VALUTAZIONE DEI RISCHI CONNESSI CON GLI USI INDUSTRIALI DELL'AZOTO

Alicino M.¹, Ferroni L.² e Lazzaro O.¹

¹ Abbott srl , Via Pontina Km 52, Campoverde (LT), 04011, Italia

² Master in Sicurezza e Protezione, Università degli Studi di Roma la "Sapienza", corso Vittorio Emanuele II 244, Roma, 00186, Italia

SOMMARIO

Il rischio connesso all'utilizzo dell'azoto, ad oggi, non è ancora mai stato affrontato nella sua specificità, pur essendo l'azoto un gas che -in campo industriale- causa ogni anno un elevato numero di infortuni molto spesso mortali legati, piuttosto che alle condizioni tipiche di utilizzo (bassa temperatura ed alta pressione), all'impoverimento di ossigeno a seguito di rilascio di azoto in ambiente.

Il lavoro in oggetto si pone l'obiettivo di fornire un approccio metodologico per la valutazione sistematica dei rischi connessi all'utilizzo industriale dell'azoto, con particolare riguardo al rischio asfissia. Nel lavoro si analizzeranno in dettaglio le principali fonti di pericolo; verrà quindi descritta una metodologia semi-quantitativa per una valutazione approfondita di rischio, con particolare riferimento al rischio asfissia. Verrà inoltre approfondito il tema delle emissioni strutturali e puntuali di azoto nei locali lavorativi, fornendo un modello per la stima delle portate di azoto, emesse sia durante le normali operazioni che in fase incidentale, utile per la conseguente verifica della concentrazione di ossigeno in ambiente. In conclusione, verranno fornite una serie di indicazioni di tipo impiantistico gestionale emerse da una applicazione estensiva della metodologia proposta all'industria chimico farmaceutica , utili a fornire misure generali di tutela in merito al rischio azoto in ambiente lavorativo.

1 RISCHI CONNESSI CON L'UTILIZZO DI AZOTO

1.1 Rischi connessi all'utilizzo dell'azoto

L'azoto è un gas incolore ed inodore molto comune in natura (comprende il 79% dell'atmosfera terrestre) caratterizzato da un punto di ebollizione molto basso, -195,82 °C, è normalmente stoccato allo stato liquido a corca 15 atm.

Tra le sue principali applicazioni si citano: l'utilizzo come fluido refrigerante e per applicazioni criogeniche grazie al suo elevato calore di evaporazione; l'utilizzo, in diversi ambiti industriali e tecnologici, come inertizzante in virtù della sua scarsa reattività chimica (tipicamente per il controllo del rischio di esplosione/incendio o lì dove vi sia una incompatibilità chimica tra materiale ed ossigeno dell'aria). Gli ambiti industriali di maggior utilizzo dell'azoto sono l'industria alimentare, quella chimica, elettronica, metallurgica, il settore ospedaliero ecc..

Le caratteristiche intrinseche di tale gas (gas inodore e incolore, coefficiente di espansione liquido/gas pari a 1:700) e quelle legate alle modalità di stoccaggio ed utilizzo (temperature criogeniche, pressioni di circa 15 bar) rendono però l'azoto molto pericoloso; i principali fattori di rischio sono i seguenti:

- l'utilizzo di un fluido a temperature criogeniche presenta, di norma, due principali fattori di rischio. Il primo è legato al potenziale infragilimento dei contenitori; l'errata definizione della temperatura di progetto di questi rispetto alle condizioni di utilizzo dell'azoto risulta, infatti, essere una delle principali cause di incidente. Il secondo fattore di rischio è costituito dal contatto accidentale del personale con superfici a temperature criogeniche, contatto che provoca sulla pelle lesioni del tutto simili alle ustioni (l'entità del danno aumenta con il diminuire della temperatura e con il prolungarsi della durata del contatto).
- per quanto riguarda l'alta pressione di stoccaggio, il rischio, genericamente, è legato al malfunzionamento dei riduttori di pressione, e alla conseguente possibilità di pericolose sovrappressioni

nelle apparecchiature di utilizzo (rischio limitato dall'installazione, a valle dei riduttori di pressione, di valvole di sicurezza).

- l'ultimo rischio, ma certamente quello più elevato in termini di frequenza di accadimenti incidentali, è quello legato al pericolo di asfissia conseguente alla dispersione di azoto in ambienti confinati. Notoriamente l'azoto non è "intrinsecamente" tossico o nocivo nel senso tradizionale del termine ma un aumento della sua concentrazione, non rilevabile poiché il gas è incolore ed inodore, può causare asfissia a causa della conseguente riduzione della percentuale di ossigeno in ambiente. Nella tabella seguente si riportano gli effetti sull'uomo di una carenza di ossigeno nell'aria.

