



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE

**TECNOLOGIE INNOVATIVE, EFFICIENZA ENERGETICA E
SICUREZZA SUL LAVORO NELLA PRODUZIONE DI VAPORE A SCOPI
INDUSTRIALI**

Relazione discussa in sede di esame finale

dal candidato Leonardo Cuccaro Matricola 462078

Docente tutore: Prof. Marco Marengo

A.A. 2022/2023

A Rossella,

che ha sempre creduto in me e che mi ha supportato e sopportato in tutti questi anni.

1 Sommario

Sommario	6
Abstract.....	7
Ringraziamenti.....	8
2 Introduzione	9
2.1 Normativa di riferimento	11
2.2 Approccio progettuale dei generatori di vapore in Asset Integrity Management; approccio RAMSE Affidabilità (Reliability) Disponibilità (Availability) Manutenibilità (Maintenability) Sicurezza (Safety) Ambiente (Enviroment).....	15
3 Generalità sui generatori di vapore.....	19
3.1 Gli elementi caratteristici del generatore di vapore.....	20
3.2 Classificazione dei generatori di vapore a tubi di fumo e a tubi d'acqua	21
3.3 Gli apparati accessori di un generatore di vapore e degli impianti termici	24
3.4 Il recupero del vapore.....	25
3.5 La regolazione automatica in un impianto di generazione vapore.....	28
3.5.1 Modellazione matematica Ingresso Stato Uscita di un sistema dinamico termico semplificato	30
3.5.2 La portata dell'acqua di alimento e il livello nel corpo cilindrico	31
3.5.3 Temperatura del vapore surriscaldato nei surriscaldatori a convezione.....	32
3.6 Il trattamento delle acque di alimento dei generatori di vapore	33
3.7 Problematiche legate a fenomeni di natura corrosiva	36
3.8 Bilancio termico di un Generatore di Vapore.....	39
4 Efficienza energetica, salvaguardia dell'ambiente e benessere lavorativo: tre sistemi di gestione ISO 50001, ISO 14001, ISO 45001 in sinergia	43
4.1 Brevi cenni descrittivi degli standard ISO50001 ISO14001 ISO45001	43
4.2 Descrizione caso pratico di miglioramento efficienza energetica di una realtà industriale nel settore energia.....	44
5 Esempi di gestione e conduzione energeticamente efficiente di un generatore di vapore, della rete di distribuzione e ottimizzazione degli usi finali	53
5.1 Gestione eccesso d'aria ottimale in camera di combustione	53

5.2	Pulizia delle superfici di scambio termico del generatore di vapore.....	55
5.3	Installazione di dispositivi per il recupero di calore	56
5.4	Installazione di un sistema automatico di spurgo acqua di caldaia	58
5.5	Recupero di energia dagli spurghi.....	59
5.6	Ottimizzazione del trattamento chimico/fisico dell'acqua	59
5.7	Gestione delle pareti refrattarie del generatore di vapore	60
5.8	Riduzione del numero dei bruciatori in servizio	61
5.9	Gestione del combustibile.....	61
5.10	Le prestazioni del degasatore termofisico.....	62
5.11	Gestione dei circuiti di distribuzione vapore alle utenze.....	64
5.12	Individuazione e riparazione rapida delle fughe di vapore.....	65
5.13	Riduzione degli sfiati di vapore	66
5.14	Gli usi finali ed il recupero della condensa	67
6	Esempi di innovazione tecnologica nella produzione di vapore	68
6.1	Applicazione del modello matematico di controllo automatico predittivo: ottimizzazione dei parametri operativi e miglioramento delle performance (Politecnico di Milano e Cannon Bono Energia).....	68
6.2	Utilizzo di materiali alternativi all'acciaio per la costruzione di parte finale circuito fumi (Brevetto Nooter Eriksen) [40]	71
7	Sicurezza sul lavoro: approccio prevenzionistico della normativa di legge.....	75
7.1	Imparare dagli errori: "lesson learned" e breve rassegna di incidenti storicamente rilevanti dei generatori di vapore.....	80
7.2	Pericoli e rischi nella conduzione di un generatore di vapore	83
7.3	Esplosioni in caldaia.....	84
7.4	Esplosione di un generatore di vapore da 180 t/h Lesson Learned trattate dal Prof. Carlo Ortolani del Politecnico di Milano nel Libro "Casi di combustioni accidentali"	
	86	
8	Conclusioni e sviluppi futuri.....	89
9	Tabellario	90
10	Bibliografia	96

11	Elenco delle figure	99
12	Elenco delle tabelle	103

Sommario

Produrre vapor d'acqua per scopi industriali è parte integrante della sfida che la transizione energetica rappresenta per l'umanità intera in conformità all'obiettivo n.7 dell'Agenda 2030 (assicurare l'accesso universale a servizi energetici economici, affidabili, sostenibili e moderni). Il generatore di vapore, infatti, appartiene al sistema integrato U.M.A. (Uomo, Macchina, Ambiente), e l'obiettivo da raggiungere consiste nel generare vapore in economia circolare.

A tal fine, il generatore di vapore dovrà raggiungere il massimo beneficio termodinamico possibile grazie all'ausilio di un approccio progettistico basato su "Asset Integrity" e progettazione "RAMSE", Affidabilità (Reliability) Disponibilità (Availability) Manutenibilità (Maintenability) Sicurezza (Safety) Ambiente (Enviroment).

Sarà altresì indispensabile l'efficace applicazione dei sistemi di gestione integrata di Efficienza Energetica, Salvaguardia dell'ambiente e Salute e Sicurezza sul Lavoro, configurate negli standard internazionali ISO50001, ISO14001 e ISO45001.

Questo lavoro si prefigge di illustrare sinteticamente alcune azioni ed interventi sia di carattere tecnologico-innovativo volte allo sviluppo del processo Industria 4.0, sia di carattere comportamentale/gestionale di conduzione degli impianti termici; tali operazioni dovranno essere fondate su un approccio di prevenzione che non consideri più il rischio come probabilità di accadimento di un evento incidentale, ma come un effetto dell'incertezza (assenza di informazione).

Abstract

Producing steam for industrial purposes in compliance with objective n.7 Agenda 2030 (ensure universal access to reliable, reliable, sustainable and modern energy services) is a challenge for all humanity to bequeath to future generations a natural heritage that allows them a state of peaceful coexistence. The steam generator must therefore be considered as the "second element" of the U.M.A. integrated system. (Man, Machine, Environment) in which the sole objective must be to generate steam in a circular economy.

The steam generator will therefore have to achieve the maximum thermodynamic benefit possible thanks to the help of a design approach based on "Asset Integrity" and "RAMSE" design. Reliability Availability Maintainability Safety Environment).

The active adoption of a management system integrated into the three components of Energy Efficiency, Environmental Protection and Occupational Health and Safety, configured respectively with the international standards ISO50001, ISO14001 and ISO45001, will also be of indispensable support.

This work will summarize some actions and interventions both of an innovative technological nature, aimed at the development of Industry 4.0, and of a behavioural/managerial nature for the management of heating systems based on a prevention approach: the risk is no longer seen as the probability of an accidental event occurring but as an effect of uncertainty (absence of information).

Ringraziamenti

Ringrazio tutti coloro che mi hanno dato l'opportunità di effettuare approfondimenti di studi universitari e che mi hanno fatto crescere come persona, come coniuge, come papà e come lavoratore di una azienda di cui sono fiero di fare parte.

Ringrazio Rossella, mia moglie, che mi ha sostenuto in questo percorso in modo esemplare e con una pazienza unica al mondo.

Ringrazio Federico e Riccardo, i miei due figli, che hanno sempre dato il loro contributo al papà e Jonathan, mio nipote, che ha contribuito al lavoro dello zio anche se distante mille chilometri.

Un ringraziamento particolare va a tutti i professori con cui mi sono interfacciato.

Un ricordo speciale al compianto Prof. Donatello Annaratone del Politecnico di Milano per la passione che ha avuto per la termotecnica; lo è per me, ma per tanti progettisti di generatori di vapore, rappresenta una luce e una grande pietra miliare.

Infine, ringrazio tutte le persone con cui ho lavorato, in particolare quelle incontrate in centrale termoelettrica perché trattasi del luogo di lavoro in cui è nata la passione per i generatori di vapore: Paolo Amodio, Mimmo Caragnano, Salvatore Tedesco, Pasquale Anelli, Franco Galante, Daniele Libardi, Giovanni Laneve, Adriano Decataldo, Giuseppe Gioventù perché sono stati i miei mentori.

2 Introduzione

Prima di entrare nel merito della trattazione, è utile fare un breve excursus sul vapore d'acqua (d'ora in avanti definito "vapore") e sui suoi molteplici utilizzi e benefici.

Il vapore e le sue modalità di utilizzo hanno compiuto un percorso in continuo sviluppo a partire dalla rivoluzione industriale. Le abilità inventive di Thomas Newcomen (Dartmouth, 1664 – Londra, 1729) e James Watt (Greenock, 1736 - Heathfield Hall, 1819) hanno dato vita alle prime locomotive, all'industria estrattiva del carbone e all'industria tessile. Esso oggi è parte integrante della tecnologia moderna ed è utilizzato, grazie alla sua versatilità, nelle trasformazioni da energia termica ad energia meccanica, per esempio per produrre energia elettrica, ma anche per utilizzi termici diretti: senza il vapore le industrie alimentari, chimiche, conserviera, farmaceutiche, petrolchimiche, di riscaldamento, metallurgiche, cartarie, tintoria, di trasporto, etc., non potrebbero esistere o, comunque, ottenere i servizi e le funzioni che le caratterizzano.

A livello industriale e nel settore energia, si utilizzano fondamentalmente sia "vapore saturo secco" (titolo unitario con frazione liquida nulla), sia "vapore surriscaldato" a seconda del processo oggetto di interesse.

La trasformazione dell'energia termica, il suo trasporto e il suo utilizzo avviene attraverso tre macro-componenti fondamentali, tra di loro in serie, che sono nell'ordine:

- Generatore di Vapore (detto anche "Generatore di Calore"), che consiste in un sistema di scambio di calore in cui l'energia chimica del combustibile si converte in energia termica tramite una reazione chimica di ossidazione. Questa energia viene ceduta ad un fluido di servizio (nel nostro caso acqua demineralizzata sotto forma di vapore) il quale avrà la funzione di "fluido termovettore".
- Linee di Distribuzione, le quali permettono il trasporto fisico del vapore dal generatore alle utenze e ritorno.
- Apparecchi utilizzatori, in cui il fluido termovettore trasferisce il calore ad un fluido di processo o all'ambiente.

I rendimenti calcolati nel processo di conversione dell'energia chimica del combustibile in energia termica del vapore hanno valori relativamente modesti. Tra le varie perdite che saranno oggetto di approfondimento nel capitolo dedicato ai bilanci energetici, la difficoltà di contenere le dissipazioni termiche lungo le linee di distribuzione è la più rilevante. Tale limite non favorisce le strategie di progetto di centralizzazioni in importanti unità produttive, che invece vengono realizzate per la produzione e trasporto di energia elettrica; ciò induce a prediligere la produzione di vapore sul luogo o nei pressi dell'utilizzatore finale (frazionamento di impianti di minore producibilità e potenza termica).

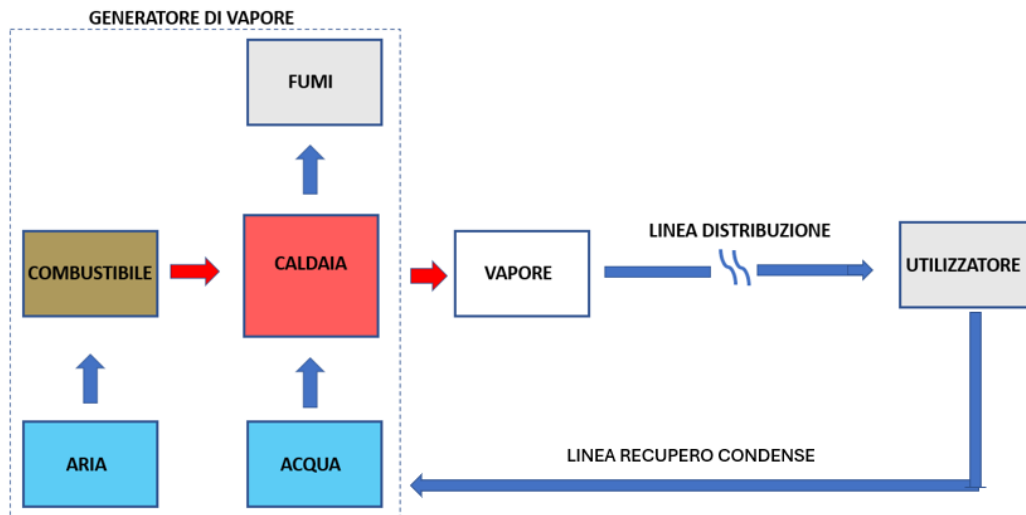


Figura 1 – Rappresentazione schematica di un processo di generazione di vapore e utilizzatore finale

Dal punto di vista fisico/fluidodinamico, quasi tutti i fluidi presenti in natura possono essere usati come “fluido termovettore”. La scelta ingegneristica però dovrà necessariamente preferire un fluido che risponda a determinate caratteristiche:

- Economico: dovrà essere un “bene economicamente strategico” che risponda, cioè, a tutti i requisiti di grande disponibilità e bassi costi e avere, dunque, un utilizzo su scala industriale. Sono da valutare anche i costi di esercizio e di utilizzo legati alla manutenzione e conduzione;
- Non pericoloso: non dovrà essere infiammabile, né tossico, né radioattivo, ed in ogni caso non dovrà essere fonte di rischio diretto ed indiretto;
- A basso impatto sia fisico (non rumoroso, perdite di carico ridotte per attriti) sia chimico (non aggressivo per problemi di infragilimento e/o corrosione);
- Alto valore del coefficiente di scambio termico tale da consentire una riduzione della superficie di scambio termico;
- Elevato calore di vaporizzazione;
- Temperatura costante nel cambiamento di fase, cioè, essere una sostanza pura;
- Elevata capacità di trasporto del calore tale da consentire al fluido termovettore di massimizzare la quantità di energia trasportata per unità di massa. Il vantaggio consentirà di lavorare con portate inferiori a pari potenza termica trasportata.

Il vapore saturo secco ed il vapore surriscaldato rientrano nella casistica sopra descritta, pertanto si configurano come buoni fluidi termovettori. Nelle tabelle riportate nel capitolo 8 sono elencate le principali caratteristiche fisiche termodinamiche dell’acqua. Per quanto concerne la pericolosità del vapore, essa è legata esclusivamente alla pressione a cui viene prodotto, e di conseguenza alla temperatura.

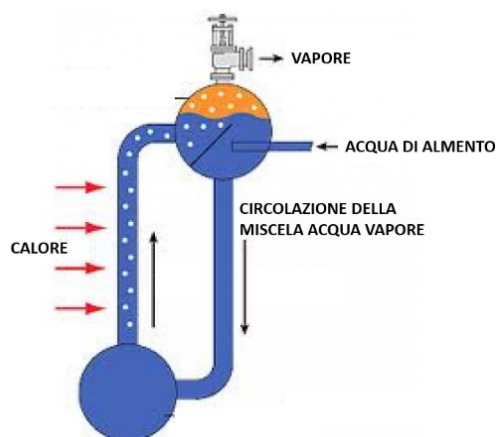


Figura 2 – Schema semplificato di un generatore di vapore

2.1 Normativa di riferimento

Parlare del quadro normativo italiano relativo ai generatori di vapore è un arduo compito poiché sovente le normative europee (direttive di prodotto) si intrecciano con norme di legge dello Stato italiano che si sono stratificate nel tempo, ma soprattutto con norme tecniche e prescrizioni INAIL (Istituto nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro), attraverso il suo dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti ed insediamenti antropici.

Esiste pertanto una esigenza collettiva anche a livello internazionale: progettare ed esercire i generatori di vapore, affinché siano rispettati i requisiti essenziali di sicurezza previsti dalla norma tecnica, la quale richiede che le apparecchiature siano sottoposte a verifiche periodiche per accertare: la conformità alle modalità di installazione previste dal fabbricante nelle istruzioni d'uso; lo stato di manutenzione e conservazione; il mantenimento delle condizioni di sicurezza previste in origine dal fabbricante e specifiche dell'attrezzatura di lavoro; l'efficienza dei dispositivi di sicurezza e di controllo.

Il settore dei generatori di vapore è regolamentato in tutti paesi del mondo fin dai primi decenni del '900, per un motivo fondamentale: la gestione della energia di pressione immagazzinata in un corpo in pressione.



Figura 3 - Energia = Pressione x Volume

Tutti gli sforzi del legislatore e dei normatori sono stati da sempre indirizzati a gestire questa aliquota di energia che potenzialmente è fonte di rischio per l'incolumità di persone e ambiente.

Una serie di aspetti termo-fisici e/o termochimici che potrebbero incombere, infatti, sono:

- ✓ Energia dell'onda di pressione dovuta alla fase vapore in caso di esplosione di un generatore di vapore;
- ✓ Vaporizzazione della fase liquida provocata dalla differenza di entalpia di vaporizzazione alla pressione di esercizio rispetto a quella alla pressione atmosferica, effetti tanto più gravi quanto maggiore è l'energia immagazzinata nel corpo in pressione;
- ✓ Aspetti relativi alla sicurezza in camera di combustione (esplosione – infortuni in genere);
- ✓ Aspetti ambientali (inquinamento atmosferico);
- ✓ Aspetti energetici (ottimizzazione del rendimento).

Per meglio comprendere il quadro normativo è consigliabile individuare due periodi storici: EX ANTE PED e EX POST PED, dove per PED si intende la direttiva europea (Pressure Equipment Directive). Quest'ultima ha stabilito i requisiti essenziali di sicurezza e specifici (RES), che hanno appunto lo scopo di rendere affini, nel territorio dell'Unione Europea i "principi tecnici" di analisi dei rischi, progettazione e fabbricazione delle attrezzature a pressione.

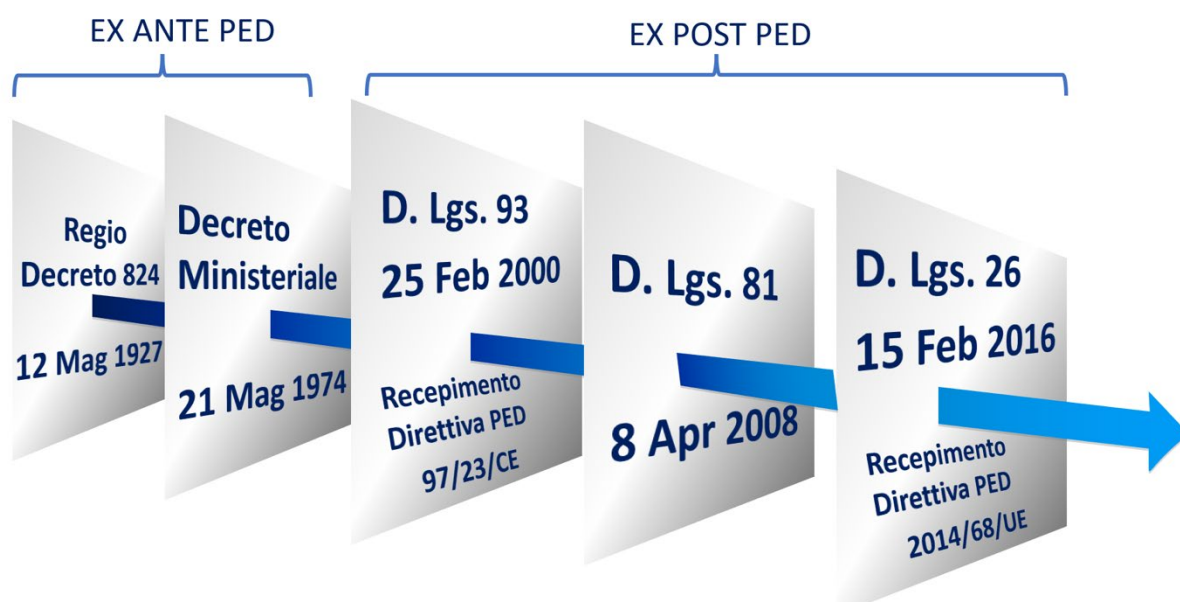


Figura 4 – Evoluzione quadro normativo leggi dello Stato italiano

L'aggettivo "essenziale" deve essere interpretato come "requisito minimo" da raggiungere: resta, infatti, consentita ai fabbricanti l'opportunità di conseguire requisiti ancora più conservativi, avvalendosi degli strumenti tecnologici e scientifici che un determinato

periodo storico offre. Quest'ultimo aspetto fra l'altro è regolamentato dall'articolo 2087 del Codice civile: "L'imprenditore è tenuto ad adottare nell'esercizio dell'impresa le misure che, secondo la particolarità del lavoro, l'esperienza e la tecnica, sono necessarie a tutelare l'integrità fisica e la personalità morale dei prestatori di lavoro".

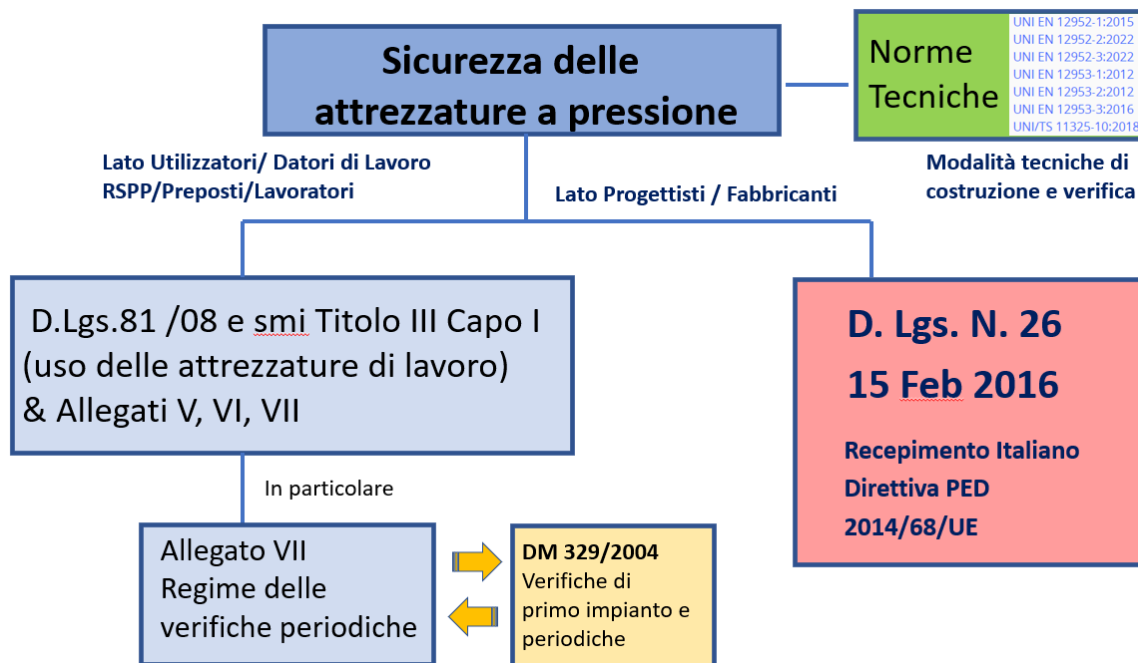


Figura 5 – Quadro completo di norme giuridiche e tecniche

Le parole chiave per la gestione delle apparecchiature in pressione sono "presunzione di conformità" e "armonizzazione", entrambe riferite al raggiungimento dei requisiti essenziali di sicurezza.

Se dovessimo chiederci: ma cos'è un generatore di vapore? C'è una definizione nel Regio Decreto 824 del maggio 1927 che recita "per generatori di vapore si intendono i recipienti nei quali si trasformano i liquidi in vapore a pressione più elevata di quella della atmosfera, allo scopo di impiegarlo fuori del recipiente stesso".

Analizzando la Direttiva PED esso ricade nelle seguenti:

- **«recipiente»**: un alloggiamento progettato e costruito per contenere fluidi pressurizzati; esso comprende gli elementi annessi diretti sino al dispositivo previsto per il collegamento con altre attrezzature. Un recipiente può essere composto di uno o più scomparti;
- **«insiemi»**: varie attrezzature a pressione montate da un fabbricante per costituire un tutto integrato e funzionale.

