EPA così da considerare le diverse variabili che influenzano le emissioni, quali manutenzione, classe di tenuta ed affidabilità.

Di particolare interesse è il lavoro del TCEQ, che oltre ad attribuire migliori fattori d'emissione (Figura 3–14) per impianti con presenza o meno di etilene, introduce il concetto di nuove categorie di sorgenti in perdita<sup>[46]</sup>.

Equipment/Service	SOCMI Average <sup>1</sup> Factors taken from EPA document EPA-453/R-95-017; November, 1995; pp. 2-12.	SOCMI Without Ethylene <sup>1</sup> TCEQ- derived factors.	SOCMI With Ethylene <sup>1</sup> TCEQ- derived factors.
Valves: Gas/Vapor	0.0132	0.0089	0.0258
Light Liquid	0.0089	0.0035	0.0459
Heavy Liquid	0.0005	0.0007	0.0005
Pumps: Light Liquid	0.0439	0.0386	0.144
Heavy Liquid	0.019	0.0161	0.0046
Flanges/Connectors : Gas	0.0039	0.0029	0.0053
Light Liquid	0.0005	0.0005	0.0052
Heavy Liquid	0.00007	0.00007	0.00007
Compressors	0.5027	0.5027	0.5027
Relief Valve (Gas/Vapor)	0.2293	0.2293	0.2293
Open-ended Lines <sup>2</sup>	0.0038	0.004	0.0075
Sampling Connections	0.033	0.033	0.033

Notes: 1. All factors are in units of (lb/hr)/component.

2. The 28 Series quarterly LDAR programs require open-ended lines to be equipped with a cap, blind flange, plug, or a second valve. If so equipped, open-ended lines may be given a 100% control credit.

Figura 3–14 – Fattori medi per industria SOCMI proposti dal TCEQ<sup>[80]</sup>

### 3.1.3.2. Metodo a fattori di perdita

Il metodo a fattori di perdita, *leak/no leak model* o *screening ranges approach*, come il precedente è un metodo a fattori medi che però è caratterizzato da una maggiore accuratezza nella stima in quanto associa fattori medi d'emissione differenti ai componenti trovati in perdita e a quelli non rilevati in perdita, secondo la definizione del “metodo 21”.

Pertanto questo modello richiede necessariamente la misura delle concentrazioni in impianto per tutti i componenti, secondo metodologia EPA.

Ad ogni componente riscontrato in perdita, ovvero con concentrazione superiore alla concentrazione soglia di 10000 ppm<sub>v</sub>, viene pertanto assegnato un fattore di perdita superiore a quello attribuito al componente non riscontrato in perdita, arrivando a formulare l'equazione 3–1.2 per il calcolo dell'emissione globale:

$$E_{TOC} = EF_{leak} \cdot N_{leak} + EF_{noleak} \cdot N_{noleak} \quad 3-1.2$$

$EF_{leak}$  e  $N_{leak}$  sono rispettivamente il fattore d'emissione ed il numero dei componenti in perdita e  $EF_{noleak}$  e  $N_{noleak}$  sono, analogamente, i valori del fattore d'emissione ed il numero di componenti non in perdita.

Come di evince chiaramente dai dati riportati nelle figure seguenti, i valori dei fattori d'emissione dei componenti in perdita sono superiori di due ordini di grandezza rispetto a quelli caratteristici dei componenti non in perdita, in quanto per l'emissione globale si attribuisce, giustamente, maggiore peso ai primi.

Equipment type	Service	≥10,000 ppmv Emission factor (kg/hr/source) <sup>a</sup>	<10,000 ppmv Emission factor (kg/hr/source) <sup>a</sup>
Valves	Gas	0.0782	0.000131
	Light liquid	0.0892	0.000165
	Heavy liquid	0.00023	0.00023
Pump seals <sup>b</sup>	Light liquid	0.243	0.00187
	Heavy liquid	0.216	0.00210
Compressor seals	Gas	1.608	0.0894
Pressure relief valves	Gas	1.691	0.0447
Connectors	All	0.113	0.0000810
Open-ended lines	All	0.01195	0.00150

<sup>a</sup>These factors are for total organic compound emission rates.

<sup>b</sup>The light liquid pump seal factors can be applied to estimate the leak rate from agitator seals.

**Figura 3-15 – Fattori per l'industria chimica organica** <sup>[93]</sup>

Equipment type	Service	≥10,000 ppmv Emission factor (kg/hr/source) <sup>b</sup>	<10,000 ppmv Emission factor (kg/hr/source) <sup>b</sup>
Valves	Gas	0.2626	0.0006
	Light liquid	0.0852	0.0017
	Heavy liquid	0.00023	0.00023
Pump seals <sup>c</sup>	Light liquid	0.437	0.0120
	Heavy liquid	0.3885	0.0135
Compressor seals	Gas	1.608	0.0894
Pressure relief valves	Gas	1.691	0.0447
Connectors	All	0.0375	0.00006
Open-ended lines	All	0.01195	0.00150

<sup>a</sup>Source: Reference 6.

<sup>b</sup>These factors are for non-methane organic compound emission rates.

<sup>c</sup>The light liquid pump seal factors can be applied to estimate the leak rate from agitator seals.

**Figura 3-16 – Fattori per la raffineria** <sup>[93]</sup>

Equipment type	Service <sup>b</sup>	≥10,000 ppmv Emission factor (kg/hr/source) <sup>a</sup>	<10,000 ppmv Emission factor (kg/hr/source) <sup>a</sup>
Valves	Gas	9.8E-02	2.5E-05
	Heavy Oil	NA	8.4E-06
	Light Oil	8.7E-02	1.9E-05
	Water/Oil	6.4E-02	9.7E-06
Pump seals	Gas	7.4E-02	3.5E-04
	Heavy Oil	NA	NA
	Light Oil	1.0E-01	5.1E-04
	Water/Oil	NA	2.4E-05
Others <sup>c</sup>	Gas	8.9E-02	1.2E-04
	Heavy Oil	NA	3.2E-05
	Light Oil	8.3E-02	1.1E-04
	Water/Oil	6.9E-02	5.9E-05
Connectors	Gas	2.6E-02	1.0E-05
	Heavy Oil	NA	7.5E-06
	Light Oil	2.6E-02	9.7E-06
	Water/Oil	2.8E-02	1.0E-05
Flanges	Gas	8.2E-02	5.7E-06
	Heavy Oil	NA	3.9E-07
	Light Oil	7.3E-02	2.4E-06
	Water/Oil	NA	2.9E-06
Open-ended lines	Gas	5.5E-02	1.5E-05
	Heavy Oil	3.0E-02	7.2E-06
	Light Oil	4.4E-02	1.4E-05
	Water/Oil	3.0E-02	3.5E-06

<sup>a</sup>These factors are for total organic compound emission rates (including non-VOC's such as methane and ethane) and apply to light crude, heavy crude, gas plant, gas production, and offshore facilities. "NA" indicates that not enough data were available to develop the indicated emission factor.

<sup>b</sup>Water/Oil emission factors apply to water streams in oil service with a water content greater than 50%, from the point of origin to the point where the water content reaches 99%. For water streams with a water content greater than 99%, the emission rate is considered negligible.

<sup>c</sup>The "other" equipment type was derived from compressors, diaphragms, drains, dump arms, hatches, instruments, meters, pressure relief valves, polished rods, relief valves, and vents. This "other" equipment type should be applied for any equipment type other than connectors, flanges, open-ended lines, pumps, or valves.

**Figura 3-17 – Fattori per l'oil & gas**<sup>[93]</sup>

Equipment type	Service	≥10,000 ppmv Emission factor (kg/hr/source) <sup>a</sup>	<10,000 ppmv Emission factor (kg/hr/source) <sup>a</sup>
Valves	Gas	NA	1.3E-05
	Light Liquid	2.3E-02	1.5E-05
Pump seals	Light liquid	7.7E-02	2.4E-04
Other (compressors and others) <sup>b</sup>	Gas	NA	1.2E-04
	Light liquid	3.4E-02	2.4E-05
Fittings (connectors and flanges) <sup>c</sup>	Gas	3.4E-02	5.9E-06
	Light liquid	6.5E-03	7.2E-06

<sup>a</sup>These factors are for total organic compound emission rates (including non-VOC's such as methane and ethane). "NA" indicates that not enough data were available to develop the indicated emission factor.

<sup>b</sup>The "other" equipment type should be applied for any equipment type other than fittings, pumps, or valves.

<sup>c</sup>"Fittings" were not identified as flanges or connectors; therefore, the fitting emissions were estimated by averaging the estimates from the connector and the flange correlation equations.

**Figura 3-18 – Fattori per il marketing terminal**<sup>[93]</sup>

Confrontando in Tabella 3–4 i fattori di perdita per l'industria chimica organica con i corrispondenti fattori medi, per ogni tipologia di componente, si osserva che i *leak factor* sono maggiori di un ordine di grandezza rispetto ai corrispondenti fattori medi, mentre i *no leak factor* risultano di un ordine di grandezza inferiore.

Componente	Servizio	Leak factor (kg/h sorgente)	No leak factor (kg/h sorgente)	Fattori medi (kg/h sorgente)
Valvola	Gas	0.000131	0.0782	0.00597
	Liquido leggero	0.000165	0.0892	0.00403
	Liquido pesante	0.00023	0.00023	0.00023
Pompa	Liquido leggero	0.00187	0.243	0.0199
	Liquido pesante	0.00210	0.216	0.00862
Compressore	Gas	0.0894	1.608	0.228
PSV	Gas	0.0447	1.691	0.104
Flange	Tutti	0.0000810	0.113	0.00183

Tabella 3–4 – *Screening range emission factor e average emission factor per l'industria SOCM*

Questa differenziazione è valida anche per i fattori inerenti tutte le altre tipologie d'impianti industriali.

### 3.1.3.3. Metodo con curve di correlazione

Il terzo metodo di stima delle emissioni si basa anch'esso sulla disponibilità dei valori di concentrazione per singolo componente ricavati tramite l'applicazione della metodologia EPA<sup>[56]</sup>. Rispetto al metodo precedente, questo garantisce una maggiore accuratezza nei risultati in quanto non discretizza i fattori in due intervalli ma, tramite le curve di correlazione da cui deriva il nome, permette di associare ad ogni concentrazione misurata una specifica portata d'emissione.

Il legame fra concentrazione, detta *screening value*, (SV) e portata emessa, ( $E_{TOC}$ ) come illustrato dall'equazione generica 3–1.3, come nei casi precedenti è funzione della tipologia di componentistica, dello stato del fluido contenuto e della categoria d'impianto considerata, tramite i parametri caratteristici a e b, ottenuti per regressione da dati statistici.

$$E_{TOC} = a \cdot SV^b \quad 3-1.3$$

A differenza del caso precedente, però, gli impianti vengono suddivisi unicamente in due categorie, l'industria chimica organica e quella petrolifera.

Equipment type	Correlation <sup>a,b</sup>
Gas valves	Leak rate (kg/hr) = $1.87E-06 \times (SV)^{0.873}$
Light liquid valves	Leak rate (kg/hr) = $6.41E-06 \times (SV)^{0.797}$
Light liquid pumps <sup>c</sup>	Leak rate (kg/hr) = $1.90E-05 \times (SV)^{0.824}$
Connectors	Leak rate (kg/hr) = $3.05E-06 \times (SV)^{0.885}$

<sup>a</sup>SV = Screening value in ppmv.

<sup>b</sup>These correlations predict total organic compound emission rates.

<sup>c</sup>The correlation for light liquid pumps can be applied to compressor seals, pressure relief valves, agitator seals, and heavy liquid pumps.

**Figura 3-19 – Curve di correlazione per l'industria SOCMI** <sup>[93]</sup>

Equipment type/service	Correlation <sup>b,c</sup>
Valves/all	Leak rate (kg/hr) = $2.29E-06 \times (SV)^{0.746}$
Pump seals/all	Leak rate (kg/hr) = $5.03E-05 \times (SV)^{0.610}$
Others <sup>d</sup>	Leak rate (kg/hr) = $1.36E-05 \times (SV)^{0.589}$
Connectors/all	Leak rate (kg/hr) = $1.53E-06 \times (SV)^{0.735}$
Flanges/all	Leak rate (kg/hr) = $4.61E-06 \times (SV)^{0.703}$
Open-ended lines/all	Leak rate (kg/hr) = $2.20E-06 \times (SV)^{0.704}$

<sup>a</sup>The correlations presented in this table are revised petroleum industry correlations.

<sup>b</sup>SV = Screening value in ppmv.

<sup>c</sup>These correlations predict total organic compound emission rates (including non-VOC's such as methane and ethane).

<sup>d</sup>The "other" equipment type was derived from instruments, loading arms, pressure relief valves, stuffing boxes, and vents. This "other" equipment type should be applied to any equipment type other than connectors, flanges, open-ended lines, pumps, or valves.

**Figura 3-20 – Curve di correlazione per l'industria petrolifera** <sup>[93]</sup>

Come detto queste sono le correlazioni che devono essere impiegate unicamente a quei componenti che durante la misurazione in impianto presentano un'emissione, di qualunque entità, riscontrabile dallo strumento di misura.

Poiché questi strumenti effettuano la misura entro un intervallo di concentrazione delimitato sia superiormente che inferiormente, oltre tali limiti si rimane nell'incertezza della reale concentrazione di sostanza emessa dal componente monitorato. Per ovviare a ciò il metodo prevede l'utilizzo di fattori d'emissioni fissi per i componenti che non superano il valore minimo (*default zero factor*) e per quelli che superano il valore massimo (*pegged factor*).

Questo significa che conservativamente viene attribuita un'emissione, seppur di modesta entità come si evince dalla Figura 3–21 e dalla Figura 3–22, anche a quei componenti che dal monitoraggio risultano perfettamente a tenuta.

Equipment type	Default-zero emission rate (kg/hr/source) <sup>a</sup>
Gas valve	6.6E-07
Light liquid valve	4.9E-07
Light liquid pump <sup>b</sup>	7.5E-06
Connectors	6.1E-07

<sup>a</sup>The default zero emission rates are for total organic compounds (including non-VOC's such as methane and ethane).

<sup>b</sup>The light liquid pump default zero value can be applied to compressors, pressure relief valves, agitators, and heavy liquid pumps.

**Figura 3–21 – Default zero factor per l'industria SOCMI<sup>[93]</sup>**

Equipment type/service	Default-zero emission rates <sup>a, b</sup> (kg/hr/source)
Valves/all	7.8E-06
Pump seals/all	2.4E-05
Others <sup>c</sup> /all	4.0E-06
Connectors/all	7.5E-06
Flanges/all	3.1E-07
Open-ended lines/all	2.0E-06

<sup>a</sup>Default zero emission rates were based on the combined 1993 refinery and marketing terminal data only (default zero data were not collected from oil and gas production facilities).

<sup>b</sup>These default zero emission rates are for total organic compounds (including non-VOC's such as methane and ethane).

<sup>c</sup>The "other" equipment type was developed from instruments, loading arms, pressure relief valves, stuffing boxes, vents, compressors, and dump lever arms. This "other" equipment type should be applied to any equipment type other than connectors, flanges, open-ended lines, pumps, or valves.

**Figura 3–22 – Default zero factor per l'industria petrolifera<sup>[93]</sup>**

Analogamente per tutti quei componenti che dallo *screening* risultano essere in perdita oltre i limiti di misura, vengono introdotti dei fattori appositi per considerare l'elevata perdita di sostanza associata.

Complessivamente l'emissione totale quindi risulta determinata da tre differenti contributi secondo l'equazione 3–1.4:

$$E_{TOC} = DZF + a \cdot SV^b + PF \quad 3-1.4$$

dove DZF è il *default zero factor* e PF è il *pegged factor*.

### 3.1.3.4. Metodo con correlazioni specifiche

Il quarto ed ultimo metodo è indubbiamente il migliore e più accurato per la stima della portata emessa anche se fondamentalmente ha le medesime basi teoriche del terzo metodo illustrato, condividendone perfino l'equazione 3-1.3.

La maggiore precisione è ottenibile unicamente tramite l'onerosa attività di sviluppo di correlazioni fra concentrazione misurata e portata emessa, specifiche per il sito analizzato. Proprio questa modalità d'indagine rende l'applicazione di tale metodo poco allettante dal punto di vista economico per le esigenze legate all'autorizzazione integrata ambientale.

Il perfezionamento delle curve di correlazione è realizzabile misurando accuratamente la portata di sostanza emessa. Poiché tali misure per essere significative devono essere realizzate sull'impianto funzionante, è necessario evitarne la dispersione in atmosfera della sostanza e pertanto devono essere realizzate prove di *bagging* ossia, come suggerisce il nome, impacchettare tutti i componenti per contenere quanto da loro emesso e poterlo misurare.

Questa metodologia è stata codificata dall'EPA<sup>[58]</sup> e prevede due soluzioni tecniche, una in pressione (*blow-through method*), secondo lo schema in Figura 3-23, ed una sottovuoto (*vacuum method*), schema in Figura 3-24, che differiscono sul modo in cui il gas di trasporto viene convogliato nel contenitore (*bag*) installato attorno al componente. Infatti, entrambe le soluzioni prevedono l'isolamento dei componenti dall'ambiente esterno mediante appositi *bag* di materiale impermeabile; ma se nella prima configurazione nel *bag* viene iniettata una portata nota di gas inerte, nella seconda il gas è aspirato dal *bag*.

Contemporaneamente alla misura di portata totale di gas, viene realizzata anche una misura di concentrazione all'interno del *bag* per determinare l'effettiva portata dei composti organici emessi dal componente.

La portata così determinata viene relazionata alla concentrazione misurata sul componente secondo il "metodo 21", ricavando così le curve di correlazione specifiche per il sito in cui sono realizzate le prove.

Fra i due metodi quello *blow-through* è il più vantaggioso in quanto, utilizzando un gas di trasporto inerte, riesce a minimizzare la quantità di sostanze organiche presenti nell'atmosfera che potrebbero falsare la misurazione. L'utilizzo di un gas inerte, inoltre, permette di annullare la probabilità che si generi una miscela

esplosiva nel contenitore. Infine l'ultimo vantaggio del metodo *blow-through* è, indubbiamente, quello di garantire un'ottima miscelazione nel contenitore garantendo una concentrazione uniforme e svincolando così il punto in cui effettuare la misura nei successivi monitoraggi.

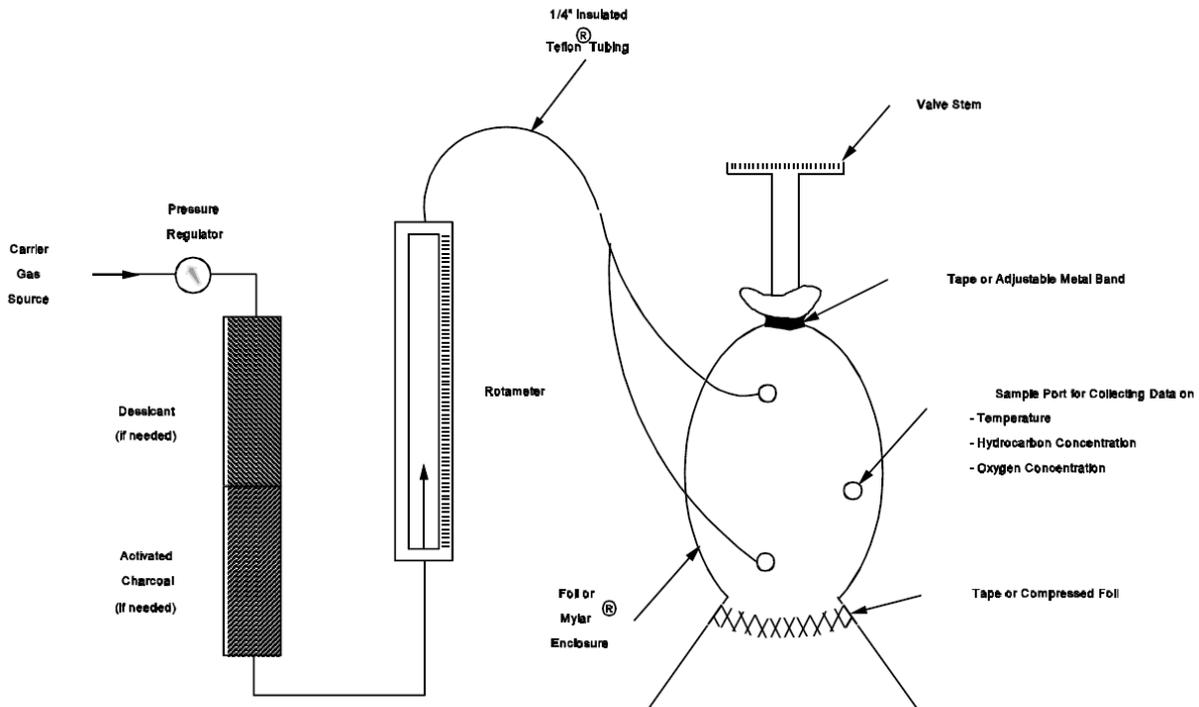


Figura 3-23 – Schema *blow-through method*<sup>[92]</sup>

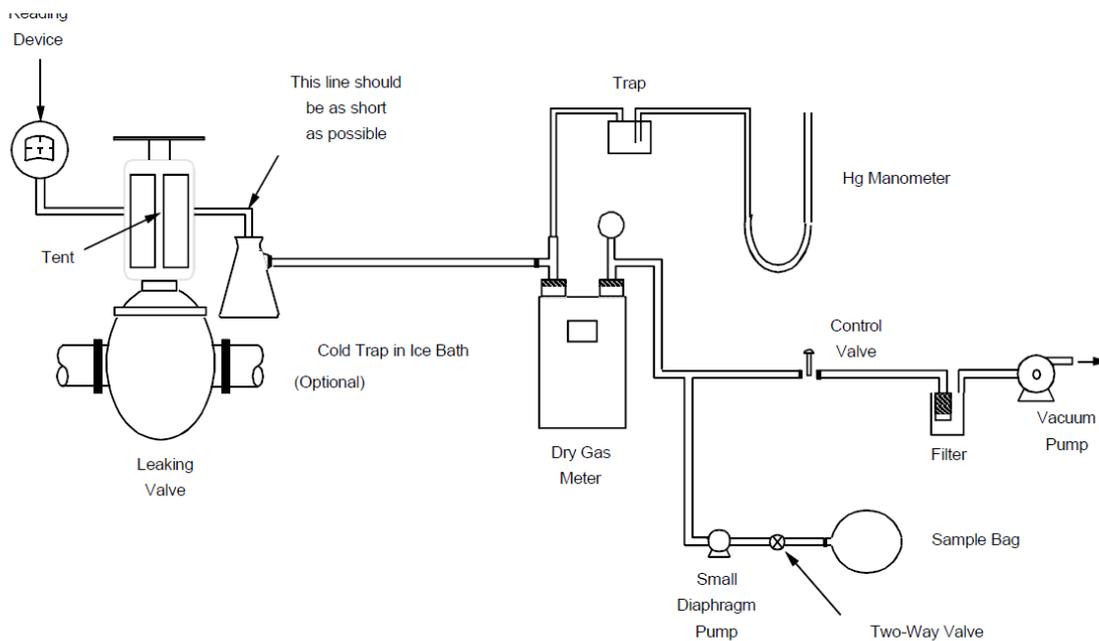


Figura 3-24 – Schema *vacuum method*<sup>[92]</sup>

## 3.2. Modello emissioni fuggitive

Nel capitolo 3.1 sono stati presentati sia i principali metodi sperimentali che quelli previsionali presenti in letteratura per la quantificazione delle emissioni.