Tabella 1. Effetti sull'uomo per carenza di ossigeno [1]

<i>Concentrazione di ossigeno in aria (%)</i>	<i>Possibili effetti sull'uomo</i>
20.9	Nessun effetto
19.0	Effetti fisiologici negativi non riscontrabili immediatamente
16.0	Aumento dei battiti cardiaci e incremento della frequenza respiratoria, abbassamento del livello di attenzione e delle capacità di ragionamento, riduzione della coordinazione nei movimenti
14.0	Affaticamento, bruschi cambi di umore, scoordinamento nei movimenti, alterazione del giudizio
12.5	Mancanza di lucidità mentale e di coordinamento, frequenza respiratoria elevata, possibili danni al cuore, nausea e vomito
<10	Inabilità nei movimenti, perdita di conoscenza, convulsioni, morte

L'ente governativo statunitense per la salute e la sicurezza "Occupational and Health Administration" (OSHA) ha definito come valori soglia per classificare un luogo di lavoro come sicuro, una concentrazione di ossigeno compresa tra il 19,5% e il 23%. Quando la concentrazione di ossigeno scende al di sotto del 16%, il cervello invia un comando al centro di controllo della respirazione che induce la persona esposta a respirare più velocemente e più profondamente, i sintomi si aggravano per concentrazioni via via inferiori finché, per concentrazioni comprese tra il 4 ed il 6%, la persona può cadere in coma in meno di 40 secondi. In tal caso, al fine di offrire una possibilità di sopravvivenza all'infortunato, l'ossigeno deve essere fornito entro pochi minuti. Una volta rianimata, comunque, la vittima rischia ancora un arresto cardiaco nei minuti successivi.

2 ANALISI STORICA DEGLI INCIDENTI CONNESSI ALL'UTILIZZO DI AZOTO

L'analisi storica degli incidenti costituisce un elemento essenziale per l'identificazione degli interventi di prevenzione degli stessi. Gli incidenti legati all'utilizzo e allo stoccaggio di azoto risultano essere dovuti prevalentemente all'impoverimento di ossigeno atmosferico nell'ambiente di lavoro piuttosto che ai rischi legati alle condizioni criogeniche e di alta pressione con cui questo gas viene di norma adoperato. L'entità degli incidenti collegati all'utilizzo dell'azoto, peraltro, non è affatto trascurabile: da una analisi effettuata nei soli Stati Uniti [2] risulta che, tra il 1992 e il 2002, sono avvenuti circa 85 incidenti che hanno provocato 80 morti; degli 85 incidenti, l'ente governativo statunitense OSHA riporta che circa il 62% è avvenuto nelle industrie chimiche, nelle raffinerie, nell'industria alimentare, in quella marittima e nell'industria metallurgica; il 13% è avvenuto durante attività di manutenzione per riparazione, pulizia e bonifica di

reattori, serbatoi, condutture e autocisterne; il 14% degli incidenti è occorso in prossimità di boccaporti e dentro trincee; il restante 11% è avvenuto in laboratori e in ambito ospedaliero. Il database del Chemical Safety and Hazard Investigation Board statunitense [3], conferma che il 60% degli incidenti ha coinvolto personale che operava dentro od in prossimità di uno spazio confinato a causa di asfissia prodotta da una atmosfera impoverita di ossigeno.

L'analisi incidentale storica evidenzia e conferma la criticità e la pericolosità dell'utilizzo di azoto in diversi ambiti lavorativi in particolare in relazione al rischio asfissia.

3. SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO AZOTO

Il processo logico proposto per la valutazione del rischio azoto è il seguente:

- individuazione e analisi dei pericoli potenziali relativamente agli ambienti e alle postazioni di lavoro, alle mansioni svolte, agli impianti presenti e alle macchine ed attrezzature utilizzate;
- identificazione delle misure di prevenzione e protezione già adottate e verifica della loro adeguatezza;
- definizione dei criteri per la valutazione dei rischi (probabilità di accadimento dell'evento e livello di danno possibile associabile all'evento);
- valutazione dei rischi e definizione della priorità di intervento per la loro riduzione/mitigazione;
- individuazione dei provvedimenti che possono essere presi per l'eliminazione o riduzione dei rischi residui.

3.1 Individuazione e analisi dei pericoli potenziali

Per attività di tecnologia nota, la fase di individuazione dei pericoli potenziali può essere effettuata basandosi sull'analisi storica degli incidenti occorsi in settori affini e, comunque, sulle risultanze dell'esperienza operativa dell'attività stessa; in base ai fattori di pericolo emersi, è possibile sviluppare una check-list mirata a valutare i diversi aspetti che caratterizzano il rischio azoto. In base all'esperienza acquisita dagli scriventi, è opportuno che nella check-list siano analizzati con particolare dettaglio i seguenti aspetti: operazioni a rischio e condizioni di emergenza, ventilazione, sistemi di monitoraggio ossigeno fissi e allarmi, misure di sicurezza aggiuntive, misure di emergenza e di soccorso, rischio da basse temperature, rischio da sovrappressione, training.

Sembra opportuno sottolineare che, poichè il metodo delle check-list può essere applicato con buon livello di confidenza solo per le lavorazioni a tecnologia nota, per cicli lavorativi particolari, per i quali non esiste una sufficiente esperienza operativa, è comunque opportuno adottare, per questa fase dell'analisi dei rischi, metodologie più complete quali l'Hazop e la What-if.