Si può allora senz'altro affermare, a più di vent'anni dalla entrata in vigore della prima direttiva PED, che la commercializzazione di generatori di vapore avviene quasi sempre attraverso la fornitura di insiemi. Il fabbricante sottoporà allora il prodotto all'esame e

verifica di un Ente accreditato dall'Unione Europea che applica la procedura globale di valutazione di conformità, finalizzata a valutare l'insieme se rispondente ai requisiti essenziali di stabilità meccanica, integrazione e protezione [1].



Figura 6 - Flusso processo algoritmo PED (Pressure Equipment Directive) [3]



Figura 7 – Obblighi del Datore di Lavoro

VERIFICHE DI LEGGE SUI GV (D.M. 329/04)

Competenza INAIL

- > verifiche di messa in servizio;
- > certificazioni di interventi di riparazione o modifica assetto tecnologico.

Competenza ARPA / ORGANISMI NOTIFICATI

- > visita interna – periodicità biennale;
- > verifica di funzionamento: prova a caldo con verifica degli accessori di protezione e sicurezza – periodicità biennale;
- > verifica di integrità strutturale, comprensiva di visita interna, esterna, CND, prova idraulica più altre eventuali prove-periodicità decennale

Figura 8 – Flusso verifiche di legge sui generatori di vapore

2.2 Approccio progettuale dei generatori di vapore in Asset Integrity Management; approccio RAMSE Affidabilità (Reliability) Disponibilità (Availability) Manutenibilità (Maintenability) Sicurezza (Safety) Ambiente (Enviroment)

Asset integrity management, tradotto letteralmente è “la gestione dell’integrità degli asset”. Per asset nella lingua italiana si intende “cospite”: in ambito economico, è quel bene materiale o immateriale impiegato nel processo produttivo che contribuisce a generare profitto per l’azienda e che è soggetto ad ammortamento.

Se noi ci aggiungiamo il sostantivo aggettivato “integrity” alla sua gestione (Guidelines Asset Integrity Management a cura del Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers New York, NY anno 2017) il concetto assume un significato molto più esteso [56].

Gestire correttamente un asset ha delle implicazioni positive a largo raggio, superando così il mero aspetto di curare gli interessi del business di un’impresa, ed estendendo a quella che possiamo definire “responsabilità” che la stessa ha nei riguardi della società e dell’ambiente (Corporate Social Responsibility). Pertanto, assicurare l’affidabilità, l’integrità tecnica e l’operabilità di un bene aziendale – che si tratti di un macchinario o un’infrastruttura – significa assolvere a una funzione pubblica, in conformità con le normative vigenti, nel rispetto dell’ambiente, in tutela del benessere lavorativo, in armonia con il contesto lavorativo interno ed esterno.

L'asset integrity management interessa tutte le fasi della vita di un asset e non si discosta molto dall'approccio RCM (Reliability Centered Maintenance). La novità introdotta da quest'ultima, che poi è estesa a RAMSE (Reliability, Availability, Maintainability, Safety, Environment), sta proprio in un ampliamento di analisi a monte e valle del ciclo produttivo, adottando sempre criteri di analisi di affidabilità, disponibilità, manutenibilità, sicurezza e ambiente [2].

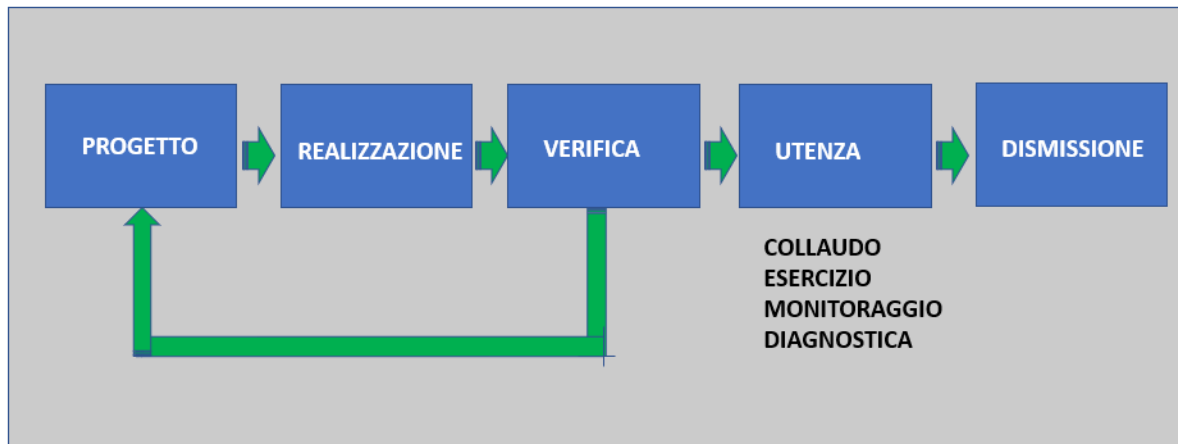


Figura 9 – Flusso di progettazione con approccio RAMSE [2]

In fase di progetto è fondamentale fissare obiettivi, strumenti della progettazione, le funzioni (è questa la novità introdotta dalla progettazione RCM).

Fissare obiettivi vuol dire ad esempio aumentare la producibilità del vapore, o ridurre al minimo le perdite per irraggiamento, oppure automatizzare il più possibile in modo che l'intervento dell'uomo sia ridotto al minimo indispensabile in accordo a quanto disposto dalle leggi. Sempre in questa fase assume una importanza strategica fondamentale la scelta del grado di accuratezza e precisione del modello matematico che servirà per scrivere le equazioni dei sistemi dinamici nella variabile reale tempo. È fondamentale inoltre stabilire fin da subito una gerarchia delle funzioni, sia dell'intero sistema sia dei singoli componenti, valutando se favorire l'affidabilità o la disponibilità: spesso si tratta di funzioni che entrano in conflitto tra di loro, così come pure la disponibilità e sicurezza [4].

Fase di **realizzazione**: in questa fase chi deve realizzare l'opera riceve i disegni e le relazioni dalla "progettazione": vengono così realizzati i singoli pezzi. È importante effettuare delle prove di analisi modale e di identificazione dei parametri (massa, smorzamento, cedevolezza) sui singoli componenti. Qualora si riscontrassero delle anomalie si invia alla progettazione l'esito dei risultati per eventuali modifiche [2].

Fase di **verifica**: La verifica globale dei componenti assemblati dovrà essere fatta nelle condizioni reali di esercizio qualora si riscontrassero ad esempio ulteriori problemi di vibrazioni oppure perdite di fluido da accoppiamenti flangiati o saldature. È una fase in cui

l'Ente certificatore europeo in base alla direttiva PED valuterà la conformità ai requisiti essenziali di sicurezza armonizzati. È palese che, qualora si riscontrassero problematiche di sorta, si invia il tutto alla progettazione.

Fase **utenza-collaudò**: il Prof. Marzio Falco del Politecnico di Milano paragonava questa fase alla "*prima forza caudina*". Il collaudo è stabilito da un certo CAPITOLATO che viene basato (nella fattispecie VIBRAZIONI) a norme tecniche di riferimento. Ci sono anche aspetti legali e contrattuali da tener conto in questa fase [2].

Fase **utenza-esercizio**: il generatore di vapore è ora nella fase in cui ha superato tutte le verifiche; è stato accettato contrattualmente dal committente per poi passare all'esercizio che ha il «*dovere di mantenerlo in buona salute*» (Prof Marzio Falco 1998) [2]. I tecnici che appartengono alla funzione aziendale "servizi tecnici" dovranno fare la cosiddetta "caratterizzazione termodinamica", vanno cioè misurati per esempio i rendimenti energetici, le vibrazioni di ogni componente, confrontandole con banche dati di apparecchiature simili, oppure se "l'insieme" è di nuova realizzazione e non vi sono dati di riferimento con cui confrontarsi, il servizio di manutenzione si deve far carico di esercirla lei per un certo periodo per definire regioni e intervalli di accettabilità. Va esercita a differenti e stazionari valori di producibilità di vapore facendo variare i parametri fondamentali del processo, memorizzando tutti questi dati [2].

Fase **utenza - monitoraggio**: il monitoraggio in esercizio del generatore di vapore è svolto con l'utilizzo principale di sistemi automatici di acquisizione che confrontano i dati acquisiti con quelli che si ritengono validi (regolazione automatica in retroazione di un generatore di vapore). Verranno implementate delle soglie di allarme e delle soglie di blocco del sistema, molti delle quali sono imposte dalla legge (soglia di allarme per basso livello acqua nel corpo cilindrico superiore o soglia di blocco per bassissimo livello). Nella maggioranza dei casi i sistemi di monitoraggio in continuo e conduzione sono basati sui sistemi informatici di comando a distanza di tipo DCS (sistemi di controllo distribuito) [5].

Fase **utenza - diagnostica**: è basata sull'utilizzo di modelli numerici in grado di studiare analisi di tendenza di varie tipologie di fenomeni chimico/fisici, analizzando sia il tipo di guasto che la probabilità di rottura. Le problematiche più comuni sono corrosione, la fatica, la corrosione sotto sforzo, il creep (scorrimento viscoso), il surriscaldamento e il degrado metallurgico.

Fase **dismissione**: l'insieme delle operazioni di decontaminazione, smontaggio e rimozione di strutture e componenti dell'impianto che abbia terminato il proprio ciclo produttivo (decommissioning).

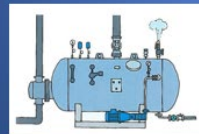
Approccio RCM (Reliability Centered Maintenance) Quali i Vantaggi



Soddisfacimento delle Normative Regolamenti Leggi



Esigenze Contrattuali e richieste di Mercato



Ottimizzazione della Produzione

Figura 10 – Principali vantaggi approccio RCM

Approccio RCM (Reliability Centered Maintenance) Quali le difficoltà



Introiti e Margini di contribuzione non immediati



Aspetto culturale per un approccio sistemico e multidisciplinare

Figura 11 – Potenziali difficoltà riscontrabili con approccio RCM

3 Generalità sui generatori di vapore

È di uso comune parlare indifferentemente di caldaia e generatore di vapore. La caldaia, in realtà, è soltanto un sottoinsieme del generatore, in quanto rappresenta la sola parte in cui avviene il passaggio di stato di aggregazione dell'acqua (da liquido a vapore) [6]. Dal manuale INAIL 2020 si deduce che *"Si considera, pertanto, 'caldaia' la parte di impianto a partire dalla connessione di ingresso per l'acqua di alimentazione fino alla connessione dell'uscita del vapore o dell'acqua surriscaldata, comprese tutte le valvole e i raccordi per il vapore e per l'acqua. Se le connessioni sono saldate, i requisiti specificati nella norma si applicano fino alle saldature, situate dove sarebbero stati applicati i giunti flangiati"*. [8]

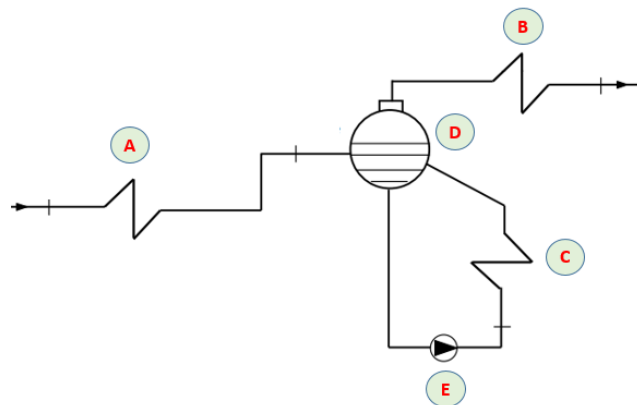


Figura 12 – Parti costituenti la caldaia

 economizzatore  surriscaldatore  vaporizzatore  separatore  pompa ricircolo

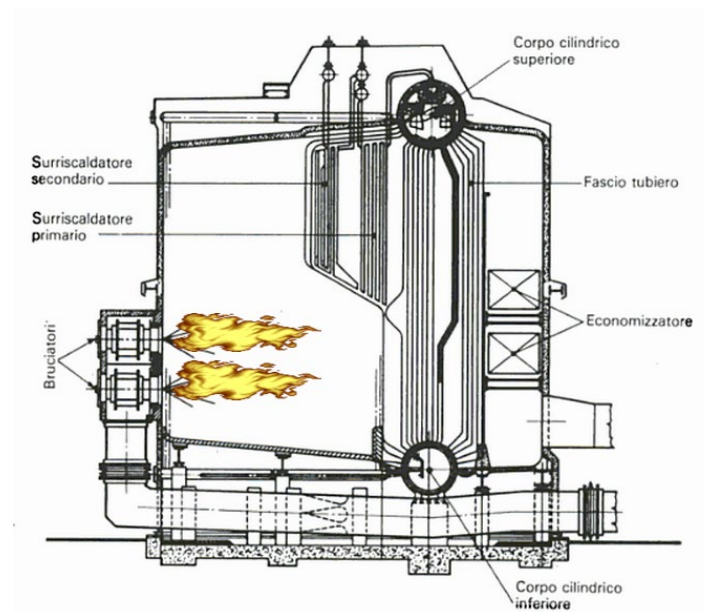


Figura 13 – Generatore di Vapore [7]

3.1 Gli elementi caratteristici del generatore di vapore

- **Producibilità del generatore di vapore P_v :** è la portata massica di vapore. Si misura in kg/h oppure in tonnellate su ora (t/h);
- **Potenza del generatore di vapore \dot{Q}_v :** se è nota l'entalpia specifica del vapore h_v è possibile desumere la potenza termica del generatore del vapore espressa in watt (detta anche Potenza nominale):

$$\dot{Q}_v = P_v \cdot h_v$$

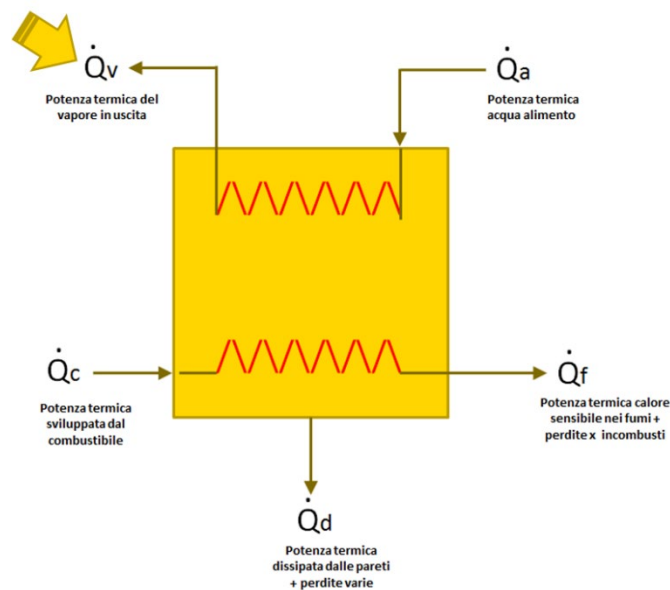


Figura 14 – Modello di rappresentazione di un generatore di vapore. Individuazione della potenza termica [8]

- **Pressione di bollo:** è la pressione effettiva massima alla quale il generatore può funzionare regolarmente. L'unità di misura è il bar. È un valore rilevabile dal libretto matricolare dell'apparecchio e dall'apposito bollo esistente al centro della targa:



Figura 15 – Targa dei valori nominali ai sensi Art. 14 Regio Decreto del 12 maggio 1927 n. 824 [9]

- **Pressione di esercizio:** è la pressione inferiore o al limite uguale alla pressione di bollo alla quale viene in pratica fatto funzionare il generatore di vapore.
- **Superficie di riscaldamento:** è l'area in metri quadrati della superficie lambita da un lato dai fumi e dall'altro dall'acqua; si misura dalla parte esposta ai fumi.
- **Carico termico volumetrico della camera di combustione:** è il rapporto tra la quantità di calore sviluppata dalla combustione nell'unità di tempo e il volume della camera di combustione. Si misura in W/m^3 .
- **Carico termico superficiale della camera di combustione:** è il rapporto tra la quantità di calore sviluppata dalla combustione nell'unità di tempo e la superficie di riscaldamento della camera di combustione. Si misura in W/m^2 .
- **Rendimento del generatore:** è il rapporto tra il calore trasmesso al fluido e il calore sviluppato dalla combustione.
- **Indice di vaporizzazione:** è il rapporto adimensionale tra la massa di vapore prodotto e la massa di combustibile bruciato nello stesso tempo.

3.2 Classificazione dei generatori di vapore a tubi di fumo e a tubi d'acqua

La classificazione dei generatori di vapore è complessa: la varietà delle tipologie esistenti ha indotto a catalogarli in base alle peculiarità che si vogliono enfatizzare. In questo paragrafo si tratterà esclusivamente la classificazione delle caldaie a tubi di fumo e a tubi d'acqua. Nelle prime l'acqua bagna la parete esterna dei tubi al cui interno circolano i fumi caldi mentre nei secondi l'acqua passa all'interno dei tubi e i fumi passano dalla parete esterna.

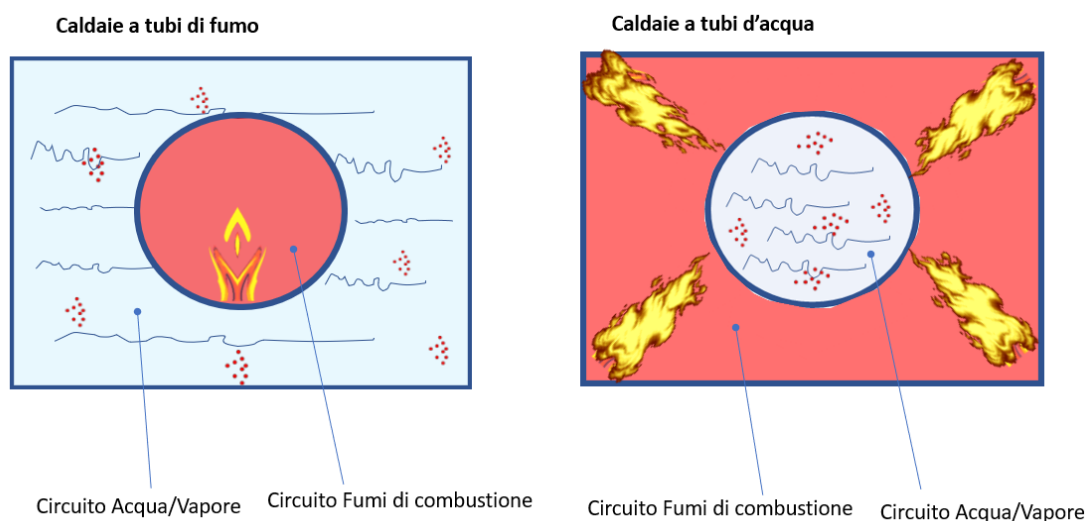


Figura 16 – Schematizzazione delle differenze strutturali tra caldaie a tubi di fumo e tubi d'acqua

Il primo generatore di vapore costruito dall'uomo è attribuibile all'Inghilterra, durante il periodo della rivoluzione industriale, del tipo a tubo di fumo. La sua peculiarità era di avere

un cospicuo quantitativo d'acqua alla temperatura di ebollizione: l'inerzia termica giocava un ruolo importante nella regolazione, in quanto il livello dell'acqua nel corpo cilindrico riusciva a non abbassarsi pericolosamente in risposta ai repentini incrementi di vapore da parte degli utenti. Erano generatori provvisti di "duomo" nella parte superiore ed erano in grado di produrre vapore dai 15 bar ai 17 bar. Come accorgimenti costruttivi si segnalano sia il carattere "ondulato" delle tubazioni dei fumi per consentire un aumento della superficie di scambio termico, sia la posizione "eccentrica" del tubo di fumo all'interno del contenitore d'acqua, per consentire una più efficace circolazione della miscela acqua - vapore nel moto convettivo. Le moderne caldaie a tubi di fumo conservano in sostanza un po' tutte le strategie costruttive e l'inventiva dell'epoca.

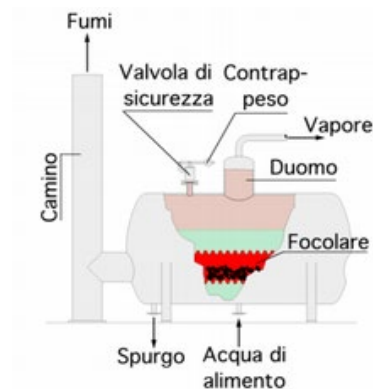


Figura 17 – Schema semplificato rappresentativo caldaia a tubi di fumo [10]

“La norma armonizzata di riferimento per la costruzione delle caldaie a tubi da fumo e la UNI EN 12953. La norma si applica alle caldaie a tubi da fumo aventi un volume superiore a 2 litri e utilizzate per la produzione di vapore e/o acqua surriscaldata a una pressione massima ammissibile maggiore di 0,5 bar e con una temperatura superiore ai 110°C. I generatori a tubi da fumo, secondo la norma UNI EN 12953, possono avere: caldaia a fiamma diretta, caldaia riscaldata elettricamente oppure caldaia a recupero di calore con pressione sul lato gas $\leq 0,5$ bar e pressione di progetto, lato vapore o acqua surriscaldata ≤ 40 bar” [11].

Le problematiche legate alla produzione di caldaie a grande volume d'acqua erano inerenti principalmente alla sicurezza delle persone e l'integrità degli asset in quanto non era raro che esplodessero.

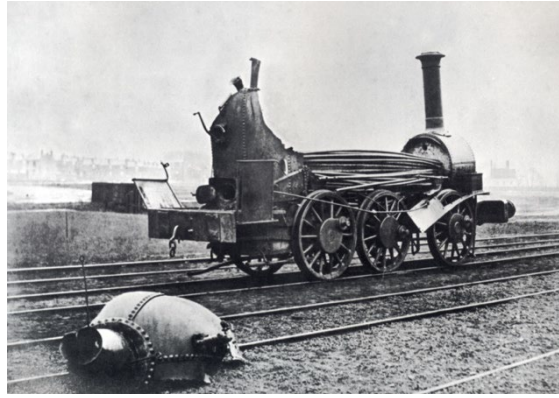


Figura 18 - Esplosione della caldaia di una locomotiva nel 1850 [11]

Ci furono due statunitensi, George Babcock e Stephen Wilcox che misero nel 1867 a fattor comune le loro conoscenze e competenze in ambito termotecnico brevettando la caldaia "non esplodente". La genialità fu quella di pensare di far passare all'interno dei tubi la miscela acqua vapore e non più i fumi caldi: così ebbe origine la precorritrice delle attuali caldaie a tubi d'acqua. I vantaggi erano legati, oltre ad un minor rischio devastante da esplosione, ma anche da un rapido avviamento legato alla ridotta massa d'acqua e alla possibilità di impiego di materiali con spessori inferiori, visto che le superfici esposte a pressione erano inferiori in metri quadri. Nei generatori a tubi d'acqua, per ottenere un'elevata producibilità, il vapore è contenuto all'interno di un mantello cilindrico di grosso volume ma, al fine di contenere gli spessori dei materiali utilizzati per la costruzione, le pressioni di progetto e, quindi, quelle di esercizio, non possono essere comunque eccessivamente elevate.