Dall'analisi è emerso che i metodi sperimentali attualmente esistenti ed impiegabili d'individuazione, stima e riduzione delle emissioni fuggitive, sviluppati da EPA<sup>[58]</sup> e riconosciuti a livello internazionale<sup>[21]</sup> e nazionale<sup>[33]</sup>, consentono una stima accurata e permettono ai gestori degli stabilimenti produttivi di adempiere agli obblighi di legge — in particolare fornendo alle autorità competenti tutti i dati necessari al rilascio dell'autorizzazione integrata ambientale (AIA) — ma d'altro canto non sono applicabili per una valutazione di alternative progettuali in quanto richiedono che l'impianto sia esistente.

Per quanto concerne i metodi previsionali proposti dall'EPA<sup>[57]</sup>, si è evinto che l'unico metodo applicabile in fase progettuale è quello a fattori medi, presente anche nella norma UNI EN 15446<sup>[61]</sup>, tuttavia l'eccessiva conservatività non consente di ricavare dati sufficientemente realistici per valutare adeguatamente le alternative, come dimostrato in diversi studi di letteratura<sup>[13][15]</sup>.

Queste incertezze elevate, inoltre, non permettono l'individuazione delle sorgenti critiche in una determinata alternativa impiantistica impedendo di fatto l'implementazione di opportune ed adeguate azioni correttive così da migliorarne la sostenibilità già in fase di progettazione.

L'obiettivo è dunque l'elaborazione di un modello, basato su quello a fattori medi proposto da EPA, che possa stimare le emissioni fuggitive durante la fase di progettazione di un impianto di processo, con un livello di dettaglio e di accuratezza tale da fornire gli strumenti adatti per poter effettuare confronti e valutazioni tra varie alternative processuali, in conformità con i suggerimenti presenti nell'allegato IV del D.M. 31 gennaio 2005<sup>[19]</sup> in cui si legge: «Le potenziali emissioni diffuse dovrebbero essere prese in considerazione in tutti gli stadi della Progettazione». Per questo motivo il lavoro svolto si è soffermato sull'approfondimento delle prestazioni delle differenti tenute esistenti, andando a specializzare le varie macro-categorie proposte dall'EPA, sul meccanismo di perdita e sull'efficienza ed efficacia della manutenzione per quantificare la loro influenza sull'emissione finale.

### 3.2.1. Sorgenti di perdita

La quantità di sostanza rilasciata da ciascun componente come emissione fuggitiva, dipende prevalentemente dalle caratteristiche della tenuta dello stesso. Proprio la differenza tecnica che intercorre fra le diverse tipologie di tenute installate sui componenti, più che il loro numero in impianto, giustifica il fatto che il contributo delle sorgenti di perdita all'emissione fuggitiva globale si differenzi come illustrato in Figura 3–25.

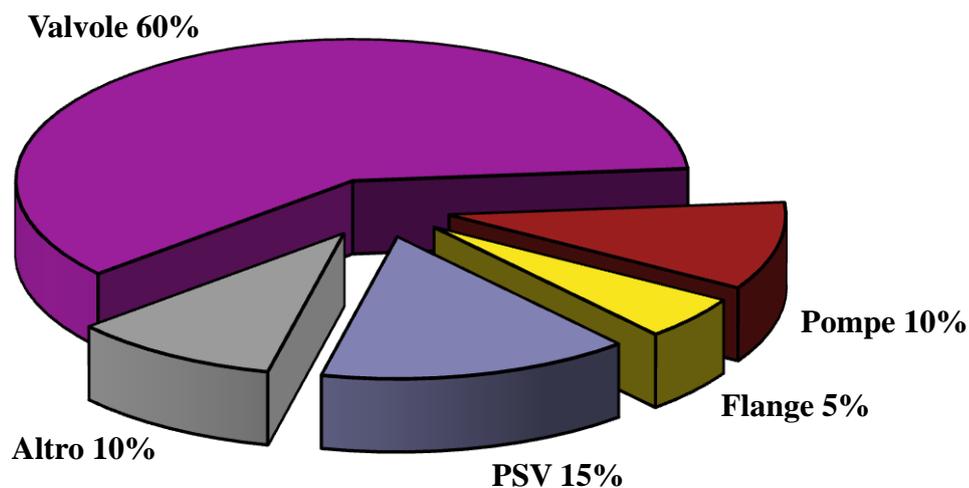


Figura 3–25 – Influenza delle macro-categorie sull'emissione globale<sup>[38]</sup>

Come si può notare, infatti, i componenti che contribuiscono maggiormente alle emissioni fuggitive sono le valvole non le flange, che generalmente sono i componenti più numerosi in un impianto industriale. Queste addirittura sono le meno influenti, sovrastate persino dalle pompe, presenti solitamente in numero esiguo in un impianto. Proprio perché questa differenza fra tenute influenza in modo così significativo le emissioni si è ritenuto opportuno analizzare nel dettaglio le diverse tipologie di tenute che possono caratterizzare i molteplici componenti di processo, che afferiscono alla medesima macro-categoria.

#### 3.2.1.1. Organi d'intercettazione

Studiando gli organi d'intercettazione solitamente impiegati, si è potuto riscontrare che esistono differenti tipologie di tenute — sia per qualità costruttiva che per tipologia di materiale adoperato — che possono essere installate sullo stelo per isolare l'ambiente interno da quello esterno.

Per quanto concerne la quantificazione delle emissioni in funzione della tipologia di tenuta la fonte di riferimento principale è la normativa ambientale tedesca <sup>[10]</sup>, che fornisce i valori riportati in Figura 3–26.

Gasket system	Leakage related to the average size of the gasket [mg/(s x m)]
Stuffing box with packing	1.0
Stuffing box with cup leather, O-ring	0.1
Stuffing box with packing, stuffing box with cup leather, O-Ring (with "TA Air Certificate" according to VDI 2440, Section 3.3.1.3)	0.01
Metallic bellows, sealed	0.01
Metallic bellows, sealed (with flat gasket possessing a TA Luft Certificate according to VDI 2440)	0.001
Stuffing box with packing and sealing medium/suction, metallic bellows, welded on both sides	No emission (technically leak-proof)

**Figura 3–26 – Valori d'emissione secondo TA Luft**

Come si può dedurre più la tenuta risulta complessa minore sarà l'emissione, in quanto tale complessità costruttiva rende più difficile la formazione di canali preferenziali per la fuoriuscita delle sostanze. Ovviamente queste diverse prestazioni hanno una ripercussione economica, come mostrato in Figura 3–27, che ne governa la scelta in fase progettuale.

Material	Emission control (ppm)	Maximum temperature (°C)	Maximum pressure (bar)	Relative cost*
Braided synthetic fibre packing	<10 000	190	80	1
Moulded or machined thermoplastic packing	<500	285	170	2
Carbon or graphite-based braid packing	<10 000	550**	170	3
Asbestos-based yarn packing	>10 000	480	275	3
Carbon or graphite-based die-formed rings	<500	550**	310	4
Polymeric bellows	0	150	20	5
Metal bellows	0	550**	170	6

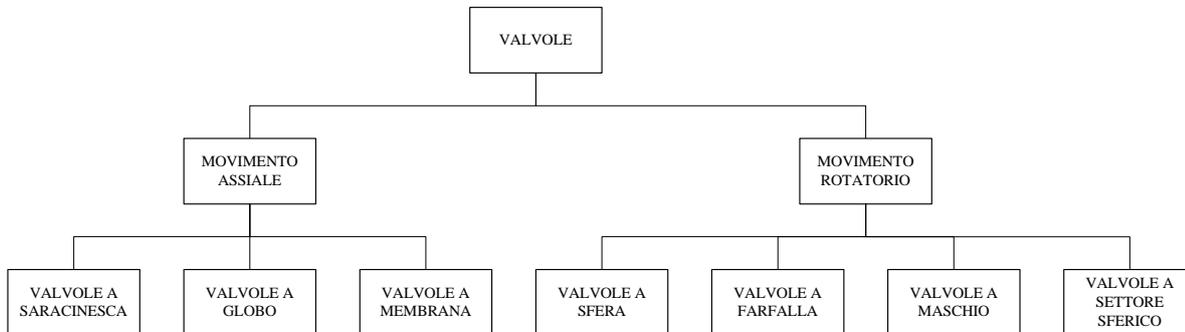
\* Cost increases from 1 to 6.

\*\* Under non-oxidising conditions, a higher temperature may be reliably achieved.

**Figura 3–27 – Prestazioni e costi per tipologia di tenuta <sup>[39]</sup>**

Dall'analisi effettuata sulle valvole è emerso un altro punto fondamentale che influenza fortemente le emissioni fuggitive. Se infatti la tipologia ed il materiale della tenuta sono determinanti per l'emissione, si è riscontrato che essa avviene per la formazione di microscopici canali nelle tenute stesse. La causa principale della loro creazione è riconducibile al movimento dello stelo, che sollecita l'organo di tenuta. Pertanto si può affermare che le emissioni fuggitive di una valvola dipendono anche dal tipo e dalla frequenza del movimento dello stelo, in definitiva, dalla tipologia specifica di valvola.

Le valvole possono essere classificate, Figura 3–28, in due sotto-categorie in relazione al movimento effettuato dallo stelo, valvole a movimento assiale e quelle a movimento rotativo. Nel primo caso lo spostamento dell’otturatore viene realizzato tramite un movimento verticale dello stelo, mentre nel secondo mediante una rotazione sul proprio asse.



**Figura 3–28 – Principali tipologie di valvole raggruppate per movimento dello stelo**

Ciascuna tipologia di valvola presenta un proprio fattore d’emissione specifico, che differisce anche in funzione del fatto che siano configurate per la regolazione o l’intercettazione del flusso.

Nello specifico, le valvole a saracinesca, sono prodotte in diverse varianti e sono idonee esclusivamente al sezionamento e non alla regolazione del flusso. In questo caso, infatti, la turbolenza prodotta provocherebbe un rapido deterioramento della tenuta dell’otturatore.

L’analisi dei dati relativi alle emissioni fuggitive mostrano come le valvole a saracinesca abbiano un impatto rilevante sulle emissioni, in quanto presentano una bassa affidabilità; l’ESA<sup>13</sup> stima che mediamente in un impianto il 26%<sup>[25]</sup> di queste valvole sia in perdita durante la loro vita utile, ed una’elevata concentrazione di rilascio, come mostrato nel Grafico 3–1. In questo senso concordano anche altri studi<sup>[9][35]</sup> i quali attribuiscono alle valvole a saracinesca un fattore d’emissione medio pari a 6 g/h; il più alto fra tutte le valvole.

Nonostante si possano incrementare le prestazioni e ridurre l’emissione scegliendo accuratamente il materiale della tenuta, fino all’utilizzo del soffietto metallico con l’aumento dei costi, ed attuando un efficiente ed efficace piano manutentivo, queste saranno sempre peggiori rispetto a quelle delle altre valvole. Per questo motivo nei casi in cui l’emissione totale non soddisfi i requisiti voluti, è opportuno evitare di utilizzare le valvole a saracinesca.

<sup>13</sup> European Sealing Association

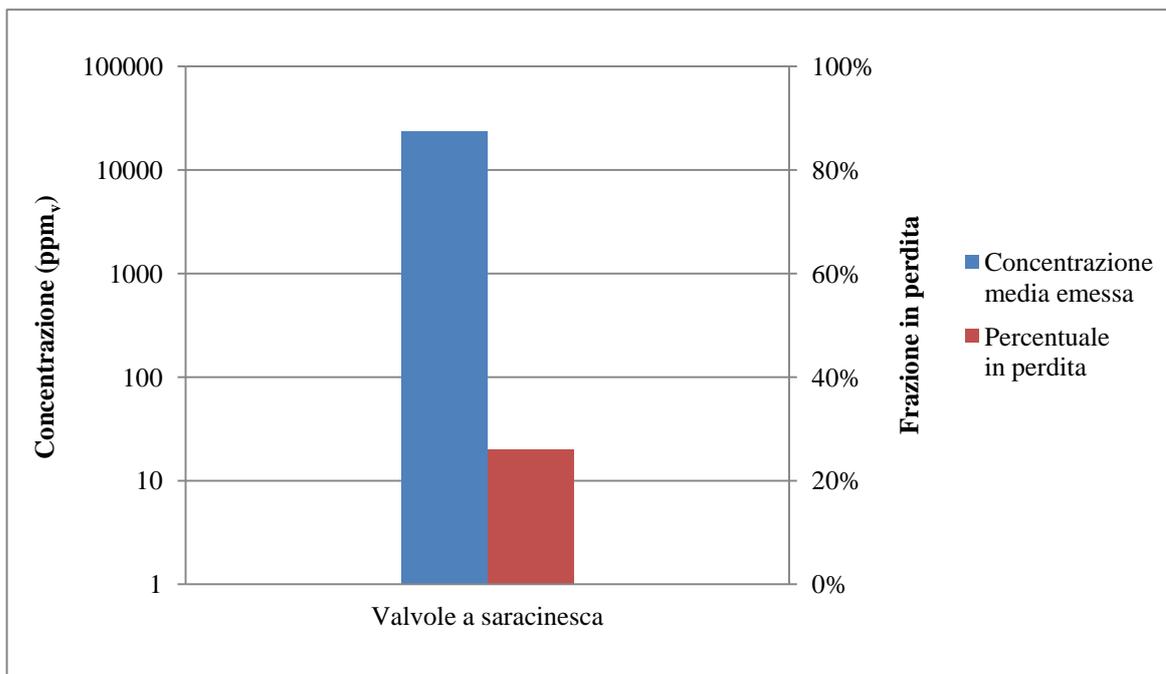


Grafico 3-1 – Concentrazione media e frazione in perdita per valvole a saracinesca <sup>[38]</sup>

Le valvole a globo, anch'esse a movimento assiale, a differenza delle precedenti possono essere impiegate alternativamente in funzione della forma dell'otturatore, come valvole d'intercettazione (otturatore piatto) o di regolazione (otturatore parabolico).

Confrontando, come da Grafico 3-2, le due configurazioni si può riscontrare che, realmente, a parità di tipologia, le valvole di regolazione risultano mediamente più propense all'emissione a causa del frequente movimento dello stelo.

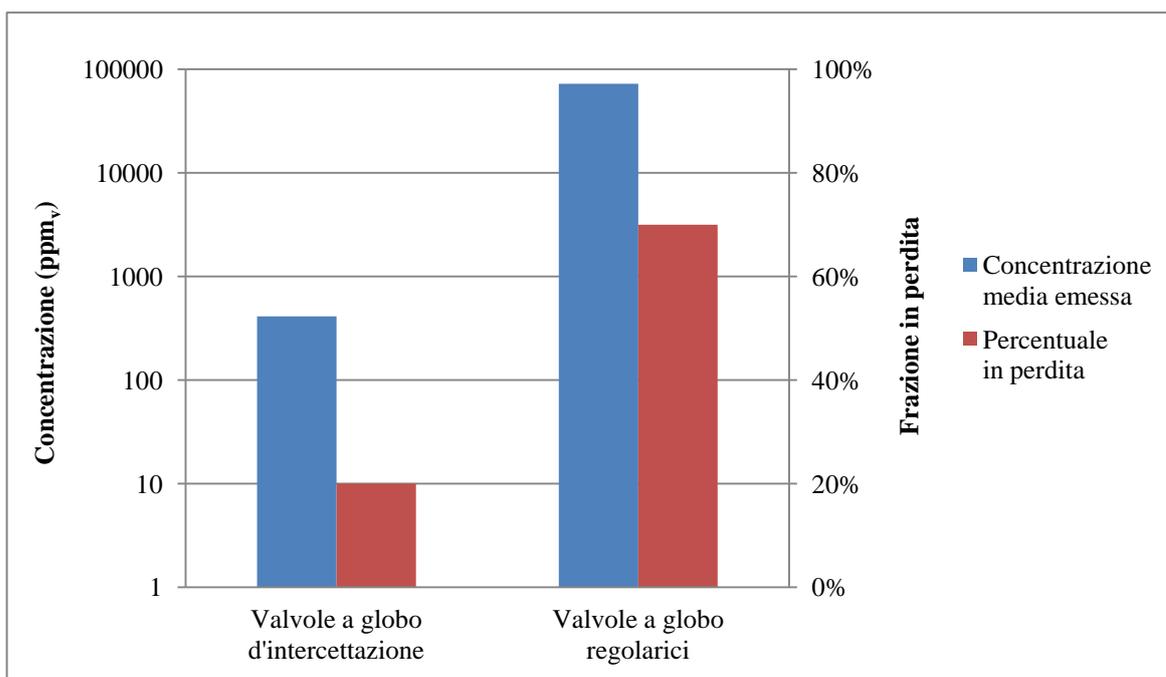


Grafico 3-2 – Concentrazione media e frazione in perdita per valvole a globo <sup>[38]</sup>

La valvola a movimento assiale ad emissione nulla, perfetta sia per l'intercettazione che per la regolazione, è la valvola a membrana, Figura 3–29, caratterizzata appunto da una membrana che funge da otturatore e che impedisce che il fluido possa arrivare a contatto con la tenuta dello stelo.

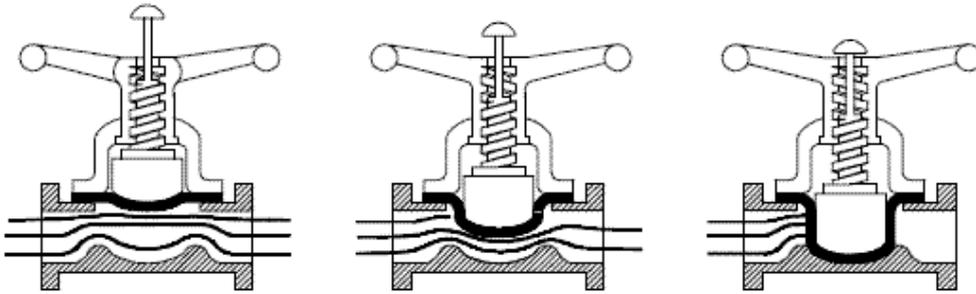


Figura 3–29 – Funzionamento di una valvola a membrana

Poiché la membrana è inevitabilmente in materiale plastico, in quanto deve avere caratteristiche elastiche, queste valvole non possono essere applicate in ogni circostanza, vincolate dalla compatibilità con la sostanza e la temperatura del fluido. Inoltre vista l'intrinseca fragilità della membrana è necessario un periodico controllo manutentivo, per verificarne lo stato, in quanto una rottura causerebbe immediatamente una perdita dalla tenuta dello stelo.

Per quanto concerne le valvole con movimento rotatorio dello stelo, come le valvole a sfera o a farfalla, proprio per il diverso meccanismo di trasmissione, il fattore d'emissione risulta drasticamente ridotto, come da Grafico 3–3.