3.2 Identificazione delle misure adottate

Con il termine "misure adottate" si intendono le principali azioni intraprese o attivate dall'azienda per ridurre o mantenere sotto controllo la probabilità di accadimento e/o la gravità delle conseguenze derivanti da eventi correlati al rischio; in particolare vengono considerate le azioni di carattere gestionale, strutturale nonché formative/informative ed dispositivi di protezione individuale.

In particolare, quali misure adottate specifiche per la prevenzione e protezione del rischio azoto si possono citare:

- misure volte a ridurre la probabilità di rilascio di azoto negli ambienti di lavoro;
- misure volte a ridurre la concentrazione di azoto nell'aria in caso di rilascio di azoto;
- misure volte a ridurre a limitare il tempo di esposizione del lavoratore ad una atmosfera impoverita di ossigeno;

3.3 Definizione dei criteri per la valutazione dei rischi

Sulla base dei fattori di pericolo potenziale individuati, dello stato di fatto e delle conseguenti misure adottate viene proposta una stima semi-quantitativa del livello di rischio esistente, basata sulla probabilità del manifestarsi degli eventi connessi e sulla gravità delle conseguenze ipotizzabili.

Probabilità di accadimento dell'evento - Per probabilità o frequenza, si intende la probabilità che si verifichi l'evento, distinguendo:

Livello 1 - L'evento è estremamente improbabile; non sono noti episodi già verificatisi; l'evento potrebbe verificarsi a causa di una concomitanza di eventi singolarmente improbabili.

Livello 3 - L'evento è probabile che accada fino ad una volta l'anno; sono noti solo alcuni casi di episodi già verificatisi; l'evento può verificarsi a seguito di circostanze sfavorevoli.

Livello 5 - L'evento è probabile che accada anche una volta al mese; l'evento può verificarsi direttamente per la mancanza o il difetto di pochi elementi;

Livello 7 - L'evento si può verificare anche una volta a settimana;

Livello 9 - L'evento si può verificare anche una volta al giorno;

Livello 10 - L'evento ha una frequenza di accadimento superiore a una volta al giorno.

Danno possibile associabile all'evento – Livello di danno o gravità delle conseguenze per le persone, quantificabile in:

Livello 1 - Lieve: l'evento provoca effetti trascurabili. Può associarsi a concentrazione di ossigeno compresi tra il 19,5% e il 21%.

Livello 2 - Medio: l'evento provoca effetti fisiologici negativi non riscontrabili immediatamente e comunque rapidamente reversibili. Può associarsi a situazioni incidentali in cui la concentrazione di ossigeno può ridursi raggiungendo valori compresi tra il 16% e il 19,5%.

Livello 5 - Grave: l'evento provoca l'aumento dei battiti cardiaci ed incremento della frequenza respiratoria, abbassamento del livello di attenzione e delle capacità di ragionamento, riduzione della coordinazione nei movimenti. Può associarsi a condizioni in cui la concentrazione di ossigeno raggiunge valori compresi tra il 14% e il 16,5%.

Livello 7 – Molto Grave: l'evento provoca effetti tali da richiedere il ricovero in ospedale. Mancanza di lucidità mentale e di coordinamento, frequenza respiratoria elevata, possibili danni al cuore, nausea e vomito. Può associarsi a condizioni in cui la concentrazione di ossigeno raggiunge valori compresi tra il 10% e il 14%.

Livello 10 - Gravissimo: Inabilità nei movimenti, perdita di coscienza, convulsioni, morte. Può associarsi a condizioni in cui la concentrazione di ossigeno in ambiente è inferiore al 10%.

3.4 Valutazione dei rischi e definizione delle priorità di intervento

Il rischio è funzione della probabilità e del danno ($R = P \times D$). E' stata realizzata una matrice con i due parametri, probabilità e gravità, per la definizione del livello di rischio e, conseguentemente, al grado di priorità da assegnare ai relativi interventi di prevenzione e protezione da adottare. I livelli di rischio associabili alle 30 possibilità che possono verificarsi incrociando i livelli definiti di probabilità e gravità si possono raggruppare in 4 classi di priorità secondo lo schema seguente:

Rischio Elevato - Livello di rischio superiore a 70: interventi e misure impiantistiche e/o gestionali da eseguire immediatamente.

Rischio Alto - Livello di rischio compreso tra 30 e 69: interventi e misure impiantistiche e/o gestionali da eseguire in tempi brevi.

Rischio Medio - Livello di rischio compreso tra 11 e 29: interventi e misure impiantistiche e/o gestionali migliorative da programmare nel breve-medio termine.

Rischio Basso - Livello di rischio compreso tra 1 e 10: interventi e misure impiantistiche e/o gestionali non indispensabili, il rischio va comunque tenuto sotto controllo.

3.5 Interventi di riduzione dei rischi residui

Gli interventi di miglioramento, volti all'ulteriore riduzione dei rischi, comprendono misure di prevenzione e protezione quali:

- misure strutturali, ovvero riferite a impianti, macchine, apparecchiature e ambiente di lavoro;
- misure gestionali, basate sulla elaborazione di procedure e istruzioni di lavoro, analisi e misure di approfondimento, programmi di manutenzione;
- intervento formativo, relativo ai fabbisogni di informazione, formazione e addestramento dei lavoratori;
- misure correlate alla necessità di rafforzamento dell'uso di DPI e di miglioramento della cartellonistica con messaggi relativi a prescrizioni o informazioni di sicurezza.

