

# **DALLA SICUREZZA DEL COMPONENTE ALLA SICUREZZA DELL'IMPIANTO: IL NUOVO APPROCCIO DELLA DIRETTIVA PED. IL CASO DI UN GENERATORE DI VAPORE A RECUPERO**

Vincenzo Annoscia (\*)  
Ornella Benedettini (\*\*)  
Marcello Gargano (\*\*)  
Giovanni Mummolo (\*\*)

(\*) ISPEL – Bari  
Via Piccinni 164 – 70100 Bari

(\*\*) Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale - Politecnico di Bari  
Viale Japigia 182 – 70126 Bari

## **SOMMARIO**

L'attuazione della direttiva PED introduce un approccio fortemente innovativo alla realizzazione delle attrezzature a pressione. La direttiva stabilisce che tali prodotti siano realizzati a seguito di un'analisi dei rischi che prenda in esame, oltre alle condizioni nominali di progetto, anche le condizioni di funzionamento anomale ragionevolmente prevedibili. Ciò comporta che l'analisi svolta dal fabbricante debba estendersi alle interazioni del componente con il resto dell'impianto al fine di individuare i rischi insiti nella funzionalità dell'impianto.

Nel presente lavoro si mostrano le potenzialità di tale approccio nell'individuare condizioni di pericolo che un'analisi del rischio confinata al componente non rivelerebbe. Si mette inoltre in evidenza come la definizione della funzionalità dell'impianto in relazione al componente a pressione consenta di fondare la scelta delle misure di sicurezza sulle reali condizioni di sicurezza dell'impianto. Tale valutazione è proposta con riferimento ad un caso concreto relativo alla progettazione di un generatore di vapore a recupero.

## **1. INTRODUZIONE**

Dal 30/05/2002 non è più consentito immettere sul mercato o mettere in servizio nel territorio dell'Unione europea attrezzature ed insiemi a pressione non conformi alla direttiva 97/23/CE, meglio nota come direttiva PED (Pressure Equipment Directive).

La suddetta direttiva definisce un iter tecnico-procedurale da applicare alla realizzazione di tutti i prodotti che presentano rischi derivanti dalla pressione [ 1 ]. Le attrezzature a pressione devono ora essere progettate, costruite e provate secondo metodologie rispondenti ai Requisiti Essenziali di Sicurezza (RES) riportati nell'allegato I della direttiva stessa. Sussiste inoltre l'obbligo di sottoporre il progetto e la costruzione a procedure di valutazione di conformità specifiche per il livello di rischio dell'attrezzatura, secondo quanto stabilito negli allegati II e III. È previsto che i prodotti che ricadono nell'ambito di applicazione della direttiva siano accompagnati da una attestazione di rispondenza a queste disposizioni nella forma di una dichiarazione di conformità e che sia data evidenza dello stato di conformità mediante l'apposizione della marcatura CE. La PED istituisce l'obbligo per il fabbricante di analizzare i rischi della propria attrezzatura per individuare quelli derivanti dalla pressione e di tenerne conto nella progettazione e nella costruzione; i risultati dell'analisi devono essere riportati nel fascicolo tecnico dell'attrezzatura e sono sottoposti ad esame in sede di valutazione di conformità.

La direttiva richiede che l'analisi dei rischi consideri la sicurezza del prodotto non soltanto in relazione all'uso previsto per esso, ma con riferimento a tutte le condizioni di impiego ragionevolmente prevedibili. A

tal fine risulta necessario tener conto della variabilità delle condizioni di funzionamento a seguito di differenti condizioni di installazione e modalità di esercizio. L'analisi dei rischi deve pertanto prendere in esame, oltre ai rischi intrinseci dell'attrezzatura o dell'insieme elementare, anche quelli relativi alla funzionalità dell'impianto. Definire la funzionalità dell'impianto in relazione al componente sottoposto all'applicazione della PED, ossia individuare gli altri componenti dell'impianto e le condizioni di funzionamento a cui possono essere associati rischi, richiede metodologie adeguate. Si ha necessità di condurre l'analisi mediante un approccio flessibile che sia in grado di rilevare le interazioni fra l'elemento in esame ed il contesto, intendendo quest'ultimo come insieme delle condizioni di installazione e delle modalità di esercizio.