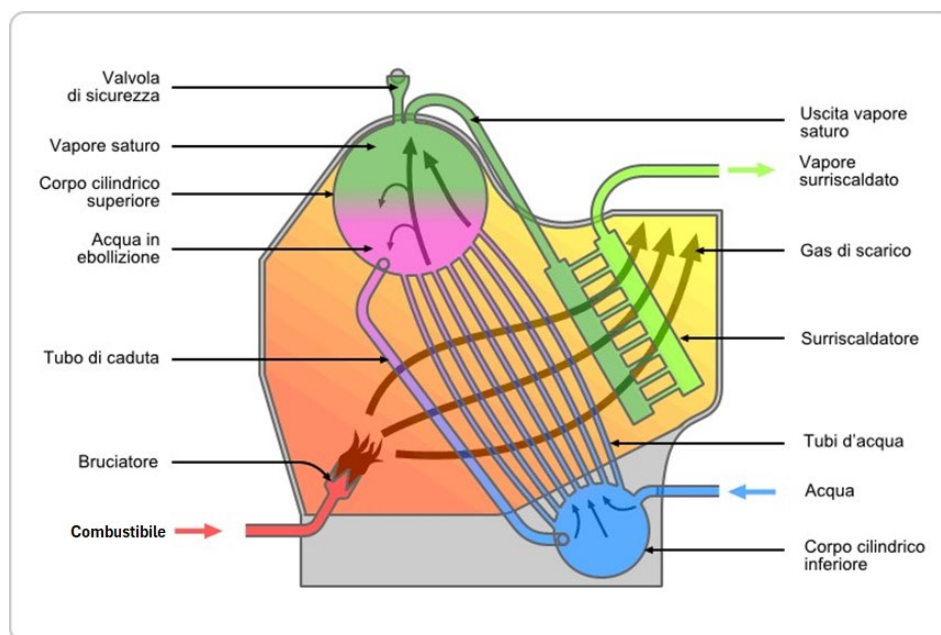


Figura 19 - Schema semplificato rappresentativo caldaia a tubi di fumo [12]

La norma di riferimento per la costruzione delle caldaie a tubi d'acqua, comprese le installazioni ausiliarie, è la UNI EN 12952; essa si applica alle caldaie a tubi d'acqua che trattano volumi maggiori di 2 litri, utilizzate per la produzione di vapore e/o acqua surriscaldata a una pressione superiore a 0,5 bar e con una temperatura superiore ai 110°C. L'applicazione delle suddette norme costruttive garantisce che siano soddisfatti i requisiti essenziali di sicurezza della direttiva PED.

3.3 Gli apparati accessori di un generatore di vapore e degli impianti termici

Il significato letterario di "accessorio" tratto da qualsiasi vocabolario della lingua italiana è legato ad un qualcosa di secondario, marginale, di importanza ridotta rispetto ad una certa funzione principale.

In un generatore di vapore invece, il valore di un "accessorio" è di pari importanza strategica al generatore stesso, quindi tutt'altro che attributo minoritario: la loro presenza per un corretto funzionamento di un generatore di vapore è una "conditio sine qua non".

È fondamentale affrontare la tematica analizzando bene cosa la Direttiva PED 2014/68/UE definisce per "accessori di sicurezza" e "accessori a pressione":

- **accessori di sicurezza:** *i dispositivi destinati alla protezione delle attrezzature a pressione contro il superamento dei limiti ammissibili, compresi i dispositivi per la limitazione diretta della pressione, quali valvole di sicurezza, dispositivi a disco di rottura, barre di schiacciamento, dispositivi di sicurezza pilotati (CSPRS) e dispositivi di limitazione che attivino i sistemi di regolazione o che chiudano o che chiudano e disattivino l'attrezzatura, come i commutatori attivati dalla pressione, dalla temperatura o dal livello del fluido e i dispositivi di misurazione, controllo e regolazione per la sicurezza (SRMCR) [13];*
- **accessori a pressione:** *i dispositivi aventi funzione di servizio e i cui alloggiamenti sono sottoposti a pressione [13].*

La discriminante che seleziona l'appartenenza o meno all'insieme degli accessori di sicurezza di un certo apparato è la sua funzione: ossia quella di tutelare la salute e la sicurezza delle persone e l'integrità degli asset andando ad inibire tutti gli eventi incidentali che potrebbero cagionarsi a seguito di superamenti di limiti (inferiori o superiori) di accettabilità imposti dalla legge o dal progettista dell'impianto.

La protezione degli impianti è fondamentalmente affidata a dispositivi diretti di protezione, le cosiddette valvole di sicurezza (PSV - Pressure Safety Valve) o dischi di rottura (RD - Rupture Disc), ovvero garantita attraverso sistemi/catene di protezione (SRMCR - Safety Related Measurement Control and Regulation) che, mediante l'impiego di sistemi

strumentati di sicurezza (SIS – Safety Instrumented System) sono in grado di assicurare i livelli di sicurezza attesi.

Una classificazione consigliata dal Prof. Fernando Pierini nel suo testo è la seguente:

Accessori di Osservazione: *sono strumenti indicatori, che permettono la lettura dei valori dei parametri in osservazione, localmente o a distanza, a mezzo di rilevazione diretta o indiretta. Essi comprendono manometri e termometri, indicatori di livello, i sensori e trasmettitori di pressione, i trasmettitori di temperatura, trasmettitori di livello [14].*

Accessori di Allarme: *sono strumenti di controllo, costituiti da una o più unità distinte, installati e collegati in maniera tale che, al raggiungimento di un valore predeterminato della pressione, della temperatura o di altro parametro ritenuto essenziale per la sicurezza o alla corretta gestione della apparecchiatura in pressione, segnalano con mezzi visivi e sonori al personale addetto, la necessità di apportare le opportune correzioni al processo [14].*

Accessori di Regolazione: *sono apparati di regolazione automatica nella stragrande maggioranza dei casi a retroazione per mantenere ad un valore desiderato una determinata misura di grandezza fisica (temperatura del vapore in uscita, pressione del vapore, livello nel corpo cilindrico superiore) [14].*

Accessori di Sicurezza: *dispositivi progettati e utilizzati per proteggere le attrezzature a pressione contro il superamento dei limiti ammissibili (per esempio valvole di sicurezza, pressostati di blocco con riarmo manuale, livellostati di blocco con riarmo manuale) [14].*

Accessori per il controllo della fiamma: *accessori di sicurezza che intervengono in caso di mancanza di fiamma mandando in blocco il generatore [14].*

Apparecchiature Ausiliare: *tutte le attrezzature necessarie alla produzione di vapore quali pompe di alimento, sistemi di pressurizzazione, sistemi di espansione e trattamento dell'acqua [14].*

3.4 Il recupero del vapore

L'argomento legato al "recupero del vapore" inteso come "recupero energetico" dopo aver svolto efficacemente la sua funzione nel processo è notoriamente inserito dagli autori dei testi specialistici nel capitolo dedicato agli accessori dei generatori di vapore (esempio Cap 7 – par 7.6 pag. 457 testo Fernando Pierini – Generatore di Vapore).

Si seguirà qui lo stesso "modus operandi", in quanto esiste un forte nesso eziologico tra un "efficiente recupero del vapore" ad una "corretta progettazione e realizzazione della rete di distribuzione del vapore stesso", dotata di tutti gli accessori quali scaricatori di condense, valvole di intercettazione e di non ritorno, eliminatori di aria, cassette collettrici di condense.

“La linea di distribuzione del vapore e la linea di recupero delle condense costituiscono con il generatore di vapore con gli apparecchi utilizzatori, l’impianto unico completo” [34].

La filosofia del progettista della linea di distribuzione deve poter seguire i due fondamentali obiettivi raffigurati nello schema seguente:

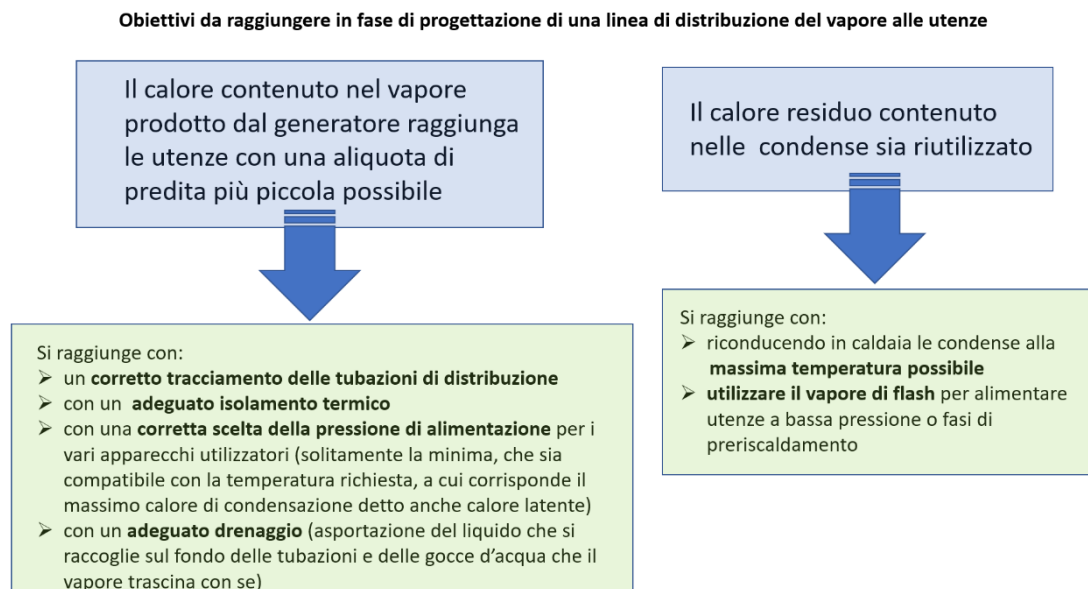


Figura 20 – Schema degli obiettivi strategici in fase di progettazione linee di distribuzione vapore [15]

Per avvalorare la tesi che una ottimale progettazione e realizzazione del circuito distribuzione vapore e ritorno condense influisca non poco sulla efficienza energetica complessiva dell’impianto, è sufficiente effettuare un semplice calcolo previsionale, attribuendo anche dei discreti valori di rendimento al generatore μ_g , della linea di distribuzione μ_d , dell’utilizzatore μ_u :

$$\mu_g = 0,95$$

$$\mu_d = 0,80$$

$$\mu_u = 0,80$$

$$\mu_{tot} = 0,95 \cdot 0,80 \cdot 0,80 \approx 0,61$$

Le eventuali perdite di energia e di massa lungo la linea di ritorno delle condense riducono ancora di più il rendimento finale [16]. Consentire un buon drenaggio delle condense lungo la linea non solo garantisce la qualità del vapore saturo secco in ingresso alle utenze, ma riduce drasticamente la probabilità del verificarsi di un evento molto indesiderato e che inficia l’integrità meccanico strutturale delle linee di distribuzione: “il fenomeno fisico del

colpo d'ariete", ossia l'effetto dell'impatto tra la condensa trascinata violentemente dal vapore contro un ostacolo interno alla tubazione (valvola, curva, filtro) [16].

La probabilità che ci siano accumuli di aria all'interno della rete distribuzione vapore è sicuramente alta durante le fasi di fermata; è quindi di fondamentale importanza effettuare durante la fase di avviamento impianto far fluire la linea a vuoto con vapore, sia per riscaldarla gradualmente (rispettando il gradiente di temperatura prescritto), sia per spiazzare l'aria. Questa abbasserebbe drasticamente lo scambio termico e favorirebbe la corrosione dei metalli.

Un efficiente impianto termico deve poter recuperare l'energia contenuta nella condensa, ed affinché ciò avvenga l'intera massa deve essere recuperata interamente. *"Non recuperare la condensa significa non essere preparati al risparmio energetico sia finanziariamente sia tecnicamente [17]"*.

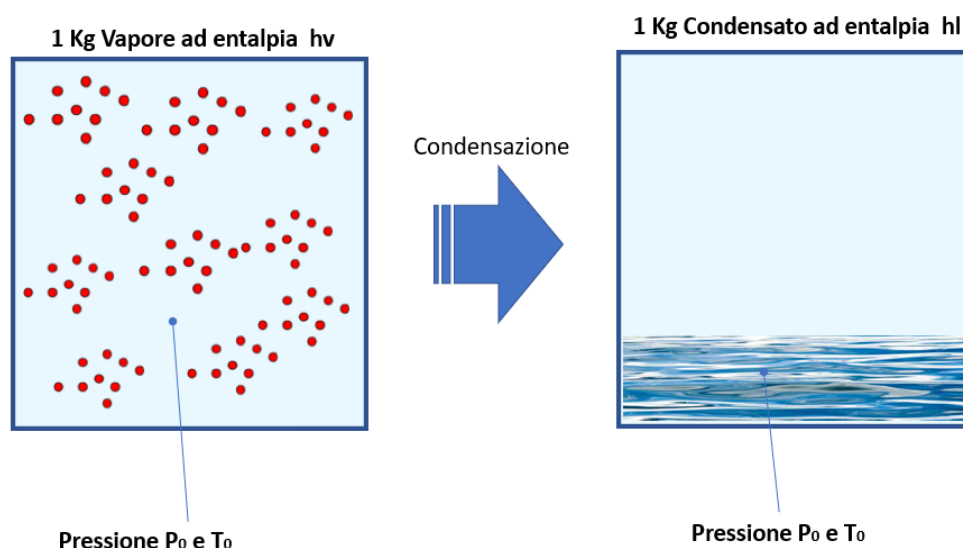


Figura 21 Recupero del condensato a seguito della condensazione della intera massa di vapore

L'obiettivo è pertanto recuperare il condensato alla temperatura più alta possibile per i seguenti vantaggi:

- maggiore producibilità del generatore di vapore;
- minor costo dell'acqua allo scarico;
- minor costo per il preriscaldamento dell'acqua di alimento della caldaia;
- riduzione degli spurghi;
- risparmio dei prodotti chimici per il trattamento;
- minore consumo di combustibile.

Per ridurre poi le perdite per irraggiamento lungo le linee, i requisiti di un buon materiale di coibentazione saranno:

- basso coefficiente di conducibilità termica;
- leggerezza per non aumentare il carico sulle strutture;
- basso calore specifico;
- deve essere il più compatto possibile nel tempo (non deve sfaldarsi, sbriciolarsi);
- non deve essere corrosivo o pericoloso per la salute e non deve generare gas tossici;

deve essere autoestinguente e non deve propagare la fiamma in caso di incendio [17].

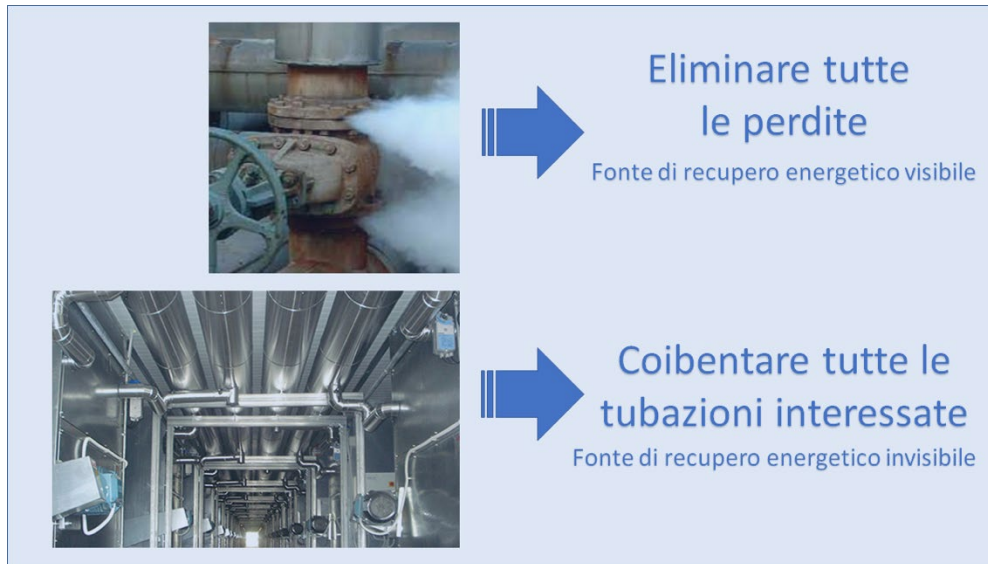


Figura 22 – Recupero di energia termica da perdite visibili e invisibili

3.5 La regolazione automatica in un impianto di generazione vapore

La regolazione automatica è strettamente correlata alla “efficienza energetica”, ed è utilizzata ad ogni livello impiantistico, dal piccolo al medio e grande impianto di processo.

Il lavoro degli operatori addetti alla conduzione del generatore di vapore ha seguito una evoluzione negli anni in termini di operazioni manuali e di presidio da svolgere; ad esempio, non si effettuerà più come un tempo il controllo del livello del corpo cilindrico basandosi sulla mera osservazione visiva del pelo libero dell’acqua: si affiderà invece ad un sistema a retroazione in cui c’è una variabile controllata che è il livello misurato da un certo trasmettitore, che confronterà poi la misura con il valore desiderato (set point), la cui differenza genererà un segnale da inviare al controllore che agirà su un servomeccanismo (ad esempio una regolatrice che si trova sulla mandata della pompa di alimento sempre in marcia). È però di fondamentale importanza che l’operatore di impianto, periodicamente, si assicuri che ci sia livello di acqua in caldaia.

Volendo generalizzare il concetto, è importante che non si ingeneri nel lavoratore “una falsa convinzione di fiducia nei dispositivi automatici di intervento quando in realtà egli dovrebbe essere sempre pronto ad intervenire immediatamente in caso di allarme” [37].

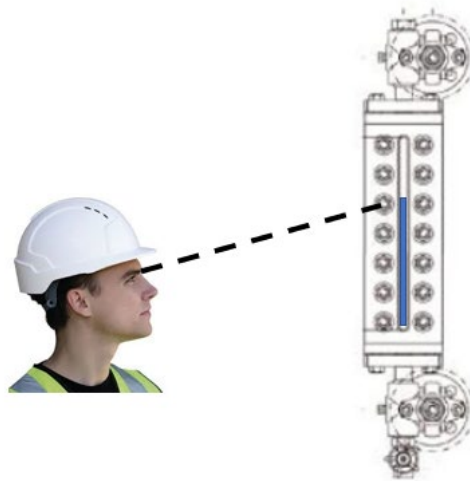


Figura 23 – Importanza del presidio dell'operatore addetto alla conduzione del gdv anche in presenza di conduzione assistita da remoto in controllo automatico

Esiste una sostanziale differenza tra "apparecchio di regolazione automatica" ed "apparecchio di intervento automatico". Il primo agisce in modulazione di una certa grandezza fisica andando ad agire opportunamente su determinati attuatori al fine di rendere stazionaria cioè vicina ad un valore desiderato, una certa condizione operativa. Il secondo invece ha una funzione di lavoro dal carattere di "immediatezza" della sua azione, usato fondamentalmente per scongiurare eventi rischiosi dovuti a superamenti dei valori di soglia e/o di progetto dell'apparecchiatura; sono casi in cui per motivi di sicurezza l'apparecchiatura è in "blocco" con l'obbligo di "riarmo" manuale effettuato volontariamente da una persona e non dall'automatismo.

Le tendenze di progettazione dei moderni generatori si concretizzano con generatori a piccolo e a piccolissimo volume d'acqua: di conseguenza la capacità di accumulo di vapore si è man mano ridotta nel tempo.

La "*capacità di accumulazione termica di un generatore di vapore*" è la quantità di vapore saturo secco che può essere erogato in assenza di apporto di calore in camera di combustione, al diminuire della pressione di 1 bar. È intuibile che maggiore è la massa d'acqua in caldaia, maggiore sarà il vapore saturo secco che si sprigionerà in regime di inerzia termica non appena si spengono tutti i bruciatori. Meno intuitivo è invece la dipendenza della capacità di accumulazione in funzione della pressione del vapore: decrementa all'aumentare della pressione fino ad un valore minimo di 85 bar per poi incrementare sino alla pressione critica.

Concettualmente l'inverso della capacità di accumulazione termica corrisponde ad una "caduta di pressione" che, per generatori di vapore con rapporto tra producibilità/volume d'acqua elevato, può assumere valori di depressurizzazione dei collettori vapore alle utenze

non accettabili. Il progettista dell'impianto non potrà quindi fare affidamento all'inerzia termica, ma dovrà dotarlo di adeguata strumentazione di controllo automatico.

Fissando pertanto il "carico" o "producibilità" del generatore di vapore come variabile indipendente, tutte le seguenti variabili sono del tipo "controllate" o "dipendenti":

- La portata della pompa di alimento in caldaia;
- La temperatura del vapore in uscita al primo surriscaldatore;
- La portata del combustibile;
- La portata di aria comburente;
- La portata del fluido di polverizzazione del combustibile;
- La temperatura aria comburente.

3.5.1 Modellazione matematica Ingresso Stato Uscita di un sistema dinamico termico semplificato

Supponiamo di avere un qualsiasi corpo dotato di un certo volume contenuto in una superficie S chiusa. Supporremo che il corpo sia omogeneo ed a temperatura uniforme T , e che attraverso la superficie S scambi di potenza termica con l'ambiente esterno a temperatura T_a . Sia h il coefficiente di scambio termico convettivo e radiativo e C la capacità termica del corpo. Il gradiente di temperatura $T_a - T$ innescherà il flusso di energia termica tra il corpo e l'ambiente esterno attraverso la superficie S (convenzione=positivo flusso entrante). Sia q un valore di potenza termica fornita in ingresso al corpo e $q_h = h(T - T_a)$.

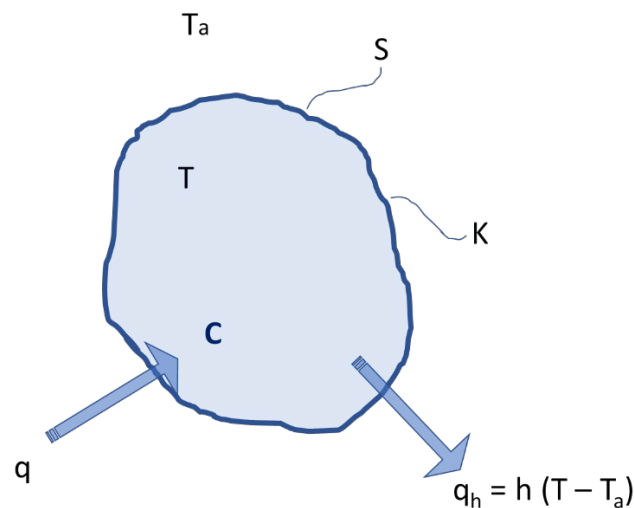
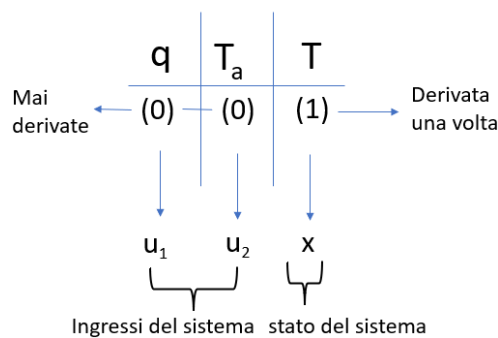


Figura 24 – Corpo di capacità termica C che scambia calore con l'esterno

$$C \dot{T} = \Sigma (\text{flussi termici entranti}) - \Sigma (\text{flussi termici uscenti}) = q - h (T - T_a)$$

$$C \dot{T} = q - h (T - T_a)$$

Le variabili nella equazione differenziale sono tre:



$$\begin{cases} \dot{x} = -\frac{h}{C} x + \frac{1}{C} u_1 + \frac{h}{C} u_2 \\ y = x \\ x(0) = x_0 \text{ per } t \geq 0 \end{cases}$$

Equazioni Ingresso Stato Uscita del sistema dinamico
Movimento dello stato e Movimento dell'uscita

e

Le variabili dipendenti della regolazione automatica di un generatore di vapore

3.5.2 La portata dell'acqua di alimento e il livello nel corpo cilindrico

Il controllo della portata dell'acqua di alimento e del livello nel corpo cilindrico dovrà necessariamente avvenire in maniera sinergica e non separata, in quanto influiscono in maniera importante azioni di disturbo legate a fenomeni fisici di cadute di pressione a seguito di una repentina richiesta di vapore a valle della caldaia.

Se il controllo del livello si affidasse al loop semplice di regolazione come rappresentato in figura 25, esso risponderebbe alla variazione dello stato (il livello di acqua in caldaia) con notevole ritardo, rendendo fortemente instabile in sistema.