A seconda della tipologia della sorgente di emissione di azoto, della frequenza di accadimento del rilascio, del tempo di esposizione, della ventilazione presente nel locale possono essere necessarie in addendum alcune delle misure sopra elencate che andranno valutate caso per caso.

4 METODOLOGIA PER IL CALCOLO DELLA VARIAZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DI OSSIGENO A SEGUITO DI RILASCIO DI AZOTO

Ipotesi del modello

Al fine di valutare la concentrazione di ossigeno che si raggiunge a seguito di perdita di azoto in un locale confinato, è stato necessario sviluppare un metodo di calcolo. Il modello si basa sulle seguenti ipotesi:

- l'aria è costituita dal 78% di azoto e dal 21% di ossigeno in condizioni normali;
- quando si verifica una perdita di azoto, il gas si miscela uniformemente con l'aria presente nel locale;
- la ventilazione del locale, espressa in numero di ricambi di aria all'ora, è riferita ad aria pura e non ricircolata. L'aria pura è composta dal 78% di azoto e dal 21% di ossigeno;
- il volume del locale è mantenuto a pressione costante, da cui consegue che il volume di aria proveniente dal sistema di ventilazione più il volume di azoto rilasciato spiazzano completamente il volume equivalente di aria inizialmente presente (bilancio aeraulico invariato);
- il volume del locale, la portata di azoto e la portata dell'impianto di ventilazione che serve il locale rimangono costanti durante l'intera fase di rilascio azoto.

Parametri in ingresso

I principali parametri che caratterizzano un rilascio di azoto, ai fini del calcolo della variazione della concentrazione di ossigeno nel locale, sono:

- Portata della perdita di azoto: questo parametro, oltre ad essere alla base del modello di calcolo della concentrazione di ossigeno nel locale, è anche il più difficile da determinare. La perdita di azoto può avvenire con diverse modalità e da sorgenti di diverso tipo: dal riduttore di una bombola di stoccaggio, da una flangia, da un tubo disconnesso ecc. Esistono casi in cui la portata di emissione può essere dipendente non solo dalla tipologia della sorgente di emissione ma anche dalla presenza di dispositivi che limitano la portata di emissione (es. regolatori di pressione, valvola di sicurezza, disco tarato). In quest'ultimo caso, la portata di emissione può essere facilmente ottenuta dai dati del fabbricante di tali dispositivi.

Per la stima della portata di azoto emessa a seguito di perdita da flangia si è fatto riferimento alle formule riportate nella norma CEI 31-35 "Guida all'applicazione della norma CEI EN 60079-10 – Classificazione dei luoghi pericolosi"[4]. Sebbene la norma si riferisca alla classificazione delle aree a rischio esplosione secondo la normativa ATEX, in essa vengono forniti modelli generali per la stima di perdite di gas e liquidi da flange e tubazioni.

- Volume del locale: nel determinare questo parametro si è tenuto conto del volume effettivo di aria presente nel locale, sottraendo al volume totale quello occupato dalle attrezzature.

Nel caso di grandi locali, poichè l'ipotesi della miscelazione perfetta del gas in tutto il volume viene meno, può risultare preferibile, nonchè più conservativo, definire un volume ridotto definito in prossimità della sorgente di emissione. Questo accorgimento è inoltre adatto in tutti quei casi in cui la presenza di apparecchiature installate molto vicine alla sorgente di emissione di azoto rappresenta un ostacolo alla ventilazione e quindi alla miscibilità dei gas.

- Ricambi d'aria: questo parametro indica il numero effettivo di ricambi d'aria fresca immessa all'interno del locale tramite l'impianto di ventilazione.

Sorgenti di emissione

Le più comuni sorgenti di emissione di azoto nell'industria sono rappresentate da valvole, riduttori di pressione, connessioni rapide, attacchi di laboratorio, sfiati di processo, bombole di azoto gassoso, serbatoi di stoccaggio azoto liquido fissi o carrellati.

Modalità di emissione dell'azoto

In condizioni incidentali le sostanze possono fuoriuscire dai sistemi di contenimento secondo diverse modalità in relazione alle caratteristiche di stoccaggio ed alla velocità di emissione. Le sostanze possono essere emesse in ambiente sotto forma di gas/vapore (singola fase), di liquido che evapora in modo trascurabile nell'emissione (singola fase) di liquido che evapora massivamente in seguito al rilascio (modalità tipica dei gas liquefatti).

Per quanto riguarda le modalità di emissione incidentale di azoto valgono le seguenti osservazioni: se l'azoto, all'interno del sistema di contenimento è allo stato liquido in pressione, nel punto di emissione subisce in parte o totalmente una vaporizzazione tumultuosa ed istantanea (flashing), in parte una nebulizzazione. La parte di liquido che non evapora o nebulizza nell'emissione va a formare una pozza dalla quale continua l'evaporazione (nel caso di evaporazione in condizioni atmosferiche, il coefficiente di espansione liquido-gas dell'azoto è pari a 1:700). Quando la velocità di emissione è piccola o la sorgente di emissione è schermata, si forma una pozza sul suolo sottostante il punto di emissione; quando la velocità di uscita è grande (pressione interna elevata), e la sorgente di emissione non è schermata, il liquido viene spruzzato e può percorrere una certa distanza prima di cadere a terra e formare una pozza.