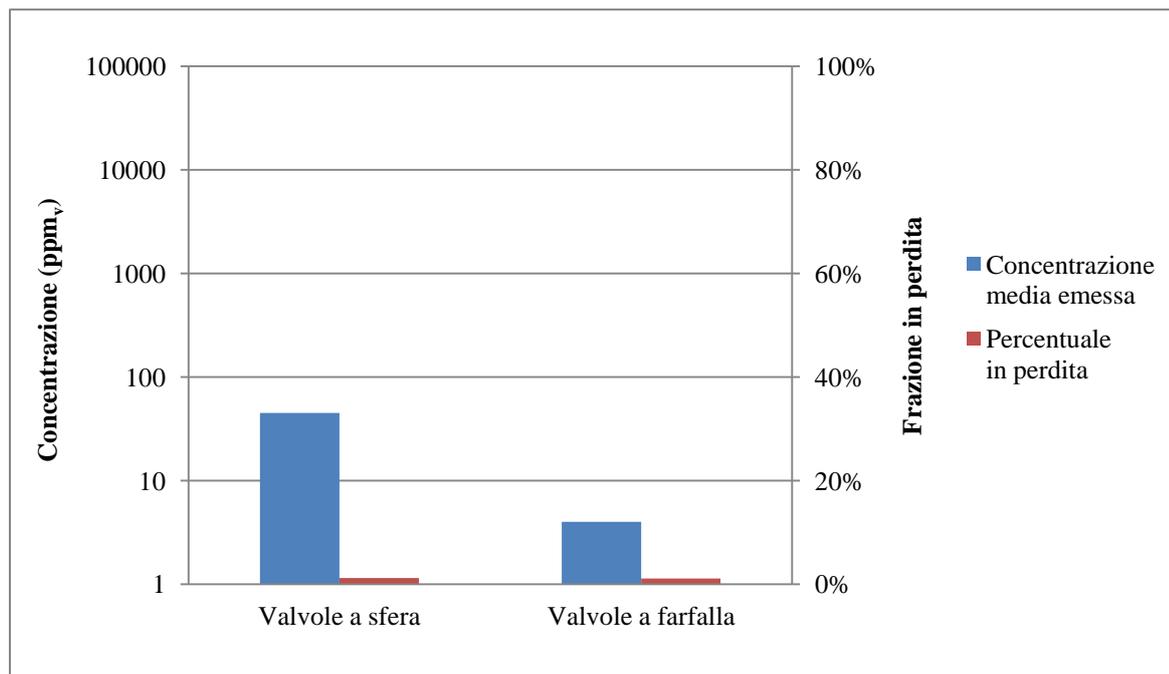


Grafico 3–3 – Concentrazione media e frazione in perdita per valvole a sfera e a farfalla<sup>[38]</sup>

Le valvole a maschio, caratterizzate da un otturatore di forma tronco-conica con foratura centrale per permettere lo scorrimento del fluido, condividono con le precedenti due tipologie il meccanismo di funzionamento, e pertanto presentano prestazioni analoghe in relazione alle emissioni fuggitive, con un fattore d'emissione pari a  $0.018 \text{ g/h}^{[35]}$ .

Anche le valvole a settore sferico impiegate per l'intercettazione del flusso hanno prestazioni analoghe alle altre valvole della categoria; invece quelle che vengono impiegate per la regolazione, sempre a causa dell'elevata frequenza d'azionamento dello stelo, sono caratterizzate da prestazioni inferiori.

### **3.2.1.2. Macchine per movimentazione fluidi**

I componenti atti alla movimentazione dei fluidi, ovvero pompe, compressori ed agitatori, contribuiscono al rilascio di sostanza sotto forma d'emissione fuggitiva per circa il 10% del valore totale, in un classico impianto industriale.

Questo impatto relativamente basso rispetto a quello delle valvole, è da imputare unicamente al fatto che questi componenti sono presenti in numero esiguo in un impianto e non ad una migliore prestazione del sistema di tenuta, che al contrario è meno affidabile in confronto a quello degli organi d'intercettazione.

Le tenute fra l'elemento rotodinamico e quello stazionario, che rappresentano la sorgente preferenziale di perdita, sono varie e possono essere raggruppate in quattro categorie, in ordine crescente di complessità tecnica:

- tenuta a baderna;
- tenuta meccanica semplice;
- tenuta meccanica doppia;
- tenuta meccanica doppia con sistema di flussaggio.

Le varie soluzioni costruttive delle tenute sono le medesime indipendentemente dal fatto che il componente sia impiegato per lo spostamento di gas o di liquidi oppure per il mescolamento di questi ultimi — in quanto la forza al fluido è sempre trasmessa mediante un albero rotante collegato ad un motore — e forniscono differenti prestazioni, in relazione alle emissioni, in funzione della complessità costruttiva. Quest'ultima, infatti, garantisce un maggior grado di contenimento del fluido ma, contestualmente, comporta un aumento dei costi di fabbricazione e d'acquisto ed una maggiore laboriosità nella manutenzione.

Le tenute a baderna, Figura 3–30, sono costituite da premistoppa, trecce di materiale plastico, che vengono mantenute compresse attorno all'albero per garantire il contenimento. Sia per la facilità con cui si usurano i premistoppa sia per la propensione all'allentamento della compressione durante la vita utile a causa delle vibrazioni dell'albero, queste tenute hanno le peggiori prestazioni di contenimento delle emissioni, con una portata media di 504 g/h, che può essere ridotta di un ordine di grandezza installando un sistema di flussaggio che grazie alla circolazione di un fluido barriera — gas o liquidi inerti — nella camera del premistoppa rende difficoltoso il flusso di sostanze volatili verso l'esterno.

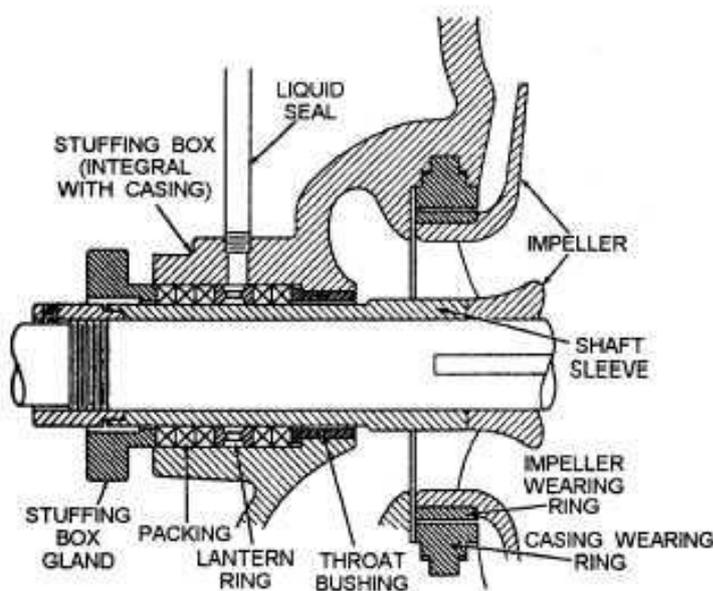


Figura 3–30 – Tenuta a baderna

Le tenute meccaniche in genere presentano migliori prestazioni di quelle a baderna. Queste sono caratterizzate da una o due coppie d'anelli, uno stazionario solidale al corpo ed uno rotante solidale all'albero, tenuti a contatto, sulla superficie perfettamente levigata, grazie alla spinta di una molla come mostrato negli schemi riportati in Figura 3–31. Il punto preferenziale di perdita è proprio il contatto fra le due superfici degli anelli; qualora si interrompesse il contatto infatti si verificherebbe la fuoriuscita della sostanza contenuta all'interno.

La tenuta doppia è stata sviluppata proprio per la necessità di garantire migliori prestazioni di tenuta in applicazioni con fluidi altamente pericolosi, in relazione alla possibilità della rottura catastrofica della tenuta singola, assicurando un'ulteriore barriera, la seconda coppia d'anelli, tra il processo e l'ambiente esterno così da incrementare la sicurezza.

Da questa soluzione si può trarre beneficio anche per la riduzione delle emissioni fuggitive, le quali si generano non per rottura catastrofica degli anelli ma per il loro allontanamento reciproco.

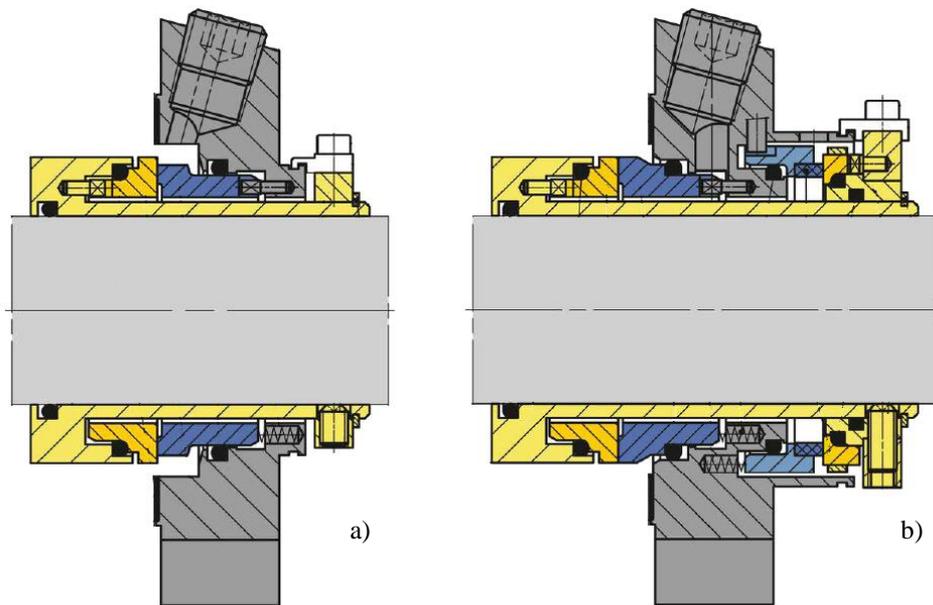


Figura 3-31 – Tenuta meccanica semplice (a) e doppia (b)

La tenuta meccanica semplice, per le sue caratteristiche costruttive è, quindi, più propensa all'emissione. Già gli studi EPA<sup>[58]</sup> evidenziavano questa tendenza attribuendo un valore di portata emessa pari a 19.9 g/h a questo tipo di tenuta. Studi più recenti<sup>[34]</sup>, che analizzavano misurazioni fatte da due associazioni di categoria americane — la CMA<sup>14</sup> e la STLE<sup>15</sup> — forniscono valori nettamente inferiori in funzione del fatto che nel corso degli anni l'evoluzione tecnologica ha permesso di migliorare le prestazioni, garantendo portate d'emissioni pari a 3.22 g/h, che scendono a 1.18 g/h per tenute pre-assemblate.

L'installazione della seconda coppia d'anelli nelle tenute meccaniche doppie che operano a secco permettono una riduzione delle portate emesse di un altro ordine di grandezza, garantendo rilasci mediamente attestanti a valori di 0.7 g/h, che scendono a valori di 0.45 g/h per le tenute pre-assemblate<sup>[34]</sup>.

Qualora si utilizzi anche un fluido barriera, la tenuta meccanica doppia è in grado di assicurare prestazioni di contenimento molto elevate, quasi annullando le emissioni fuggitive<sup>[7]</sup>, le quali sono realmente eliminate utilizzando pompe a trascinamento magnetico, che non presentano organi di tenuta.

<sup>14</sup> Chemical Manufacturers' Association, oggi American Chemistry Council

<sup>15</sup> Society of Tribologists and Lubrication Engineers

### 3.2.1.3. Connessioni di processo

Nonostante in un tipico impianto di processo le flange siano il componente presente in maggior numero, contribuiscono all'emissione totale in percentuale inferiore agli organi d'intercettazione e a quelli di movimentazione. Ciò significa che singolarmente ogni flangia è caratterizzata da una portata d'entità estremamente ridotta e questo è da attribuire alle prestazioni delle guarnizioni. Infatti fra le flange, fissate mediante dadi, sono interposte delle guarnizioni, come mostrato in Figura 3–32, che servono per correggere eventuali difetti dei giunti flangiati, quali non planarità o imperfezioni superficiali, che non garantirebbero la perfetta tenuta delle connessioni.

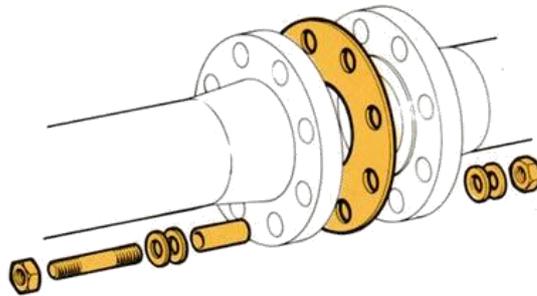


Figura 3–32 – Tipico d'installazione per flange

La corretta installazione, il giusto materiale e, soprattutto, l'esatta coppia di serraggio sono gli elementi fondamentali per un adeguato controllo delle emissioni fuggitive e pertanto sono trattati da numerose normative<sup>[60][62][63]</sup>.

La guarnizione, infatti, è soggetta a varie sollecitazioni, sia di tipo statico sia dinamico, che influenzano le caratteristiche di tenuta. Il principale carico che una guarnizione subisce è la compressione statica, ovvero il serraggio, come da Figura 3–33, che si oppone alla pressione idrostatica che il fluido esercita sulle flange. Se il serraggio non ha la forza sufficiente le flange si allontanano e la guarnizione non è più in grado di sopperire alle imperfezioni superficiali, che diventano la strada preferenziale per la fuoriuscita delle sostanze.

Qualora il serraggio fosse troppo stretto si avrebbe una deformazione plastica della guarnizione con conseguente perdita d'elasticità che consente l'adattamento alla superficie delle flange. Quando si verifica il tipico allentamento del serraggio durante la vita utile del giunto, a causa delle vibrazioni, la guarnizione non è più in grado di correggere i difetti superficiali così che si vengono a creare canali preferenziali per le emissioni fuggitive.

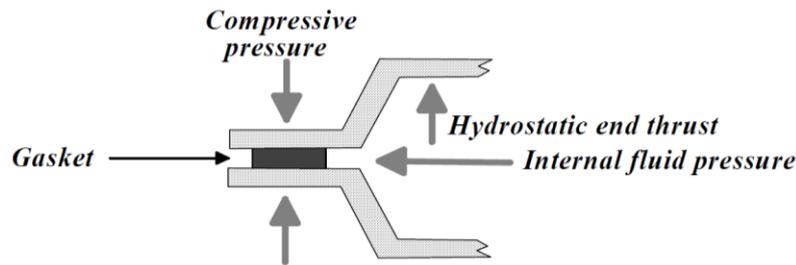


Figura 3-33 – Carichi statici esercitati sulla guarnizione di una flangia

Il materiale della guarnizione è l'altro importante fattore che influenza le prestazioni di tenuta; le flange sono, infatti, sottoposte anche a carichi dinamici dovuti alle variazioni di pressione e temperatura della corrente di processo, molto frequenti soprattutto in impianti *batch*. Queste fluttuazioni delle condizioni operative si ripercuotono anche sulle guarnizioni incrementandone la porosità e favorendo di conseguenza la formazione di canali preferenziali per le emissioni fuggitive. Per questo è necessario scegliere il materiale più adeguato.

In generale si possono individuare tre categorie di guarnizione:

- non metalliche;
- semi-metalliche;
- metalliche.

Le prime sono realizzate in materiale plastico chimicamente compatibile con la sostanza — i più comuni sono PTFE, fibre aramidiche o grafite — e, quindi, presentano un ampio campo d'impiego grazie ai grandi intervalli d'applicabilità di temperature, pressioni e resistenza alla corrosione, tipici dei materiali utilizzati. Risultano pertanto le guarnizioni più comuni in impianto e sono quelle con maggiori studi in merito alle emissioni fuggitive.

Come già riscontrato per le tenute meccaniche, i dati dell'EPA relativi alle portate rilasciate dalle guarnizioni risultano fortemente sovrastimati rispetto a quelli ricavati da studi più recenti<sup>[8][9][25]</sup>, e ciò si può ricondurre nuovamente all'evoluzione delle tecnologie; infatti in passato il principale materiale con cui venivano realizzate le guarnizioni era l'amianto che ha prestazioni di contenimento estremamente inferiori a quelle dei materiali attuali.

Se, infatti, le guarnizioni d'amianto sono caratterizzate da una portata emessa per unità di lunghezza pari a  $0.056 \frac{\text{mg}}{\text{s m}}$ , le attuali guarnizioni in grafite dimezzano tale valore, mentre sia quelle in fibra aramidica che in PTFE sono caratterizzate da prestazioni migliori come illustrato nel Grafico 3-4.

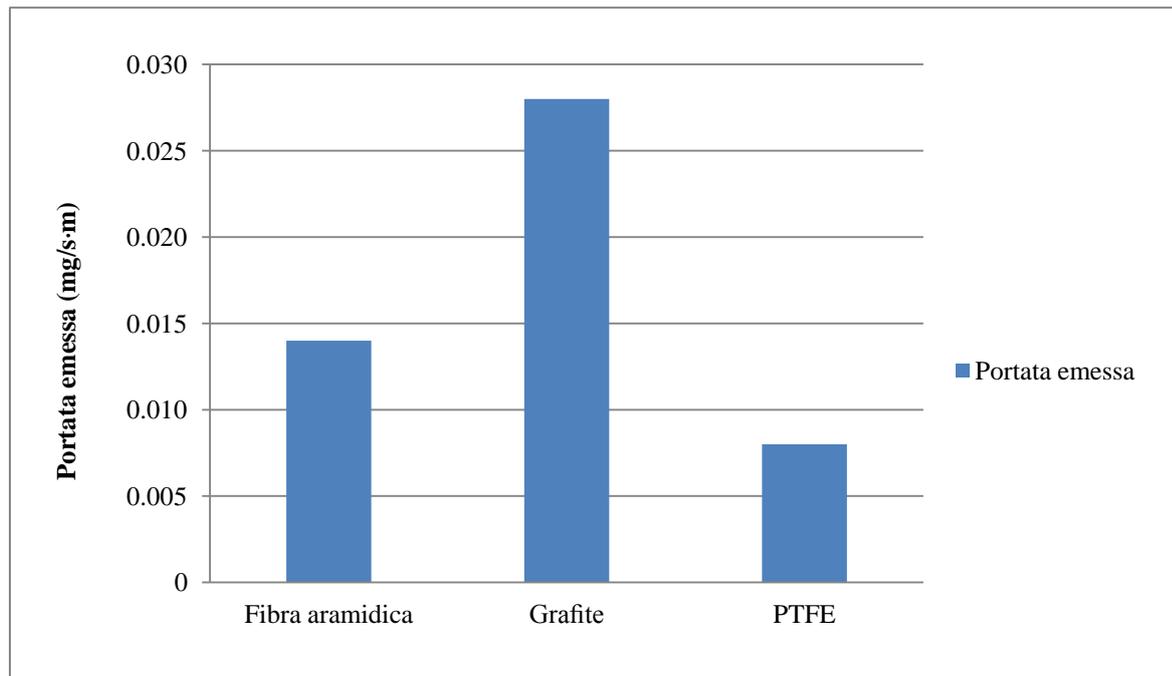


Grafico 3-4 – Prestazioni delle guarnizioni in funzione del materiale<sup>[38]</sup>

È possibile migliorare le prestazioni di un giunto flangiato utilizzando guarnizioni semi-metalliche che sono caratterizzate da elevata resistenza ed elasticità e che mediamente garantiscono una riduzione delle portate emesse di un ordine di grandezza rispetto alle guarnizioni non metalliche<sup>[25]</sup>.

Le guarnizioni metalliche invece presentano portate medie più elevate a causa della loro intrinseca rigidità che impedisce l'occlusione dei difetti più piccoli delle facce; ma il loro contributo all'emissione totale risulta estremamente basso in quanto il loro utilizzo è circoscritto ad applicazioni in condizioni di processo veramente proibitive per gli altri materiali.

#### 3.2.1.4. Organi di sicurezza

Gli organi di sicurezza sono dispositivi di protezione meccanica contro le sovrappressioni in un'apparecchiatura di processo e possono essere o valvole di sicurezza o dischi di rottura. Per la funzione che svolgono il loro numero, normalmente, non eccede quello dei singoli apparecchi dell'impianto, dunque è molto esiguo in confronto al numero di flange o valvole.

Però anche questa categoria di componenti contribuisce in modo significativo all'emissione globale. Si può ascrivere ad essa il 15% del rilascio totale per l'elevata portata d'emissione che caratterizza le valvole di sicurezza; mentre i dischi non concorrono in alcuna misura.

Questa differenza è riconducibile alle caratteristiche costruttive; infatti il disco di rottura presenta una membrana metallica preformata che in caso di sovrappressione si rompe permettendo il rilascio mentre la valvola di sicurezza ha un otturatore metallico che, mediante l'azione di una molla, chiude il passaggio al fluido. Quindi il disco di rottura a differenza della valvola di sicurezza non presenta, come mostrato in Figura 3–34, punti di tenuta.

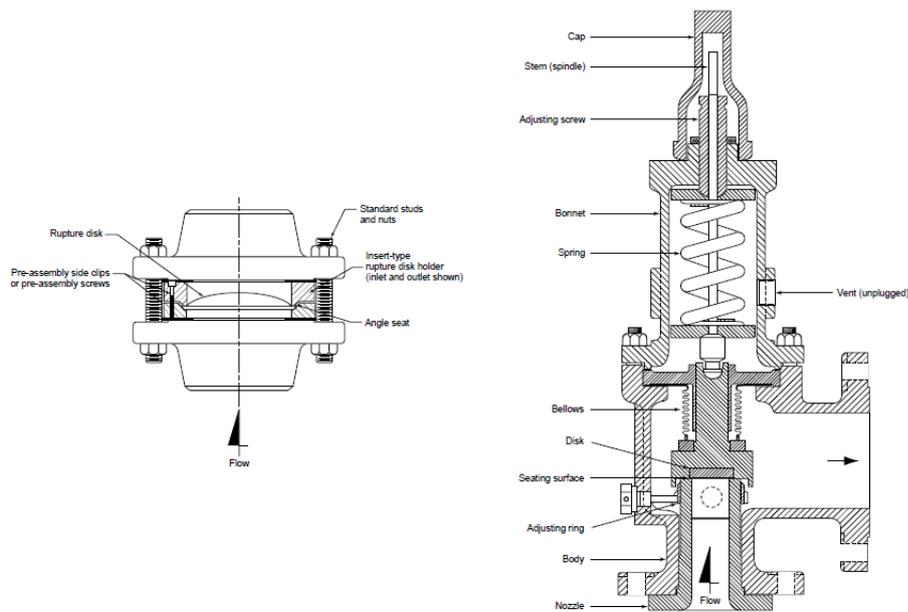


Figura 3–34 – Disco di rottura e valvola di sicurezza

Il punto preferenziale di perdita per le valvole di sicurezza è riconducibile alla tenuta fra il disco dell'otturatore e la sua sede — solitamente una tenuta metallo su metallo, ma non mancano casi di tenute plastiche per applicazioni in processi particolarmente aggressivi dal punto di vista corrosivo — che nel caso di non perfetta aderenza fra le due superfici consente il trafilamento della sostanza.