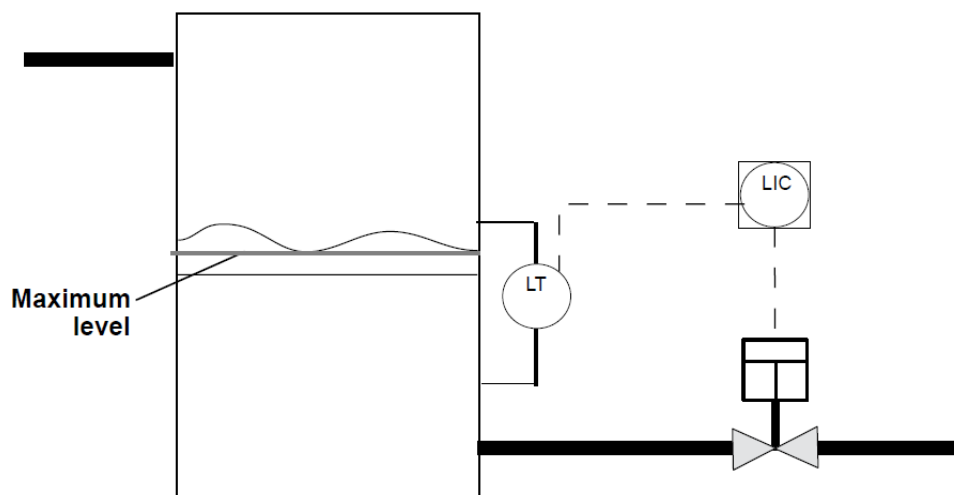


Figura 25 – Sistema di controllo semplice del livello nel corpo cilindrico superiore

Se si dovesse incrementare repentinamente la richiesta di vapore, infatti, si creerebbe all'interno dell'intero tratto di circuito (dal corpo cilindrico superiore alla camera di ammissione vapore utente) un abbassamento della pressione. La massa d'acqua nel corpo

cilindrico risponde con un rigonfiamento in avanti in quanto il liquido saturo si trova in uno stato di forte sovrasaturazione portandosi ad una tumultuosa ebollizione. Ciò comporta un innalzamento del livello dell'acqua fittizio perché il LIC (livello indicato e controllato) è ingannato dalla misura istantanea e pertanto non invierà mai nella immediatezza un segnale di comando di aumento della portata di acqua di alimento. Ad aggravare il ritardo del tempo di reazione del suddetto loop, contribuisce anche il fenomeno del "tempo di risalita" delle bolle nei collettori inferiori per tutta la quota dei tubi evaporatori.

Questo genere di problematiche sono risolte dalla scienza dei controlli automatici con strategie progettuali legate architetture di controllo in cascata. Esse prevedono l'implementazione di più loop di controllo fra loro annidati, in cui si retro-azionano tutte le variabili misurabili ed ottimizzare le proprietà di reiezione dei disturbi.

3.5.3 Temperatura del vapore surriscaldato nei surriscaldatori a convezione

La trasmissione del calore tra i fumi di combustione ed il surriscaldatore di vapore è fortemente dipendente dalla massa di combustibile bruciato: maggiore è il carico della caldaia, maggiore quindi sarà la temperatura del vapore. Avendo anche in dotazione un economizzatore, di conseguenza aumenterà anche la temperatura dell'acqua di alimento in uscita dallo scambiatore. Nasce l'esigenza di controllare la temperatura del vapore in uscita: infatti non si può offrire ad una certa utenza un vapore con temperatura né superiore né inferiore a quella nominale di funzionamento. Si utilizzano le stazioni di "attemperamento" o anche dette di "de-surriscaldamento".

La maggior parte dei desurriscaldatori utilizzati per il loro minor impatto di perdite di carico, sono quelli a "*nebulizzazione ad acqua*", il cui principio di funzionamento è che l'acqua di raffreddamento è a diretto contatto con il vapore surriscaldato pertanto l'acqua assorbe calore nel processo di evaporazione e il vapore viene raffreddato: la temperatura del vapore può essere controllata con precisione regolando appunto la quantità di evaporazione dell'acqua di raffreddamento.



Figura 26 -Nebulizzatore di un attemperatore [19]

3.6 Il trattamento delle acque di alimento dei generatori di vapore

Per comprendere quanto sia importante il "trattamento chimico fisico" dell'acqua di alimento di un generatore di vapore, basti pensare che gli stessi sali disciolti nell' acqua che ingeriamo e metabolizziamo nel nostro organismo sarebbero deleteri all'interno del circuito acqua vapore di una caldaia, arrecandole un danno irreparabile per le incrostazioni che si creerebbero nel tempo. Neanche l'acqua piovana soddisfa i requisiti minimi per essere data in alimento ad una caldaia in quanto, nonostante il bassissimo contenuto di sali disciolti (epurati durante il processo di evaporazione) essa è ricca di gas disciolti, vista la sua spiccata proprietà di dissoluzione di ossigeno, anidride carbonica e idrogeno (legge di Henry).

Le impurità che un conduttore generatore di vapore deve monitorare sono tutte quelle riportate in figura 27:

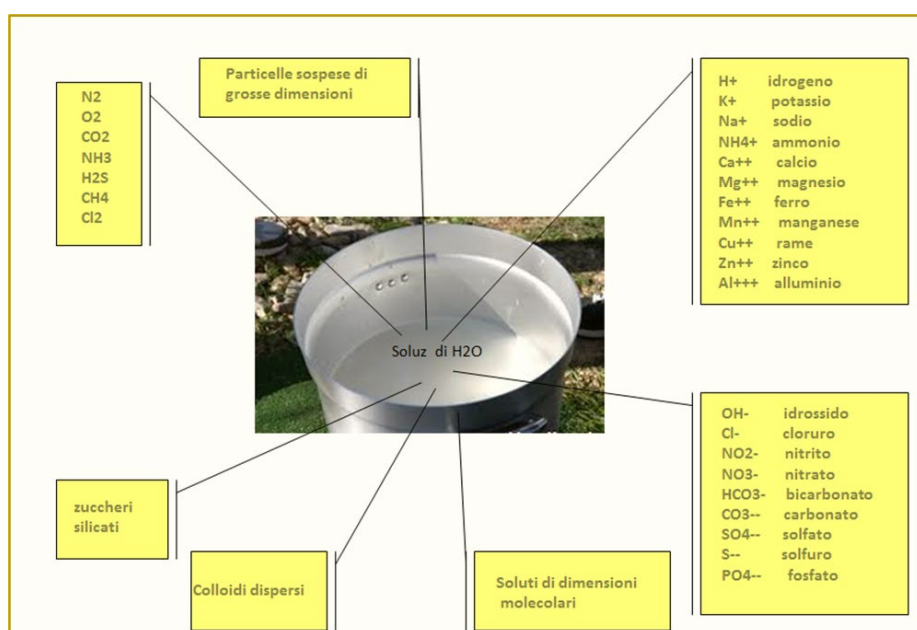


Figura 27 – Rappresentazione delle sostanze chimiche che rendono l'acqua impura ai fini della produzione di vapore a scopi industriali

Le particelle sospese e i colloidi creano fanghi indesiderati, dannosi non soltanto all'interno del corpo cilindrico inferiore, ma anche per il sistema di depurazione: le resine e le membrane verrebbero compromesse in maniera irreversibile, in quanto le prime subirebbero un avvelenamento, le seconde perderebbero le proprietà di permeazione. Una adeguata progettazione dei sistemi di filtrazione eviterebbe il verificarsi di tale problematica.

Per tutti i soluti dissociati e non dissociati, la progettazione dovrà valutare quale sia la migliore tipologia di trattamento di depurazione, di solito da svolgersi in serie e non in

parallelo. Si deciderà che tipo di trattamento adoperare in base al contenuto dei "Sali Totali disciolti TDS" misurati in mg/L ed al volume di acqua da trattare.

STD = (Concentrazione di Durezza Temporanea) + (Concentrazione di Durezza Permanente) + (Concentrazione di Sali di non Durezza)

È fondamentale eseguire campionamenti periodici almeno sui seguenti quattro elementi da monitorare:

- Acque Gregge: le analisi servono per orientarsi sulla gestione del trattamento depurativo;
- Acque Depurate: le analisi servono per testare l'efficacia del trattamento depurativo;
- Acque di Caldaia: le analisi servono per monitorare lo stato di salute del generatore di vapore;
- Vapore in uscita: le analisi servono per verificare se ci sono trascinamenti di sali ed eventuali trascinamenti di silice.

1) Presenza di solidi sospesi, torbidità,

2) Salinità o Conduttività elettrica,

3) pH (riscontro immediato del valore di acidità / alcalinità),

4) Durezza totale,

5) Alcalinità:

P = indice alcalino apparente (relativo a Carbonati e Idrati)

M = indice alcalino completo (relativo a Carbonati Bicarbonati e Idrati)

6) Determinazioni dei Cloruri (quando si utilizza un'acqua di integrazione addolcita)

7) Rilevazione di Ferro, Manganese, Silice,

8) Rilevazione di gas disciolti (Ossigeno, Idrogeno, Anidride Carbonica).

Figura 28 – Parametri chimo-fisici da misurare per il controllo delle acque di caldaia

Norma Italiana		Ottobre 1985
CTI	Requisiti delle acque per generatori di vapore e relativi impianti di trattamento	UNI 7550

Figura 29 – Norma UNI vigente in merito ai requisiti delle acque per i generatori di vapore e impianti

L'obiettivo del personale addetto alla conduzione del generatore di vapore è quello di monitorare costantemente le sostanze indesiderate nell'acqua di alimento in caldaia, gestendo tutti gli inconvenienti quali incrostazioni, corrosioni, schiumeggiamenti depositi carboniosi, al contempo controllando periodicamente le acque di condensa di ritorno in ciclo.

Parametri da osservare

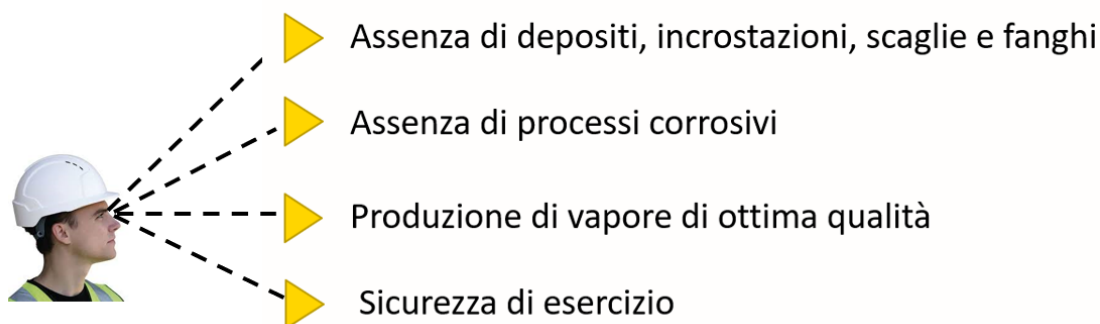


Figura 30 – Parametri da monitorare a cura del conduttore gdv in ambito qualità delle acque di caldaia e vapore

Una scorretta gestione della concentrazione dei sali di durezza può causare l'accumulo di incrostazioni all'interno del tubo raffigurato in figura 31. Oltre alla riduzione del diametro utile interno, l'inconveniente che inficia la sicurezza dell'impianto è l'effetto coibente dello strato di calcare. Trattandosi necessariamente di un generatore a tubi d'acqua, i fumi caldi che lambiscono il tubo esternamente non saranno più in grado di trasferire il calore all'interno, che andrà perso in atmosfera tramite il tiraggio al camino: aumenteranno così le perdite per calore sensibile. Da non trascurare il rischio di arroventamento delle superfici esterne del tubo con generazione di cricche e rotture.

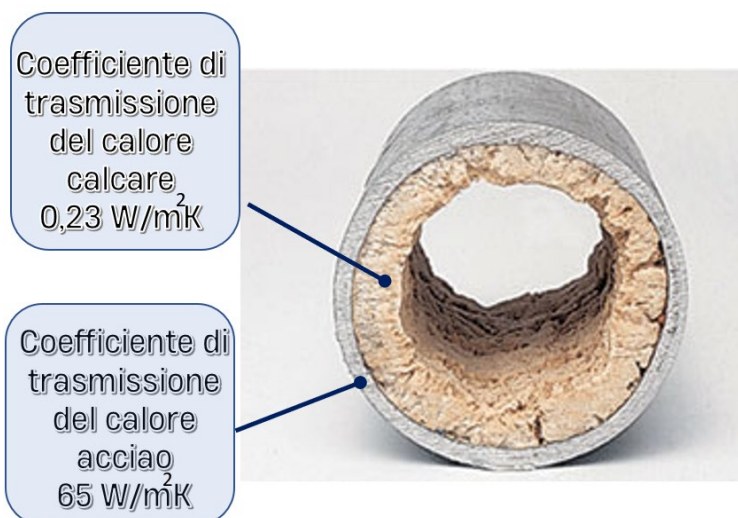


Figura 31 – Visualizzazione di un tubo incrostato

La presenza di silice nelle acque di caldaia peggiora ulteriormente la situazione perché, oltre a formare incrostazioni particolarmente dure e difficili da rimuovere, reagisce con i sali di calcio e magnesio, formando silicati caratterizzati da bassa conducibilità che oppongono quindi un alto grado isolante alla trasmissione del calore, fino a danneggiare gravemente i fasci tubieri di scambio termico.

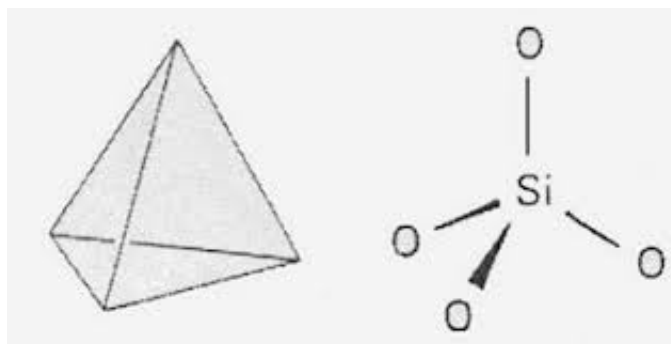
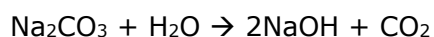


Figura 32 – Silice

La fragilità caustica è il fenomeno per cui il materiale di una caldaia diventa fragile a causa dell'azione di sostanze alcaline presenti nell'acqua di riscaldamento. L'acqua riscaldata evapora: di conseguenza, la concentrazione di Carbonato di Sodio aumenta nel corpo della caldaia. Il Carbonato di Sodio è usato abitualmente per addolcire l'acqua di caldaia e una certa quantità rimane disciolta nell'acqua addolcita che la alimenta.

In un ambiente di lavoro particolarmente riscaldato (maggiore di 100°C) la concentrazione di Carbonato di Sodio tende ad aumentare e si idrolizza per formare Idrossido di Sodio [NaOH]:



La presenza di Idrossido di Sodio aumenta il pH rendendo l'acqua alcalina (basica).

3.7 Problematiche legate a fenomeni di natura corrosiva

Quando si pensa alla "corrosione dei metalli" di apparecchiature di solito vi si associa una cinetica "lenta" del meccanismo di danno; al contrario, si parla di "attacco chimico" quando la cinetica è veloce.

La norma UNI EN ISO 8044:2001 definisce la corrosione "*Interazione fisico-chimica tra un metallo e il suo ambiente, che causa cambiamenti nelle proprietà del metallo e che può determinare un deterioramento significativo della funzione del metallo, dell'ambiente o la riduzione dell'efficienza del sistema tecnico di cui questi fanno parte. Questa interazione è spesso di natura elettrochimica*".

I metalli, come d'altronde tutti gli altri materiali esistenti in natura, seguono la legge dell'entropia, si deteriorano nel tempo perdendo i requisiti essenziali di sicurezza e

progetto; è la loro forte elettropositività che tende ad un incremento del numero di ossidazione.

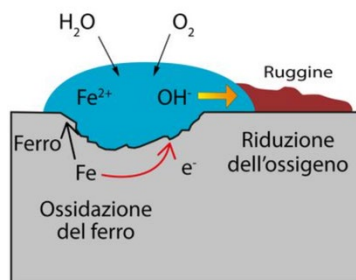


Figura 33 – Principio di corrosione da ossigeno [57]

La corrosione elettrochimica, come è ben noto, si manifesta quando la perdita di elettroni causa la formazione di ioni metallici che passano in soluzione, determinando una continua sottrazione di materiale. I prodotti della reazione, di conseguenza, reagiscono con le sostanze presenti: una volta innescato il fenomeno è difficilmente arrestabile.

Nel circuito acqua vapore l'attacco inizia nelle zone ad alta energia interna come, ad esempio, nei "bordi di grano", causando punti di nucleazioni di cricche e successivi suoi avanzamenti sino alla rottura del materiale.

Le cause radici dei processi corrosivi possono essere:

- L'anidride carbonica che si libera nella reazione di trasformazione dei carbonati di calcio e magnesio in bicarbonati di calcio e magnesio. Quando si superano i 100°C le reazioni sono spostate sui prodotti: la CO₂ non è più solubile in acqua;



- L'ossigeno libero che è presente in tutte le acque, e che diminuisce la sua solubilità all'aumentare della temperatura. La reazione è $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

Gli ioni OH⁻ prodotti reagiscono con gli ioni Fe⁺⁺ formando il precipitato Fe(OH)₂ che a sua volta si scinde in $3\text{Fe(OH)}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$ (Fe₃O₄ magnetite);

- Il PH acido: gli ioni H⁺ presenti in soluzione sottraggono elettroni all'equilibrio di dissoluzione del ferro secondo la reazione $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$; $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ ed il ferro passa definitivamente in soluzione;
- Solidi sospesi ed impurità.

Lo strato di magnetite Fe₃O₄ che si forma sulla superficie dell'acciaio ha un'azione protettiva, in quanto aderisce compattandosi ed arrestando così il fenomeno della

corrosione lato circuito acqua vapore (tranne che nelle zone a temperatura sotto i 100°C in quanto non ci sono condizioni favorevoli alla decomposizione del $3\text{Fe}(\text{OH})_2$).

La **corrosione lato fumi** nei generatori di vapore assume connotazioni diverse da quella nel circuito acqua vapore. In entrambi i casi si tratta di fenomeni di natura elettrochimica, che si manifestano tra l'interfaccia della superficie metallica della condotta fumi e sostanze quali i prodotti della combustione, i quali si depositano o rasentano la superficie stessa. È necessario inoltre distinguere tra "corrosione ad alta temperatura" e "corrosione ad bassa temperatura".

"Nel fenomeno corrosivo ad alta temperatura si riscontrano due tipologie degrado: l'assottigliamento e la corrosione vera e propria" [44]. Il primo si manifesta con riduzione continua ed omogenea dello spessore dei tubi; la seconda, per effetto della quale i tubi si presentano rivestiti di ossido e prodotti della corrosione, al di sotto dei quali la superficie del metallo presenta alterazioni profonde e attacchi localizzati con spessore fortemente diminuito. Si è riscontrato che, se è presente nei fumi sia solfato di sodio che vanadio, si può dar luogo a corrosioni anche gravi. La pericolosità sta nel fatto che lo strato di metallo alterato è nascosto dagli accumuli e quindi non facilmente rilevabile [44]. Nella corrosione a bassa temperatura, detta anche "acquosa" si riscontrano la presenza di sostanze diversificate in forma umida. La cinetica del danno diventa particolarmente rapida quando alla pila che si viene a creare si aggiunge la presenza di un agente depolarizzatore. Sono fenomeni non rari quando si cerca di spingersi al massimo con l'aliquota energetica che si vuole recuperare nei fumi al camino, ma che consentono di raggiungere il punto di rugiada acido. Se nel combustibile ci sono tracce di zolfo, con una serie di reazioni di combustione si avrà che l'anidride solforica SO_3 , combinandosi con l' H_2O , formerà acido solforico H_2SO_4 .

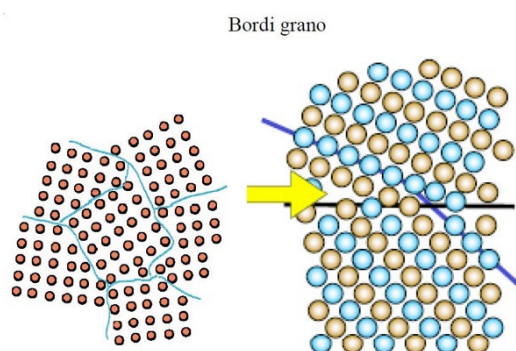


Figura 34 – Rappresentazione dei bordi di grano [21]

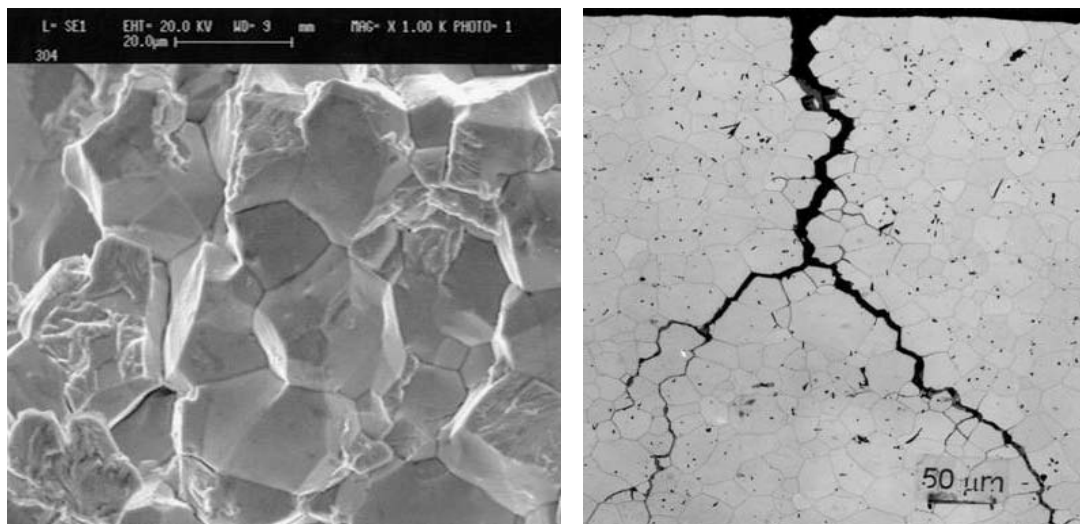


Figura 35 – Corrosione intergranulare [22]

3.8 Bilancio termico di un Generatore di Vapore

Il generatore di vapore è un sistema fisico aperto, in quanto scambia con l'ambiente esterno sia materia, sia energia. Il suo rendimento μ_g è calcolabile come il rapporto tra il calore utilizzato e il calore speso, dove per calore speso si intende la somma del calore utilizzato e del calore perso.

$$\eta_g \% = \frac{\text{calore utilizzato}}{\text{calore speso}} \cdot 100$$

- **Calore speso** – nei generatori di vapore è la somma dell'energia chimica contenuta nel combustibile (potere calorifico inferiore moltiplicato la massa del combustibile) maggiorato da eventuale calore speso per preriscaldare sia il combustibile che l'aria comburente;
- **Calore utilizzato** – È l'energia assorbita dall'acqua per scaldarsi e per portarsi a vapore saturo, e dal vapore saturo al vapore surriscaldato;
- **Calore perso** – È la parte del calore fornito dalla combustione che non si utilizza e che è dato dalla differenza tra il calore speso ed il calore utilizzato. Può anche essere calcolato come somma di perdite definite come "perdite per calore sensibile", "perdite per incombusti", "perdite per irraggiamento", "perdite varie".

Si analizzano ora le singole perdite, attribuendo un algoritmo per il suo calcolo.

Perdite per calore sensibile P_{cs}

È l'aliquota di energia termica che viene persa nei fumi al camino, per conseguenza della temperatura. La quantità di fumi prodotta dipende oltre che dalla massa di combustibile bruciato (legge di Lavoisier) anche dall'eccesso d'aria impiegato nella combustione [57]:

$$P_{cs} = K_s \frac{T_f - T_a}{\% CO_2}$$

dove P_{cs} : la perdita per calore sensibile in % del calore speso

T_f : temperatura dei prodotti della combustione alla base del camino in °C

T_a : temperatura ambiente in °C

$CO_2\%$: contenuto percentuale in volume di anidride carbonica misurata nei fumi

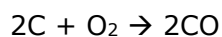
K_s : coefficiente variabile funzione del combustibile e della $\%CO_2$

CO ₂ [%]	Costante di Hassenstein K _s [1/°C]				
	gasolio	nafta	metano	coke	antracite
4	0,523	0,543	0,418	0,749	0,683
5	0,530	0,550	0,427	0,749	0,684
6	0,536	0,556	0,537	0,750	0,685
7	0,543	0,563	0,447	0,750	0,686
8	0,550	0,570	0,457	0,751	0,687
9	0,557	0,576	0,466	0,751	0,688
10	0,564	0,583	0,476	0,752	0,689
11	0,571	0,590	0,486	0,752	0,690
12	0,578	0,596		0,753	0,691
13	0,585	0,603		0,753	0,692
14	0,592	0,610		0,754	0,693
15				0,754	0,694
16				0,755	0,695

Figura 36 - Tabella dei valori della costante di Hassenstein

Perdite per incombusti P_{co}

È l'aliquota di energia termica che viene persa quando si sviluppa la seguente reazione:



La relazione per il calco della perdita in percentuale è:

$$P_{co} = K_c \frac{\% CO}{\% CO + \% CO_2}$$

$K_c = 50,5$ per olio combustibile
 $K_c = 59$ per carbone
 $K_c = 37,9$ per metano

Perdite per irraggiamento P_{irr}

Il generatore di vapore, seppur adeguatamente coibentato, avrà una aliquota di energia termica che cederà all'ambiente proporzionale alla quarta potenza della temperatura misurata in gradi kelvin.