Nel presente lavoro si illustreranno dapprima i principi applicativi dell'approccio PED all'analisi di sicurezza; obiettivi, strumenti e risultati di tale approccio saranno confrontati con quelli relativi alle prassi progettuali in uso in Italia nella situazione pre-PED. In seguito le modalità e le potenzialità di applicazione della direttiva all'analisi di sicurezza saranno proposte con riferimento ad un caso concreto.

## **2. L'APPROCCIO PED ALL'ANALISI DI SICUREZZA**

Il recepimento in Italia della direttiva PED, formalmente avvenuto con l'entrata in vigore del D.Lgs. n.93 del 25/02/2000, si rivela di non semplice attuazione. L'applicazione della direttiva comunitaria invalida molte prassi progettuali e costruttive rispondenti alla legislazione pre-PED e comunemente adottate per rendere sicure le attrezzature a pressione [ 2 ]. La normativa nazionale era infatti rimasta ferma ai principi generali stabiliti dal R.D.n.824 del 12/05/1927 [ 3 ]; le norme tecniche applicative emanate ad integrazione del già citato decreto si erano limitate all'analisi dei soli fattori di rischio previsti dal decreto stesso, senza occuparsi della necessità di adeguare i requisiti di sicurezza all'evoluzione tecnologica. Il riferimento a queste norme vede l'analisi di sicurezza svolta dal fabbricante unicamente in relazione alle condizioni di funzionamento dell'elemento in esame e impone all'utilizzatore, responsabile della scelta di idonei dispositivi di regolazione e di controllo, la definizione delle relazioni fra modalità di impiego e condizioni di funzionamento. La direttiva comunitaria richiede che l'analisi del fabbricante consideri esplicitamente le differenti fasi di impiego dell'attrezzatura e che si occupi della scelta dei dispositivi di protezione, ivi comprese le istruzioni operative. L'analisi dei rischi non deve limitarsi all'esame delle possibili condizioni di pericolo ma deve estendersi da un lato all'individuazione delle cause e dall'altro alla determinazione degli effetti, al fine di definire le misure preventive e protettive più efficaci in relazione al contesto operativo. Si ha dunque necessità di adottare tecniche e strumenti in grado di differenziare i possibili contesti operativi.

Le metodologie classiche di progettazione non sembrano potersi adattare all'estensione ed alla specificità richieste all'analisi. Esse sono basate su di un complesso di norme tecniche ( Raccolte ANCC ) che stabiliscono i requisiti di sicurezza in funzione dei valori di pressione e di temperatura previsti durante il regolare esercizio, caratterizzando in tal modo le condizioni di funzionamento esclusivamente in relazione a questi due parametri. L'elevato numero di variabili associate alle condizioni di impiego introduce la complessità delle interazioni fra di esse; a ciò si aggiunge l'impossibilità di definire variabili ed interazioni se non con riferimento al prodotto ed alle condizioni di installazione.

Da queste limitazioni deriva la discrezionalità conferita dalla PED al fabbricante nell'identificazione dei pericoli e nella valutazione dei rischi. Alla discrezionalità dell'analisi fa seguito l'autocertificazione del fabbricante sullo stato di conformità del prodotto che gli attribuisce "in toto" le responsabilità sulla sicurezza del prodotto. Le attrezzature a pressione devono ora essere di per sé sicure. Le garanzie di sicurezza fornite dal fabbricante non possono pertanto limitarsi alle condizioni nominali di progetto; esse devono coprire tutte le modalità di funzionamento che possono manifestarsi durante l'esercizio, come anche nelle fasi di avviamento e di fermata. La sicurezza ottenibile mediante una progettazione funzionale adeguata a questi requisiti ha necessità di completarsi con le funzioni di sicurezza associate alla strumentazione ed alle prassi operative. I dispositivi di sicurezza, di regolazione e di controllo diventano parte integrante dell'attrezzatura; il fabbricante ha la responsabilità assegnarne la dotazione in relazione alle condizioni di installazione. L'utilizzatore deve ricevere istruzioni specifiche per il montaggio, la messa in servizio, l'esercizio e la manutenzione in maniera tale da essere informato dei limiti per l'impiego dell'attrezzatura in condizioni di sicurezza.