Calcolo delle portate di emissione

La stima delle dimensioni dei fori da utilizzare per definire la portata di emissione è di difficile valutazione; in generale la stima è basata sull'esperienza pratica e su considerazioni ingegneristiche legate, soprattutto, alle caratteristiche dei materiali utilizzati, alla periodicità ed accuratezza della manutenzione e alla rapidità di intervento in caso di guasto.

Di seguito sono fornite alcune indicazioni in merito alla valutazione delle emissioni da flange, valvole, valvole di sicurezza e dischi di rottura, connessioni di piccole dimensioni, punti di drenaggio e prelievo campioni.

Nel caso delle flange per definire le dimensioni del foro di emissione si considera il guasto della guarnizione. Nella pratica industriale, il foro è definito considerando le dimensioni della flangia, il tipo e lo spessore della guarnizione. I principali tipi di flange sono quelle con guarnizione in fibra compressa, guarnizione avvolta a spirale, giunto ad anello metallo su metallo. Lo spessore delle guarnizioni in fibra compressa può variare generalmente da 0,6 a 3mm; lo spessore del foro in presenza di flange con guarnizione avvolta a spirale e con giunto ad anello metallo su metallo è molto inferiore. Con guarnizioni in fibra compressa un guasto grave può originare un foro di spessore 1mm lungo quanto la sezione compresa tra due fori di serraggio. La tipologia di perdita delle flange, però, è tale per cui normalmente il guasto inizia con un foro relativamente piccolo e, solo col tempo, le dimensioni possono aumentare fino ai valori sopra riportati. Dovendo fare delle assunzioni sulle dimensioni del foro, dunque, si deve ricorrere ad uno o l'altro range di dimensioni in relazione anche a considerazioni di tipo operativo: nello specifico, potendo prevedere la presenza di operatori in grado di intervenire sin dalle prime fasi del rilascio, si può ragionevolmente assumere che le dimensioni del foro di siano ancora piccole, dell'ordine di soli $2,5\text{mm}^2$. Con guarnizioni avvolte a spirale o ad anello ondulato metallico con inserto in grafite, un guasto grave può originare un foro di spessore fino a 0,05mm lungo quanto la sezione di guarnizione compresa tra due fori di serraggio. Anche in questo caso, però, quando è prevedibile un intervento tempestivo degli operatori, possono essere assunti nella modellazione del rilascio fori più piccoli, dell'ordine di non più di $0,2\text{mm}^2$. Con giunti ad anello metallico¹ (ring joint), mentre un guasto grave può originare un foro di spessore 0,05mm lungo 10mm, quindi di area $0,5\text{mm}^2$, l'intervento nelle prime fasi del rilascio consente di poter stimare delle dimensioni del foro non ancora superiori a $0,1\text{mm}^2$.

Nel caso delle valvole, per definire le dimensioni del foro di emissione, si considera l'emissione dallo stelo. Nella pratica industriale, quale area del foro di emissione dallo stelo, si può assumere $0,25\text{mm}^2$ per valvole di uso generale su tubazione di diametro minore o uguale a 150 mm, $2,5\text{mm}^2$ per valvole di uso generale su tubazione di diametro maggiore di 150 mm.

L'apertura di valvole di sicurezza e di dischi di rottura determina portate di rilascio facilmente determinabili tramite i dati tecnici forniti dal fabbricante.

Nel caso di connessioni di piccole dimensioni (es. per il collegamento della strumentazione di processo), la tipologia di perdita è tale per cui normalmente il guasto inizia con un foro piccolo e, solo se non si interviene, raggiunge le dimensioni della rottura completa del tubo. Pertanto, quando la rottura completa è ritenuta improbabile perchè è previsto un intervento tempestivo o per altri validi motivi, possono essere considerati fori più piccoli nel campo tra $0,1$ e 1mm^2 ed assumere mediamente il valore di $0,25\text{mm}^2$.

Sia per i punti di drenaggio sia per i punti di prelievo campioni si considera invece, come evento di riferimento, il trafileamento dalla valvola di intercettazione. Il trafileamento può essere escluso quando sono previste doppie valvole di intercettazione, una valvola più una flangia cieca o un tappo, oppure per prese campione a dosaggio predeterminato quando la quantità prelevata è di pochi cm^3 . Quanto detto, evidentemente, è applicabile al caso di prelievo campioni a circuito aperto, per i punti di prelievo a circuito si può ragionevolmente escludere perdite in ambiente. Nei casi in cui non possa essere ragionevolmente esclusa la possibilità che la valvola di drenaggio o prelievo campioni sia lasciata o rimanga aperta, per definire le dimensioni del foro si considera la valvola completamente aperta. Il diametro tipico di efflusso dei punti di prelievo campioni è di 20 mm. Il diametro tipico di efflusso dei punti di drenaggio varia in genere tra 15, 25, 40 e 50 mm. Per il trafileamento possono essere considerati fori più piccoli; indicativamente 1/10 del diametro sopra indicato.