Nell'ambito delle emissioni fuggitive il rilascio non è mai riconducibile all'apertura della valvola per lo scarico della sovrappressione per la quale è progettata, ma è causato in genere dall'usura della tenuta.

L'EPA riscontra questa criticità, però attribuisce<sup>[58]</sup> un valore medio di portata estremamente elevato, 104 g/h per l'industria SOCOMI, e non discrimina in nessun modo sulla configurazione d'installazione degli organi di sicurezza. Infatti una valvola di sicurezza è soggetta ad emissione fuggitiva unicamente se lo scarico non è convogliato ad un adeguato sistema d'abbattimento.

Grazie al convogliamento, infatti, è garantito il controllo di tutte le possibili emissioni fuggitive, inviandole ad un sistema d'abbattimento.

Qualora gli organi di sicurezza non fossero convogliati, invece, si avrebbero rilasci in atmosfera che differiscono d'entità in funzione della tipologia di tenuta installata. In particolare si possono distinguere due tipologie di valvole di sicurezza, una con tenuta normale ed una con soffiello, come da Figura 3–35, e quest'ultima presenta prestazioni di contenimento migliori.

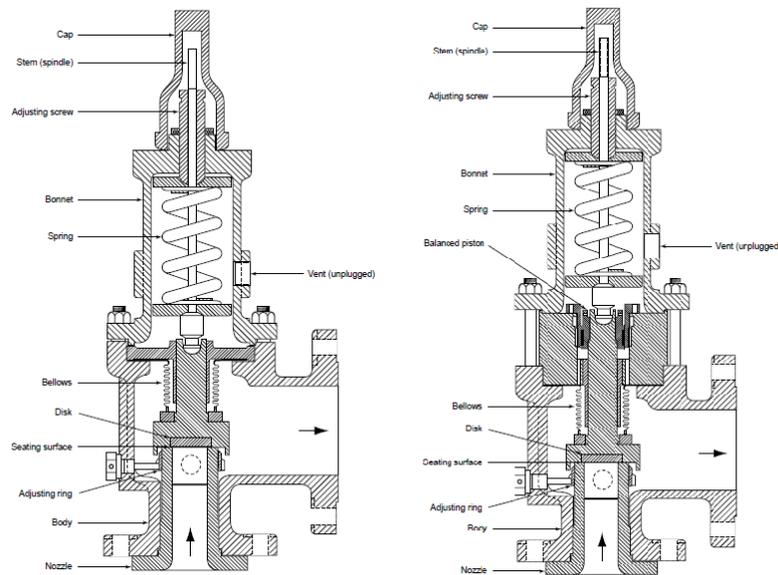


Figura 3–35 – Valvole di sicurezza con e senza soffiello

Inoltre nella formulazione del suo fattore d'emissione l'EPA non ha considerato la normativa attualmente vigente<sup>[18]</sup>, che impone la revisione, ogni due anni, delle valvole di sicurezza in funzione. Con questo controllo non si verificano unicamente il corretto funzionamento del dispositivo e la sua taratura, ma anche le prestazioni di tenuta. Per farlo si realizza un test, schema in Figura 3–36 in cui è misurato il numero di bolle attraversanti l'otturatore, immergendo la valvola in acqua ed insufflando aria con una portata stabilita dalle normative API<sup>16[4]</sup>.

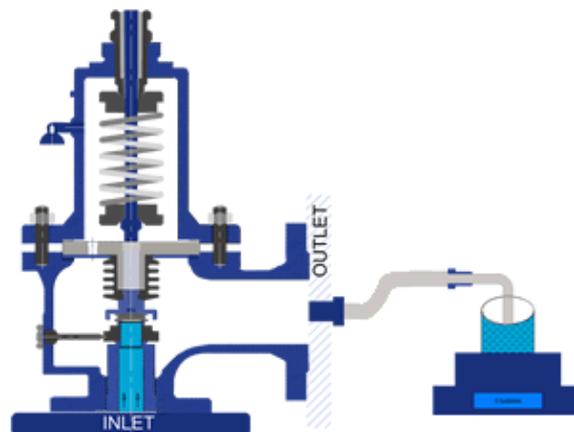


Figura 3–36 – Impianto per il leakage test

<sup>16</sup> American Petroleum Institute

L'esito della prova è positivo unicamente se il numero di bolle emesse non supera le venti unità. Questo significa che l'emissione fuggitiva associabile ad una valvola è bassa e dalle analisi svolte sugli organi di sicurezza nello stabilimento produttivo analizzato si è riscontrato che essa è mediamente pari a 0.77 g/h. Questo è un valore inferiore di quattro ordini di grandezza rispetto a quello stimato dall'EPA per le industrie chimiche.

Seppur modesta, le valvole di sicurezza presentano una portata di rilascio che può essere annullata unicamente combinandole con un disco di rottura, di cui in Figura 3-37 è riportata l'installazione tipica.

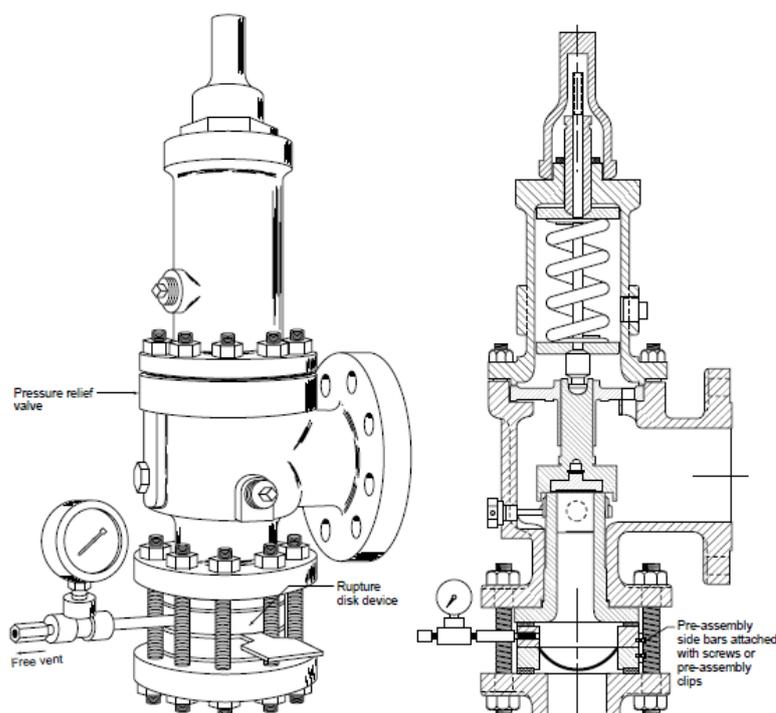


Figura 3-37 – Tipico d'installazione di disco di rottura a protezione di valvola di sicurezza

Questa soluzione tecnica si applica normalmente per quei processi che coinvolgono sostanze che hanno caratteristiche d'aggressività, come polveri abrasive o fluidi corrosivi, tali da danneggiare la valvola di sicurezza e per le quali non è possibile utilizzare materiali plastici per le condizioni operative o in tutti quei processi che impiegano sostanze che tendono a cristallizzare, formando depositi solidi che potrebbero impedire la perfetta tenuta dell'otturatore dopo l'apertura della valvola.

Questi fattori favoriscono, ovviamente, anche le emissioni fuggitive pertanto la soluzione tecnica di accoppiare l'utilizzo di una valvola di sicurezza con l'utilizzo di un disco di rottura permette di annullare i rilasci.



## 4. APPLICAZIONE DEI SISTEMI DI SUPPORTO DECISIONALE E RISULTATI

### 4.1. Caso di studio

Nella sezione precedente sono stati introdotti nuovi indicatori sia per quanto riguarda lo studio di sbottigliamento (capitolo 2.3) sia per considerare nuove categorie d'impatto delle emissioni fuggitive (capitolo 2.4) nell'analisi della sostenibilità ad integrazione del modello dei KPI di sostenibilità presente in letteratura e descritto nel capitolo 2.2. La stima delle emissioni fuggitive ha inoltre richiesto l'approfondimento dei modelli di rilascio descritti in letteratura e l'introduzione di un nuovo metodo di stima (capitolo 3.2), poiché quelli attuali sono risultati estremamente conservativi per fornire indicazioni attendibili.

Queste nuove proposte sono state validate mediante l'applicazione su di un caso reale d'impianto produttivo di un intermedio, verificando che i risultati ottenuti fossero concordi con le misure sperimentali effettuate sull'impianto stesso.

In particolare per quanto riguarda gli indici che forniscono lo stato di salute di una linea e verificano la necessità di sbottigliamento, essi sono stati validati confrontandoli con la simulazione HYSYS<sup>[6]</sup> e la verifica fluidodinamica dell'impianto attuale per poi essere impiegati nell'analisi delle alternative di sbottigliamento necessarie per soddisfare l'aumento di richiesta del prodotto.

Sullo stesso impianto è stato validato il modello di stima delle emissioni fuggitive effettuando un confronto dei risultati ottenibili dalla simulazione con quelli misurati sperimentalmente in impianto mediante il metodo proposto da ISPRA<sup>[33]</sup> e richiesto ai gestori degli stabilimenti soggetti ad AIA.

Inoltre per ottenere un ulteriore riscontro il modello è stato applicato ad un secondo impianto, in questo caso di purificazione di un solvente, sempre soggetto al monitoraggio richiesto per legge.

Validati sia il modello di stima delle emissioni fuggitive che gli indicatori di sbottigliamento (*bottleneck indicators*) e degli impatti sociali delle emissioni fuggitive (*area hazard indicators*) sul caso reale, è stato impiegato il metodo dei KPI di sostenibilità modificato per valutare le alternative progettuali di sbottigliamento nell'ottica della sostenibilità.

### 4.1.1. Le problematiche

Le esigenze aziendali di un incremento della produzione di TAA del 15% rispetto all'attuale hanno comportato la necessità di verificare se la sezione di purificazione fosse adeguata per le nuove potenzialità.

Il lavoro ha richiesto l'analisi delle problematiche della linea mediante lo studio dei dati storici di produttività e manutenzione. Da questo è emerso che l'impianto è limitato nella sua capacità produttiva da problematiche riconducibili alle sostanze. In particolare alla TAA che, come detto, presenta un elevato punto di solidificazione e una bassa temperatura di decomposizione.

La tendenza alla solidificazione del prodotto è una delle principali cause dei malfunzionamenti della linea produttiva.

Infatti la TAA tende a depositarsi nei punti freddi delle apparecchiature e tubazioni, soprattutto nei condensatori delle colonne o negli strumenti non correttamente coibentati, e questo comporta necessariamente l'oneroso compito di lavaggio e manutenzione che impedisce il pieno sfruttamento della linea.

Con i risultati ottenuti dall'analisi storica, si è potuto validare il primo indice relativo allo sbottigliamento, il *process effectiveness*.

L'indice è infatti definito proprio per effettuare l'analisi delle cause che impediscono il corretto sfruttamento della linea.

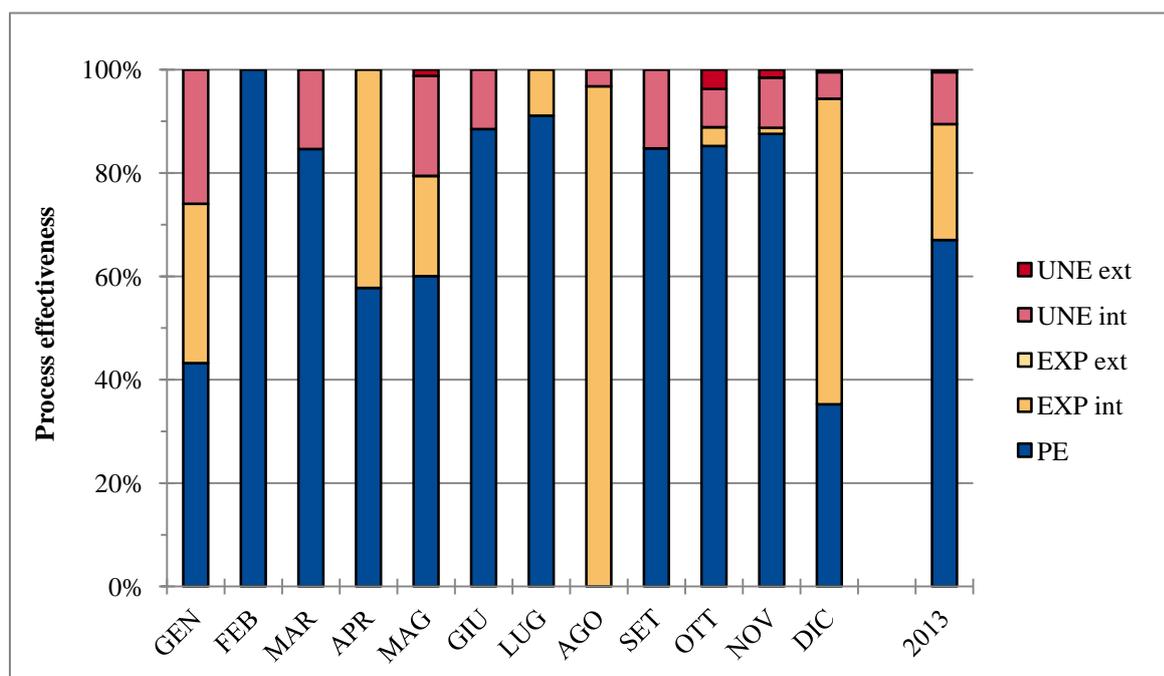


Grafico 4-1 – Valore del *process effectiveness* per l'impianto della TAA nel 2013

Ricavando i dati di produttività e di fermo impianto dai registri aziendali è stato calcolato l'indice per la linea della TAA sia per l'anno 2013, riportato nel Grafico 4-1, che nel 2014 come da Grafico 4-2.

Per entrambi i casi si è graficato l'indice sia su base mensile che su base annua per una migliore comprensione delle problematiche.

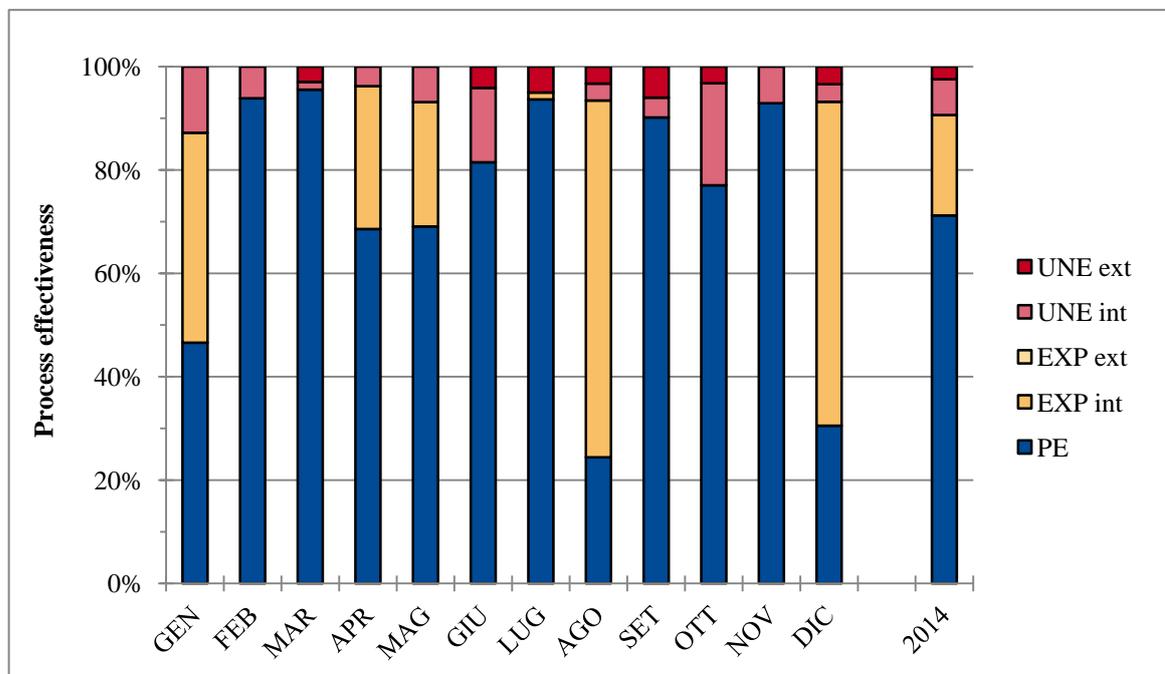


Grafico 4-2 – Valore del *process effectiveness* per l'impianto della TAA nel 2014

Come si può notare dai grafici sopra riportati e dalla Tabella 4-1, in cui sono sintetizzati i valori annuali dei vari indici, la capacità produttiva è inficiata in modo particolare da problematiche endogene alla linea stessa, e in misura maggiore da cause note da precedenti storici.

Indice	2013	2014
Process effectiveness (PE)	67.02%	71.21%
Perdite pianificate interne (EXP <sub>int</sub> )	22.43%	19.42%
Perdite pianificate esterne (EXP <sub>ext</sub> )	0%	0%
Perdite inaspettate interne (UNE <sub>int</sub> )	10.05%	6.93%
Perdite inaspettate esterne (UNE <sub>ext</sub> )	0.50%	2.44%

Tabella 4-1 – Indici per la linea produttiva della TAA

Per la verifica dell'attendibilità dei risultati dell'indice *process effectiveness*, si è proceduto con l'analisi dettagliata delle cause di radice delle perdite così da valutare se forniscono le medesime informazioni dell'analisi storica.

Analizzando le perdite pianificate interne per entrambi gli anni si è riscontrato che, come previsto dall'analisi storica, le cause principali della mancata produzione sono di tre tipologie, secondo quanto riportato in Tabella 4–2.

<b>Cause primarie</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
Interventi migliorativi	42.9%	0%
Manutenzione	41.0%	100%
Errori in ripartenza	16.1%	0%

**Tabella 4–2 – Cause primarie delle perdite pianificate interne**

Essenzialmente le perdite sono causate da interventi manutentivi programmati o da interventi migliorativi della linea, quali razionalizzazione delle linee, sostituzione della strumentazione con elementi innovativi o installazione di nuove tipologie di apparecchiature, come successo ad agosto del 2013 quando è stato introdotto il nuovo filtro a coalescenza K602-S1.

Analizzando l'altra categoria fortemente impattante sulla capacità produttiva, le perdite inaspettate interne, si è evinto che anche in questo caso le cause di radice fossero limitate, come riportato in Tabella 4–3, e che nuovamente la principale causa di mancata produzione fosse per entrambi gli anni la necessità di effettuare manutenzioni alle apparecchiature e alla strumentazione.

<b>Cause primarie</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
Manutenzione	81.8%	95.3%
Errori operativi	2.3%	4.7%
Errori in ripartenza	15.9%	0%

**Tabella 4–3 – Cause primarie delle perdite inaspettate interne**

Per completezza d'indagine ed essere sicuri della validazione dell'indice si è indagato anche sulle cause di radice delle perdite inaspettate esterne.

In questo caso le perdite possono essere ricondotte a due sole categorie ovvero problematiche con le materie prime o le utilities, come riportato in Tabella 4–4.

<b>Cause primarie</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
Materie prime	0%	39.4%
Utilities	100%	60.6%

**Tabella 4–4 – Cause primarie delle perdite inaspettate esterne**

Complessivamente dall'indice *process effectiveness* si sono ritrovate le medesime cause primarie determinate dall'analisi storica, validandone l'attendibilità. Quindi in definitiva si evince che l'impianto è sfruttato meno della propria capacità massima a causa soprattutto della necessità di continui interventi manutentivi sulla linea, come dimostrato anche dall'indice relativo alla manutenzione MTZ riportato in Tabella 4-5.

<b>Indice</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
Perdite per manutenzione (MTZ)	17.4%	20.0%

**Tabella 4-5 – Indice delle perdite produttive ascrivibili alla manutenzione**

Alla base della continua necessità di effettuare interventi manutentivi si riscontra la problematica di una eccessiva deposizione di sostanze solide nei punti più freddi della linea, proprio per la natura del prodotto d'interesse.

Questo permette di dedurre che le apparecchiature non operano nelle corrette condizioni per le quali sono state progettate e questo può essere valutato applicando l'indice *equipment effectiveness*.

Per dimostrare tale affermazione e validare anche il secondo indicatore, è necessario effettuare una simulazione del processo, mediante appositi software, per reperire tutte le informazioni necessarie alle verifiche fluidodinamiche che non disponibili dagli storici d'impianto.

## 4.2. Analisi di sbottigliamento

Lo studio fluidodinamico delle apparecchiature, concordemente all'indice *equipment effectiveness* dedicato all'individuazione dei colli di bottiglia, ha riscontrato che tre delle attuali apparecchiature impiegate nella sezione di distillazione della TAA non sono adeguate all'operazione. Chiaramente questo significa che non potranno essere assolutamente adeguate nel caso d'incremento della produttività, come richiesto dall'azienda. Inoltre è emerso che alcune apparecchiature fondamentali, come l'evaporatore della sezione di flash, non presentano elevati margini d'ampliamento della loro capacità produttiva. Per questo motivo per tali apparecchiature è necessario effettuare un'ulteriore verifica fluidodinamica, simulando le portate incrementate, così da valutare se i margini di sbottigliamento sono sufficienti ad assorbire la nuova potenzialità.

Poiché queste problematiche affliggono le apparecchiature principali della linea, due colonne di distillazione su tre, nell'analisi per incrementare la produzione del 15% rispetto all'attuale non ci si è solo soffermati sul dimensionamento di nuove apparecchiature nella configurazione attuale. Sono state proposte due alternative tecniche con un diverso numero di operazioni unitarie, così da ridurre l'investimento necessario e cercare nel contempo di razionalizzare sia le *utilities* impiegate che lo spazio occupato nel fabbricato.