L'obbligatorietà di queste azioni per il fabbricante comporta che egli debba rispondere della progettazione, della costruzione e delle condizioni stabilite per l'esercizio dell'attrezzatura. La legislazione precedente aveva invece suddiviso le regolamentazioni di progettazione, costruzione ed esercizio a soggetti diversi, quali il progettista abilitato, il fabbricante ed il gestore dell'impianto . Per il fabbricante sussisteva

unicamente l'obbligo di attestare di aver seguito nelle modalità di calcolo, nella scelta dei materiali e nella progettazione delle saldature le indicazioni delle norme tecniche ANCC [ 4 ]. La PED lascia al fabbricante molta autonomia nelle scelte progettuali e costruttive, ma lo costringe a certificare in maniera dettagliata le proprie decisioni tecniche [ 5 ]. All'utilizzatore restano le responsabilità stabilite dalla legislazione in materia di sicurezza e salute dei luoghi di lavoro [ 6 ].

### 3. ANALISI DEL RISCHIO DI UN GENERATORE DI VAPORE A RECUPERO

Di seguito è sviluppata l'analisi del rischio di un generatore di vapore a recupero di grande potenzialità progettato e costruito su specifiche dedicate per una centrale termoelettrica.

#### 3.1 Il generatore di vapore

La centrale termoelettrica è costituita da due unità identiche, installate in parallelo e funzionanti in maniera indipendente. Ciascuna unità, a ciclo combinato, è dotata di un generatore di vapore a recupero ( GVR ) che alimenta una turbina a vapore recuperando l'entalpia dei fumi di scarico del gruppo di generazione a gas.

I GVR in oggetto rientrano nell'ambito di applicazione della direttiva PED come attrezzature a pressione di categoria IV ( allegato II D.Lgs. 93/2000 – tab.5 ). Essi sono del tipo a tre livelli di pressione; pertanto, se considerati come attrezzature a pressione, sono costituiti da tre caldaie che realizzano gli stadi di alta, media e bassa pressione nel circuito acqua – vapore. Il singolo GVR è a disposizione orizzontale con banchi di scambio termico a circolazione naturale di tipo controcorrente. Ciascuno stadio, secondo uno schema di impianto tipico dei generatori di vapore a recupero, è composto da: un economizzatore che preriscalda l'acqua di alimento sfruttando i fumi più freddi, un evaporatore, un corpo cilindrico atto a portare il vapore in condizioni di saturazione, una sezione di surriscaldamento del vapore. L'acqua di alimento del GVR è fornita dal condensatore ed è introdotta nella sezione di bassa pressione; il corpo cilindrico di bassa pressione provvede ad alimentare i circuiti di media e di alta pressione mediante una pompa centrifuga bistadio. Il vapore prodotto dai tre stadi del GVR è convogliato nella turbina a vapore all'ingresso dei corrispondenti stadi di espansione.

Il regime di funzionamento del GVR deve poter variare in relazione all'assorbimento di energia elettrica della rete a valle. L'assenza di sistemi di intercettazione dei fumi fra collettore di scarico del turbogas e GVR comporta che la produzione di vapore possa essere variata unicamente controllando l'alimentazione di combustibile del turbogas. Al fine di ottenere una regolazione continua e rapida, il dispositivo che regola la portata di combustibile è sottoposto a comando diretto da parte del segnale di pressione proveniente dai corpi cilindrici del GVR. L'adeguamento dell'alimentazione di acqua al regime di carico del turbogruppo è realizzata attraverso livellostati che comandano le valvole di alimentazione dei corpi cilindrici.

Pertanto, turbina a gas, GVR e turbina a vapore sono fra loro strettamente interconnessi durante il funzionamento. Ne consegue l'interesse di considerare gli effetti delle possibili variazioni dei parametri di funzionamento di uno di essi sugli altri due.

Tale valutazione è prevista in un'analisi del rischio del GVR realizzata secondo la direttiva PED.

Di seguito se ne mostrerà l'efficacia nell'individuare eventi iniziali che un'analisi del rischio "locale", ossia confinata al componente a pressione, non rivelerebbe. Si proporrà l'applicazione di una metodologia del tipo "event tree analysis" [ 7 ] al fine di determinare le reali condizioni di sicurezza dell'impianto, oltre che di valutare la necessità/efficacia di funzioni di sicurezza aggiuntive.