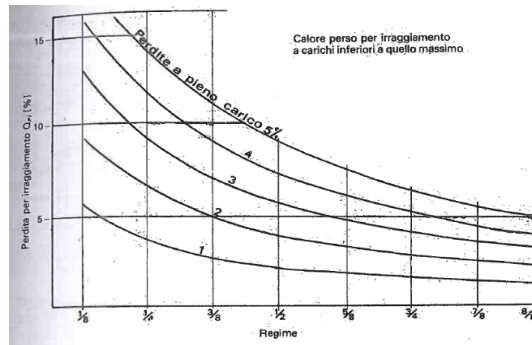


Figura 37 - Perdite per irraggiamento

Perdite Varie P_v

Si calcolano per differenza dalle altre perdite e sono quelle imputabili a cause varie, quali gli spurghi e drenaggi:

$$P_v = 100 - \eta - P_{cs} + P_{co} + P_{irr}$$

Bilancio Termico del Generatore di Vapore in condizioni di regime stazionario

Applicando il principio di conservazione dell'energia avremo che la somma della potenza termica entrante al sistema è uguale alla somma della potenza termica uscente.

$$\dot{Q}_c + \dot{Q}_a = \dot{Q}_v + \dot{Q}_f + \dot{Q}_d$$

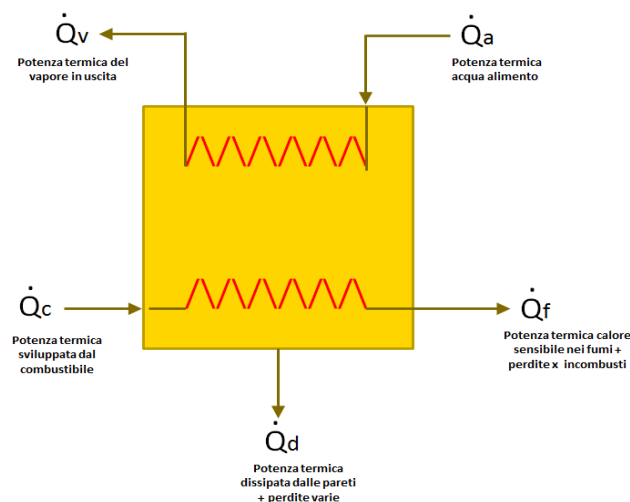


Figura 38 – Modello semplificato per il bilancio termico [8]

Le espressioni per ogni singola potenza termica sono le seguenti:

- Potenza termica del vapore in uscita:

Potenza termica del vapore in uscita	Potere calorifico inferiore	Consumo di Combustibile
\dot{Q}_c	H_i	P_c
$[MW]$	$[MJ/kg]$	$[kg/s]$

$$\dot{Q}_c = H_i \cdot P_c$$

- Potenza termica dell'acqua di alimento:

Potenza termica acqua alimento	Calore specifico massico	Portata acqua alimento	Temperatura acqua alimento
\dot{Q}_a	c_a	P_a	t_a
$[MW]$	$[MJ/kgK]$	$[kg/s]$	$[K]$

$$\dot{Q}_a = c_a \cdot P_a \cdot t_a$$

- Potenza termica del vapore in uscita:

Potenza termica del vapore in uscita	Produttività vapore	Entalpia del vapore prodotto
\dot{Q}_v	P_v	h_v
$[MW]$	$[kg/s]$	$[MJ/kg]$

$$\dot{Q}_v = P_v \cdot h_v$$

- Potenza termica del calore sensibile ai fumi e generata dalla combustione imperfetta:

Potenza termica calore sensibile nei fumi + perdite x incombusti	Calore specifico Volumico fumi	Consumo di Combustibile	Volume specifico fumi	Temp fumi	Temp aria
\dot{Q}_f	c_f	P_c	v_f	t_f	t_a
$[MW]$	$[MJ/kgK]$	$[kg/s]$	$[m^3/kg]$	$[K]$	$[K]$

$$\dot{Q}_f = c_f \cdot P_c \cdot v_f \cdot (t_f - t_a)$$

4 Efficienza energetica, salvaguardia dell'ambiente e benessere lavorativo: tre sistemi di gestione ISO 50001, ISO 14001, ISO 45001 in sinergia

Con il termine "sistema di gestione" si intende un insieme di azioni supportate da un investimento di fattori di produzione, dedicate al governo di un processo tipicamente operativo, produttivo o amministrativo di una organizzazione che, in maniera del tutto volontaria, aderisce allo standard.

L'obiettivo, generalmente, è quello di attuare strumenti che consentono all'azienda o all'organizzazione di tenere sotto controllo i propri processi e le proprie attività.

Un aspetto fondamentale che il Prof. Claudio Peri dell'Università di Milano ha enfatizzato, ma nello stesso tempo ammonito, nel suo testo "Oltre i sistemi di qualità" è la tendenza a "*burocratizzare/tecnocratizzare*" una organizzazione lavorativa con un sistema di gestione in cui "*riferimenti normativi e procedure costituiscono una grande costruzione barocca nella quale i fronzoli e le decorazioni hanno finito per nascondere le linee essenziali della struttura*" [25].

Il sistema di gestione va pertanto implementato nei comportamenti quotidiani delle persone e non in una mera e sterile raccolta di procedure e liste di controllo.

4.1 Brevi cenni descrittivi degli standard ISO50001 ISO14001 ISO45001



Nella fattispecie con la ISO50001 si cura l'aspetto legato all'efficienza energetica; con la ISO14001 si considerano gli aspetti connessi alla salvaguardia dell'ambiente mentre con la ISO45001 si pone come obiettivo di lavorare in sicurezza con salvaguardia del benessere lavorativo. Sono tutte e tre "figlie" della ISO9001 gestione della qualità, che pare abbia origine come prima applicazione pratica da un giovane ingegnere di nome Walter Shewhart, che ideò per la prima volta un grafico di controllo statistico (un metodo replicabile di controllo qualità) nel 1924, messo in pratica nello stabilimento di Hawthorne della società di Western Electric nel 1926.

I sistemi di gestione ISO45001, ISO50001, ISO14001 e ISO9001 sono tutti basati sulla struttura ad alto livello (High Level Structure) e condividono molti elementi comuni.

Ecco i punti in comune dei sistemi di gestione ISO45001, ISO50001, ISO14001 e ISO9001:

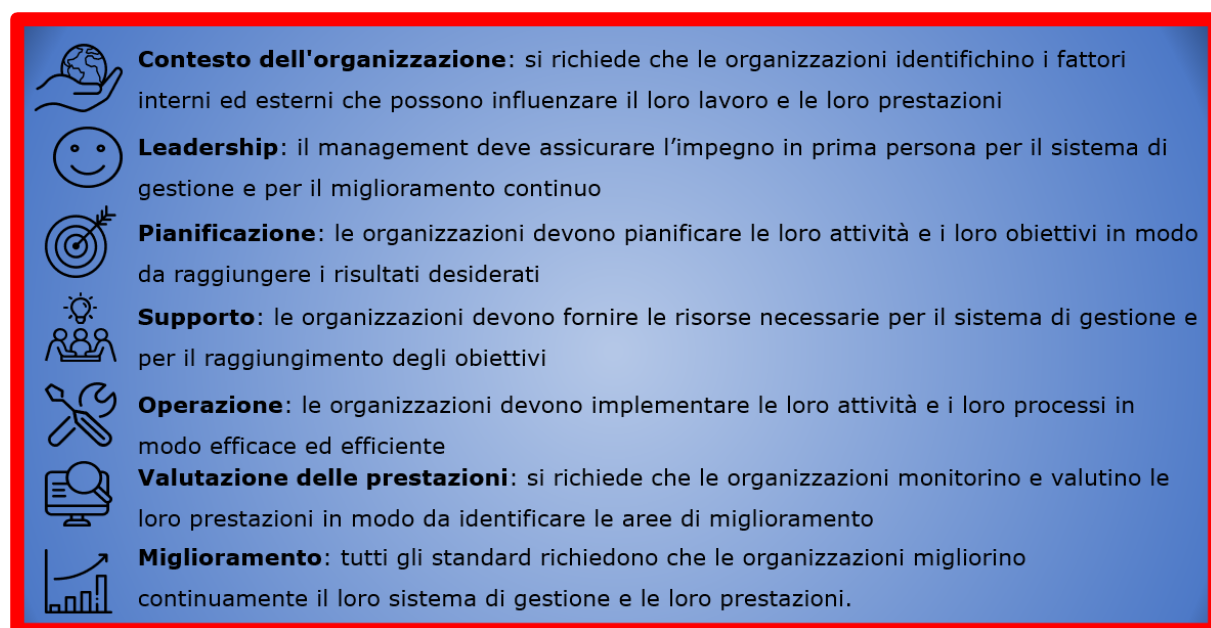


Figura 39 – Requisiti comuni ai tre sistemi di gestione ISO45001 ISO14001 ISO5001

4.2 Descrizione caso pratico di miglioramento efficienza energetica di una realtà industriale nel settore energia

La realtà oggetto di interesse di osservazione è lo stabilimento Enipower di Ferrera Erbognone. Esso è un impianto di cogenerazione di energia elettrica e vapore costituito da due unità a ciclo combinato da 390 MWe ciascuna (denominati CC1 e CC2) ed una unità a ciclo combinato da 250 MWe (denominato CC3) per una potenza totale installata di 1030 MWe.

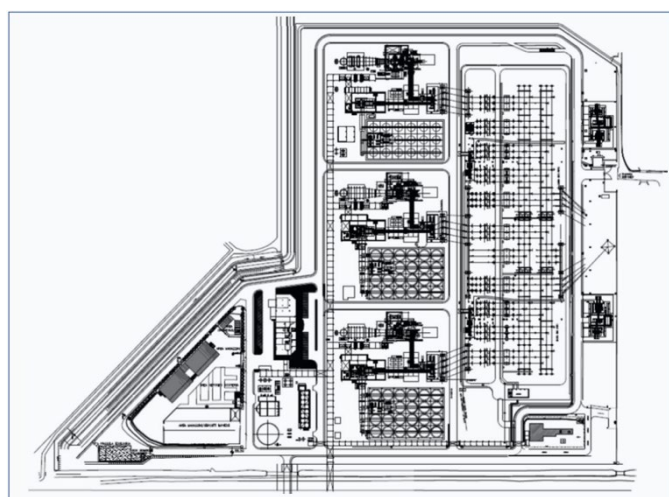


Figura 40 – Planimetria di Stabilimento

La centrale Enipower di Ferrera Erbognone fu inaugurata nel marzo del 2004 ed è stato il primo impianto di produzione di energia elettrica ad entrare in funzione dopo la liberalizzazione del mercato energetico italiano.



Figura 41 – Pianta prospettica dall’alto della zona industriale [26]

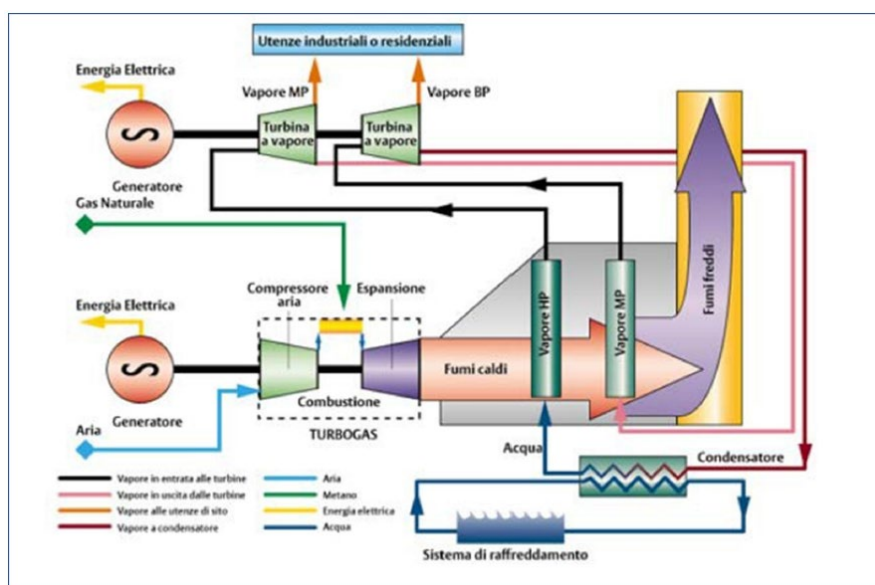


Figura 42 – Schema di impianto turbogas in ciclo combinato cogenerativo

Si produce energia elettrica attraverso la tecnologia del ciclo combinato. Questo consiste nell'accoppiamento di un ciclo turbogas e di uno a vapore, in cui l'energia termica entrante nel ciclo a vapore è ottenuta dal recupero termico effettuato sui gas combusti scaricati dalla turbina a gas. Con la combinazione di due cicli termodinamici – il ciclo Brayton e il ciclo Rankine – gli impianti a ciclo combinato permettono di ottimizzare il rendimento del processo termodinamico e di utilizzare il calore utile residuo per gli impieghi tecnologici

dello stabilimento industriale o per il riscaldamento/raffrescamento di ambienti, conseguendo così le massime efficienze oggi raggiungibili.

Il ciclo Brayton converte l'energia termica posseduta dai gas derivanti dalla combustione del gas naturale in energia meccanica e quindi elettrica.

Nel ciclo Rankine l'energia termica residua dei gas di combustione viene ceduta all'acqua per la produzione di vapore e convertita in energia meccanica e quindi elettrica.

Presso le centrali di Enipower è stato sviluppato un articolato piano pluriennale di investimenti, caratterizzati da una significativa componente di innovazione tecnologica, finalizzati al raggiungimento del massimo livello di flessibilità produttiva ed efficienza del processo di generazione termoelettrica possibili con conseguente riduzione delle emissioni inquinanti [26].

Tra i tanti obiettivi aziendali che l'Azienda Enipower si prefigge di raggiungere, sanciti nella Politica Societaria in materia di Salute, Sicurezza, Ambiente, Qualità c'è il seguente:



Figura 43 – Estratto della politica societaria in materia di efficienza energetica [27]

Enipower aderisce allo standard ISO 50001 e ottiene la certificazione di tutti i suoi siti operativi.

Si è partiti con una diagnosi energetica iniziale per individuare tutti gli usi energetici al fine di definire le opportunità di miglioramento.

Si descriveranno di seguito tre interventi significativi che di fatto hanno apportato ad un efficientamento energetico:

- Implementazione di un sistema di azionamento a giri variabili per i ventilatori delle torri evaporative di raffreddamento;
- Intervento al ciclo combinato CC1 per:
 - a. Sostituzione della palettatura turbina esistente con palette di nuovo design;
 - b. Installazione di un cuscinetto reggispira dotato di pistoni idraulici per la riduzione dei giochi di macchina nelle idonee condizioni di operative e di carico;
 - c. La sostituzione di componenti della camera di combustione con materiali maggiormente resistenti alle alte temperature e conseguenti minori perdite per raffreddamento.
- Modifica sul circuito di preriscaldamento di gas naturale con condensato vapore bassa pressione.

Implementazione di un sistema di azionamento a giri variabili per i ventilatori delle torri evaporative di raffreddamento.

Nel corso del 2022, presso il sito di Ferrera Erbognone (PV) è stata completata l'implementazione di un sistema di azionamento a giri variabili per i ventilatori delle torri di raffreddamento evaporative da circa 33 MWt, che consentono la rimozione del calore smaltito dai sistemi ausiliari (alternatori turbine a gas, turbine a vapore e sistemi di lubrificazione). Il sistema permetterà una riduzione dei consumi per il raffreddamento in condizioni invernali o di basso carico.

Le torri evaporative o torri di raffreddamento sono dispositivi che sfruttano l'evaporazione forzata di una minima quantità d'acqua, rispetto alla massa principale e che avviene per sottrazione di calore alla massa stessa raffreddandosi (calore latente di evaporazione).

Nel caso dello stabilimento Enipower di Ferrera Erbognone asportano il calore residuo a basso contenuto termico il cui recupero risulterebbe economicamente svantaggioso. Trattasi pertanto di raffreddamento di acque provenienti da scambi termici avvenuti in circuiti ausiliari ed alternatori.

Ci sono delle sezioni di scambio a secco tra aria ambiente e acqua e di una sezione sottostante a umido.

Studi e monitoraggi sviluppati nel tempo hanno consentito di dedurre la temperatura dell'acqua di raffreddamento è compresa tra 2°C e 5°C, nettamente minore di 8°C di progetto e quindi è stato valutato positivamente lo studio di fattibilità per l'installazione di sistemi inverter ai motori asincroni trifase che azionano le ventole.

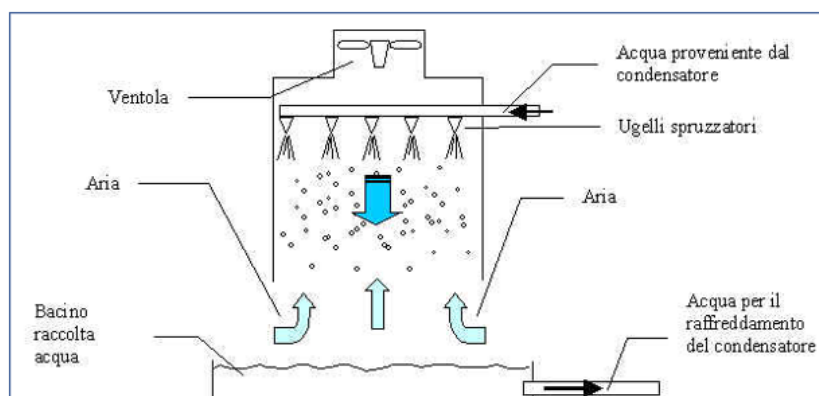


Figura 44 - Elementi principali di una torre di raffreddamento evaporativa [60]

Aspettative e risultati sono sintetizzati nella tabella sotto riportata.

Aspetto ambientale/ Rischio/ Opportunità	Opportunità	Intervento previsto	Risultato atteso	Valutazione della performance
Consumo di materie prime / Emissioni puntuali in atmosfera	Riduzione del consumo di gas naturale e dell'effetto serra	Inverter torri di raffreddamento (ventilatori)	Risparmio previsto di 70 tep/anno pari a 163 t/anno di CO ₂	Nel periodo Gennaio/Aprile 2023 si è registrato un risparmio di 13,5 TEP.

Nella dichiarazione ambientale presentata nel 2023 relativa all'anno 2022 Enipower annuncia agli stakeholders che l'opera è stata portata a compimento definendo il guadagno dei **13,5 tonnellate equivalenti di petrolio** nel periodo da gennaio ad aprile 2023 con una salvaguardia ambientale emissiva di CO₂ pari a **163 tonnellate all'anno** non emesse.



Figura 45 – Dichiarazione ambientale Enipower al 31-12-2022

Intervento al ciclo combinato CC1 per: Sostituzione della palettatura turbina esistente con palette di nuovo design.

L'intervento di upgrade ha previsto la sostituzione di pale della turbina caratterizzate da nuovo design denominate MXL2. Esse hanno nuovo profilo e nuovo materiale di rivestimento. Il vantaggio che si ottiene è la riduzione di adduzione aria di raffreddamento che diversamente va a sommarsi all'aria in camera di combustione aumentandone la temperatura.



Figura 46 – Rotore con calettamento palette turbina a gas [61]

Intervento al ciclo combinato CC1 per: Installazione di un cuscinetto reggispira dotato di pistoni idraulici per la riduzione dei giochi di macchina nelle idonee condizioni di operative e di carico

Il cuscinetto reggispira di nuova installazione denominato RDS (Rotor Displacement System) consente di ottimizzare i giochi di turbina durante la marcia recuperando i maggiori spazi che si creano tra componenti statoriche e rotoriche della stessa a causa della dilatazione termica del rotore. Il sistema è costituito da un nuovo cuscinetto reggispira dotato di pistoni idraulici per permettere il movimento assiale. I pistoni sono azionati da una nuova unità idraulica che, utilizzando olio di lubrificazione di una centralina dedicata, è in grado di mantenere una pressione di 160-180 bar. Il sistema è completato da trasduttori per il monitoraggio in continuo della posizione assiale del cuscinetto.

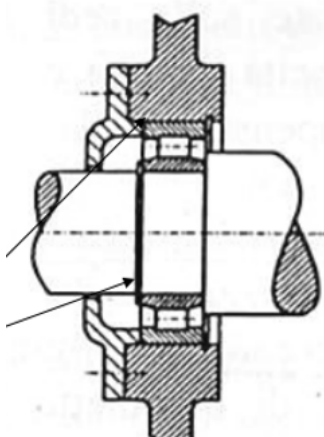


Figura 47 – Nuovo cuscinetto Rotor Displacement System [28]

Intervento al ciclo combinato CC1 per: La sostituzione di componenti della camera di combustione con materiali maggiormente resistenti alle alte temperature e conseguenti minori perdite per raffreddamento

Sono stati effettuate alcune sostituzioni della camera di combustione del turbogas con materiali maggiormente resistenti alle alte temperature, con conseguenti minori perdite per raffreddamento. È stata effettuata, inoltre, la riduzione dell'aria secondaria di raffreddamento.

Aspettative e risultati sono sintetizzati nella tabella sotto:

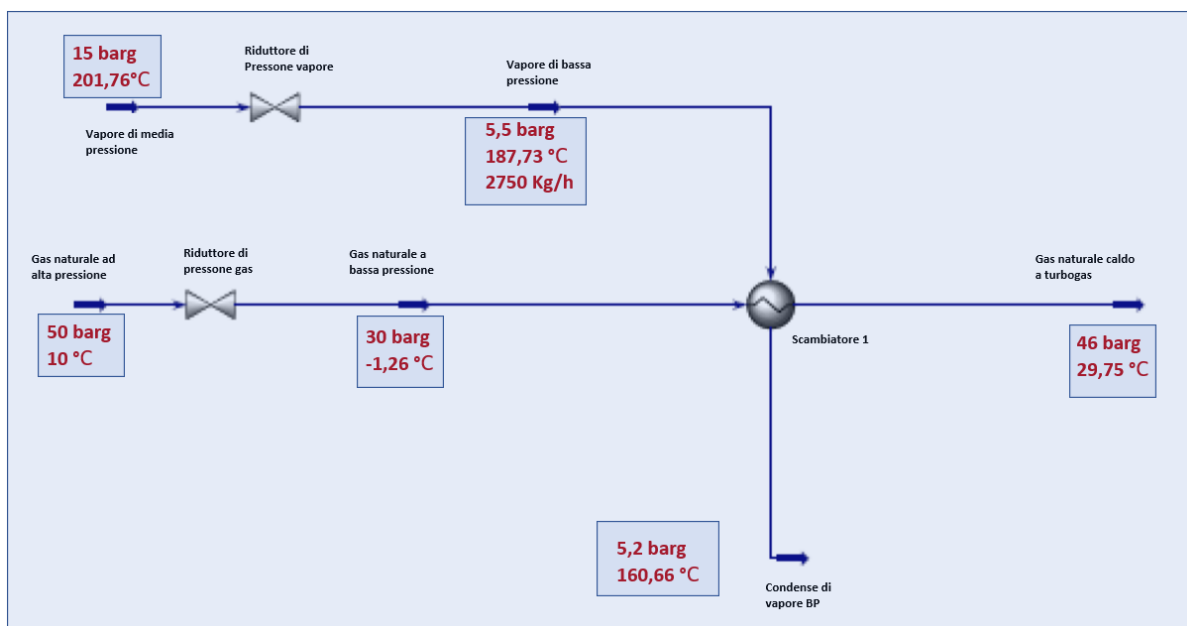
Aspetto ambientale/ Rischio/ Opportunità	Opportunità	Intervento previsto	Risultato atteso
Consumo di materie prime / Emissioni puntuali in atmosfera	Riduzione del consumo di gas naturale e dell'effetto serra	Upgrade Turbina a gas CC1 (MXL) ³	Risparmio di 1.028 tep/anno

Beneficio apportato con aumento del rendimento del ciclo combinato nel range 0.1 – 0.3 % partendo da valori già in linea con le BACT di cui alla Decisione CE2326 del 30/11/2021

Modifica sul circuito di preriscaldamento di gas naturale con condense calde vapore BP

I recuperi energetici sono realizzati mediante l'installazione di scambiatori di calore a fascio tubiero, utilizzando come fluidi termici condense calde provenienti dai condensatori finali del ciclo combinato e condense di blow-down. Prima della modifica effettuata, il gas naturale veniva riscaldato, precedentemente all'invio ai rispettivi turbogas, utilizzando vapore di bassa pressione (5,5 barg surriscaldato) proveniente dai servizi di interconnessioni delle utilities della adiacente raffineria Eni.