Anche per ognuna delle nuove alternative, proposte nei prossimi paragrafi, si è effettuata una simulazione in HYSYS per ricavare le informazioni necessarie al dimensionamento fluidodinamico, realizzato secondo le procedure analizzate in precedenza, così da permettere la loro quantificazione economica.

### 4.2.1. Alternativa I

La prima alternativa considerata è quella più naturale, ovvero mantenere inalterata la configurazione delle operazioni unitarie, cambiando unicamente le apparecchiature non adeguate alla nuova potenzialità, Figura 4-1.

Come anticipato in questo caso sarà sicuramente necessario provvedere alla modifica delle due colonne di distillazione sottodimensionate e alla verifica delle apparecchiature con bassi margini d'incremento della potenzialità.

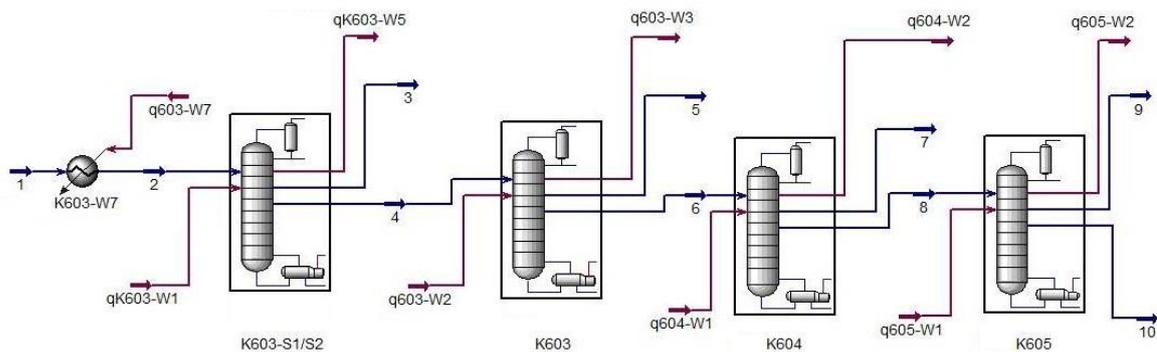


Figura 4-1 – Configurazione dell'alternativa I

Al fine della simulazione si è assunto che nella configurazione sbottigliata, le pressioni di testa di ciascuna colonna e dello stadio di flash rimanessero inalterate rispetto all'impianto attuale, così come i rapporti di riflusso.

Analogamente vengono mantenuti identici il rapporto di riciclo al serbatoio di rettifica della sezione di flash, le temperature di fondo colonna e quella della corrente in uscita dall'evaporatore della sezione di flash K603-W1.

Per quanto riguarda le portate di riciclo agli evaporatori delle colonne, quelle attuali sono state incrementate della percentuale di sbottigliamento.

Dalla simulazione — di cui si riportano i bilanci di materia normalizzati sulla portata di prodotto uscente dall'attuale impianto produttivo, Tabella 4-6 ed energia, Tabella 4-7 — e dalle successive verifiche fluidodinamiche è emerso che tutte le apparecchiature sovra dimensionate per la potenzialità attuale sono adeguate per l'incremento di produttività.

Linea	Portata simulata
1	513.9
2	513.9
3	270.3
4	243.6
5	76.3
6	167.3
7	25.7
8	141.6
9	114.3
10	27.3

Tabella 4-6 – Bilancio di massa normalizzato per l'alternativa I

<b>Apparecchiatura</b>	<b>Potenza termica (kW)</b>
K603-W7	117.4
K603-W1	673.4
K603-W5	696.3
K603-W2	138.0
K603-W3	176.0
K604-W1	115.9
K604-W2	134.4
K605-W1	272.9
K605-W2	307.5

Tabella 4-7 – Bilancio termico per l'alternativa I

Risulta pertanto necessario sostituire o modificare unicamente le apparecchiature K603-W5, K603 e K605.

#### **4.2.1.1. Condensatore K603-W5**

La prima apparecchiatura che risulta sottodimensionata per l'applicazione è il condensatore della sezione di flash, già attualmente non operante correttamente. Infatti la sua area geometrica è pari a  $10.12 \text{ m}^2$  a fronte di una richiesta di  $12.28 \text{ m}^2$ , questo significa che anche per la nuova produttività risulterà inadeguato, la nuova area richiesta è infatti di  $15.06 \text{ m}^2$ .

Come noto gli scambiatori a piastre sono modulabili mediante l'aggiunta di piastre; pertanto per l'adeguamento è possibile o aggiungere un numero di piastre sufficienti o acquistare una nuova apparecchiatura.

L'impiego di una nuova apparecchiatura di tipologia differente, come uno scambiatore a fascio tubiero risulta impraticabile per questioni di spazio.

Rispetto all'acquisto di un nuovo scambiatore a piastre, visto il buono stato di conservazione dell'attuale ed il fatto che le specifiche piastre sono ancora commercializzate, l'aggiunta di piastre all'apparecchiatura attuale risulta economicamente vantaggioso, sia dal punto di vista dei costi d'acquisto — è sufficiente aggiungere 30 piastre per raggiungere un'area di  $16.72 \text{ m}^2$  — sia per quanto riguarda i costi d'installazione. La piastra mobile dell'apparecchio, infatti, non è connessa a nessuna tubazione pertanto, a differenza dell'acquisto di un nuovo scambiatore, non è necessario modificare le tubazioni.

#### **4.2.1.2. Colonna di distillazione K603**

Come verificato nei capitoli precedenti, per l'applicazione attuale la colonna K603 risulta sottodimensionata nella sua sezione d'esaurimento. Verificandola per la portata sbottigliata, risulta inadeguato anche il tronco d'arricchimento.

Questa verifica del tronco superiore alla nuova portata non è scontata; infatti la colonna non è realizzata in un unico pezzo saldato ma presenta una flangiatura all'altezza dell'alimentazione. È pertanto possibile riutilizzare separatamente i tronchi qualora fossero adeguati per la nuova potenzialità.

Poiché entrambi i tronchi non sono adoperabili è necessario provvedere alla modifica della colonna, questa può essere realizzata o acquistandone una nuova o modificando il tipo di riempimento per incrementare l'efficienza dell'attuale.

Per la scelta della soluzione si è dovuto considerare il vincolo degli spazi a disposizione, per tutte le colonne le sezioni d'arricchimento possono espandersi in altezza ma non in diametro, mentre per le sezioni d'esaurimento l'espansione può avvenire unicamente sul diametro. Ciò scongiurerebbe l'impiego di una nuova colonna, sfavorito anche dagli elevati costi d'acquisto e d'installazione. È però necessario verificare se è possibile variare i corpi di riempimento.

Studiando la sezione d'arricchimento è emerso che la sostituzione degli attuali riempimenti di tipo BX con quelli di tipo BX plus, che presentano maggiore capacità, consente di processare le nuove potenzialità lasciando inalterate le dimensioni del tronco che pertanto risulterà impiegabile tal quale.

Per quanto riguarda il tronco d'esaurimento per mantenere invariata l'altezza, è necessario sostituire l'attuale riempimento M350.Y con un riempimento che garantisca un'efficienza maggiore a parità di carico di vapore, il tipo M452.Y.

Di contro l'utilizzo di questo tipo di riempimento richiede l'incremento del diametro della sezione d'esaurimento del 20% rispetto all'attuale.

Appare chiaro che l'opzione di modificare la tipologia dei corpi di riempimento, nonostante sia richiesta la sostituzione di un tronco della colonna, risulta più vantaggiosa economicamente. Infatti nel caso della modifica, si dovrà acquistare solo una parte di colonna e non una intera, inoltre i costi di installazione risulteranno più contenuti. In questo caso, infatti, si dovrebbero modificare solamente le tubazioni afferenti al tronco d'esaurimento mentre, visto il loro ottimo stato, sarebbero mantenute quelle relative al tronco d'arricchimento.

#### **4.2.1.3. Colonna di distillazione K605**

Analizzando la colonna K605 risulta che attualmente è sottodimensionata la sezione d'arricchimento; analogamente al caso precedente si è analizzato anche il tronco d'esaurimento per verificarne l'adeguatezza. In questo caso il tronco inferiore risulta correttamente dimensionato anche per la nuova potenzialità, pertanto gli interventi si focalizzeranno unicamente sul tronco d'arricchimento.

Attualmente il tronco superiore impiega riempimenti di tipo CY, che presentano la migliore efficienza ma hanno una capacità limitata rispetto agli altri.

Per trattare una maggiore portata l'opzione più naturale sarebbe quella di impiegare il medesimo tipo di riempimento ed aumentare il diametro della colonna per compensare l'incremento della portata. Nel caso specifico si dovrebbe ingrandire il diametro del 25% rispetto all'attuale.

Come anticipato nell'analisi della colonna K603, l'incremento del diametro è pressoché impossibile a causa dei ridotti spazi disponibili per le sezioni d'arricchimento. Inoltre attualmente la colonna K605 presenta un diametro differente fra i due tronchi, in particolare quello d'arricchimento è maggiore di quello d'esaurimento del 25%. Un ulteriore aumento potrebbe comportare variazioni nel regime di flusso del vapore con conseguenti problematiche.

Nel caso del tronco d'arricchimento è però possibile incrementare l'altezza per compensare l'aumento di produttività. Per questo si è deciso di impiegare un riempimento con maggiore capacità, così da non dover incrementare il diametro, ma con una minore efficienza che comporta l'aumento dell'altezza.

Per l'applicazione specifica il riempimento scelto per sostituire l'attuale CY è di tipo BX. Esso presenta appunto una maggiore capacità e un'efficienza minore ma sufficiente a garantire il corretto funzionamento della colonna con un incremento dell'altezza del tronco d'arricchimento del 25% rispetto all'attuale.

In questo caso, proprio grazie alla costruzione con flangiatura, la soluzione che prevede la sostituzione dei corpi di riempimento risulta essere immediatamente più vantaggiosa rispetto a quella dell'acquisto di un'intera colonna. Infatti per incrementare l'altezza è sufficiente acquistare una lamiera d'altezza idonea, flangiata, da connettere alle flangiature dell'attuale colonna. E, come nel caso della colonna K603, i costi d'installazione sono estremamente ridotti in quanto è necessario modificare unicamente le tubazioni di una sezione di colonna.

#### 4.2.1.4. Equipment effectiveness alternativa I

L'indice *equipment effectiveness* per l'alternativa I, riportato nel Grafico 4-3 e nella Tabella 4-8, conferma l'adeguatezza di tutte le apparecchiature, sottodimensionate nella situazione attuale, anche per la nuova potenzialità.

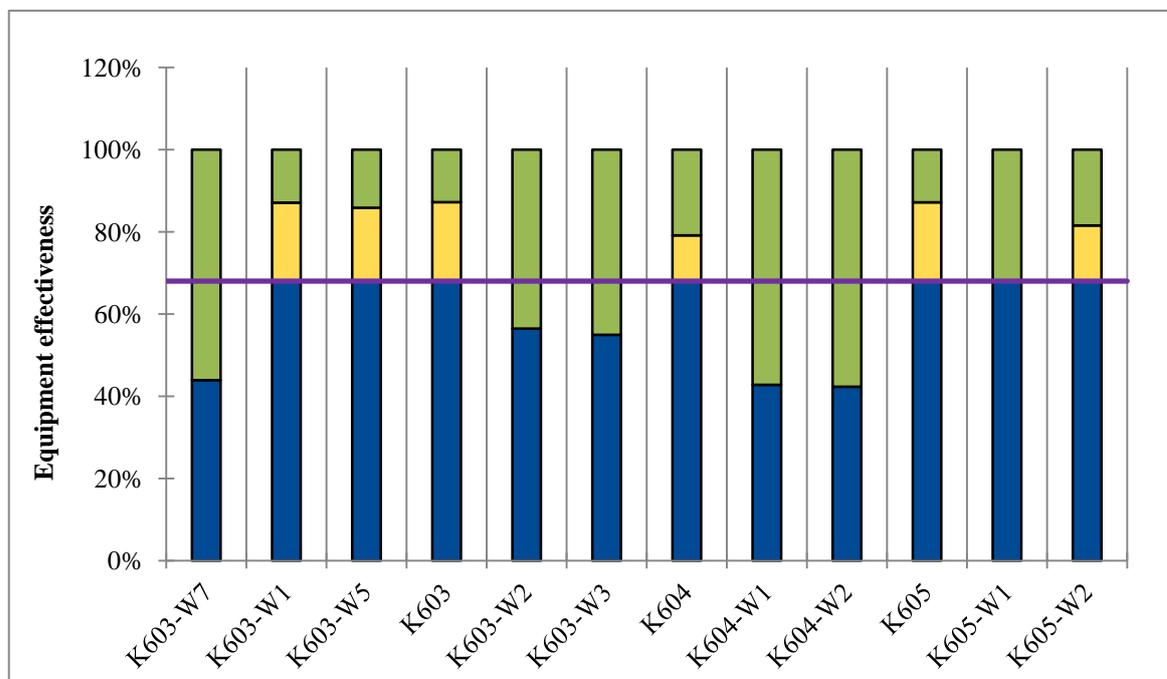


Grafico 4-3 – *Equipment effectiveness* per l'alternativa I

Apparecchiatura	EE
K603-W7	43.9%
K603-W1	87.1%
K603-W5	85.9%
K603	87.2%
K603-W2	56.5%
K603-W3	55.0%
K604	79.1%
K604-W1	42.8%
K604-W2	42.3%
K605	87.2%
K605-W1	68.0%
K605-W2	81.6%
Indice medio	68.0%
Bilanciamento linea	82.0%

Tabella 4-8 – Valori dell'*equipment effectiveness* per l'alternativa I

Analizzando i risultati emerge anche che lo sfruttamento complessivo della linea è inferiore a quello della linea attuale, ma prossimo ai margini d'accettabilità, per un corretto dimensionamento complessivo della linea.

Inoltre si può facilmente notare che a differenza dell'impianto attuale la nuova configurazione presenta un bilanciamento decisamente migliore. Sono comunque presenti alcune apparecchiature che presentano margini di sviluppo ridotti. In particolare le colonne K603 e K605 insieme all'evaporatore K603-W1 sono le apparecchiature più sfruttate nella configurazione sbottigliata.

#### 4.2.2. Alternativa II

Oltre ad esaminare il caso in cui per lo sbottigliamento l'impianto rimane immutato nella successione e nel numero d'operazioni unitarie, aumentando solamente le dimensioni delle apparecchiature, è opportuno analizzare la possibilità di razionalizzare la linea produttiva. La motivazione di questa valutazione risiede nel fatto che tre delle quattro operazioni di purificazione separano sostanze che sono poi riutilizzate insieme nella sezione di sintesi.

La prima ipotesi di razionalizzazione prevede l'accorpamento delle operazioni di purificazione attualmente svolte separatamente nella K603 e nella K604 in un'unica colonna, denominata K607, come da schema in Figura 4-2.

In questa nuova colonna si separerebbero in testa i composti leggeri, ovvero il reagente chetonico, residuo dall'operazione di flash, e tutti gli intermedi di processo. Per realizzare questa distillazione è necessario che la nuova colonna operi alla medesima pressione della K604 in modo tale che la temperatura che si instaura sul fondo non superi quella di degradazione del prodotto.

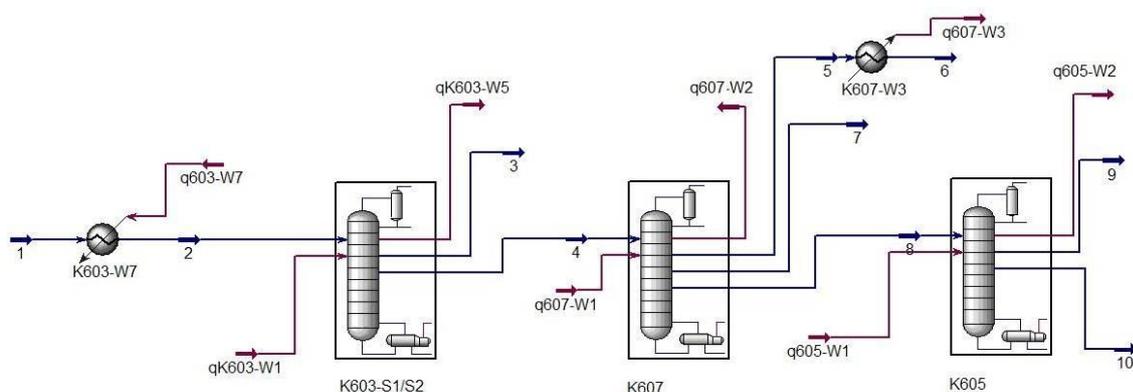


Figura 4-2 – Configurazione dell'alternativa II

Operando a queste pressioni risulta che la temperatura di bolla della miscela uscente dalla testa della colonna è estremamente bassa, tanto che per la condensazione è richiesto come fluido di servizio acqua frigo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tale necessità risulta problematica poiché nella corrente uscente è presente un quantitativo non trascurabile di prodotto che, alle temperature richieste dalla condensazione, potrebbe solidificare sulle pareti del condensatore. Per questo motivo la soluzione proposta per l'alternativa II prevede l'impiego di due condensatori in serie. Il primo (K607-W2) operato con acqua di torre effettua una parziale condensazione della miscela in cui vengono rimossi principalmente il prodotto e gli intermedi meno volatili. Ad esso segue un condensatore ad acqua frigo (K607-W3) dove avviene la condensazione totale del reagente e degli intermedi più volatili. Il riflusso in colonna è garantito dalla corrente di liquido condensato di K607-W2, come illustrato nella Figura 4-3.

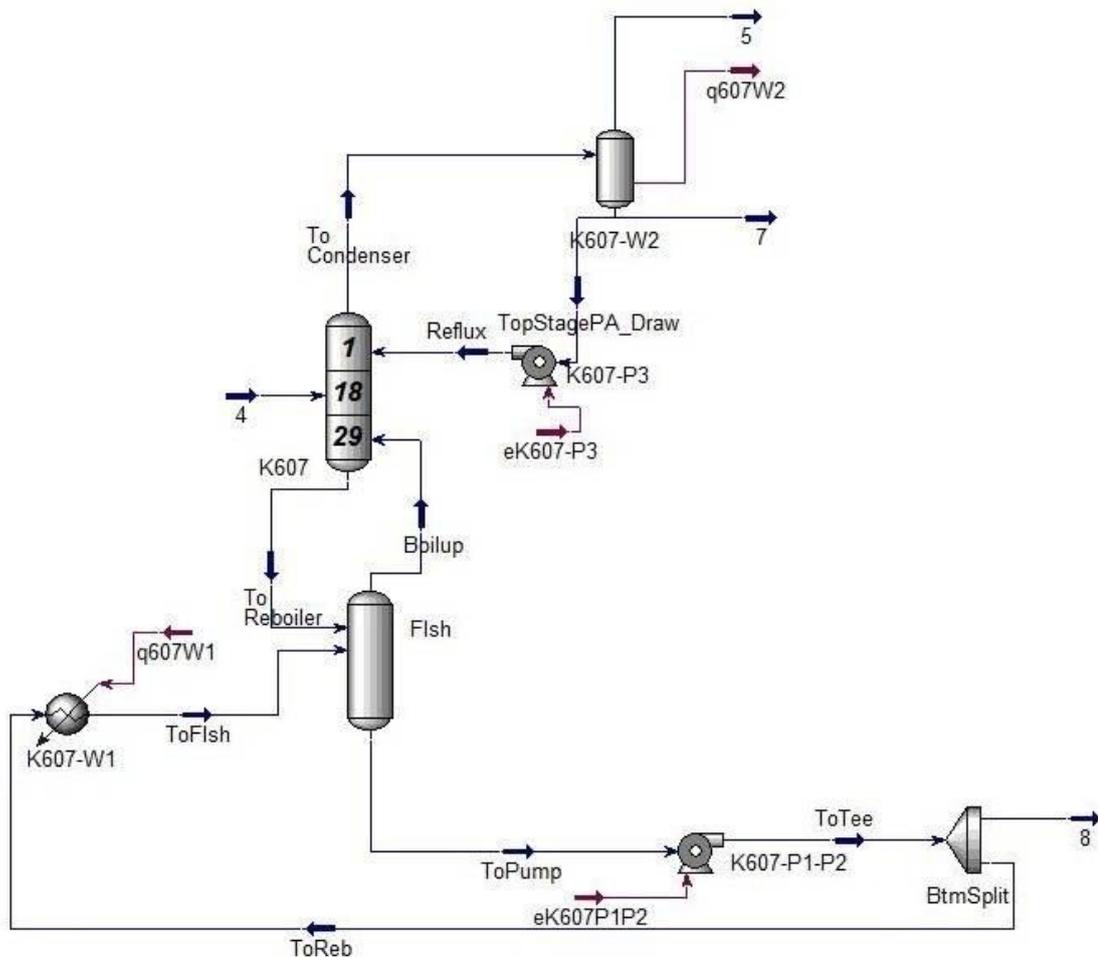


Figura 4-3 – Schema della colonna K607

Al fine della simulazione per lo stadio di flash e la colonna K605 sono state assunte le medesime ipotesi del caso precedente.

Per saturare i gradi di libertà della nuova colonna, sono state imposte pressione di testa e temperatura di fondo analoghe alla K604 così da evitare fenomeni di decomposizione termica del prodotto. Inoltre è stata fissata la temperatura della corrente liquida in uscita dal condensatore parziale K607-W2 a 50 °C così che il prodotto non possa solidificare nell'apparecchiatura.

Infine sono state fissate la portata di riciclo dell'evaporatore di fondo colonna K607-W1, in modo che il grado di vaporizzazione della corrente uscente fosse pari al 10%, ed il rapporto di riflusso, scelto per minimizzare la composizione degli intermedi presenti nella corrente di fondo della K607.