#### 3.2 Analisi del rischio del generatore di vapore in caso di distacco improvviso dell'impianto dalla rete elettrica

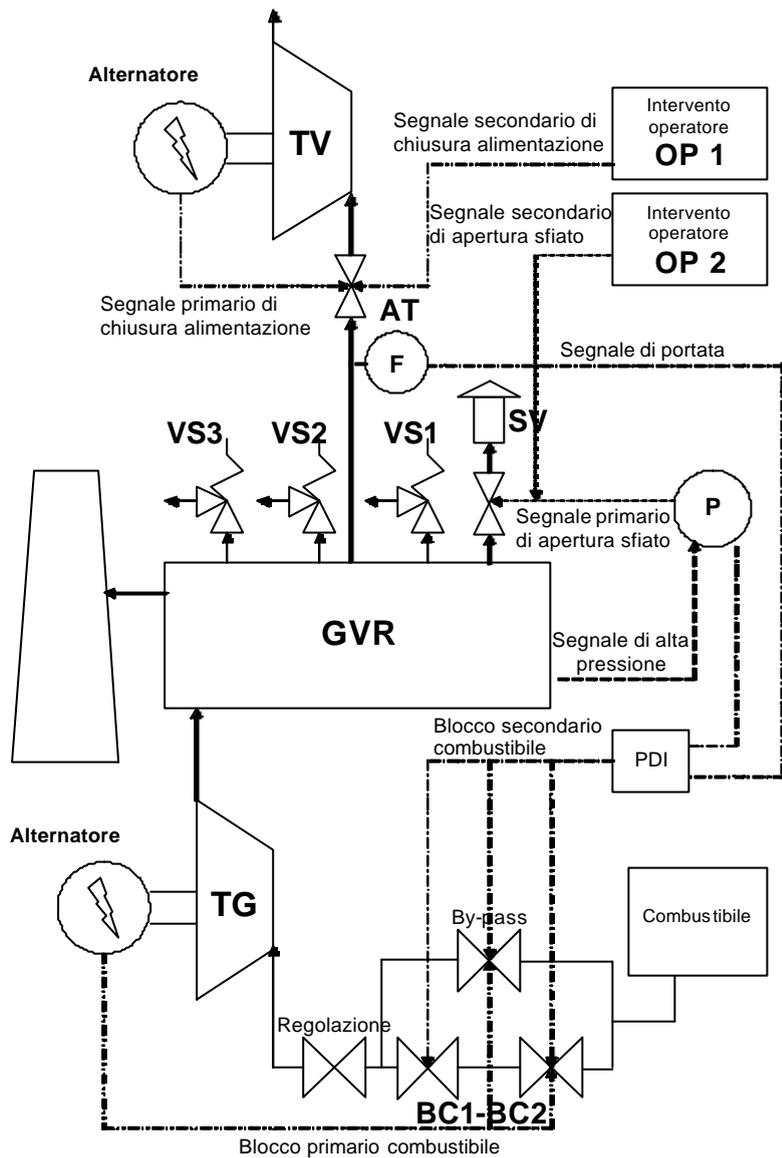


Figura 1. Schema funzionale dell'impianto

statoriche del primo stadio del compressore può essere impiegata per ridurre il lavoro di compressione durante il funzionamento nelle condizioni di "idle". La valvola che regola l'immissione di vapore in turbina ( AT ) è predisposta per chiudersi automaticamente nell'eventualità di distacco ed interviene in maniera indipendente dal sistema di blocco del combustibile. Nel caso in cui il sistema automatico non funzioni, la chiusura è affidata al comando manuale di un operatore ( OP1 ). Se le alimentazioni della turbina a gas e della turbina a vapore si interrompono entrambe, il sistema raggiunge una condizione di sicurezza; anche se la produzione di vapore continuerà per l'inerzia termica del GVR, l'aumento di pressione nei corpi cilindrici sarà contenuto e comunque controllato a mezzo di un sistema di sfiato.

Alla condizione di funzionamento del blocco sul combustibile e di mancata chiusura della valvola di mandata del vapore sono associate possibili condizioni di overspeed della turbina a vapore: la turbina è alimentata con il vapore prodotto per inerzia termica dal generatore pur senza assorbire carico.

Nell'eventualità che il blocco dell'alimentazione del combustibile non intervenga, il turbogas continua a funzionare ed il GVR continua a produrre vapore. L'assenza di carico fa aumentare la velocità di rotazione della turbina a gas verso condizioni di overspeed. Se in concomitanza fallisce la chiusura dell'alimentazione della turbina a vapore, anche quest'ultima tende a condizioni di overspeed. La turbina a vapore è portata a rottura molto più rapidamente che in caso di blocco del turbogas poiché la produzione di vapore continua ad essere alimentata dalla produzione di fumi.