Circuito prima della modifica



Circuito dopo la modifica

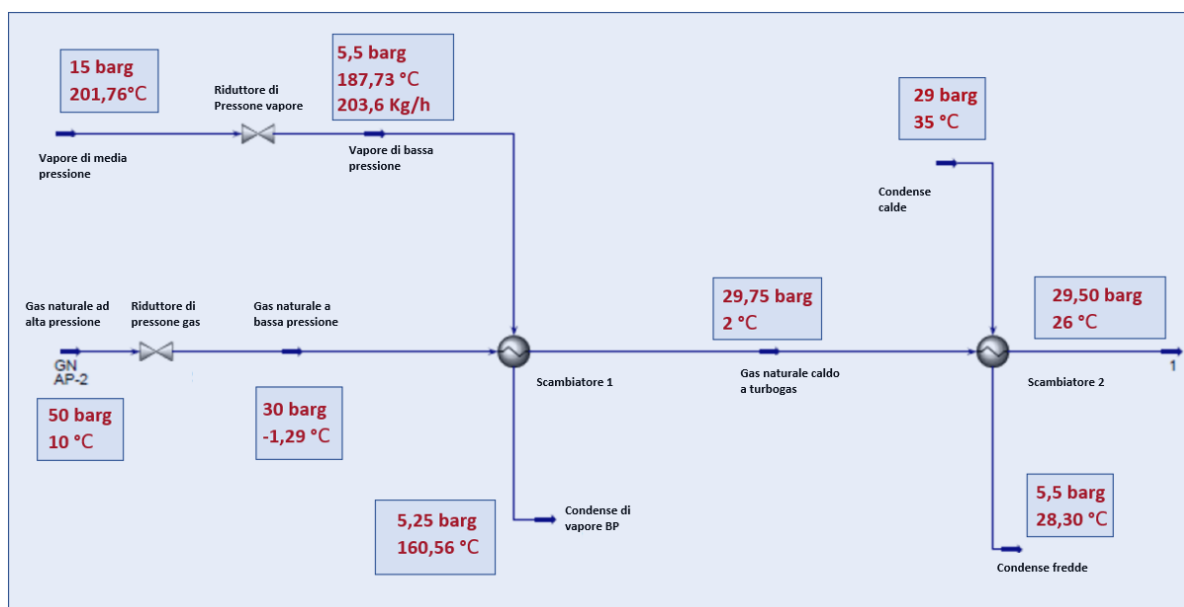


Figura 48 – Schemi dell’impianto prima e dopo la modifica di aggiunta dello scambiatore

Complessivamente gli interventi realizzati a partire dal 2014, anno in cui Enipower ha introdotto il monitoraggio sistematico e la rendicontazione dei benefici apportati dalle iniziative di efficienza sulla base dei principi della norma ISO 50001, hanno consentito di ridurre le emissioni dirette di gas climalteranti, per minore consumo di combustibile, di un valore che cumulativamente nel 2022 è stato pari a ca. 63.000 tCO₂/anno (ca. **27.000 tep/anno**).

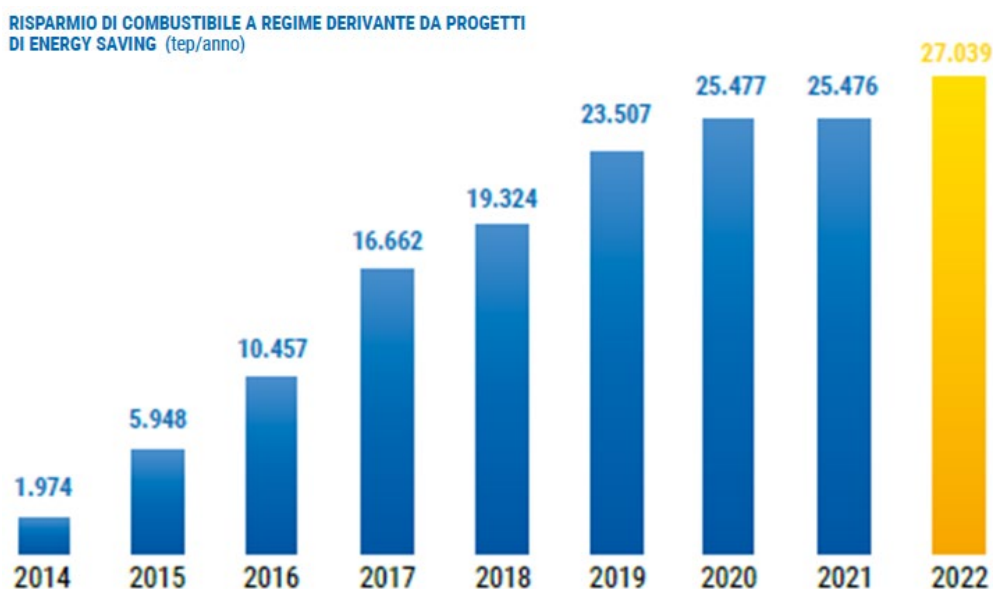


Figura 49 – Rappresentazione del trend di miglioramento negli anni misurato in tonnellata equivalente di petrolio TEP

5 Esempi di gestione e conduzione energeticamente efficiente di un generatore di vapore, della rete di distribuzione e ottimizzazione degli usi finali

La conoscenza profonda dell'impianto e di tutte le variabili interne ed esterne che ne influenzano il funzionamento è la condizione necessaria per produrre vapore nel pieno rispetto dei requisiti, al fine di risparmiare energia e soprattutto ridurre i costi di produzione. È importante soffermarsi su ogni singola apparecchiatura per rispettare il più possibile il funzionamento ai dati nominali: la caldaia, ad esempio, non deve essere esercitata con un carico superiore a quello di targa, in quanto produrrebbe vapore ad una pressione più bassa, e si formerebbero sedimenti solidi nella condensa.

Di seguito si analizzeranno in rassegna alcuni accorgimenti che miglioreranno la resa energetica.

5.1 Gestione eccesso d'aria ottimale in camera di combustione

Per i generatori che utilizzano l'aria come mezzo ossidante per sviluppare la reazione di ossido riduzione in camera di combustione è necessario fornire un addendum di aria rispetto al valore scaturito dalla stechiometria della reazione. Il motivo è che nella pratica l'aria teorica non è sufficiente, in quanto molteplici sono i fattori che ne determinano il bisogno, quali la geometria del focolare, il tipo di combustibile ed il tipo di testina del bruciatore.

$$\begin{array}{ll} \text{Eccesso d'aria} & \text{E} = \text{Volume aria effettivo} - \text{Volume aria teorico} \\ \text{Coefficiente} & \\ \text{di eccesso d'aria} & e = \frac{\text{Volume d'aria effettivo}}{\text{Volume d'aria teorico}} \end{array}$$

È quindi indispensabile che ci sia l'eccesso d'aria, ma questo non deve eccedere, in quanto aumenterebbero non di poco le perdite per calore sensibile al camino P_{cs} , dove K_s è detta costante di Hassenstein, T_f è la temperatura dei fumi e T_a la temperatura ambiente [58]:

$$P_{cs} = K_s \frac{T_f - T_a}{\% \text{CO}_2}$$

Oltre a ridurre il rendimento del generatore di vapore per dispersione di calore per convezione, un valore di eccesso d'aria troppo ampio può influenzare la formazione di ossidi di azoto NO_x durante la combustione: maggiore sarà il valore di E , maggiore è la temperatura di fiamma e di conseguenza la produzione di NO_x .

Altre problematiche legate a un valore di eccesso d'aria elevato sono quelle delle azioni corrosive dell'ossigeno all'interno della membratura metallica, con ovvie conseguenze degradanti nel tempo. Di contro, un eccesso d'aria insufficiente porterebbe alla produzione di particelle incombuste, con produzione di monossido di carbonio in atmosfera, o comunque una riduzione del rendimento energetico del generatore, in quanto aumenterebbero le perdite per incombusti P_{co} dove K_c è una costante che dipende dal combustibile [59]:

$$P_{co} = K_c \frac{\% CO}{\% CO + \% CO_2}$$

Notoriamente nei generatori di vapore la portata di combustibile è controllata dalla pressione del vapore nel collettore di vapore in uscita. Ci sarà pertanto una strumentazione chiamata "PIC" (pressione indicata e controllata), che è un trasmettitore di pressione che invia la sua misura ad un controllore. Se quest'ultimo registra un abbassamento di valore (dovuto ad esempio ad un repentino aumento del consumo dell'utenza) la caldaia dovrà essere predisposta a bruciare più combustibile per sopperire alla variazione della domanda. La logica implementata sarà quella di temporizzare due azioni disgiunte a due servomeccanismi distinti: in primis si invia un segnale apertura incrementale alla regolatrice di aria comburente posta sulla mandata del ventilatore sempre in marcia; successivamente si invierà un segnale di apertura incrementale alla regolatrice del combustibile.

La logica di assicurare sempre stabilità della reazione di combustione vale anche al contrario, quando cioè il PIC misura un valore troppo alto di pressione: prima si ridurrà il combustibile, successivamente la portata dell'aria comburente.

Ci sono diagrammi che prendono il nome da colui che per primo analizzò i dati sperimentali dei prodotti di combustione "Wilhelm Ostwald (1853 Lettonia, 1932 Lipsia-Germania) che aiutano a capire se il punto di lavoro è sulla ipotenusa massima (combustione perfetta) oppure al di sotto (combustione con incombusti).

Ogni combustibile ha il suo diagramma; in seguito, si rappresenta quello del gasolio.

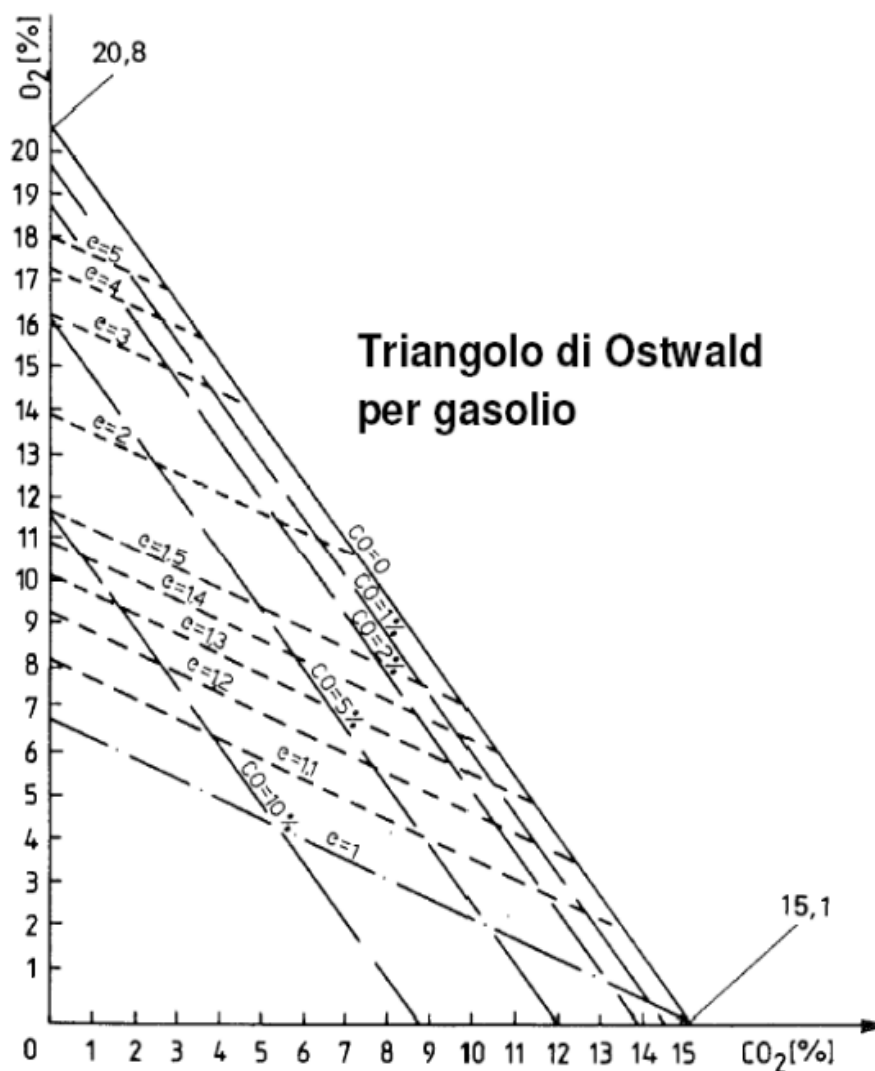


Figura 50 - Triangolo di Ostwald del gasolio [29]

5.2 Pulizia delle superfici di scambio termico del generatore di vapore

Le superfici di scambio termico saranno inevitabilmente sedi di accumulo di impurità e sostanze indesiderate che col tempo si stratificano, inficiando così l'efficienza energetica. La resistenza termica totale diventa pertanto un parametro del sistema non più costante, ma variabile nel tempo.

Un parametro che offre un indice qualitativo circa gli accumuli di sostanze indesiderate delle superfici di scambio termico è la "temperatura dei fumi al camino" T_f (a parità di combustibile bruciato). La fenomenologia termodinamica si evince dai flussi di calore in figura 51 a destra, ovvero una quota significativa di energia associata ai gas di scarico viene persa in atmosfera.

C'è un secondo aspetto di cui tener conto: il flusso termico Q è invariante ai diversi carichi, ed è pari a $Q = K \cdot S \cdot \Delta T = K \cdot S \cdot (T_2 - T_1)$ in cui T_2 la temperatura parete esterna e T_1 la

temperatura parete interna. Il coefficiente di conducibilità termica del metallo è superiore a quello dei depositi calcarei, pertanto se K diminuisce, non può che aumentare il ΔT , ossia il salto di temperatura tra la superficie interna ed esterna del tubo. Il metallo sarà pertanto soggetto a tensioni interne e stress termico dovuto a dilatazioni non uniformi, sino ad arrivare alla rottura.



Figura 51 – Raffigurazione della differenza del flusso di calore scambiato in una tubazione pulita e incrostata internamente

$$Q = K \cdot S \cdot \Delta T = K \cdot S \cdot (T_2 - T_1)$$

Temp. parete
esterna

Temp. parete interna



Figura 52 – Quantità di calore scambiata tra la superficie interna ed esterna alla tubazione

L'accumulo di impurità sulle superfici di scambio termico lato fumi è praticamente trascurabile se si utilizzano combustibili gassosi, mentre assume una certa importanza se si utilizzano combustibili liquidi (olio combustibile o gasolio). In questi casi, anche se oramai rari grazie agli accordi internazionali di riduzione uso combustibili fossili, si devono prevedere soffiature di fuliggine periodiche, normalmente effettuate con vapore di bassa pressione.

5.3 Installazione di dispositivi per il recupero di calore

La strategia del recupero del calore in ambito termotecnico non è una novità degli anni della transizione energetica in atto. Lo dimostra il fatto che un libro scritto negli anni Sessanta descriveva ampiamente sia "l'economizzatore", sia il "preriscaldatore di aria comburente".

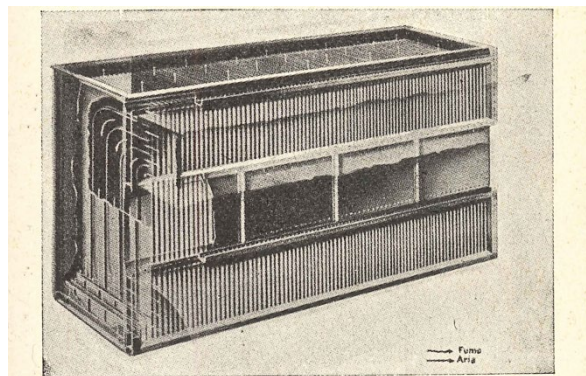
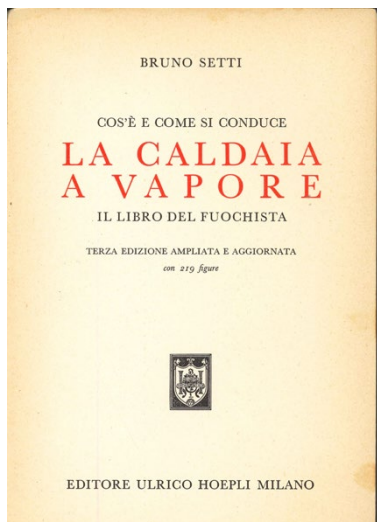


Fig. 12.2. — Preriscaldatore d'aria a lamiere piane, come disegnato in fig. 12.1. L'aria fredda entra in alto di fianco ed esce in basso nei condotti appena ombreggiati in figura. Ogni cella nella quale passa l'aria è fiancheggiata da due celle analoghe nelle quali scorre il fumo dal basso verso l'alto.

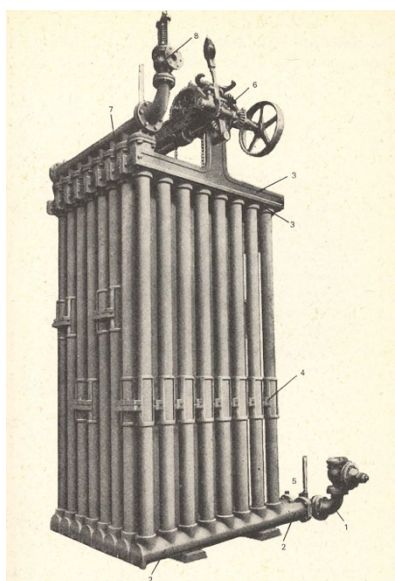


Fig. 11.2. — Economizzatore a tubi lisci. I tubi sono riuniti in sezioni in basso con i diramatori (2), in alto con i collettori (3). L'acqua fredda arriva da (1); la sua temperatura all'entrata nei diramatori è segnata dal termometro (5). L'acqua calda esce da (7) e va in caldaia. In (8) è una valvola di sicurezza caricata a molla. In (6) sono i meccanismi per il movimento di salita e di discesa dei raschiatori di fuliggine (4).

Figura 53 - Immagine di un testo degli anni Sessanta

L'economizzatore è il cuore pulsante del recupero energetico di un generatore di vapore: esso è uno scambiatore di calore che trasferisce energia termica dei gas di scarico all'acqua di alimento del generatore. La tecnologia moderna ha ridotto sia la caduta di pressione dei due fluidi in controcorrente, sia la superficie totale di scambio di calore.

Il preriscaldatore dell'aria comburente recupera calore dai gas di scarico che fuoriescono dal camino. Si tratta di scambiatori aria - aria; tipicamente sono di grandi dimensioni e comportano importanti cadute di pressione. Il risultato finale è una riduzione di consumo di combustibile a parità di producibilità di vapore prodotto: ne consegue un miglioramento dell'efficienza del bilancio termico. L'esercizio e l'esperienza ha con il tempo cercato un trade off tra i vantaggi energetici assicurati e gli svantaggi derivanti dal numero non

trascurabile di manutenzioni a guasti di simili apparecchiature. Le problematiche nascono quando nel preriscaldatore lato fumi si creano zone fredde che rasentano il punto di rugiada acido, variabile del combustibile adottato. La percentuale di zolfo sotto forma di anidride solforica SO_3 reagisce con il vapor d'acqua presente, generando acido solforico, con le ovvie conseguenze disastrose di corrosione. Meno impattante è la reazione tra vapor d'acqua e anidride carbonica, con formazione di acido carbonico: è un acido debolissimo, ma la sua permanenza nel tempo contribuisce ai processi di corrosione.

5.4 Installazione di un sistema automatico di spurgo acqua di caldaia

Una maniera semplice e rapida per effettuare un controllo della concentrazione delle sostanze disciolte nell'acqua di caldaia, oltre al monitoraggio della qualità dell'acqua in ingresso, è l'apertura di una valvola di scarico che si trova nella parte più bassa del circuito acqua vapore. È un'operazione che permette di abbattere velocemente alti valori di concentrazione dei sali che pericolosamente possono aver superato i limiti consigliati dalla Norma UNI 7550. È un'operazione che tuttavia ha un costo energetico importante. Un accorgimento immediato che non prevede onerosi investimenti è quello di incrementare l'acqua di reintegro del circuito di ritorno delle condense: maggiore è questa portata (a patto che non sia inquinata), maggiore sarà la diluizione. L'acqua di spurgo contiene il liquido saturo alla pressione di caldaia. Dalle tabelle del liquido saturo è facile dedurre l'entalpia specifica H_L e capire di quanto sia importante la sua aliquota energetica. Questa è una operazione che, se non viene eseguita al bisogno, ovvero quando la concentrazione dei Sali Totali Disciolti (TDS) o silice o alcalinità supera i valori massimi accettabili citati nella norma UNI 7550, rischia di compromettere l'integrità dell'asset.

Per capire quale deve essere la portata massica dello spurgo rispetto alla portata di acqua di alimento si utilizza la seguente formula:

$$S \% = 100 \frac{C_a}{C_c}$$

Percentuale di portata massica di spurgo rispetto alla portata massica dell'acqua di alimento

C_a → E' la concentrazione piu' critica in mg/L di un determinato sale nell'acqua di caldaia

C_c → E' la concentrazione massima ammessa per lo stesso sale

Controllare i flussi in un sistema di regolazione in continuo è impresa ardua, in quanto qualsiasi strumento misuratore di portata sarebbe ingannato dal passaggio all'interno del suo "disco orifizio venturi" sia dell'acqua sotto forma di vapore, sia di acqua del liquido

saturo. Si preferisce quindi stimare le portate riferendosi in proporzione alle concentrazioni e/o conducibilità.

Il sistema di spurgo rappresentato in figura progettato dall'azienda Spiraxsaco funziona in modalità automatica con flusso on/off.

Impianto di spurgo automatizzato verso cassa spurghi

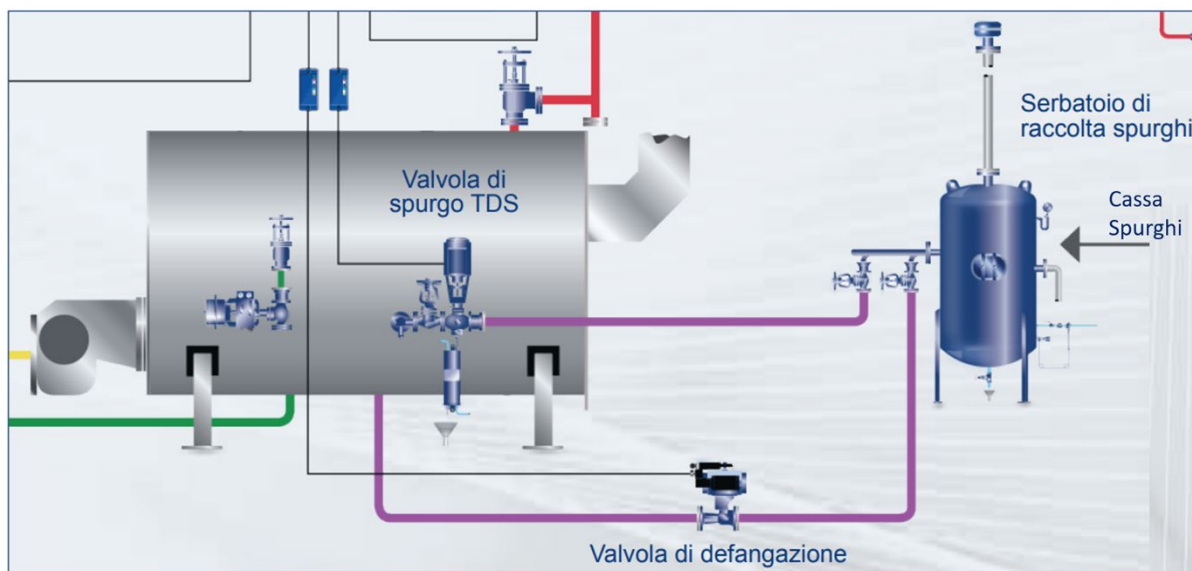


Figura 54 – Rappresentazione di un sistema di drenaggio collettore acqua vapore [30]

Possono essere notate due differenti tipologie di spurghi: spurgo TDS e spurgo di defangazione. Quest'ultimo ha una sezione di tubo maggiore perché serve a far defluire eventuale fanghiglia che potrebbe accumularsi, la quale è più viscosa e difficile da far defluire. Non a caso lo stacco è dal sottopancia serbatoio.