¹ I giunti filettati maschio-femmina (es. tubo manicotto) possono essere considerati equivalenti a giunti ad anello metallo su metallo.

Stima delle emissioni strutturali

Emissioni strutturali sono quelle che possono avvenire durante l'attività dell'impianto dai punti di discontinuità dei componenti del sistema di contenimento dell'azoto, quali ad esempio le flange sulle tubazioni, le giunzioni tra parti di apparecchi e macchine, gli sfiati di valvole di sicurezza, di sfioro e simili chiuse ecc. La stima delle emissioni strutturali è di difficile valutazione. Esse possono essere trascurabili quando i componenti sono nuovi oppure hanno subito da poco un intervento di manutenzione, ma con il tempo possono aumentare, in relazione alle condizioni di esercizio o a cause esterne di guasto, fino a diventare significative. Le portate di emissione di gas indicate nella tabella 2 sono basate su dati statistici e possono essere utili nell'industria per la valutazione di tale tipologia di emissioni.

Tabella 2. Emissioni strutturali di diversi componenti [4]

COMPONENTI	EMISSIONI STRUTTURALI Kg/s
Connessioni (a flangia o filettate), accessori di tubazioni	$1,9 \cdot 10^{-8}$
Valvole manuali e automatiche (escluse le valvole di sicurezza e di rilascio all'atmosfera)	$5,6 \cdot 10^{-7}$
Sfiati, drenaggi, spurghi e prese-campione intercettati da valvole (escluse le valvole di sicurezza e di rilascio all'atmosfera)	$5,6 \cdot 10^{-8}$
Sfiati di valvole di sicurezza chiuse, valvole di rilascio all'atmosfera chiuse, boccaporti, passi d'uomo.	$1,5 \cdot 10^{-6}$

Calcolo delle portate di emissione di gas in singola fase

L'azoto può fuoriuscire dal sistema di contenimento, all'interno del quale è allo stato gassoso, a bassa velocità in regime subsonico (non turbolento) o ad alta velocità in regime di flusso sonico (turbolento). Per definire il regime di flusso si applica la formula (1):

$$\frac{P_a}{P} \leq \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

dove: P_a - pressione atmosferica, [Pa];

P - pressione assoluta all'interno del sistema di contenimento nel punto di emissione,

P_a ; γ - rapporto tra i calori specifici (indice di espansione) = C_p/C_v .

Quando questa relazione è rispettata si ha un flusso sonico (regime turbolento), quando non è rispettata si ha flusso subsonico (non turbolento). Per definire la portata di emissione si applica la formula (2):

$$Q_g = \phi \cdot c \cdot A \left[\gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\beta} \right]^{-0,5} \frac{P}{\left(\frac{R T}{M} \right)^{0,5}} \quad (2)$$

dove: Q_g - portata di azoto, Kg/s;

ϕ - rapporto critico del flusso;

c - coefficiente di efflusso (emissione), valore fornito dal costruttore oppure per valvole di sicurezza = 0,97 e negli altri casi in genere = 0,80;

A - sezione del foro di emissione, m²;

P - pressione assoluta all'interno del sistema di contenimento nel punto di emissione, Pa;

T - temperatura assoluta all'interno del sistema di contenimento in prossimità del foro di fuoriuscita, K;

R - costante universale dei gas = 8314 J/kmol · K; M - massa molare dell'azoto, kg/kmol;

γ - rapporto tra i calori specifici (indice di espansione) = C_p/C_v ; $\beta = \frac{\gamma+1}{\gamma-1}$.

Caso tipico di applicazione è la fuoriuscita di azoto da un sistema di contenimento nel quale la pressione non cali sensibilmente per effetto dell'emissione considerata. Il rapporto critico ϕ si determina per emissioni in regime subsonico (non turbolento) con la formula (3):

$$\phi = \left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]^{0,5} \cdot \left[\left(\frac{2}{\gamma-1}\right) \cdot \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\beta}\right]^{0,5} \quad (3)$$

Per emissioni in regime sonico (turbolento) si può assumere $\phi = 1$.

Calcolo delle portate di evaporazione dalla pozza di azoto liquido

La portata di evaporazione da una pozza di azoto che si trova allo stato liquido (caso che si verifica per stoccaggi refrigerati, criogenici) può essere calcolata con la formula (4) che considera l'evaporazione immediatamente successiva all'emissione:

$$Q_g = \left[A \frac{2 \cdot X_g \cdot K_t}{c_{lv}} \left(\frac{1}{\pi \cdot \alpha}\right)^{0,5} \cdot (T_g - T) \cdot 10^3 \right] / t_e^{0,5} \quad (4)$$

dove: X_g è uguale a 1 con pavimento non poroso (es. in calcestruzzo), è uguale a 3 con pavimento poroso (es. con ghiaia);

K_t è uguale a $0,3 \cdot 10^{-3}$ per la sabbia asciutta, è uguale a $0,6 \cdot 10^{-3}$ per la sabbia umida, è uguale a $0,2 \cdot 10^{-3}$ per il legno, è uguale a $1,3 \cdot 10^{-3}$ per il calcestruzzo armato, è uguale a $0,4 \cdot 10^{-3}$ per il calcestruzzo non armato, K è uguale a $2,5 \cdot 10^{-3}$ per la ghiaia, è uguale a $46 \cdot 10^{-3}$ per l'acciaio.