Si è presa in esame l'eventualità di un distacco improvviso dell'impianto dalla rete elettrica. Questa condizione può presentarsi a seguito di interruzione della domanda di energia elettrica o essere attivata come funzione di sicurezza per la protezione del turbogruppo. La cessazione improvvisa dell'assorbimento da parte della turbina a vapore può portare il GVR dell'impianto a condizioni di esercizio fuori norma.

Nel seguito si farà riferimento allo schema funzionale riportato in figura 1. In figura 2 è riportato l'albero degli eventi che seguono l'evento iniziatore e che possono originarsi per il corretto/non corretto intervento delle funzioni di sicurezza.

Sull'alimentazione di combustibile del turbogas è presente un sistema di blocco costituito da due valvole in serie, predisposto per l'immediato intervento in caso di distacco dalla rete ( BC1 ). È previsto che il segnale di blocco chiuda il collettore di alimentazione primaria ed apra nel contempo l'alimentazione di "idle" sul circuito di by-pass. La condizione di "idle" vede la portata di combustibile ridotta al 2% del valore nominale e la turbina a gas in rotazione ad un numero di giri minimo. La possibilità di variare la portata di aria aspirata mediante l'orientazione delle pale

POSSIBILI CONDIZIONI FINALI DELL' IMPIANTO	FUNZIONI DI SICUREZZA							EVENTO INIZIATORE
	VS1 VS2-VS3	OP2	SV	BC2	OP1	AT	BC1	Distacco improvviso dalla rete elettrica
Spegnimento impianto in sicurezza								
Spegnimento impianto in sicurezza								
Possibili danni alla turbina a vapore								
Spegnimento impianto in sicurezza								
Danni al turbogas								
Danni al turbogas								
Danni al turbogas								
Danni al turbogas e al GVR								
Spegnimento impianto in sicurezza								
Danni al turbogas								
Danni al turbogas								
Danni al turbogas								
Danni al turbogas e al GVR								
Danni al turbogas e alla turbina a vapore								

Figura 2. Albero degli eventi per l'impianto

Se invece l'alimentazione della turbina a vapore è interrotta, il vapore prodotto dal GVR farà aumentare la pressione nei corpi cilindrici. Il segnale di pressione, che in condizioni di normale funzionamento agisce sulla valvola di regolazione del combustibile, può funzionare come blocco secondario ( BC2 ), preservando il turbogas dalla rottura per overspeed. In caso di chiusura della valvola di alimentazione della turbina a vapore, il segnale di pressione tende a regolare il turbogas, ma l'annullamento della portata misurato all'ingresso alla turbina a vapore fa scattare il blocco agendo sull'azione derivativa della centralina di comando.

In caso di mancato intervento del blocco secondario, l'aumento di pressione nei corpi cilindrici farà intervenire il sistema di sfiato del vapore ( SV ). Il sistema è a comando automatico, con possibilità di apertura manuale da parte di un operatore ( OP2 ). Sono presenti tre valvole di sicurezza, una all'uscita del surriscaldatore ( VS1 ) e due sul corpo cilindrico ( VS2 e VS3 ), per l'eventualità che gli sfiati non si aprano; le pressioni di taratura sono tali da dare priorità di intervento alla via di smaltimento del vapore surriscaldato. Nel caso in cui il vapore non riesca comunque ad essere smaltito, il GVR sarà danneggiato.

### 3.3 Risultati dell'analisi

L'analisi condotta mette in evidenza l'impossibilità di separare l'analisi di sicurezza del componente a pressione da quella del resto dell'impianto. Si nota infatti che l'evento considerato, pur essendo esterno al generatore di vapore, può comprometterne la sicurezza. Si può inoltre osservare che i rischi associati a tale evento per la turbina a gas e per la turbina a vapore dipendono in ampia misura dalle interazioni di funzionamento fra esse ed il GVR.

L'estensione dell'analisi all'impianto consente inoltre di valutare la necessità/efficacia di funzioni di sicurezza aggiuntive nonché di associare funzioni di sicurezza agli altri componenti ed alle modalità di funzionamento dell'impianto.