5.5 Recupero di energia dagli spurghi

Ogniqualvolta si effettua uno spurgo di acqua di caldaia, soprattutto quando questo avviene in modo continuo, è economicamente vantaggioso recuperare l'energia che lo spurgo porta con sé; in teoria essa può essere recuperata nella sua interezza: sia l'aliquota di energia termica nel vapore di flash (che può alimentare ad esempio il collettore di bassa pressione), sia il calore presente del condensato che rimane sul fondo della cassa spurghi (ad esempio per preriscaldare l'acqua di reintegro in caldaia).

5.6 Ottimizzazione del trattamento chimico/fisico dell'acqua

È importante che il conduttore di generatore di vapore sappia in qualsiasi momento quali sono le caratteristiche chimico fisiche dell'acqua, e che queste siano sempre conformi ai parametri della norma UNI 7550.

NORMA UNI – CTI 7550 REQUISITI DELLE ACQUE PER GENERATORI DI VAPORE E RELATIVI IMPIANTI DI TRATTAMENTO

Tab. IV – Valori limite e frequenza dei controlli consigliati

Tipo generatore		A tubi di fumo e cornovaglia												A tubi d'acqua												Circolazione forzata				Note
Pressione di esercizio del generatore (bar)		Acqua surriscaldata		15		25		20		40		60		80		100		130		160		> 180		Sotto-critica		Sopra-critica				
Parametri	Unità di misura	Limite	Frequenza	Limite	Frequenza	Limite	Frequenza	Limite	Frequenza	Limite	Frequenza	Limite	Frequenza	Limite	Frequenza	Limite	Frequenza	Limite	Frequenza	Limite	Frequenza	Limite	Frequenza	Limite	Frequenza	Limite	Frequenza			
Acqua di alimento																														
pH	—	7,5 a 9,5	T S	7,5 a 9,5	T S	7,5 a 9,5	T S	8,5 a 9,3	T S	8,5 a 9,3	T S	9 a 9,3	T S	9 a 9,3	T S	9 a 9,3	T S	9 a 9,3	T S	9 a 9,3	T S	9 a 9,3	T S	9 a 9,3	T S	9 a 9,3	T S	9 a 9,3	T A	[D]
Durezza totale	mg CaCO ₃ /kg	5	T	5	T	5	T	5	T	0,5	T	ass.	T	ass.	T	ass.	T	ass.	T	ass.	ass.	T	ass.	ass.	ass.	ass.	ass.	ass.	T A	[E]
Ossigeno	µg O ₂ /kg			100	S	50	S	100	S	10	S	10	G	7	G	7	G	7	G	7	G	7	G	7	G	5	T A	5	T A	[F]
Anidride carbonica libera	µg CO ₂ /kg			200	S	200	S																						[F]	
Ferro	µg Fe/kg			100	S	100	S	100	S	100	S	100	S/2	50	S/2	50	S/2	50	S/2	50	S/2	30	S/2	15	S/2	10	S/2	10	S/2	[G]
Rame	µg Cu/kg			100	S	100	S	100	S	10	S/2	10	S/2	5	S/2	5	S/2	5	S/2	5	S/2	5	S/2	5	S/2	3	S/2	2	S/2	[G]
Sostanze oleose	mg/kg	3	T	1	T	1	T																						[H]	
Sostanze organiche STD	µg/kg							5	S	3	S	3	S	3	S	3	S	3	S	3	S	3	S	3	S					[H]
Conducibilità totale	µS/cm											10	T A	10	T A	10	T A	10	T A	10	T A	10	T A	100	G T A	50	G T A	50	G T A	[I] [L] [M]
Conducibilità acida	µS/cm																						1	T A	1	T A	1	T A	[N]	
Silice	µg SiO ₂ /kg																						20	S/2	20	A G	10	A G		
Acqua del generatore																														
pH	—	9 a 10	T S	9 a 12	T S	9 a 11,7	T S	9 a 11,7	T S	9 a 11,7	T S	9 a 10,6	T S	9 a 10,4	T S	9 a 10,2	T S	9 a 10,2	T S	9 a 10,2	T S	9 a 9,5	T S	9 a 9,4	T S					
Alcalinità totale	mg CaCO ₃ /kg																													
Durezza totale	mg CaCO ₃ /kg	5	T	5	T	5	T	5	T	5	T	5	T	5	T	5	T	5	T	5	T	5	T	5	T					
Conducibilità totale STD	µS/cm	2000	G	7000	G	6000	G	7000	G	6000	T	3500	T	2500	T	1500	T	1000	T	500	T	100	T	10	T					[I] [M]
Silice	mg SiO ₂ /kg	1000	S	3500	S	3000	S	3500	S	2500	S	1500	S	1000	S	500	S	100	S	100	S	2	S	0,5	G	0,35 a 0,15	G	0,15	G	[P]
Fosfati	mg PO ₄ /kg	150	S	150	S	150	S	100	S	35	G	8	G	5	G	3	G	1	G	0,5	G	0,5	G	0,5	G	2	G	2	G	[Q]
Conducibilità acida	µS/cm	30	S	30	S	30	S	30	S	10	G	5	G	5	G	5	G	5	G	5	G	5	G	5	G					

Condizionanti: per mantenere i valori indicati, oltre all'uso corretto dei sistemi di trattamento acqua e dello spurgo si presuppone l'utilizzazione di condizionanti. I dosaggi di tali reagenti ed i limiti sono in relazione alla natura degli stessi. Le frequenze di analisi relative dipendono pure dalla loro funzione; in qualche caso per il loro controllo possono essere eseguite determinazioni dei parametri sui quali agiscono (per esempio, pH, O₂, ecc.).

Figura 55 – Norma UNI 7550 – Parametri concentrazioni massime ammissibili [31]

5.7 Gestione delle pareti refrattarie del generatore di vapore

Un controllo periodico attraverso una metodologia di indagine non distruttiva con analisi termografica consente di riscontrare la presenza di crepe o rotture. Le immagini vanno confrontate con le precedenti archiviate, al fine di ricercare eventuali diverse colorazioni. Lo stesso controllo andrebbe effettuato per le tubazioni coibentate.



Figura 56 – Esecuzione di una analisi termografica del refrattario [32]

5.8 Riduzione del numero dei bruciatori in servizio

La scelta del numero di bruciatori accesi quando si hanno più generatori in parallelo su un collettore vapore unico è compito strategico del responsabile di centrale, che deve valutare, ad esempio, tra la "disponibilità" immediata di una caldaia in "riserva calda", pronta per essere messa a pieno regime, e la "affidabilità": quest'ultima può venir meno, in quanto se la caldaia viene lasciata accesa con un solo bruciatore, questo non potrà riscaldare in maniera uniforme la camera di combustione; ciò potrebbe essere foriero di danni e quindi ridurre il livello di affidabilità.

La scelta dovrà essere frutto di un "trade-off": favorire l'affidabilità dell'intero impianto oppure l'affidabilità del generatore di vapore in "riserva calda".

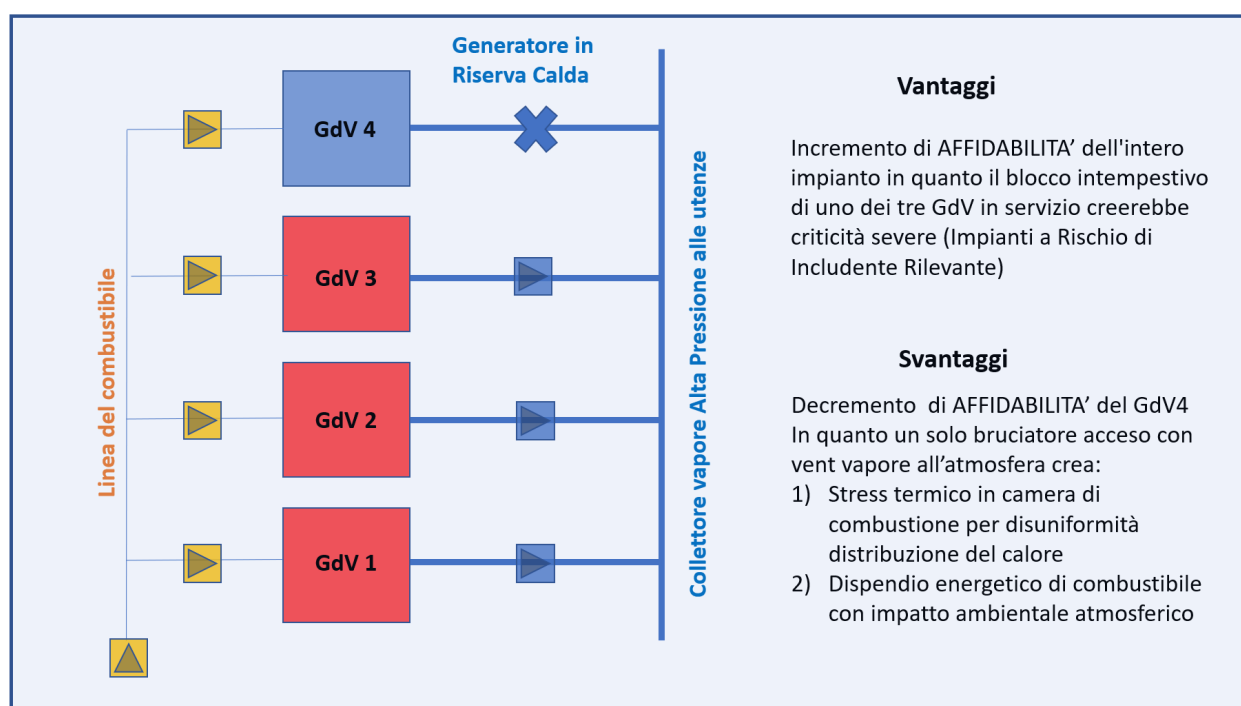


Figura 57 – Schema semplificato di batteria di generatori di vapore in parallelo con riserva calda

Taluni assetti vanno concordati e autorizzati dal Ministero Ambiente e Territorio, in ambito "Autorizzazione Integrata Ambientale", definendo le modalità di esercizio con l'obiettivo di scegliere sempre, caso per caso, la soluzione economicamente vantaggiosa.

5.9 Gestione del combustibile

La gestione del combustibile da bruciare nei generatori di vapore dei grandi siti industriali e centrali di produzione energia elettrica è un compito difficile, specie in questo periodo storico di forte instabilità geopolitica internazionale; inoltre, non bisogna dimenticare l'esigenza di perseguire l'obiettivo n.7 della Agenda 2030 (assicurare l'accesso universale ai servizi energetici economici, affidabili, sostenibili e moderni).

È in corso una transizione energetica in evoluzione continua, caratterizzata dalla ricerca, al momento attuale, di un mix energetico che consenta di arrivare, in tempi medi, alla completa estinzione dell'utilizzo del combustibile fossile.

Sempre su scala industriale, la scelta del combustibile dipende innanzitutto dal generatore di vapore in dotazione, oltre che dal piano di monitoraggio e controllo che, in ambito Autorizzazione Integrata Ambientale, indica la tipologia che si è autorizzati a bruciare.

La maggior parte dei generatori di vapore in funzione a livello nazionale è a piccolo volume d'acqua e consente di bruciare combustibili misti. Il combustibile maggiormente usato è il gas naturale, mentre il gasolio viene bruciato soltanto in fase di primo avviamento.



Figura 58 – Obiettivo 7 Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile

5.10 Le prestazioni del degasatore termofisico

Il degasatore termofisico, nella stragrande maggioranza degli impianti industriali, è parte integrante del sistema di trattamento acque di alimento dei generatori di vapore. Esso è di solito l'ultimo passaggio di lavorazione ed è posizionato in quota rispetto al baricentro della girante della pompa di alimento: questa costituisce una scelta strategica volta a creare una prevalenza netta positiva di aspirazione alla pompa, in quanto influisce sul valore di 'NPSH (Net Positive Suction Head), in modo tale da prevenire fenomeni di cavitazione all'interno della girante (supponendo che trattasi di pompe di tipo centrifugo).

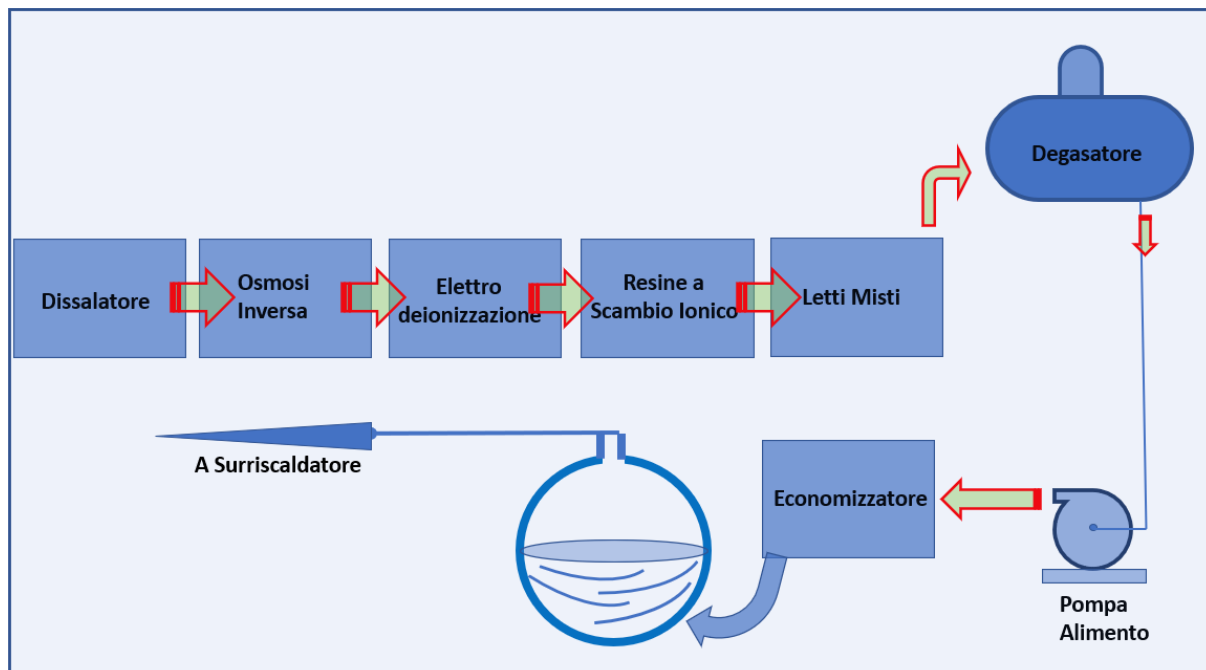


Figura 59 - Schema semplificato di una ipotetica filiera del processo trattamento acqua di alimento di una centrale termoelettrica

Il degasatore termofisico svolge le seguenti funzioni:

- Abbatte l'ossigeno e l'anidride carbonica;
- Preriscalda l'acqua in alimento alla caldaia;
- Serbatoio di accumulo (in quota) per l'acqua di alimento;
- Miscelare le condense pulite di ritorno dalle utenze con l'acqua di reintegro.

Il vapore di bassa pressione viene fatto fluire in controcorrente all'acqua ancora ricca di gas disciolti: essa, riscaldandosi, riduce il suo potere solubile. La separazione dei gas viene favorita se, anziché lavorare alla pressione atmosferica, si lavora ad una pressione ridotta.

“Il diagramma seguente mostra il contenuto di ossigeno disciolto nell'acqua in funzione della pressione e della temperatura. Si può notare che, alla temperatura di ebollizione di 105°C per la pressione di esercizio di 1,2 bar assoluti, ci troviamo in una zona in cui il contenuto di O₂ nell'acqua è praticamente nullo” [33].

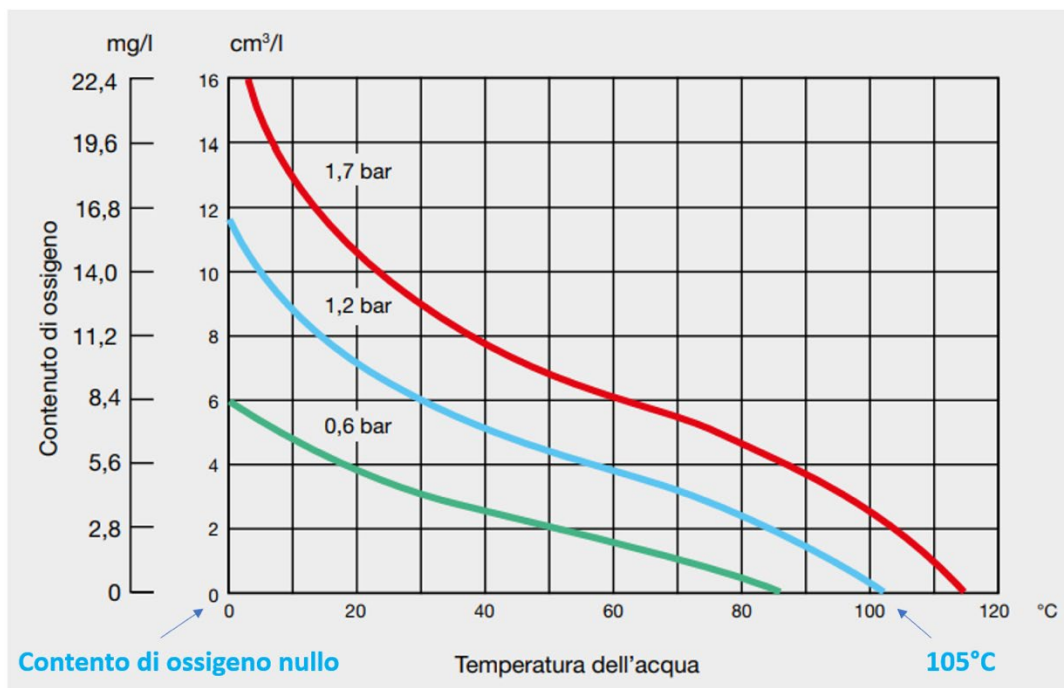


Figura 60 – Andamento della concentrazione dell'ossigeno in funzione della temperatura e della pressione di lavoro [33]

5.11 Gestione dei circuiti di distribuzione vapore alle utenze

Una buona progettazione del circuito di distribuzione del vapore alle utenze è una *conditio sine qua non* per assicurare un regolare utilizzo e funzionamento dell'intero impianto. Casi di presenza di vizi dell'opera dovuti ad errori di progettazione della rete di distribuzione potrebbero inficiare gli sforzi fatti per ottenere l'efficienza energetica ed in generale perseguire gli obiettivi dell'asset integrity. Lo scopo finale è quindi servire le utenze con la qualità del vapore prevista per specifiche di progetto.

Il vapore saturo secco e/o surriscaldato è un fluido termovettore che non necessita di macchine operatrici per essere movimentato: può raggiungere anche velocità di 70/80 km/h a seconda della differenza di pressione che intercorre tra il punto di partenza ed il punto di arrivo.

Indicazioni progettuali vengono egregiamente strutturate da Luciano Piovan, autore dell'opera "Progettare impianti a vapore" – 2010 -Dario Flaccovio Editore a cui qui si fa riferimento per la prosecuzione del presente paragrafo [34].

Per quanto riguarda il dimensionamento delle tubazioni i dati necessari per il calcolo sono:

- Portata;
- Velocità;
- Perdite di carico (di pressione);
- Lunghezza.

Altri e molteplici aspetti da non trascurare [34]:

- Assicurare drenaggi con adeguati scaricatori e pozzetti di raccolta di condensa;
- La pendenza del tubo deve essere adeguata al diametro e alla lunghezza;
- Effettuare lo stacco della presa di vapore all'utenza dall'alto;
- Le riduzioni di diametro di tubazioni tali da evitare sacche di condensa;
- Distribuire dei separatori di condensa nei punti strategici per evitare colpi d'ariete;
- Si deve prevedere il riscaldamento assistito per grossi diametri;
- Prevedere sfati d'aria nella parte alte;
- Prevedere una buona coibentazione;
- Prevedere ancoraggi idonei e giunti dilatatori [34].

5.12 Individuazione e riparazione rapida delle fughe di vapore

Le fughe di vapore si verificano potenzialmente in qualsiasi punto dell'impianto, in particolare da accoppiamenti flangiati, valvole, tenute, raccordi, tubazioni, etc.



Figura 61 – Esempi di fughe di vapore

Esse costituiscono innanzitutto un problema di sicurezza per i lavoratori che in prossimità di una fuga sono fisicamente presenti, con rischi fisici multipli quali rischio rumore, rischio di ustione, rischio da taglio. Quest'ultimo, in particolare, è molto subdolo se provocato da sfati di vapore a pressioni elevate in quanto, essendo invisibile per un lungo tratto dal punto in cui c'è la perdita, assume la stessa efficacia di taglio di una potente sega elettrica.

Per eliminare le perdite su tratti di linea vapore con impianto in marcia è utilizzata la tecnica della scatola metallica esterna con iniezione di una sostanza denominata "furmanite", un composto in fogli non vulcanizzato, resistente alle alte temperature e che va temporaneamente a tappare il foro di uscita vapore. La manutenzione vera e propria sarà effettuata poi ad impianto fermo e depressurizzato.

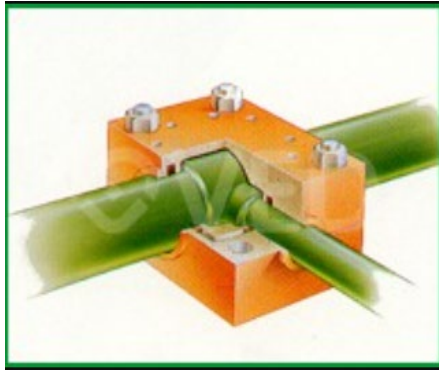


Figura 62 - Esempi di scatole di furmanite per contenimento provvisorio di una fuga pericolosa di vapore [35]



Figura 63 - Operatore in azione durante l'applicazione della scatola di furmanite [36]

5.13 Riduzione degli sfiati di vapore

A differenza della fuga di vapore, lo sfiato di vapore è un'operazione in campo che la maggior parte delle volte deve essere eseguita perché rientra nella prassi operativa, nelle procedure o addirittura nelle disposizioni obbligatorie di legge (ad esempio provare lo sfiato di una valvola di sicurezza manualmente per poi farla richiudere subito).

Gli sfiati vengono effettuati, ad esempio, quando una caldaia è in fase di avviamento; con un solo bruciatore acceso, (quello centrale possibilmente) si riscaldano membrane, refrattario e massa di acqua, la quale, iniziando man mano a riscaldarsi e vaporizzare, convoglia il primo vapore in atmosfera (appunto come sfiato). La strategia di riduzione sfiati consiste allora nel rispettare pedissequamente le istruzioni che indica il costruttore sull'intervallo di tempo necessario, e nel non far fluire per un tempo ancora maggiore.

5.14 Gli usi finali ed il recupero della condensa

La conoscenza approfondita del bisogno energetico di una certa utenza consente di non eccedere con la fornitura inutilmente maggiorata di massa di vapore.

L'energia termica recuperata dalla condensa è concentrata in quella massa di fluido che ha ceduto calore e che deve far spazio subito ad altro vapore che svolgerà la stessa funzione: essa deve pertanto esser rimossa di continuo; non va considerata come scarto, bensì come una risorsa, in quanto ha un valore entalpico maggiore dell'acqua di reintegro in caldaia. Se non inquinata, essa non necessita di un trattamento chimico successivo.