α è uguale a $2 \cdot 10^{-7}$ per la sabbia asciutta, $3,3 \cdot 10^{-7}$ per la sabbia umida, $1,6 \cdot 10^{-7}$ per il legno, $2,5 \cdot 10^{-7}$ per il calcestruzzo, $11 \cdot 10^{-7}$ per la ghiaia, $128 \cdot 10^{-7}$ per l'acciaio,

c_{lv} = calore latente di vaporizzazione, [J/kg];

A - area della pozza o area di evaporazione dalla superficie libera dell'azoto liquido nel contenitore, [m²];

T_g - temperatura del suolo, K; t_e - tempo di emissione o tempo trascorso dall'inizio dell'evaporazione (t_e iniziale = 1), [s].

L'area A della pozza è definita in modi diversi in relazione alla situazione locale. Quando il liquido è confinato, cioè delimitato da cordoli, terrapieni, dighe ecc., l'area A della pozza dovrebbe essere corrispondente all'area delimitata dagli stessi cordoli, terrapieni, dighe ecc. Quando il suolo è pavimentato

con pendenza verso pozzetti o ghiotte di drenaggio in fogna, può essere considerata la possibilità che il liquido fuoriuscito venga scaricato in fogna, o comunque in un volume diverso, limitando sensibilmente l'area A fino a dimensioni trascurabili. Quando la sorveglianza dell'impianto assicura un intervento tale da sopprimere rapidamente la perdita si può limitare l'area A a dimensioni più piccole di quelle indicate nei punti precedenti.

Modello di calcolo

Al fine di modellizzare la concentrazione di ossigeno all'interno del locale si è ipotizzato che all'interno del locale entrino due correnti: una, Q_{azoto} , con composizione pari allo 0% di ossigeno e portata pari a quella del rilascio di azoto. L'altra ha composizione pari al 21% di ossigeno e portata data dalla differenza tra la portata di estrazione garantita dalla ventilazione Q e Q_{azoto} . La variazione in funzione del tempo della concentrazione di ossigeno all'interno del locale a seguito di rilascio di azoto può essere calcolata utilizzando la formula (5):

$$C_f = C_p + (C_i - C_p) \exp\left(-\frac{Qt}{V}\right) \quad (5)$$

Dove: t - tempo del rilascio, [s];

Q - portata di miscela azoto/aria in ingresso al locale [m^3/s] data dalla somma della portata di aria fresca entrante e della portata di azoto rilasciata. E' pertanto pari alla portata di aria estratta dal sistema di ventilazione;

V - volume del locale, m^3 ,

C_f - concentrazione dell'ossigeno nel locale dopo un tempo t ;

C_i - concentrazione dell'ossigeno nel locale prima del rilascio (in genere 21%);

C_p - concentrazione dell'ossigeno nel gas entrante nel locale; viene calcolata con la formula (6):

$$C_p = C_i \cdot \frac{(Q - Q_{\text{azoto}})}{Q} \quad (6)$$

Esplicitando la formula rispetto al tempo si ottiene la formula (7):

$$t = -\frac{V}{Q} \ln\left(\frac{C_f - C_p}{C_i - C_p}\right) \quad (7)$$

Qualora si conosca il numero n di ricambi orari di aria fresca, Q è ricavabile con la formula (8):

$$Q = V \cdot n \quad (8)$$

5. RISULTATI

Una volta definiti i criteri e la metodologia per la valutazione del rischio azoto, è stata condotta una valutazione specifica in circa sette stabilimenti produttivi europei della multinazionale chimico-farmaceutica Abbott: in totale sono stati analizzati circa 200 locali in cui viene utilizzato azoto. La valutazione del rischio è stata applicata in tutti i luoghi di lavoro presenti negli stabilimenti analizzati, comprese le aree tecniche, in cui l'azoto viene stoccato, trasportato ed utilizzato. I locali in cui l'azoto si trova in tubazioni completamente saldate e senza alcuno stacco per il suo utilizzo sono stati esclusi dalla valutazione del rischio poichè non vi è alcuna sorgente potenziale di emissione. Nonostante le diverse modalità, pressioni e finalità di utilizzo di azoto nei diversi locali analizzati, i risultati ottenuti presentano comunque diverse analogie:

- I locali in cui l'azoto viene utilizzato per inertizzare (pressione di esercizio pari a 10-15 mmbar) non costituiscono, generalmente, luoghi pericolosi fintanto che sia presente una ventilazione del locale superiore a 10 ricambi/h, ventilazione che garantisce una concentrazione di ossigeno nei limiti della sicurezza anche in caso di fuoriuscita accidentale. Nel caso in cui la ventilazione si riduca, o sia del tutto assente, anche una perdita di azoto da flangia a 10-15mmbar è tale da determinare una concentrazione di ossigeno inferiore al 19,5% in pochi minuti. Nel giro di qualche ora la concentrazione raggiunge valori inferiori al 10%.
- Nei locali in cui l'azoto vi sia fuoriuscita di azoto ad 1-1,5 bar per rottura della tubazione, una ventilazione di circa 10 ricambi/h è in grado generalmente di mantenere la concentrazione di ossigeno a valori superiori al 10%, con l'eccezione di locali di volumetria molto bassa (<50 m³). Nel caso in cui la ventilazione si riduca o sia del tutto assente, si può raggiungere in brevissimo tempo una concentrazione di ossigeno inferiore al 10%.
- Nei locali in cui l'azoto viene fornito a pressioni superiori a 1,5 bar, nonostante la presenza di una ventilazione che assicuri 10 ricambi/h, si può raggiungere una concentrazione di ossigeno inferiore al 10% in breve tempo.

A seguito dell'applicazione estensiva della metodologia sopradetta sono state identificate, a titolo non esaustivo, le seguenti misure di riduzione del rischio azoto:

- ❑ nei locali in cui la ventilazione artificiale o naturale presente non è in grado, in caso di perdita di azoto, di evitare il raggiungimento di concentrazioni di ossigeno pericolose, sono stati installati limitatori di portata sulle tubazioni di gas e allarmi sonori e visivi locali in caso di anomalia al sistema di estrazione;
- ❑ per le apparecchiature di processo in cui è facilmente identificabile la sorgente di rilascio, sono state installate aspirazioni localizzate;
- ❑ nei locali in cui non è possibile garantire una sufficiente ventilazione artificiale sono stati installati dei rilevatori di ossigeno in prossimità dei punti di potenziale rilascio di azoto. Tali rilevatori attivano un allarme locale acustico e visivo internamente ed esternamente ai punti di accesso a tali locali;
- ❑ sono stati collettorezzati all'esterno gli eventuali dispositivi di protezione da sovrappressioni che, inizialmente, sfogavano all'interno dei locali;
- ❑ ove necessari, sono stati installati dei manometri sulle apparecchiature contenenti azoto volti ad evidenziare condizioni anomale di sovrappressione interna al fine di evitare l'apertura accidentale, da parte del personale, di boccaporti, passi d'uomo ecc. Tale sistema di prevenzione può, naturalmente, essere automatizzato;
- ❑ sono state predisposte procedure di risposta alle emergenze di stabilimento per includere gli scenari incidentali causati da carenza di ossigeno dovuti a rilasci di azoto, e per prevedere l'utilizzo di dispositivi di protezione individuale per il recupero dell'infortunato (es. autorespiratori) e le azioni che la squadra di emergenza deve adottare in caso di rilascio di azoto (es. intercettazione della valvola sulla linea di distribuzione);
- ❑ sono stati definiti dei programmi di formazione/informazione sui rischi connessi all'utilizzo di azoto per il personale interno, per i lavoratori di ditte esterne e manutentori che devono accedere in locali in cui tale rischio sia presente;
- ❑ è stata predisposta opportuna segnaletica nei punti di accesso ai locali in cui un'eventuale perdita di azoto può determinare condizioni di rischio.

6 CONCLUSIONI

Il lavoro presentato nella memoria in oggetto ha consentito la valutazione dei rischi connessi all'utilizzo dell'azoto, in particolare in ambienti dell'industria chimico-farmaceutica; la metodologia sviluppata consente di analizzare in maniera sistematica e semi-quantitativa i rischi di asfissia, basse temperature e sovrappressioni legati all'utilizzo di azoto.

In particolare, per il rischio di asfissia è stata sviluppato un metodo di calcolo per stimare le emissioni strutturali e puntuali di azoto nei locali lavorativi, e un modello matematico che consente di stimare le emissioni di azoto, sia durante le normali operazioni che in fase di emergenza, al fine di calcolare la conseguente diminuzione della concentrazione di ossigeno in ambiente.

L'applicazione estensiva della metodologia proposta ha consentito di individuare una serie di indicazioni di tipo impiantistico gestionale volte a ridurre il rischio azoto in ambiente lavorativo.

Opportunità di sviluppare ulteriormente tale metodologia sono rappresentate dall'approfondimento della modellizzazione fine della diffusione dell'azoto in prossimità del punto di rilascio, al fine di poter delimitare le aree specifiche in cui è potenzialmente prevedibile la presenza di atmosfere da rischio asfissia.

RIFERIMENTI

- [1] Compressed Gas Association, Inc., Safety Bulletin, Oxygen-Deficient atmospheres, SB-2, 4th edition, 2001.
- [2] U.S.Chemical Safety and Hazard Investigation Board, Hazard of nitrogen asphyxiation safety bulletin, No. 2003-10-B, 2003.
- [3] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, Incident Database, www.csb.gov, Oct-Nov 2002.
- [4] CEI, Norma italiana CEI 31-35, Guida all'applicazione della Norma CEI EN 60079-10 (CEI 31-30) – Classificazione dei luoghi pericolosi, 2004.