Dalla simulazione — di cui si riportano, come nel caso analizzato nel precedente paragrafo, i bilanci di materia normalizzati sulla portata di prodotto uscente dall'attuale impianto produttivo, Tabella 4–9 ed energia, Tabella 4–10 — e dalle successive verifiche fluidodinamiche è emerso che alcune delle apparecchiature attuali possono essere impiegate nuovamente per la realizzazione della nuova colonna di distillazione. Questo si riferisce in particolare all'evaporatore K607-W1, per il quale si può impiegare l'attuale evaporatore K604-W1, ed ai condensatori K607-W2 e K607-W3 per i quali si possono utilizzare rispettivamente i condensatori K604-W2 e K603-W3.

Le apparecchiature che risultano inutilizzabili rimangono, come nel caso precedente, il condensatore K603-W5 e la colonna di distillazione K605. Poiché la potenzialità è la medesima, per questi apparecchi valgono le considerazioni della precedente alternativa, espresse nei paragrafi 4.2.1.1 e 4.2.1.3.

<b>Linea</b>	<b>Portata simulata</b>
1	514.0
2	514.0
3	270.3
4	243.7
5	81.5
6	81.5
7	20.7
8	141.6
9	114.3
10	27.3

**Tabella 4–9 – Bilancio di massa normalizzato per l'alternativa II**

Apparecchiatura	Potenza termica (kW)
K603-W7	117.4
K603-W1	673.4
K603-W5	696.3
K607-W1	273.5
K607-W2	153.6
K607-W3	154.1
K605-W1	258.1
K605-W2	307.3

Tabella 4-10 – Bilancio termico per l'alternativa II

Bisogna soffermarsi unicamente sul dimensionamento della nuova colonna.

#### 4.2.2.1. Colonna di distillazione K607

La nuova colonna di distillazione K607 necessaria al processo di separazione, per poter operare alla nuova potenzialità, ha bisogno di un elevato numero di stadi teorici, per la precisione 18 nella sezione d'arricchimento ed 11 in quella di esaurimento. Per garantire dimensioni contenute è quindi opportuno selezionare riempimenti strutturati ad alta efficienza. Nel caso in esame si è scelto il tipo CY per la sezione d'arricchimento e il tipo BX per il tronco d'esaurimento, garantendo così che le dimensioni geometriche siano pari a quelle della sezione d'esaurimento della K605 per quanto concerne il diametro e a quelle della K604, smantellata, per l'altezza. Questa soluzione garantisce una colonna lontana dal *flooding* in entrambi i tronchi come mostrato in Figura 4-4.

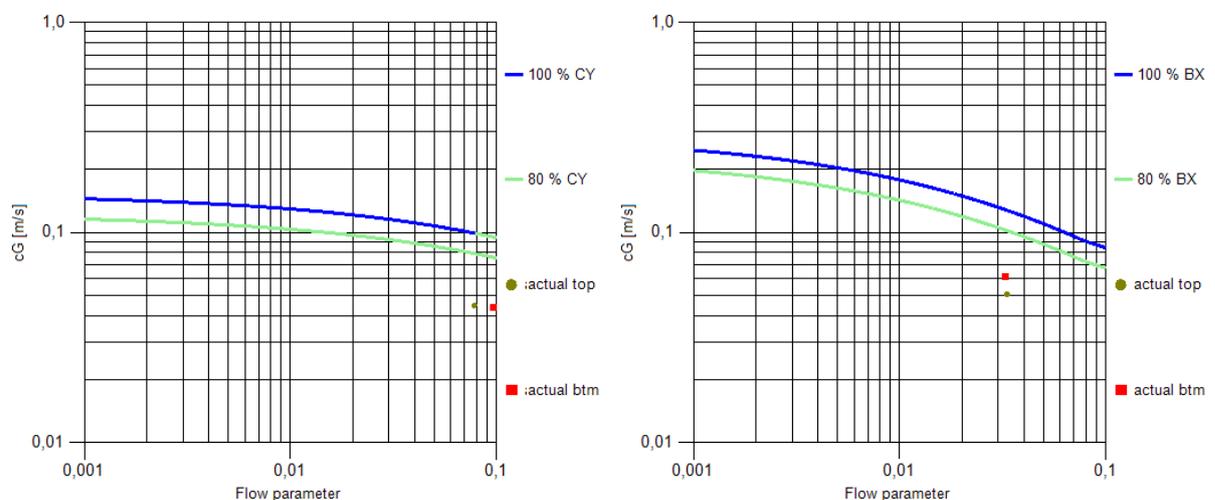


Figura 4-4 – Capacity diagram per le sezioni d'esaurimento (destra) ed arricchimento (sinistra) della K607

#### 4.2.2.2. Equipment effectiveness alternativa II

L'indice *equipment effectiveness* per la seconda alternativa processuale, riportato nel Grafico 4-4 e nella Tabella 4-11, conferma l'adeguatezza delle apparecchiature per lo scambio termico, sottodimensionate nella situazione attuale, ad essere impiegate nella nuova colonna di distillazione, in quanto perfettamente in grado di trattare la nuova portata.

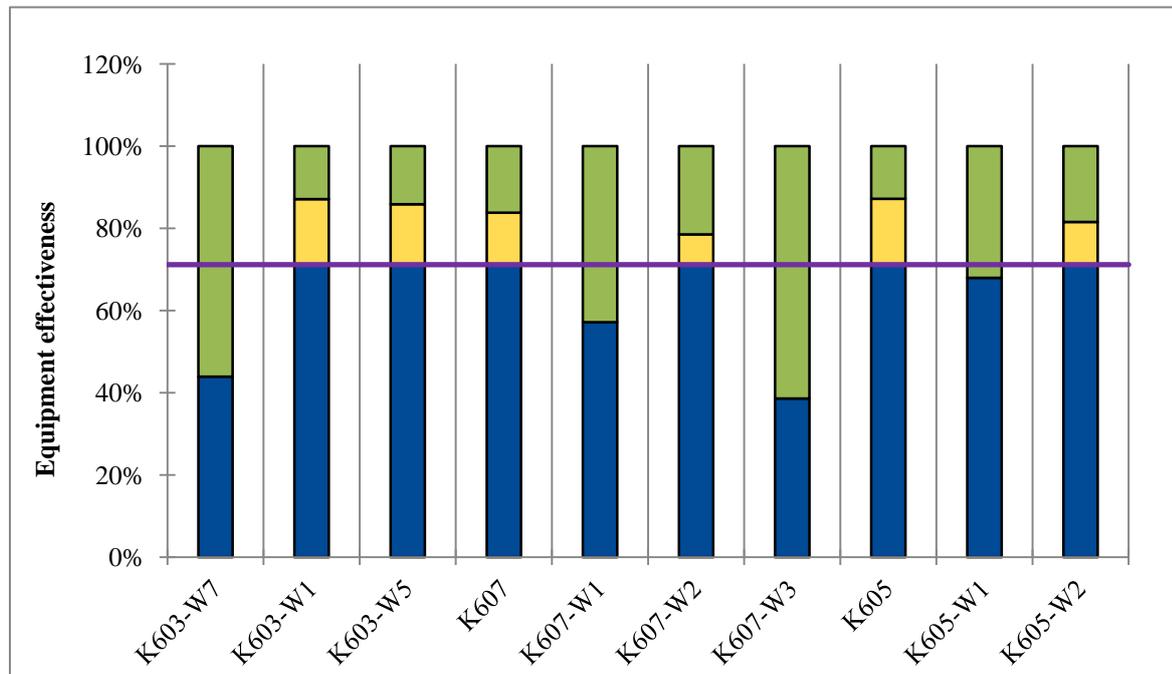


Grafico 4-4 – *Equipment effectiveness* per l'alternativa II

Apparecchiatura	EE
K603-W7	43.9%
K603-W1	87.1%
K603-W5	85.9%
K607	83.8%
K607-W1 (ex K604-W1)	57.2%
K607-W2 (ex K604-W2)	78.5%
K607-W3 (ex K603-W3)	38.6%
K605	87.2%
K605-W1	68.0%
K605-W2	81.6%
Indice medio	71.2%
Bilanciamento linea	82.5%

Tabella 4-11 – Valori dell'*equipment effectiveness* per l'alternativa II

Analizzando i risultati emerge che la linea così progettata è sfruttata maggiormente rispetto alla prima alternativa proposta ma la differenza è esigua ed anche in questo caso lo sbottigliamento porterebbe ad avere un impianto meno sfruttato, anche se di poco, rispetto all'attuale. La linea produttiva è più bilanciata rispetto al caso precedente nonostante alcune apparecchiature siano estremamente sotto sfruttate. Analogamente al caso precedente, in questa configurazione le apparecchiature con margini di sviluppo minori sono l'evaporatore K603-W1 e la colonna K605 come atteso dal fatto che in entrambi i casi vengono riutilizzate le apparecchiature già disponibili in impianto.

### 4.2.3. Alternativa III

La seconda alternativa proposta con riduzione del numero d'operazioni unitarie prevede di condensare in un'unica apparecchiatura, detta K608, le separazioni del reagente effettuate nel flash e nella prima colonna di distillazione.

In questa nuova colonna si separerebbero in testa i composti leggeri, ovvero il reagente chetonico e gli intermedi di processo più volatili. Come per l'alternativa II, per realizzare correttamente questa distillazione è necessario che la nuova colonna operi alla medesima pressione dell'attuale K603, in modo tale che la temperatura che si instaura sul fondo dell'apparecchiatura non superi quella di degradazione del prodotto. Operando a queste pressioni risulta che la temperatura di bolla della miscela uscente dalla testa della colonna è estremamente bassa, tanto che per la condensazione è richiesto come fluido di servizio acqua frigo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A differenza del caso precedente non è necessario impiegare due distinti condensatori poiché in testa non è presente il prodotto.

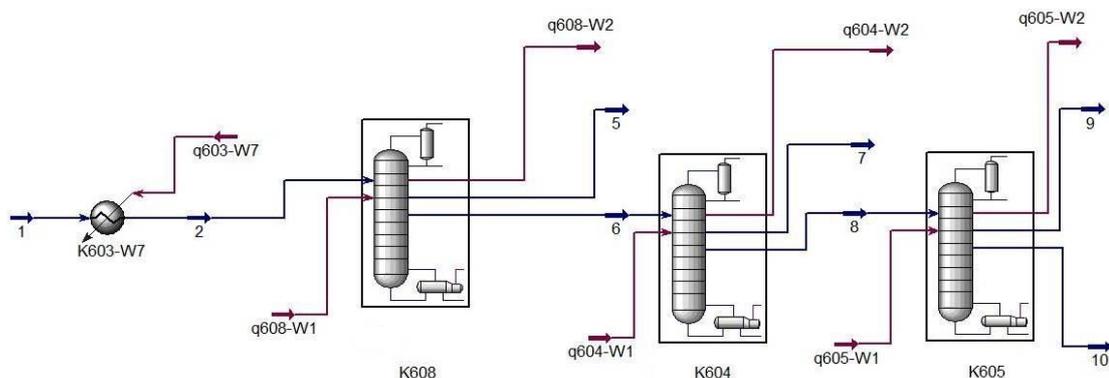


Figura 4-5 – Configurazione dell'alternativa III

Al fine della simulazione per le colonna di distillazione K604 e K065 sono state assunte le medesime ipotesi descritte dell'alternativa I.

Per saturare i gradi di libertà della nuova colonna, sono state imposte pressione di testa e temperatura di fondo analoghe alla K603 così da evitare fenomeni di decomposizione termica del prodotto. Infine sono state fissate la portata di riciclo dell'evaporatore di fondo colonna K608-W1, in modo che il grado di vaporizzazione della corrente uscente fosse pari al 10%, ed il rapporto di riflusso, scelto per minimizzare la composizione degli intermedi presenti nella corrente di fondo della K608, fissando una composizione massima del reagente chetonico e dell'intermedio I pari al 2% in massa.

Dalla simulazione — di cui si riportano, come in precedenza, i bilanci di materia normalizzati sulla portata di prodotto uscente dall'attuale impianto produttivo, Tabella 4-12 ed energia, Tabella 4-13 — e dalle successive verifiche fluidodinamiche è emerso che alcune delle apparecchiature attuali possono essere impiegate nuovamente per la realizzazione della nuova colonna di distillazione. Questo si riferisce in particolare all'evaporatore K608-W1, per il quale si possono impiegare gli attuali evaporatori K603-W1 e K603-W2 in parallelo, ed al condensatore K608-W2 per il quale può essere utilizzato l'attuale condensatore a piastre K603-W3 della prima colonna.

Le apparecchiature che risultano inutilizzabili rimangono, come nei casi precedenti, il condensatore K603-W5 e la colonna di distillazione K605. Poiché la potenzialità è la medesima, per questi apparecchi valgono le considerazioni dell'alternativa I espresse nei paragrafi 4.2.1.1 e 4.2.1.3.

<b>Linea</b>	<b>Portata simulata</b>
1	513.6
2	513.6
5	345.3
6	168.2
7	26.7
8	141.6
9	114.3
10	27.3

**Tabella 4-12 – Bilancio di massa normalizzato per l'alternativa III**

Apparecchiatura	Potenza termica (kW)
K603-W7	117.4
K608-W1	689.1
K608-W2	882.9
K604-W1	133.6
K604-W2	121.2
K605-W1	270.5
K605-W2	307.6

Tabella 4-13 – Bilancio termico per l'alternativa III

#### 4.2.3.1. Colonna di distillazione K608

La nuova colonna di distillazione K608 necessaria al processo di separazione, per poter operare alla nuova potenzialità, non ha bisogno di un elevato numero di stadi teorici, per la precisione quattro nella sezione d'arricchimento ed undici in quella di esaurimento. Per questo si è scelto di utilizzare riempimenti a bassa efficienza, nel caso in esame il tipo BX per la sezione d'arricchimento e il tipo M350.Y per il tronco d'esaurimento, così da garantire margini per un futuro sbottigliamento, tramite la sola sostituzione con riempimenti ad alta efficienza. Questo è possibile perché le dimensioni geometriche della nuova colonna sono tali da consentirne l'installazione nel fabbricato; infatti esse sono pari a quelle della colonna K603, smantellata, per quanto concerne l'altezza, mentre per quanto riguarda il diametro è necessaria una colonna doppia rispetto all'attuale. Questa soluzione garantisce una colonna al di sotto del punto di *flooding* in entrambi i tronchi come mostrato in Figura 4-6.

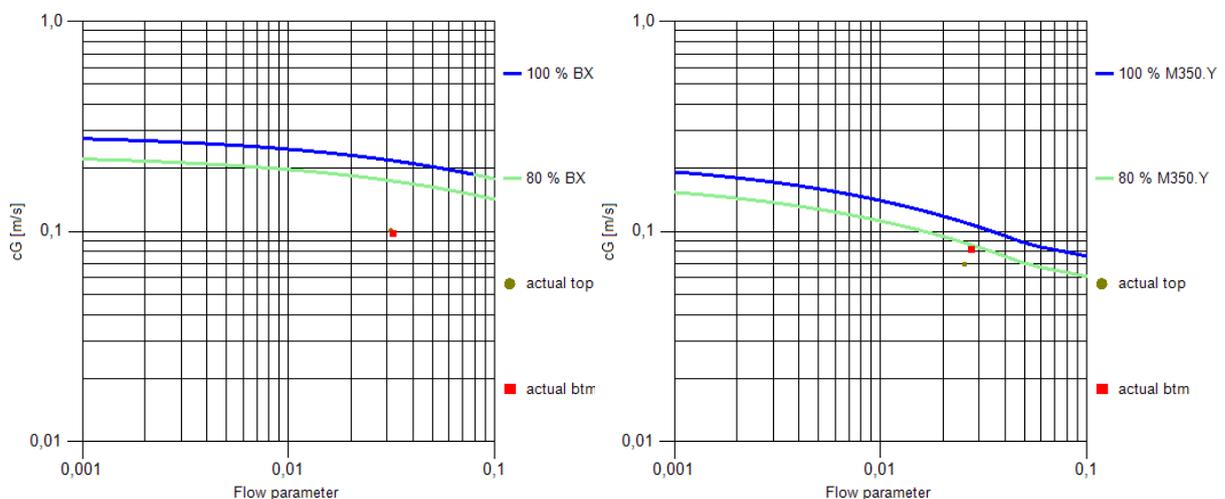


Figura 4-6 – Capacity diagram per le sezioni d'esaurimento (destra) ed arricchimento (sinistra) della K608

### 4.2.3.2. Equipment effectiveness alternativa III

L'indice *equipment effectiveness* anche per la terza alternativa processuale, riportato nel Grafico 4-5 e nella Tabella 4-14, conferma l'adeguatezza delle apparecchiature per lo scambio termico, sottodimensionate nella situazione attuale, ad essere impiegate nella nuova colonna di distillazione, in quanto perfettamente in grado di trattare la nuova portata.

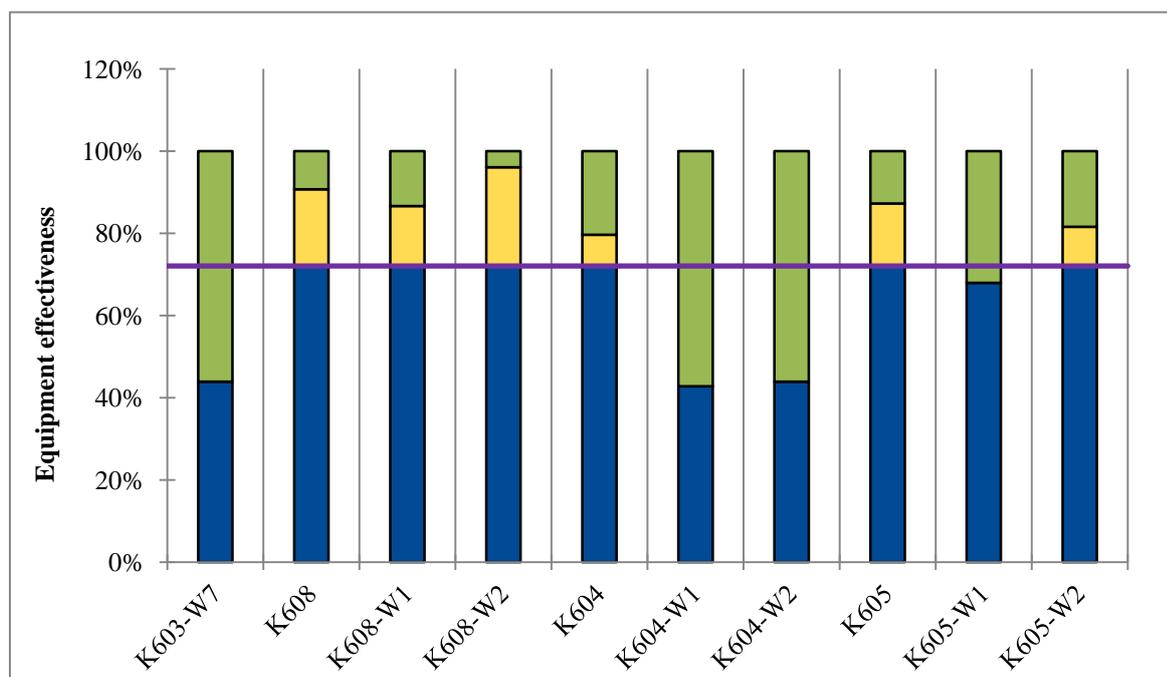


Grafico 4-5 – *Equipment effectiveness* per l'alternativa III

Apparecchiatura	EE
K603-W7	43.9%
K608	90.7%
K608-W1 (ex K603-W1/W2)	86.7%
K608-W2 (ex K603-W3)	96.1%
K604	79.6%
K604-W1	42.8%
K604-W2	43.9%
K605	87.2%
K605-W1	68.0%
K605-W2	81.6%
Indice medio	72.1%
Bilanciamento linea	80.1%

Tabella 4-14 – Valori dell'*equipment effectiveness* per l'alternativa III

Analizzando i risultati emerge che la linea così progettata è quella con lo sfruttamento maggiormente rispetto alle altre alternative proposte. Inoltre in questo caso lo sbottigliamento porterebbe ad avere un impianto più sfruttato anche rispetto a quello attuale. Di contro presenta un buon bilanciamento anche se inferiore alle due alternative precedentemente analizzate.

A differenza dei casi precedenti, in questa configurazione le apparecchiature con margini di sviluppo minori sono il condensatore K608-W2 e la colonna K608.

### **4.3. Indicatori di sostenibilità**

Nei capitoli precedenti sono stati verificati gli indicatori di sbottigliamento confermando che le problematiche da loro evidenziate rispecchiano quelle realmente riscontrate in impianto. Questo ha portato ad un approfondito studio fluidodinamico con la simulazione di varie alternative progettuali per lo sbottigliamento della linea, la migliore delle quali è stata individuata in base a scelte prese su fattori tecnici ed economici.

Nell'ottica del miglioramento continuo delle prestazioni ambientali e di sicurezza è opportuno procedere anche con l'analisi di sostenibilità tramite gli indicatori del metodo proposto in letteratura, illustrato nel capitolo 2.2, e quelli relativi alla salubrità sul luogo di lavoro sviluppati in questa tesi.

Poiché entrambi i nuovi indicatori proposti ed alcuni di quelli esistenti si basano sulla portata d'emissione fuggitiva legata all'impianto, per ottenere risultati con una maggiore attendibilità si utilizzeranno i valori stimanti dal modello proposto nel capitolo 3.2 — la cui accuratezza è stata validata mediante il confronto con misurazioni sperimentali — applicato alle alternative progettuali individuate.

A corredo degli indicatori che si basano sulla quantità di sostanza emessa annualmente, per gli impatti relativi alla salubrità sul luogo di lavoro sono stati proposti alcuni indicatori di supporto, i quali si basano sulla concentrazione delle sostanze emesse all'interno degli edifici, contenenti le linee di processo. Quindi, prima di procedere con la valutazione delle differenze d'accuratezza che comporta l'utilizzo del metodo di stima previsionale delle emissioni fuggitive proposto rispetto a quello EPA e la valutazione della sostenibilità delle due alternative progettuali, è conveniente verificare l'attendibilità del modello di ventilazione necessario alla quantificazione della concentrazione.