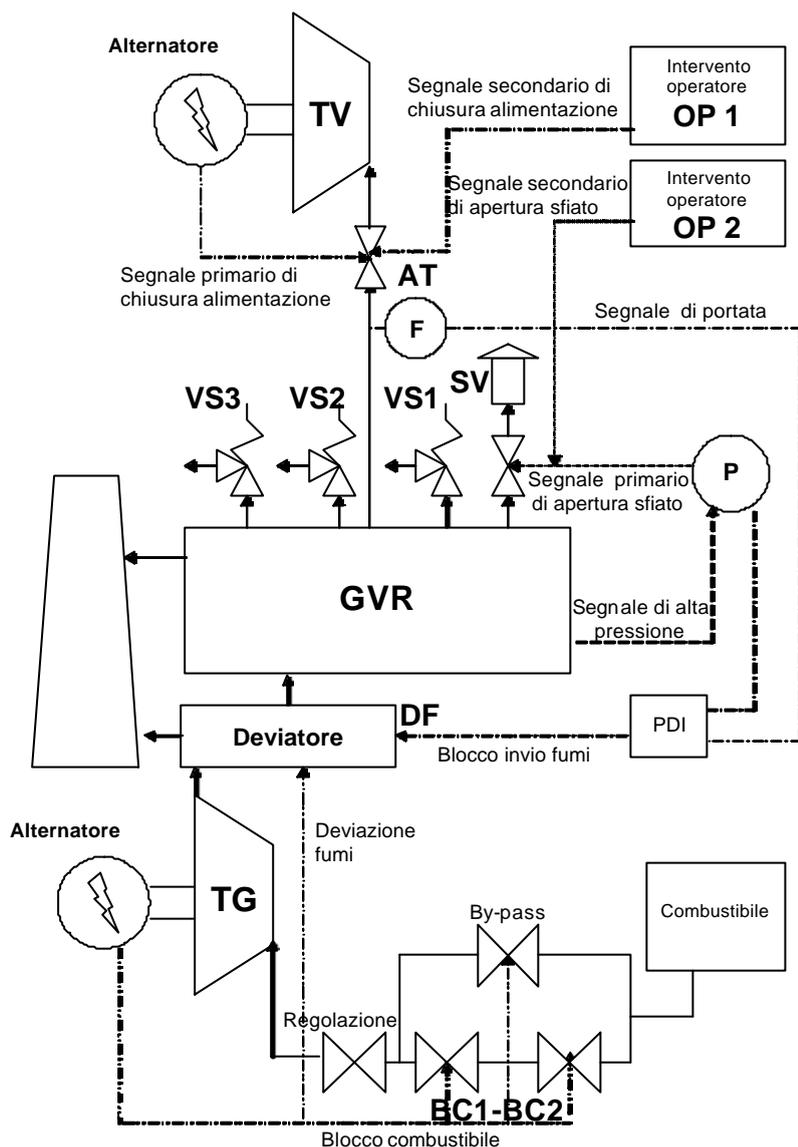


Figura 3. Schema funzionale dell'impianto con deviatore

Lo studio dei possibili effetti dell'evento incidentale preso in esame mostra che, soltanto se il turbogas interrompe l'alimentazione del GVR, l'impianto può spegnersi in sicurezza e che, al contrario, le condizioni finali in cui si presentano i danni maggiori, ivi compresi danni al GVR, si verificano se il turbogas è mantenuto in funzione. Appare dunque opportuno, qualora si stiano valutando le possibilità di aumentare il livello di sicurezza dell'impianto, considerare le possibilità di aumentare l'affidabilità della funzione di sicurezza associata al turbogas. Tale risultato può essere sicuramente ottenuto aggiungendo una valvola per il blocco dell'alimentazione di combustibile in ridondanza con quelle già esistenti. Ne risulterebbe in sostanza ridotta la probabilità di fallimento dell'attivazione del blocco. La protezione del GVR può in alternativa ottenersi mediante un deviatore di fumi (DF) che avrebbe la possibilità di far arrestare la produzione di vapore in caso di mancato blocco del turbogas. Il nuovo schema di impianto ed il relativo albero degli eventi sono riportati rispettivamente in figura 3 ed in figura 4. Il tipo di intervento associato al deviatore

si pone dunque in serie a quello del blocco del combustibile e sarebbe attivato contemporaneamente ad esso. La presenza del deviatore, permettendo di escludere il generatore dal percorso dei fumi, consentirebbe inoltre di evitare l'arresto del turbogas in caso di guasti al GVR o alla turbina a vapore ed in generale conferirebbe una maggiore flessibilità di regolazione dell'impianto. Il deviatore è in grado di proteggere il GVR ma non di evitare che la turbina a gas sia portata a rottura per overspeed. È quindi evidente che il deviatore non può essere introdotto come funzione di sicurezza sostitutiva dell'azione diretta sul turbogas poiché quest'ultima è in grado di proteggere l'intero impianto. L'introduzione del deviatore risponde invece all'opportunità di differenziare il tipo di intervento delle misure di sicurezza a protezione del GVR.