### 4.3.1. Scelta dell'alternativa sostenibile

L'individuazione e la successiva scelta dell'alternativa più sostenibile fra le due proposte passa attraverso la quantificazione degli indicatori di sostenibilità. Quindi come già fatto per i KPI relativi alle emissioni fuggitive è necessario provvedere alla semplificazione dell'albero degli impatti, individuando quelli d'interesse per la sezione di distillazione della TAA.

In primo luogo si deve considerare che il processo non produce rifiuti solidi da smaltire ed i reflui liquidi prodotti sono utilizzati come combustibile internamente all'azienda; questo fa sì che non si debbano considerare gli aspetti delle emissioni in acqua né quelle nel terreno. Per quanto concerne le emissioni in aria, viste le caratteristiche delle sostanze trattate nella linea non è stato considerato l'impatto relativo alla cancerogenicità; inoltre poiché né nel processo in esame né in quelli di produzione delle *utilities* associate vengono impiegate o prodotte sostanze gassose acide o responsabili della riduzione dello strato d'ozono, è possibile escludere sia l'impatto dell'acidificazione delle acque piovane che quello relativo alla degradazione dell'ozono stratosferico.

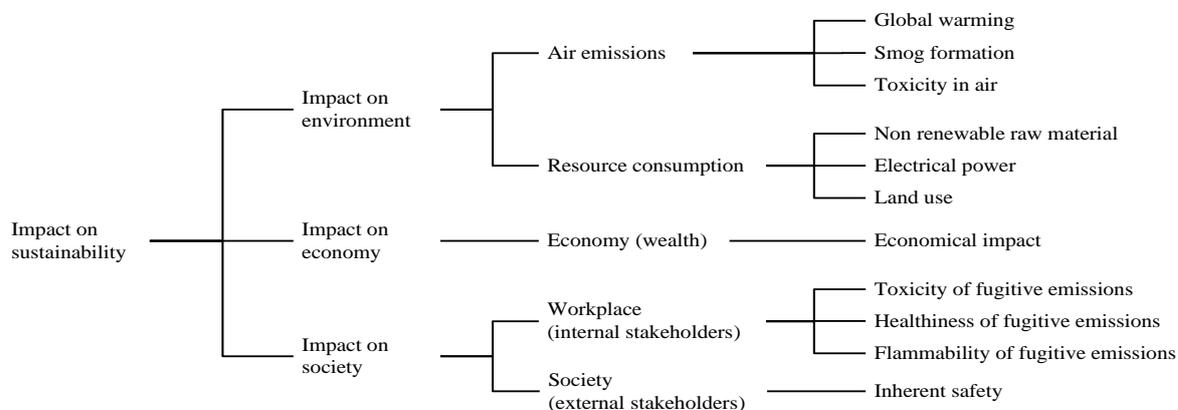


Figura 4-7 – Albero degli impatti semplificato per il caso in esame

Analizzando l'ultimo aspetto dell'impatto ambientale, il consumo delle risorse, poiché vengono impiegate unicamente materie prime non rinnovabili si è potuto escludere la categoria d'impatto relativa all'uso di materie rinnovabili.

Infine, nel processo di semplificazione, sono state escluse sia la categoria d'impatto sull'occupazione, per quanto riguarda la sostenibilità sociale esterna, in quanto non vi sono variazioni di personale connesse allo sbottigliamento delle linee, che, per quanto concerne la sostenibilità interna, la categoria della cancerogenicità delle emissioni fuggitive, come discusso in precedenza.

In funzione di queste considerazioni si ottiene un albero degli impatti semplificato, Figura 4–7, sul quale si procede al calcolo degli indicatori. Teoricamente sarebbe possibile procedere con la semplificazione escludendo gli impatti non rilevanti in funzione dell'ordine di grandezza, ovvero come appurato nel precedente capitolo quelli delle emissioni fuggitive. Ai fini dell'analisi è però interessante valutare anche il loro contributo alla sostenibilità globale pertanto verranno calcolati i relativi KPI per entrambe le alternative.

#### **4.3.1.1. Valutazione dei KPI di sostenibilità**

La valutazione degli impatti ambientali per quanto concerne l'emissione in aria si esaurisce nel calcolo dei KPI relativi al riscaldamento globale, alla formazione di smog fotochimico e alla tossicità delle emissioni in aria. La valutazione delle ultime due categorie è estremamente semplice dal momento che per il processo in esame esse dipendono unicamente dalla portata delle emissioni fuggitive. Diversamente, per quanto riguarda l'impatto sul riscaldamento globale, è necessario considerare anche le portate di sostanze ad effetto serra emesse per la produzione delle *utilities* e lo smaltimento dei rifiuti; in questo caso si considera il biossido di carbonio formato dalla combustione della quantità di metano, bruciato in caldaia per la produzione del vapore utilizzato nella sezione dei distillazione, sia quello creato dalla combustione attuata per smaltire i residui liquidi prodotti dal processo. A questi vanno aggiunti, per considerare la sostenibilità ambientale nel suo insieme, i KPI relativi al consumo delle risorse. Dalla semplificazione si è determinato che è necessario considerare in primo luogo il consumo delle materie prime non rinnovabili; per questo si sono monetizzate tutte le portate dei reagenti, dei solventi e dei catalizzatori impiegati nella sezione di sintesi che portano alla produzione della miscela da purificare. Per quanto riguarda il consumo di corrente elettrica oltre alle macchine che necessitano di elettricità, direttamente installate sulla linea produttiva, in particolare le pompe, sono state valutate le potenze elettriche necessarie alla produzione ed alla movimentazione delle *utilities*, come l'acqua di torre e l'acqua frigo, impiegate nello scambio termico per il processo. L'ultima considerazione si è effettuata sull'uso del suolo; questo impatto primario è stato calcolato nonostante nessuna delle due alternative progettuali presenti una

variazione della superficie occupata dal fabbricato, dove è localizzato l'impianto produttivo, e pertanto risulta invariante ai fini della sostenibilità globale.

In base alle considerazioni illustrate è stato possibile procedere con la quantificazione dei KPI ottenendo i valori riportati in Tabella 4–15.

<b>Impatto</b>	<b>Alternativa I</b>	<b>Alternativa II</b>
Global warming	$9.9991 \cdot 10^6$	$1.0007 \cdot 10^7$
Smog formation	$1.5669 \cdot 10^1$	$9.7976 \cdot 10^0$
Air toxicity	$2.0318 \cdot 10^1$	$1.6904 \cdot 10^1$
Non renewable raw materials	$2.9424 \cdot 10^7$	$2.9426 \cdot 10^7$
Electrical power	$4.6306 \cdot 10^5$	$4.5953 \cdot 10^5$
Land use	$8.9414 \cdot 10^{-5}$	$8.9414 \cdot 10^{-5}$

**Tabella 4–15 – KPI degli impatti ambientali per le due alternative progettuali**

Poiché l'impatto economico è valutato come l'opposto del valore attuale netto di un investimento sono stati calcolati gli investimenti necessari per realizzare le due alternative ed i flussi di cassa ad esse connessi. Da ciò era già stato quantificato l'NPV della prima alternativa ed è possibile calcolare quello della seconda, ottenendo così i valori del KPI economico per le due soluzioni tecniche.

<b>Impatto</b>	<b>Alternativa I</b>	<b>Alternativa II</b>
Economic impact	$-1.2497 \cdot 10^8$	$-1.2488 \cdot 10^8$

**Tabella 4–16 – KPI dell'impatto economico per le due alternative progettuali**

Dai valori in Tabella 4–16 si ottiene conferma che, la prima alternativa è economicamente vantaggiosa rispetto alla seconda, infatti presenta un indicatore inferiore.

La sostenibilità sociale, come quella ambientale, consta di due sottocategorie. La prima è quella relativa alla valutazione della salubrità del luogo di lavoro che considera, come discusso in precedenza, unicamente la tossicità acuta, quella cronica e l'infiammabilità delle emissioni fuggitive in quanto le sostanze trattate non presentano pericoli legati alla cancerogenicità.

La seconda categoria della sostenibilità sociale è legata unicamente al rischio d'incidente rilevante e non considera l'impatto primario sull'occupazione, poiché non sono previste variazioni al personale operante in impianto.

La valutazione del KPI per la categoria della sicurezza intrinseca si basa sulle distanze di danno; in questo caso sono state considerate quelle per le quali si raggiunge la soglia d'inizio letalità, fissata dalla legislazione italiana<sup>[17]</sup>, calcolate mediante il software di simulazione DNV Phast<sup>[23]</sup>, per tutti gli eventi incidentali associati ai possibili scenari di rilascio, considerando una velocità del vento di 1.5 m/s ed una classe di Pasquill F per la stabilità atmosferica.

Per tutte le apparecchiature e le tubazioni operanti in pressione, gli scenari di rilascio sono stati individuati tramite le linee guida disponibili in letteratura<sup>[59]</sup>.

In particolare per le tubazioni gli scenari considerati sono due: il primo è rappresentato dal tranciamento completo della linea, mentre il secondo considera la formazione di un foro di dimensioni pari ad un decimo del diametro della tubazione stessa. Per quanto riguarda le apparecchiature, oltre alla rottura catastrofica, sono stati considerati i rilasci dovuti alla formazioni sia di un foro di 10 mm, di diametro situato o sul fondo dell'apparecchiatura — quindi caratterizzato da un fuoriuscita liquida — o in testa alla stessa — nel caso il rilascio avviene in fase gassosa — sia di un foro tale da consentire la fuoriuscita dell'intera massa contenuta nell'apparecchiatura in dieci minuti.

Analizzando le apparecchiature sottovuoto si può considerare il rilascio da foro nella zona a contatto con la fase liquida in quanto la contropressione è vinta dal battente, ma sicuramente non si può considerare il caso di un foro in testa. Questo poiché non si avrà la fuoriuscita di gas ma si verificherà la situazione inversa, con l'ingresso di aria nell'apparecchiatura e, di conseguenza, la formazione di una miscela esplosiva. Questo ha portato a dover considerare ugualmente lo scenario in quanto si può verificare un'esplosione interna all'apparecchiatura ed una conseguente rottura catastrofica con onda di pressione e proiezione dei frammenti generati.

Poiché non è possibile simulare lo scenario appena descritto tramite il software DNV Phast, per determinare le distanze di danno si è applicato il metodo del TNT<sup>17</sup> equivalente<sup>[64]</sup>. Questo modello, fissato il valore di sovrappressione corrispondente alla soglia di danno d'interesse — in questo caso l'inizio della letalità — fornisce in maniera univoca, attraverso la curva di correlazione riportata in Figura 4–8, il parametro  $z$  che rappresenta una distanza scalata.

---

<sup>17</sup> Trinitrotoluene

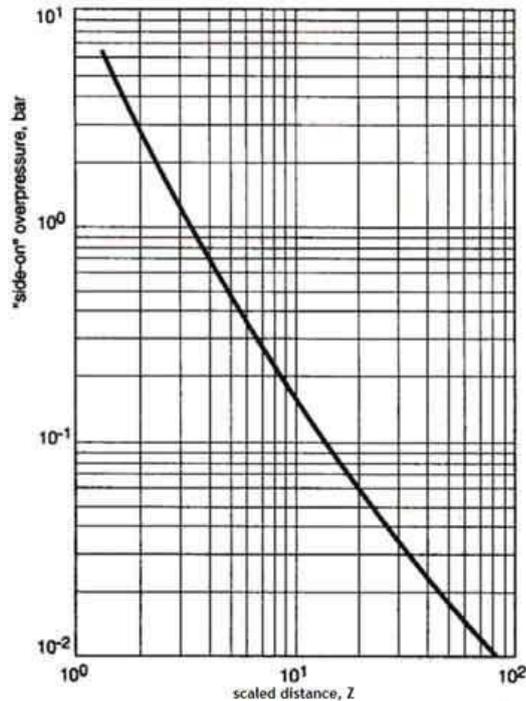


Figura 4-8 – Curva di correlazione del metodo del TNT equivalente

Il parametro così determinato, infatti, associa la distanza alla quale si raggiunge la sovrappressione d'interesse con la massa di TNT equivalente specifica per lo scenario in esame, secondo l'equazione 4-3.1.

$$d = z \cdot m_{TNT_{eq}}^{1/3} \quad 4-3.1$$

La massa di TNT equivalente è l'espressione dell'energia di pressione rilasciata dallo scoppio dell'apparecchiatura ( $W_p$ ), come da equazione 4-3.2.

$$W_p = \Delta \hat{H}_{c,TNT} \cdot m_{TNT_{eq}} \quad 4-3.2$$

Questa è l'energia, connessa all'espansione della massa della miscela gassosa contenuta nell'apparecchiatura, dissipata sotto forma di onda di pressione, quantificata mediante l'equazione 4-3.3.

$$W_p = (1-k) \frac{p_f \cdot V_{app}}{\gamma} \left[ 1 - \left( \frac{p_{atm}}{p_f} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad 4-3.3$$

Dove  $k$  rappresenta la frazione d'energia dissipata per la proiezione dei frammenti,  $V_{app}$  il volume dell'apparecchiatura,  $\gamma$  il coefficiente d'espansione adiabatica e  $p_f$  la pressione nell'apparecchiatura al momento dello scoppio.

Quest'ultima è ottenuta mediante l'equazione 4–3.4 noti, dai bilanci di materia ed energia per il sistema, il numero di moli totali e la temperatura alla fine della combustione, considerando conservativamente che la reazione avvenga in condizioni stechiometriche.

$$p_f = \frac{n_{t,f} \cdot R \cdot T_f}{V_{app}} \quad 4-3.4$$

È importante notare che la pressione raggiunta alla fine della combustione può non essere sufficiente per provocare lo scoppio dell'apparecchiatura. Infatti perché ciò avvenga deve essere superata la pressione di rottura. Questa è una caratteristica tipica dell'apparecchiatura che dipende, in definitiva, dallo spessore del materiale che la costituisce e solitamente viene espressa mediante il parametro della pressione massima ammissibile definito dalla direttiva PED<sup>[22]</sup>.

Poiché le apparecchiature operanti a pressione sono progettate con margini di sicurezza, fissati dalla direttiva PED<sup>[22]</sup>, lo scoppio avverrà ad una pressione superiore rispetto a quella massima ammissibile, ma è opportuno mantenere un approccio conservativo e considerare come limite di resistenza il valore di pressione massima ammissibile dichiarato dal fabbricante. In funzione di ciò, si è calcolata la distanza di danno per ogni scenario incidentale associato a ciascuno scenario di rilascio e si è valutata quella massima per ogni apparecchiatura. Per ciascuna è stata ricavata la frequenza di accadimento<sup>[59]</sup> così da poter valutare il KPI specifico per l'impatto della sicurezza intrinseca.

Analogamente a quanto effettuato per l'impianto attuale, si è provveduto alla stima dei KPI delle emissioni fuggitive per le due alternative considerando, per quanto riguarda la seconda alternativa sia la differente composizione nelle linee, ricavata dalla simulazione con HYSYS, che la variazione del numero delle possibili sorgenti di perdita, ottenendo i valori riportati in Tabella 4–17.

<b>Impatto</b>	<b>Alternativa I</b>	<b>Alternativa II</b>
TFE	2.0318·10 <sup>1</sup>	1.6904·10 <sup>1</sup>
HFE	4.0044·10 <sup>1</sup>	2.3552·10 <sup>1</sup>
FFE	3.7584·10 <sup>1</sup>	3.0987·10 <sup>1</sup>
Inherent safety	1.0921·10 <sup>-5</sup>	9.1967·10 <sup>-6</sup>

Tabella 4–17 – KPI degli impatti sociali per le due alternative progettuali

Analizzando i KPI ottenuti si può facilmente desumere che, come stabilito dal modello previsionale, l'entità delle emissioni fuggitive non varia in funzione della portata trattata nella linea produttiva ma unicamente con il numero delle possibili sorgenti di perdita, la composizione e le proprietà della miscela. Infatti è facilmente osservabile che i KPI relativi agli impatti primari dipendenti unicamente dall'entità della portata delle emissioni fuggitive per la prima alternativa hanno i medesimi valori ottenuti per l'attuale impianto, mentre quelli della seconda alternativa sono inferiori. Ciò è proprio dovuto al fatto che quest'ultima alternativa consta di un numero minore di operazioni unitarie e, di conseguenza di sorgenti di perdita, e di una diversa composizione della miscela. Oltre a questa considerazione relativa meramente al funzionamento del modello previsionale proposto, dai dati si può chiaramente osservare che non è possibile definire quale sia l'alternativa migliore dal punto di vista della sostenibilità. Infatti ognuna presenta valori dei KPI superiori o inferiori rispetto all'altre in base all'impatto primario analizzato. L'unica certezza che si ottiene dai valori è che la prima alternativa risulta economicamente vantaggiosa rispetto alla seconda ma presenta un'entità dell'impatto maggiore per quanto riguarda tutti gli aspetti della categoria sociale, riconducibile proprio al fatto che la seconda alternativa riduce il numero di operazioni unitarie utilizzate per il processo di distillazione. Per quanto riguarda la sostenibilità ambientale, invece, la convenienza fra le alternative è variabile in funzione dell'impatto primario considerato.

#### **4.3.1.2. Normalizzazione ed aggregazione dei KPI di sostenibilità**

A causa della loro espressione, i risultati non permettono di comprendere la reale influenza dei singoli impatti sulla sostenibilità globale. Dai valori, infatti, sembrerebbe che gli impatti legati alle emissioni fuggitive siano estremamente più influenti rispetto a quelli della sicurezza intrinseca.

Per prima cosa è quindi necessario provvedere alla normalizzazione dei KPI, come stabilito dal metodo, così da poter esplicitare la giusta influenza di ciascun impatto in relazione alla zona industriale in cui è situato l'impianto. Questo viene effettuato mediante i fattori di normalizzazione, illustrati precedentemente nel paragrafo 2.2.1.3 durante la trattazione teorica del metodo, specifici per la

zona industriale nella quale è localizzato l'impianto analizzato, ottenendo i valori riportati in Tabella 4–18.

<b>Impatto</b>	<b>Alternativa I</b>	<b>Alternativa II</b>
Global warming	$8.6199 \cdot 10^0$	$8.6265 \cdot 10^0$
Smog formation	$2.8335 \cdot 10^{-3}$	$1.7717 \cdot 10^{-3}$
Air toxicity	$5.3892 \cdot 10^{-5}$	$4.4837 \cdot 10^{-5}$
Non renewable raw materials	$8.3839 \cdot 10^1$	$8.3835 \cdot 10^1$
Electrical power	$4.2097 \cdot 10^{-1}$	$4.1776 \cdot 10^{-1}$
Land use	$3.8211 \cdot 10^0$	$3.8211 \cdot 10^0$
Economic impact	$-3.6756 \cdot 10^0$	$-3.6730 \cdot 10^0$
TFE	$5.3893 \cdot 10^{-5}$	$4.4837 \cdot 10^{-5}$
HFE	$4.2646 \cdot 10^{-4}$	$2.5082 \cdot 10^{-4}$
FFE	$9.1223 \cdot 10^{-4}$	$7.5211 \cdot 10^{-4}$
Inherent safety	$1.8201 \cdot 10^0$	$1.5328 \cdot 10^0$

**Tabella 4–18 – KPI normalizzati per le due alternative progettuali**

Dai valori ottenuti attraverso la normalizzazione emergono i reali rapporti fra i vari impatti e, come atteso, quelli maggiormente influenti risultano essere legati al consumo delle risorse, alla sicurezza intrinseca, agli investimenti economici, al riscaldamento globale ed al consumo d'energia elettrica e del terreno. Questa influenza deve essere riportata alla criticità specifica così da permettere il confronto fra impatti di natura differente e poter quantificare l'effettivo il peso di ciascuno sulla sostenibilità globale. A tal fine si impiegano i fattori d'aggregazione, definiti nel paragrafo 2.2.1.3, ottenendo i valori pesati degli impatti primari, ovvero del quarto livello dell'albero degli impatti.

Analizzando questi valori, riportati nella Tabella 4–19, si possono valutare quali siano gli impatti più significativi per ciascuna delle categorie di sostenibilità caratterizzanti il terzo livello dell'albero degli impatti specifico per il caso in esame. Fermo restando gli aspetti economici e di sicurezza intrinseca che non vengono aggregati con altri impatti al terzo livello, per quanto riguarda l'emissione in aria viene confermata la predominanza del riscaldamento globale. Questa però risulta drasticamente ridimensionata in confronto al consumo delle materie prime il quale influenza sia la categoria del consumo delle risorse che, di conseguenza, la categoria della sostenibilità ambientale nel suo insieme.

<b>Impatto</b>	<b>Alternativa I</b>	<b>Alternativa II</b>
Global warming	$4.3961 \cdot 10^{-1}$	$4.3995 \cdot 10^{-1}$
Smog formation	$1.3884 \cdot 10^{-4}$	$8.6815 \cdot 10^{-5}$
Air toxicity	$5.1199 \cdot 10^{-6}$	$4.2595 \cdot 10^{-6}$
Non renewable raw materials	$3.6885 \cdot 10^0$	$3.6887 \cdot 10^0$
Electrical power	$2.6942 \cdot 10^{-2}$	$2.6736 \cdot 10^{-2}$
Land use	$2.2162 \cdot 10^{-1}$	$2.2162 \cdot 10^{-1}$
Economic impact	$-3.6756 \cdot 10^0$	$-3.6730 \cdot 10^0$
TFE	$1.6330 \cdot 10^{-5}$	$1.3586 \cdot 10^{-5}$
HFE	$4.6057 \cdot 10^{-5}$	$2.7088 \cdot 10^{-5}$
FFE	$4.6524 \cdot 10^{-5}$	$3.8358 \cdot 10^{-5}$
Inherent safety	$1.4561 \cdot 10^0$	$1.2262 \cdot 10^0$

**Tabella 4–19 – KPI pesati per le due alternative progettuali**

Oltre a ciò, osservando i KPI relativi alla salubrità del luogo di lavoro, si può individuare che l’impatto predominante nella categoria, seppur di poco, è rappresentato dall’infiammabilità delle emissioni fuggitive.

Sommando i KPI pesati per ciascun impatto primario si ottengono i valori aggregati, riportati in Tabella 4–20, per le categorie definite nel terzo livello dell’albero degli impatti specifico per il caso analizzato.

<b>Impatto</b>	<b>Alternativa I</b>	<b>Alternativa II</b>
Air emission	$4.3976 \cdot 10^{-1}$	$4.4004 \cdot 10^{-1}$
Resource consumption	$3.9370 \cdot 10^0$	$3.9371 \cdot 10^0$
Economy	$-3.6756 \cdot 10^0$	$-3.6730 \cdot 10^0$
Workplace	$1.0891 \cdot 10^{-4}$	$7.9032 \cdot 10^{-5}$
Society	$1.4561 \cdot 10^0$	$1.2262 \cdot 10^0$

**Tabella 4–20 – KPI aggregati al terzo livello per le due alternative progettuali**

I valori così ottenuti, che misurano per le alternative il peso delle categorie di terzo livello, devono essere combinati, secondo la struttura gerarchica dell’albero degli impatti, per ottenere la quantificazione sia delle tre categorie della sostenibilità, ambientale, economica, sociale definite nel secondo livello dell’albero stesso, sia il valore numerico che esprime la sostenibilità globale del processo. Per realizzare tale combinazione s’impiegano gli specifici valori dei fattori d’aggregazione, ottenendo i KPI riportati in Tabella 4–21.

<b>Impatto</b>	<b>Alternativa I</b>	<b>Alternativa II</b>
Environment	1.3130	1.3131
Economy	-1.8378	-1.8365
Society	0.2039	0.1717
Sustainability	-0.3209	-0.3517

**Tabella 4-21 – KPI aggregati per le due alternative progettuali**

Studiando i risultati ottenuti si può osservare in primo luogo come le singole categorie di secondo livello siano fortemente influenzate dagli impatti primari predominanti, individuati dall'analisi precedente. Altra informazione fondamentale, ricavabile dagli indicatori, è che l'impatto economico è quello predominante sulla sostenibilità globale di entrambe le alternative.

Come già discusso ampiamente, per quanto concerne la sostenibilità economica è nuovamente confermata la convenienza della prima alternativa. Analizzando la sostenibilità ambientale essa risulta pressoché identica per le due alternative; questo era ovviamente atteso poiché operando alle medesime potenzialità le due alternative prevedono un uguale consumo di materie prime. La piccola differenza è riconducibile ad un irrisorio incremento della quantità di metano necessaria alla produzione di vapore, che si ripercuote anche sull'impatto del riscaldamento globale. Invece, la riduzione dell'entità della portata delle emissioni fuggitive, dovuta alla diminuzione delle possibili sorgenti di perdita, e la possibilità di smantellare un condensatore di guardia operante con acqua di frigo, ovvero un'utenza che necessita di potenza elettrica, entrambe connesse alla diminuzione del numero di operazioni unitarie nella seconda alternativa, influenzano in maniera praticamente trascurabile la sostenibilità globale.

La variazione del numero di operazioni unitarie, invece, influenza fortemente la sostenibilità sociale che risulta decisamente migliore per la seconda alternativa. Questo non è dovuto alla diminuzione dell'entità dell'impatto sulla salubrità del luogo di lavoro — come detto la riduzione delle emissioni fuggitive è trascurabile per la sostenibilità globale — ma è legato alla sicurezza intrinseca. Infatti la riduzione del numero di apparecchiature comporta sia la diminuzione dei possibili scenari di rilascio sia il calo del quantitativo della massa di sostanze pericolose presenti nell'impianto durante il normale funzionamento. E questo, di conseguenza, comporta una riduzione delle distanze di danno.

## 5. CONCLUSIONI

Oggigiorno la presa di coscienza dell'importanza degli aspetti di sostenibilità ambientale e sociale dei processi chimici fa sì che la scelta fra le alternative, già dalle primissime fasi di progettazione, non si possa più basare su considerazioni unicamente di natura tecnica ed economica.

Nell'ambito del presente lavoro è stato ulteriormente sviluppato un metodo, concepito appositamente per rispondere a tale esigenza, che permette di quantificare e confrontare tutti gli aspetti della sostenibilità. Nello specifico si è ritenuto indispensabile introdurre nel metodo un insieme di indici relativi due nuovi impatti, ascrivibili alla sostenibilità sociale, che vadano a quantificare gli aspetti di salubrità sul luogo di lavoro relativi alla tossicità cronica ed all'infiammabilità legate alle emissioni fuggitive. Questa analisi ha portato alla definizione delle espressioni di due KPI, l'*healthiness of fugitive emissions* ed il *flammability of fugitive emissions*, impiegati per integrare tali impatti all'interno della struttura ad albero proposta dal metodo. Sono stati inoltre formulati due indicatori a supporto, l'*healthiness of fugitive emissions concentration* ed il *flammability of fugitive emissions concentration*, la cui struttura è stata estesa anche agli impatti legati alla tossicità acuta ed alla cancerogenicità delle emissioni fuggitive.

L'introduzione di questi nuovi indicatori per descrivere la salubrità del luogo di lavoro ha richiesto necessariamente lo studio dei metodi per la stima delle emissioni fuggitive. In letteratura è attualmente disponibile un unico metodo di stima previsionale riconosciuto, proposto dall'EPA, utilizzabile in fase progettuale in quanto applicabile senza necessità di misurare la concentrazione in impianto. Questo metodo di stima si è però dimostrato estremamente conservativo, di circa tre ordini di grandezza, quando si sono confrontati i risultati ottenuti applicandolo a due impianti esistenti opportunamente monitorati per quantificare la reale entità delle emissioni fuggitive.

Tali risultati hanno reso necessario sviluppare un nuovo modello previsionale che potesse consentire una stima più accurata in fase progettuale.

Il modello ottenuto basandosi su quello proposto da EPA, attraverso un accurato studio delle tipologie di sorgenti e dei relativi meccanismi di perdita, è stato

validato nuovamente mediante il confronto con i dati ottenuti sperimentalmente. Dal confronto è chiaramente emerso che il nuovo modello sviluppato permette di approssimare con un'accuratezza maggiore, rispetto al metodo EPA, i risultati sperimentali, consentendo d'individuare il corretto ordine di grandezza.

Dimostrata l'accuratezza del modello in tutti i suoi aspetti si è valutata l'influenza nella determinazione della sostenibilità globale, applicando il metodo ad uno degli impianti monitorati. Se per quanto riguarda il metodo degli indicatori di sostenibilità in sé la maggiore accuratezza non comporta effetti significativi, in quanto l'aspetto degli impatti delle emissioni fuggitive è pressoché sempre molto inferiore rispetto agli impatti legati ad aspetti come la sicurezza intrinseca, il consumo di materie prime o il ritorno economico, nell'applicazione dei KPI di supporto si è riscontrato un effettivo beneficio. Come ampiamente discusso i KPI di supporto quantificano la vicinanza della concentrazione di una sostanza pericolosa, presente nell'atmosfera di un luogo confinato, alla soglia espositiva massima consentita per una determinata categoria di pericolosità. È quindi possibile definire una soglia di sicurezza — nell'applicazione effettuata fissata al 10% del valore di soglia massimo — oltre la quale l'impatto è da considerarsi insalubre ed è quindi necessario provvedere ad interventi migliorativi sull'impianto per ridurre l'entità delle emissioni.

Se ci si basasse sui valori dei KPI ottenuti impiegando la portata di emissioni fuggitive stimata dal modello EPA risulterebbe che l'impianto attuale sarebbe da considerarsi insalubre per quanto concerne la tossicità cronica e necessiterebbe di interventi adeguati per migliorare la salubrità del luogo di lavoro. In realtà applicando la portata stimata con il modello proposto, e quindi più fedele alla realtà, l'impianto risulta trovarsi ampiamente al di sotto dei valori di sicurezza, dimostrando così come il nuovo modello proposto sia indispensabile per ottenere informazioni attendibili per il processo decisionale. Ciò consente di prendere decisioni su dati prossimi alla realtà evitando, quando possibile, inutili e dispendiosi interventi migliorativi richiesti unicamente dall'eccessiva conservatività nella stima della portata delle emissioni fuggitive di un impianto caratterizzante il modello previsionale proposto dall'EPA.

Dimostrata l'indubbia utilità dei nuovi indicatori e, soprattutto, l'attendibilità e l'accuratezza del nuovo modello previsionale proposto, indispensabile per la

loro corretta quantificazione, il metodo degli indicatori di sostenibilità è stato impiegato per valutare due alternative progettuali di sbottigliamento. Le conclusioni sono state confrontate con quelle ottenute da una classica analisi di fattibilità basata unicamente su considerazioni di carattere economico.

Lo sbottigliamento è richiesto sia per incrementare l'attuale capacità produttiva che per risolvere alcuni problemi riscontrati durante lo studio dell'impianto. Al fine di facilitare le future analisi per l'individuazione dei colli di bottiglia, sono stati introdotti due indicatori che permettono d'identificare le cause di mancata produttività, il *process effectiveness*, e di allocarle alle apparecchiature sovra sfruttate individuate con l'*equipment effectiveness*. Questi sono stati validati sperimentalmente sull'impianto da sbottigliare, applicandoli alla configurazione attuale, e confrontando i risultati con le simulazioni e le verifiche fluidodinamiche, appurando che tali indicatori consentono d'individuare correttamente le cause di mancata produzione ed i colli di bottiglia.

Le due soluzioni progettuali, che hanno superato il vaglio di fattibilità tecnica, sono state confrontate prima in base a considerazioni economiche e successivamente esaminando tutti gli aspetti della sostenibilità. Da tale analisi è emerso che la scelta basata meramente su considerazioni economiche può portare a preferire una soluzione progettuale, si più economica, ma che presenta aspetti di sostenibilità ambientale e sociale peggiori, i quali fanno sì che la sostenibilità, considerata nel suo insieme, risulti inferiore.

In conclusione i nuovi indicatori relativi allo sbottigliamento consentono d'individuare, con le poche informazioni disponibili dalla strumentazione installata in impianto, le cause di mancata produzione ed i colli di bottiglia, indirizzando così i successivi studi fluidodinamici unicamente verso le apparecchiature realmente problematiche. Parallelamente i nuovi indicatori legati alle emissioni fuggitive, grazie alla precisione di stima del nuovo modello previsionale proposto, consentono di ricavare informazioni indispensabili al processo decisionale già nelle primissime fasi di progettazione, consentendo di confrontare le alternative non soffermandosi unicamente sugli aspetti economici ma, come richiesto oggi, valutando tutti gli aspetti di sostenibilità.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Allen, D. T. & Shonnard, D. R., **Green Engineering - Environmentally conscious design of chemical processes**, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ, (2002).
- [2] Alter, S. L., **Decision support systems - Current practice and continuing challenge**, Addison-Wesley, Reading, MA, (1980).
- [3] Anthony, R. N., **Planning and control systems - A framework for analysis, 1<sup>st</sup> ed.**, Harvard University Graduate School of Business, Cambridge, MA, (1965).
- [4] API Standard 527:2001, Seat tightness of pressure relief valves.
- [5] Copyright© 1981 – 2014 Aspen Technology Inc., "**Aspen HYSYS V8**".
- [6] Copyright© 1981 – 2006 Aspen Technology Inc., "**Aspen Properties 2006 User Interface**".
- [7] Bowden, P. E. & Fone, C. J., **Containment seals for API 682 second edition**, In *19th international pump users' symposium*, Houston, TX, (Febbraio 2002), pp. 67–84.
- [8] Bramsiepe, C. et al., **A model to predict fugitive VOC emissions from liquid charged flange joints with graphite gaskets**, *Chemical Engineering Journal*, **159**, (Febbraio 2010), pp. 11–16.
- [9] British Occupational Hygiene Society, **Fugitive emissions of vapours from process equipment**, Science Reviews Ltd, Northwood, UK, (1984).
- [10] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, **Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)**, Berlino, Germania, (Ottobre 2002).
- [11] Burton, D. J., **Industrial ventilation workbook**, DJBA Inc., Salt Lake City, UT, (1989).
- [12] Copyright© 1988 – 2012 Chemstation Inc., "**Chemcad**".
- [13] Colombo, F., Fazzari, F. & Rossini, V., **Emissioni fuggitive: una proposta metodologica per la gestione integrata del problema**, In *Valutazione e Gestione del Rischio negli insediamenti civili ed industriali*, Pisa, Italia, (17-19 Ottobre 2006).
- [14] Commissione Europea, **Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) - Reference document on the general principles of monitoring**, (Luglio 2003).
- [15] Cunningham, D., **Estimation of VOC emissions**, *Journal of Cleaner Production*, **3** (4), (1995), pp. 225–228.
- [16] D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152, Norme in materia ambientale, s.m.i.
- [17] D.M. 9 maggio 2001, Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante.
- [18] D.M. 1° dicembre 2004, n. 329, Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.
- [19] D.M. 31 gennaio 2005, Emanazione di linee guida per l'individuazione e l'utilizzazione delle migliori tecniche disponibili, per le attività elencate nell'allegato I del decreto legislativo 4 agosto 1999, n. 372.
- [20] Dir. UE 26 febbraio 2014, n. 34 (**ATEX**), Concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati a essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva.
- [21] Dir. UE 24 novembre 2010, n. 75 (**IPPC**), Relativa alle emissioni industriali

(prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento).

- [22] Dir. UE 15 maggio 2014, n. 68 (**PED**), Concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione.
- [23] Copyright<sup>©</sup> 1999 – 2007 Det Norske Veritas, "**DNV Phast 6.54**".
- [24] Epperson, D. et al., **Equivalent leak definition for Smart LDAR (leak detection and repair) when using optical imaging technology**, *Journal of the Air & Waste Management Association*, **57**, (Settembre 2007), pp. 1050–1060.
- [25] European Sealing Association, **Sealing Technology - BAT guidance notes**, 014/09, Gwynedd, UK, (Settembre 2009).
- [26] European Union network for the Implementation and Enforcement of Environmental Law, **Diffuse VOC emissions**, Bruxelles, Belgio, (Dicembre 2000).
- [27] Hassim, M. H. & Hurme, M., **Inherent occupational health assessment during basic engineering stage**, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **23** (2), (Marzo 2010), pp. 260–268.
- [28] Hassim, M. H. & Hurme, M., **Inherent occupational health assessment during preliminary design stage**, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **23** (3), (Maggio 2010), pp. 476–482.
- [29] Hassim, M. H. & Hurme, M., **Inherent occupational health assessment during process research and development stage**, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **23** (1), (Gennaio 2010), pp. 127–138.
- [30] Hassim, M. H. & Hurme, M., **Occupational chemical exposure and risk estimation in process development and design**, *Process Safety and Environmental Protection*, **88** (4), (Luglio 2010), pp. 225–235.
- [31] Hassim, M. H. et al., **Fugitive emissions in chemical processes: The assessment and prevention based on inherent and add-on approaches**, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **25** (5), (Settembre 2012), pp. 820–829.
- [32] Hassim, M. H. et al., **Estimation of chemical concentration due to fugitive emissions during chemical process design**, *Process Safety and Environmental Protection*, **88** (3), (Maggio 2010), pp. 173–184.
- [33] ISPRA, **Definizione di modalità per l'attuazione dei Piani di Monitoraggio e Controllo (PMC). Seconda emanazione**, nr. 0018712, (Giugno 2011).
- [34] Kittleman, T., Pope, M. & Adams, W., **CMA/STLE pump seal mas emissions study**, In *11th international pump users' symposium*, Houston, TX, (Marzo 1994), pp. 57–62.
- [35] Lees, F. P., **Lees' loss prevention in the process industries - Hazard identification, assessment and control**, 3<sup>rd</sup> ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, (2005).
- [36] Lev-On, M. et al., **Derivation of new emission factors for quantification of mass emissions when using optical gas imaging for detecting leaks**, *Journal of the Air & Waste Management Association*, **57**, (Settembre 2007), pp. 1061–1070.
- [37] Lewis sr., R. J., **Sax's Dangerous properties of industrial materials**, 11<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, (2004).
- [38] Little, J. D. C., **Models and managers: The concept of a decision calculus**, *Management Science*, **16** (8), (Aprile 1970), pp. 466–485.
- [39] Mashuga, C. V. & Crawl, D. A., **Derivation of Le Chatelier's mixing rule for flammable limits**, *Process Safety Process*, **19** (2), (Luglio 2000), pp. 112–117.
- [40] Pearson, J. M. & Shim, J. P., **An empirical investigation into DSS structures and**

- environments**, *Decision Support Systems*, **13**, (1995), pp. 141–158.
- [41] Power, D. J., **A Brief History of Decision Support Systems**, DSSResources.COM, <http://DSSResources.COM/history/dsshistory.html>, versione 4.0, 10 marzo 2007, *Consultazione Gennaio 2015*.
- [42] Scott Morton, M. S. & Gorry, G. A., **A framework for management information systems**, *Sloan Management Review*, **13** (1), (1971), pp. 50–70.
- [43] Shim, J. P. et al., **Past, present, and future of decision support technology**, *Decision Support Systems*, **33**, (2002), pp. 111–126.
- [44] Simon, H. A., **The new science of management decision**, *1<sup>st</sup> ed.*, Harper & Brothers, New York, NY, (1960).
- [45] Texas Commission on Environmental Quality, **Emissions factors for equipment leak fugitive components**, Air Quality Division, Addendum RG-360, Austin, TX, (Gennaio 2008).
- [46] Texas Commission on Environmental Quality, **Emissions inventory guidelines**, Air Quality Division, RG-360/13, Austin, TX, (Gennaio 2014).
- [47] **ThermaCAM GasFindIR Series**, <http://www.flir.com/legacy/view/?id=52339>, *Consultazione Febbraio 2015*.
- [48] Tugnoli, A. et al., **A consequence based approach to the quantitative assessment of inherent safety**, *AIChE Journal*, **53** (12), (Dicembre 2007), pp. 3171–3182.
- [49] Tugnoli, A. et al., **Sustainability assessment of hydrogen production by steam reforming**, *International Journal of Hydrogen Energy*, **33** (16), (Agosto 2008), pp. 4345-4357.
- [50] Tugnoli, A. et al., **Supporting the selection of process and plant design options by Inherent Safety KPIs**, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **25** (5), (Settembre 2012), pp. 830–842.
- [51] Tugnoli, A. et al., **Implementation of sustainability drivers in the design of industrial chemical processes**, *AIChE Journal*, **57** (11), (Novembre 2011), pp. 3063–3084.
- [52] U.S. Environmental Protection Agency, **Control techniques for fugitive VOC emissions from chemical process facilities**, Office of Research and Development, EPA 625-R-93-005, Cincinnati, OH, (Marzo 1994).
- [53] U.S. Environmental Protection Agency, **Enforcement Alert – Proper monitoring essential to reducing fugitive emission under leak detection and repair programs**, Office of Regulatory Enforcement, EPA 300-N-99-014, Washington, DC, (Ottobre 1999).
- [54] U.S. Environmental Protection Agency, **Leak Detection and Repair – A best practices guide**, Office of Enforcement and Compliance Assurance, EPA 305-D-07-001, Washington, DC, (Ottobre 2007).
- [55] U.S. Environmental Protection Agency, **Leak Detection and Repair – A best practices guide pamphlet**, Office of Enforcement and Compliance Assurance, EPA 305-K-08-002, Washington, DC, (Giugno 2008).
- [56] U.S. Environmental Protection Agency, **Method 21 "Determination of Volatile Organic Compound Leaks"**, EMTIC M-21, (Settembre 1993).
- [57] U.S. Environmental Protection Agency, **Point sources preferred and alternative methods - Preferred and alternative methods for estimating fugitive emissions from equipment leaks**, (Vol. II, Cap. 4), Office of Air Quality Planning and Standards, EPA 454-R-97-004B, Research Triangle Park, NC, (Novembre 1996).

- [58] U.S. Environmental Protection Agency, **Protocol for equipment leak emission estimates**, Office of Air Quality Planning and Standards, EPA 453-R-95-017, Research Triangle Park, NC, (Novembre 1995).
- [59] Uijt de Haag, P. A. M. & Ale, B. J. M., **Guidelines for quantitative risk assessment 'Purple Book'**, 3<sup>rd</sup> ed., Sdu Uitgevers, The Hague, Paesi Bassi, (2005).
- [60] UNI EN 13555:2005, Flange e loro giunzioni - Parametri delle guarnizioni e procedure di prova relative alle regole di progettazione per le giunzioni con flange circolari con guarnizioni.
- [61] UNI EN 15446:2008, Fugitive and diffuse emissions of common concern to industry sectors - Measurement of fugitive emission of vapours generating from equipment and piping leaks.
- [62] UNI EN 1591-1:2009, Flange e loro giunzioni, Regole di progettazione delle giunzioni con flange circolari con guarnizioni - Parte 1: Metodo di calcolo.
- [63] UNI EN 1591-2:2009, Flange e loro giunzioni, Regole di progettazione delle giunzioni con flange circolari con guarnizioni - Parametri delle guarnizioni.
- [64] van den Bosch, C. J. H. & Weterings, R. A. P. M., **Methods for the calculation of physical effects 'Yellow Book'**, 3<sup>rd</sup> ed., Sdu Uitgevers, The Hague, Paesi Bassi, (2005).
- [65] World Commission on Environment and Development, **Our common future**, Oxford University Press, Oxford, UK, (1987).