POSSIBILI CONDIZIONI FINALI DELL' IMPIANTO	FUNZIONI DI SICUREZZA								EVENTO INIZIATORE
	VS1 VS2-VS3	OP2	SV	BC2	OP1	AT	DF	BC1	Distacco improvviso dalla rete elettrica
Spegnimento impianto in sicurezza									
Spegnimento impianto in sicurezza									
Possibili danni alla turbina a vapore									
Danni al turbogas									
Danni al turbogas									
Danni al turbogas e possibili danni alla turbina a vapore									
Spegnimento impianto in sicurezza									
Danni al turbogas									
Danni al turbogas									
Danni al turbogas									
Danni al turbogas e al GVR									
Spegnimento impianto in sicurezza									
Danni al turbogas									
Danni al turbogas									
Danni al turbogas									
Danni al turbogas e al GVR									
Danni al turbogas e alla turbina a vapore									

Figura 4. Albero degli eventi per l'impianto con deviatore

#### 4. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti mostrano come un approccio globale all'analisi del rischio si rivela decisamente più affidabile in quanto in grado di evidenziare condizioni di pericolo ed eventi iniziatori di sequenze incidentali che una analisi del rischio locale potrebbe trascurare. Tale risultato deriva dall'aver considerato un maggior numero di fattori di rischio e soprattutto dall'aver individuato condizioni di pericolo costituite dall'interazione fra più fattori.

Le interazioni fra il GVR ed i componenti a monte e a valle nell'impianto sono apparse di fatto non trascurabili in un'analisi dei rischi riferita anche alla funzionalità dell'impianto. In quest'ottica emerge con chiarezza che l'accettabilità del rischio non può essere confinata ad aspetti progettuali del componente avulsi dal contesto operativo.

L'estensione dell'analisi all'intero impianto ha consentito di associare funzioni di sicurezza del GVR anche a componenti esterni ad esso. In particolare, la funzione di sicurezza associata al deviatore è emersa grazie all'approccio PED all'analisi del rischio poiché la sua azione di sicurezza primaria è evidente solo nel caso in cui l'analisi dell'insieme GVR consideri anche le interazioni con i sistemi ad esso collegati. L'approccio della direttiva PED si presta in generale a rendere più efficace la scelta delle misure di sicurezza, anche qualora si tratti di introdurre azioni multiple in ridondanza con quelle già esistenti per una maggiore sicurezza dell'impianto.

L'attuazione della direttiva PED si inserisce quindi nel quadro generale della sicurezza degli impianti industriali in quanto l'estensione conferita all'analisi del rischio per gli elementi a pressione è in grado di fornire importanti indicazioni per la sicurezza degli impianti in cui tali componenti sono installati.

## **Ringraziamenti**

Si ringrazia l'ingegner Alessandro Saponaro della Ansaldo Caldaie S.p.A. per le proficue discussioni ed il contributo di idee.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [ 1 ] D.Lgs. n.93 del 25 Febbraio 2000 *Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione.*
- [ 2 ] D.M. dell' 1 Dicembre 1975 *Norme di sicurezza per apparecchi contenenti liquidi caldi sotto pressione.*
- [ 3 ] R.D. 12 Maggio 1927, n.824 *Approvazione del regolamento per l'esecuzione del Regio Decreto-Legge 9 Luglio 1926, n.1331 che costituisce l'associazione nazionale per il controllo sulla combustione.*
- [ 4 ] D.M. del 21 Novembre 1972 *Norme per la costruzione degli apparecchi a pressione.*
- [ 5 ] Circolare n.13/2001 *Direttiva 97/23/CE: linee guide, precisazioni e chiarimenti.*
- [ 6 ] V.Annoscia, R.Balestrieri, V.Rizzi, *Direttiva PED e impianti a rischio di incidente rilevante*, Convegno Nazionale "Sicurezza nei Sistemi Complessi", Bari 18-19 Ottobre 2001.
- [ 7 ] Center for Chemical Process Safety, *Hazard Evaluation Procedures*, American Institute of Chemical Engineering, New York, 1992.