Le apparecchiature che compongono un sistema di recupero condense sono: scaricatrici di condensa, serbatoi di recupero di flash, pompe, filtri. La fattibilità economica alla realizzazione va valutata anche in base alla dimensione dell'impianto e, soprattutto, è attuabile se la percentuale di recupero è maggiore dell'80%, sempre in processi dove non c'è vapore a perdere. Maggiore è la condensa che si recupera, minore è l'energia richiesta dal degasatore, minore sarà l'acqua di reintegro, minori sostanze chimiche per il trattamento, minori spurghi di caldaia per maggiore diluizione di acqua di buona qualità.

6 Esempi di innovazione tecnologica nella produzione di vapore

Esiste un forte legame tra “*Industria 4.0*” ed “*Industrial Internet of Things*” in quanto l’analisi dei Big Data oggi in continua evoluzione, ed utilizzati nello scambio di informazioni tra macchine e/o tra macchina ed internet, permette di migliorare la produttività, ridurre gli sprechi e migliorare l’affidabilità dei sistemi.

La ricerca scientifica e la sperimentazione giocano inoltre un ruolo fondamentale nella ricerca di nuovi materiali, offrendo un apporto indispensabile all’ingegneria della manutenzione in questo periodo particolare della “*transizione industriale*”, ovvero in uno scenario in cui gli obiettivi assumono carattere di ambiziosità e multifattorialità. Basti osservare i numerosi paradigmi per conseguire una migliore crescita quali salute, sicurezza, ambiente, qualità, società inclusiva, economia circolare [37].

6.1 Applicazione del modello matematico di controllo automatico predittivo: ottimizzazione dei parametri operativi e miglioramento delle performance (Politecnico di Milano e Cannon Bono Energia)

È stata condotta una ricerca congiunta tra Luca Ferrarini del Politecnico di Milano e Antonio Landi della società Cannon Bono Energia. Il lavoro finale ha portato alla realizzazione di un sistema di controllo caldaia di ultima generazione basato su un modello di controllo predittivo (MPC). Tale modello viene utilizzato per simulare le condizioni future della caldaia in diversi scenari produttivi, al fine di settarla in funzione del parametro da ottimizzare.

Gli studi si sono sviluppati secondo tre fasi, sintetizzate nella seguente tabella:

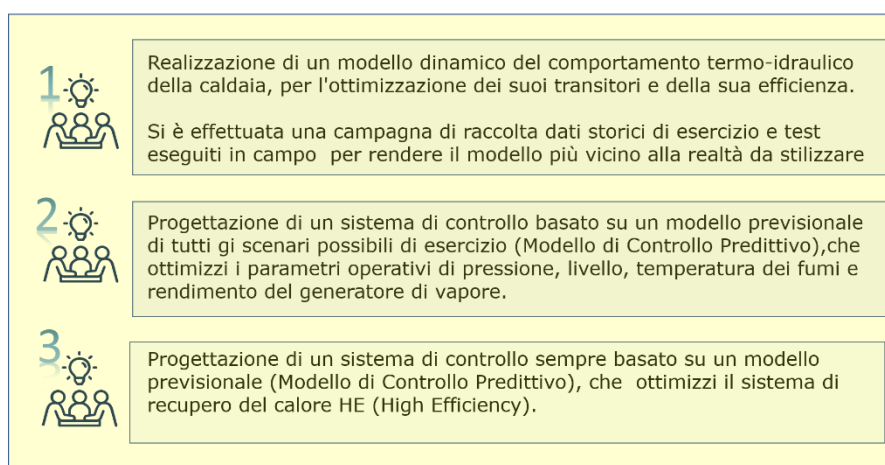


Figura 64 – Tabella di sintesi dei lavori Cannon Bono Energia e Politecnico Milano [38]

Nelle seguenti raffigurazioni invece si apprezza, dall’andamento dei diagrammi, l’efficacia del metodo di controllo MPC (Model predictive control) rispetto al metodo di controllo PID (proporzionale-integrale-derivativo).

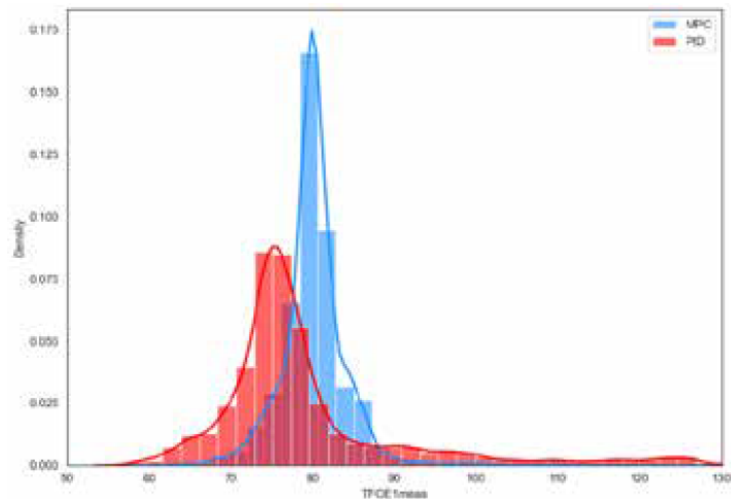


FIGURA 1 – Distribuzione della temperatura dei fumi a valle di un sistema di recupero HE (il valore desiderato è 80°C) con un controllo PID (rosso) e un controllo MPC (blu). Come si vede l'MPC oltre ad essere mediamente più vicino alla temperatura desiderata ha anche una gaussiana con una σ più piccola (la distribuzione dell'MPC è più alta e snella del PID)

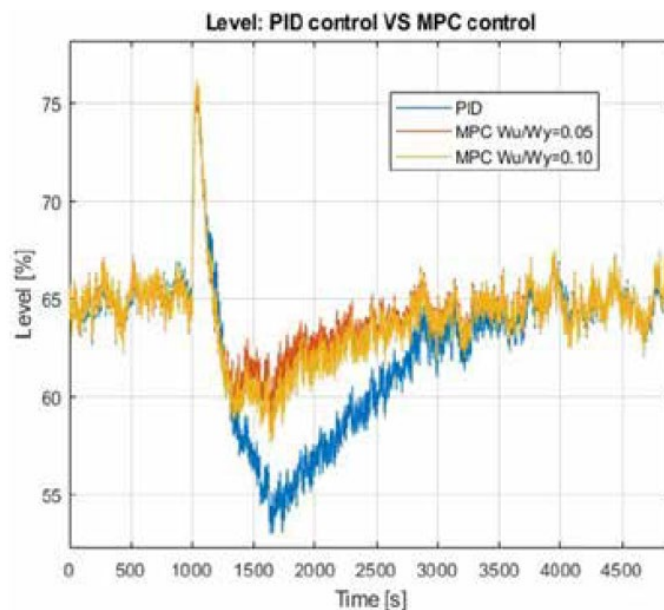


FIGURA 2 – Risposta del controllo di livello (ad un solo elemento) ad una presa di carico veloce (effetto di rigonfiamento, meglio noto come shrink/swell phenomenon), di un PID ottimizzato (blu) e di un MPC (rosso e giallo). Con il controllo PID la riduzione del livello è molto accentuata rispetto al MPC

Figura 65 – Differenze di andamenti di grandezze (temperature e livello) [39]

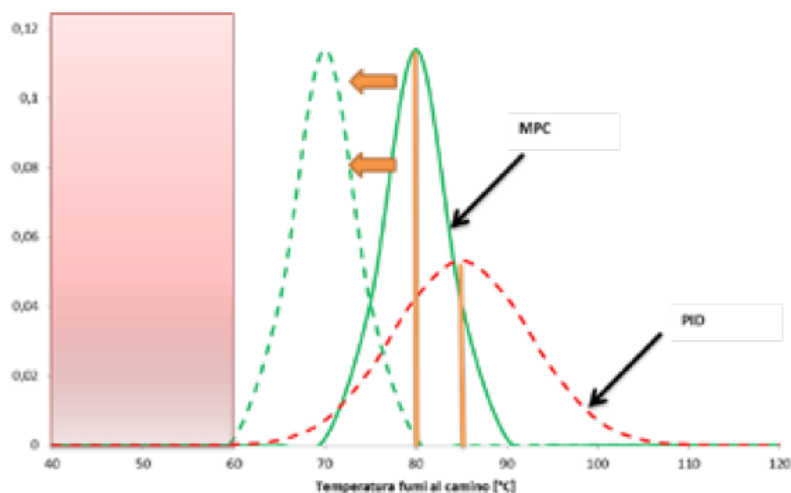


FIGURA 3 - Una gaussiana più “snella” dell’MPC (curva verde) ci permette di impostare una temperatura dei fumi più bassa spostandoci come set point verso la curva verde tratteggiata consentendo così di recuperare altri 10°C sui fumi senza andare a lavorare nella zona rossa della condensazione. Il PID (curva rossa tratteggiata) già lavora al limite non ha più margine

Figura 66 – Differenze di andamenti di grandezze (temperature e livello) [39]







 Rassegna dei risultati ottenuti	
	Aumento della precisione del controllo, ossia una diminuzione dell'errore medio rispetto al set point, che per il livello si è ridotto del 67%, per la pressione dell'80% e per la temperatura di fumi del 53%
	Diminuzione della variabilità degli errori di tracking, ovvero forte restringimento della gaussiana degli errori che permette di lavorare più vicino ai limiti operativi
	Riduzione dei movimenti degli organi di regolazione: per il livello abbiamo una riduzione di 24 volte, per la regolazione della pressione abbiamo una riduzione di circa 3 volte e per il sistema HE di circa 7 volte
	Riduzione di consumi che per il controllo di livello e pressione è difficilmente valutabile ma per il sistema HE può essere valutabile intorno allo 0,5-1% potendo avvicinarci molto alle condizioni operative limite (condensazione)
	Riduzione della possibilità di un errore umano durante la messa a punto e la gestione della caldaia

Figura 67 – Elencazione risultati ottenuti dalla ricerca Polimi/Cannon Bono Energia

6.2 Utilizzo di materiali alternativi all'acciaio per la costruzione di parte finale circuito fumi (Brevetto Nooter Eriksen) [40]

Nooter Eriksen è un'organizzazione che opera nel settore delle attrezzature in pressione, dalla progettazione alla produzione di apparecchiature dedicate alla produzione di energia; l'azienda ha di recente richiesto istanza di brevetto per progettazione e realizzazione di Economizzatori a bassissima temperatura (LLTE low low temperature economizer). L'LLTE è una batteria economizzatrice assemblata con tubi in materiale termoplastico per operare in sicurezza sotto punto di rugiada in piena condensazione, grazie all'ottima resistenza sia all'acqua acida, sia alla corrosione da acido solforico. Si tratta di una soluzione industriale unica per gestire la grave corrosione causata ai materiali in acciaio quando si opera sotto il punto di condensazione dei gas di scarico.



Figura 68 - Rappresentazione di parte dell'economizzatore in materiale termoplastico [40]

Si analizzerà ora maggiormente nel dettaglio il fenomeno chimico fisico che ha portato la Nooter Eriksen a progettare il sistema LLTE. Si è più volte menzionato quanto sia tecnologicamente limitato, al momento attuale, il recupero del calore a valle del camino, a causa delle condense di acqua e della successiva formazione di acido solforico nelle parti di condotta più fredde; esiste infatti un limite di temperatura al di sotto del quale non si può scendere. Il fenomeno della condensazione si verifica quando la temperatura sulla superficie esterna del metallo è inferiore alla temperatura di condensazione del vapore acqueo. Ciò avviene alla temperatura di saturazione corrispondente alla pressione parziale del vapore acqueo nel flusso del gas di scarico, stimabile secondo la legge di Dalton:

$$P_{H_2O} = P_{atm} \cdot \chi_{vol H_2O}$$

Se il combustibile bruciato in camera di combustione contiene zolfo, si formano anidridi solforose ed anidridi solforiche, con successiva formazione di acido solforico. Quest'ultimo condensa a bassa temperatura (tra i 100°C e 140°C) a seconda del contenuto di SO₃ e di acqua nei gas di scarico.

Per il calcolo della temperatura di deposizione dell'acido solforico, Nooter Eriksen utilizza la seguente formula:

$$1000/T_{dp} = 2,276 - 0,0294 \ln(P_{H_2O}) - 0,0858 \ln(P_{SO_3}) + 0,0062 \ln(P_{H_2O}) \ln(P_{SO_3}) \quad (\text{VERHOFF-BANCHERO})$$

Sono stati effettuati test di stress al passaggio dei fumi a bassa temperatura con formazione di condense acide sui materiali metallici indicati nella tabella. Nessuno di loro ha dato garanzia di vita del prodotto compresi tra 25 ai 30 anni.

Elenco materiali metallici sottoposti a test di resistenza agli ambienti acidi

• SA-213-T22	(Low Alloy Steel)
• S355J0WP	(Corten A)
• S-TEN-1	(Low Corrosion Alloy Steel)
• SA 240 304-L	(Stainless Steel)
• AL6XN	(Low Corrosion Stainless Steel)
• Zeron 100	(Low Corrosion Duplex)

Nooter, congiuntamente ad una società tedesca, (Technoform) ha iniziato a progettare e costruire scambiatori con materiali polimerici termoplastici resistenti agli ambienti acidi. Il Polifenilene solfuro termoconduttivo (PPS-GR) si è rivelato un ottimo materiale in quanto c'è buona compatibilità tra le pressioni e temperature tra i due fluidi interagenti negli scambiatori di calore.



Figura 69 – Immagine fotografica del Polifenilene solfuro termoconduttivo (PPS-GR) [41]

Temperatura massima di esercizio T_{max} (PPS-GR) = 200°C

Pressione massima di esercizio P_{max} (PPS-GR) = 30 bar ass

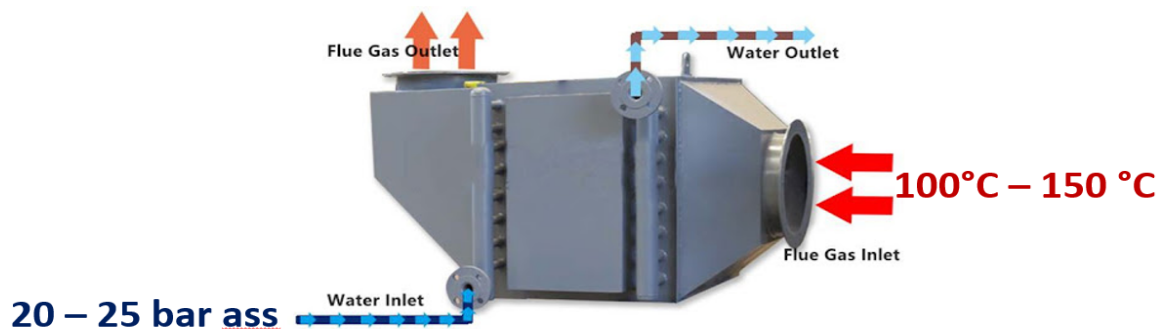


Figura 70 – Rappresentazione delle temperature che mediamente si ottengono nelle caldaie a recupero degli impianti di cogenerazione lato fumi e lato acqua in zona economizzatore [40]

I risultati del test sul materiale PPS-GR immerso in acido solforico al 60% ed alla temperatura di 160°C non hanno dato alcun difetto finale.

Proven Chemical Resistance – Sulfuric Acid


Test setup for Sulfuric acid H_2SO_4

Test conditions:

- Samples submerged in sulfuric acid
- Concentration: 60%
- Temperature: 160°C
- Test duration: 6 months

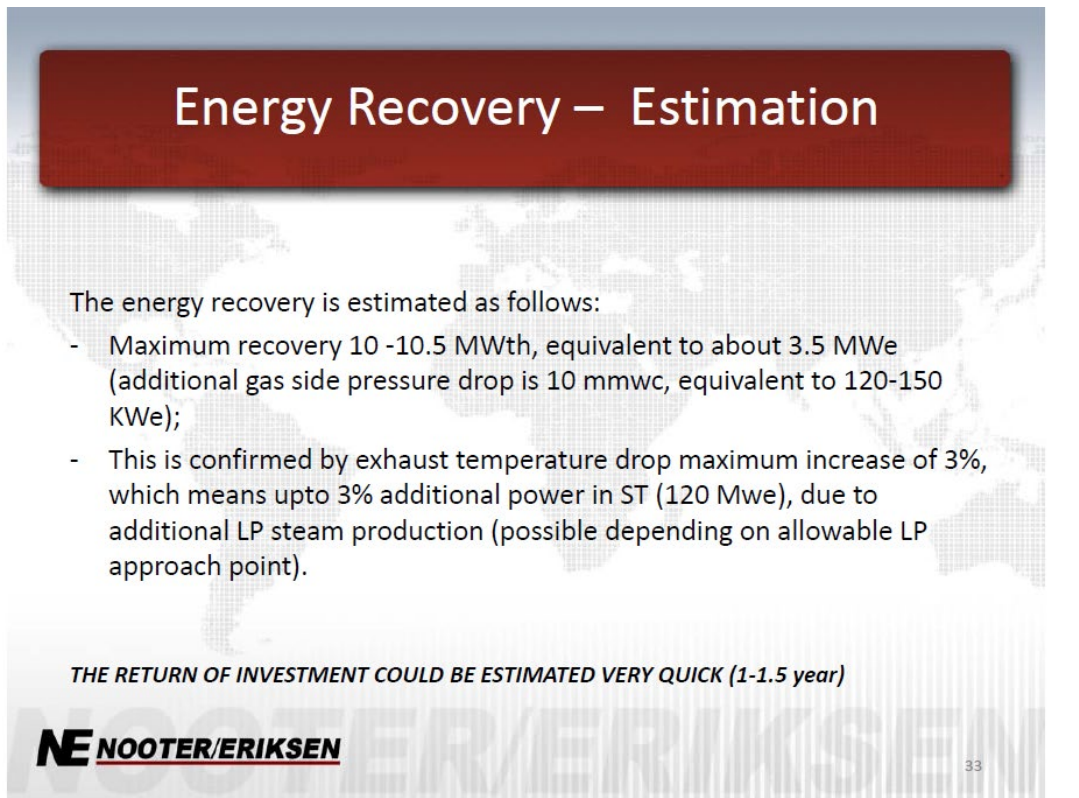
RESULTS:

No visible defects after test in 60% H_2SO_4 at 160 °C



NE NOOTER/ERIKSEN

La stima del risparmio energetico:

A presentation slide titled "Energy Recovery – Estimation" in a dark red box. The background features a faint world map. The text on the slide provides an estimation of energy recovery, listing two points: maximum recovery of 10-10.5 MWth (equivalent to 3.5 MWe) and a 3% increase in exhaust temperature drop leading to additional power in the steam turbine. It also states that the return on investment could be very quick (1-1.5 years). The logo "NE NOOTER/ERIKSEN" is at the bottom left, and the number "33" is at the bottom right.

Energy Recovery – Estimation

The energy recovery is estimated as follows:

- Maximum recovery 10 -10.5 MWth, equivalent to about 3.5 MWe (additional gas side pressure drop is 10 mmwc, equivalent to 120-150 KWe);
- This is confirmed by exhaust temperature drop maximum increase of 3%, which means upto 3% additional power in ST (120 Mwe), due to additional LP steam production (possible depending on allowable LP approach point).

THE RETURN OF INVESTMENT COULD BE ESTIMATED VERY QUICK (1-1.5 year)

NE NOOTER/ERIKSEN

33

Figura 71 – Valorizzazione del risparmio energetico [40]

7 Sicurezza sul lavoro: approccio prevenzionistico della normativa di legge

Se ci dovessimo chiedere: ma cos'è la sicurezza? Si citeranno i pareri di due autorevoli autori: quello del professor ingegnere Nicola Marotta e quello del compianto medico e psicologo professor Enzo Spaltro.

Nicola Marotta: " può essere intesa quale insieme di misure, condizioni e circostanze oggettive volte ad assicurare ai singoli e alla collettività il tranquillo e regolare svolgimento dei propri compiti, il rispetto dei principi e dei valori di convivenza democratica, l'osservazione di norme e di regole di comportamento" [42].

Enzo Spaltro:

«L'idea di sicurezza è un tema variabile e vasto perché parla di lavoro e di società, di oggettività e di soggettività. Di presente e di futuro, cioè di vita; è un sentimento composto che deriva dall'ansia e sfocia nell'insicurezza, con tutte le sue sfaccettature variabili. Non si riferisce praticamente a nulla, ma per questo esiste dappertutto. Il lavoro è l'occasione per parlarne, ma la vita è il campo dove viene sempre giocata»
(Prof. Enzo Spaltro 2003)



Sono entrambe vere e valide come definizioni, tuttavia, offrono connotazioni diverse.

Se dovessimo continuare la ricerca scopriremmo la variabilità dei contenuti, pur sempre tutti validi. In realtà non esiste una vera e propria definizione, in quanto si tratta di un costrutto non rilevabile direttamente, ma intuibile soltanto sulla base delle sue conseguenze. Se una persona è destrorsa, ad esempio, e durante una certa attività lavorativa si frattura la mano destra, ella non potrà più scrivere per parecchio tempo (conseguenza della non sicurezza).

Carlo Bisio, psicologo delle organizzazioni, consapevole che non può affidarsi ad una definizione di sicurezza, offre una classificazione delle "*dimensioni della sicurezza*" quali "dimensione spazio-temporale", "dimensione energetica", "dimensione sociale", "dimensione semantica", "dimensione valoriale" [43].

Fare sicurezza in modo efficace significa avere la percezione e la consapevolezza, ma soprattutto la conoscenza, di tutte le energie in gioco in tutte le dimensioni prima elencate; per fare ciò è indispensabile avere conoscenze di lingua italiana, matematica, fisica, chimica, storia, lingua inglese, biologia, meteorologia, primo soccorso, probabilità, statistica, sociologia, psicologia del lavoro, scienza della comunicazione, scienze motorie,

scienze delle religioni, perché tutte concorrono, non soltanto a saper leggere e interpretare i segnali dell'ambiente in cui si sta svolgendo una azione, ma consentono di prevedere il futuro (quindi fare prevenzione).

Quanto sopra esposto, la psicologia comportamentale definisce il tutto con due sole parole: "CONSAPEVOLEZZA SITUAZIONALE".

È importante quindi, per fare sicurezza, saper misurare tutti i livelli di energia per confrontarsi con il proprio livello di vulnerabilità. Spesso questo meccanismo si inceppa in quanto subentra ciò che gli anglosassoni chiamano "over confidence" ossia attitudine ad avere un'eccessiva sicurezza o un'eccessiva fiducia nelle proprie capacità e conoscenze.

Quasi sempre essa è foriera di incidenti o quasi incidenti (near miss), sia nel caso in cui un comportamento a rischio sia attivato in piena coscienza (in tal caso trattasi di violazione), sia quando lo stesso comportamento sia attivato per ignoranza o assenza di informazione (in tal caso trattasi di errore).

La legislazione italiana in ambito prevenzionistico ha mostrato di essere sin dall'inizio del 1900 all'avanguardia rispetto gli altri paesi: è sufficiente leggere il Regio Decreto del 12 maggio 1927 n. 824 per desumere che la parola "prevenzione" non è nata con la direttiva quadro europea 89/391 CEE da cui è poi scaturito il decreto legislativo 19 settembre 1994, n. 626. Da notare, nel Regio Decreto sui generatori di vapore, anche la cura dedicata alla regolamentazione della manutenzione e controlli.

Regio Decreto del 12 maggio 1927 n. 824	
<u>TITOLO I</u>	<u>NORME PER LA PREVENZIONE CONTRO GLI INFORTUNI</u>
<u>CAPO I</u>	<u>LIMITI DELLA PREVENZIONE E DISPOSIZIONI RIGUARDANTI GLI ESONERI</u>
<u>CAPO II</u>	<u>COSTRUZIONE, IMPIANTO ED ESERCIZIO</u>
<u>CAPO III</u>	<u>DENUNCIE</u>
<u>CAPO IV</u>	<u>VERIFICHE</u>
<u>CAPO V</u>	<u>DEMOLIZIONI E MODIFICAZIONI DI USO</u>
<u>CAPO VI</u>	<u>DISPOSIZIONI TRANSITORIE</u>
<u>TITOLO II</u>	<u>NORME RIGUARDANTI IL CONTROLLO SULLA COMBUSTIONE</u>
<u>CAPO I</u>	<u>LIMITI DEL CONTROLLO E PROCEDURA PER GLI ESONERI</u>
<u>CAPO II</u>	<u>DISPOSIZIONI RIGUARDANTI LA DENUNCIA DEGLI APPARECCHI E IMPIANTI SOTTOPOSTI AL CONTROLLO</u>
<u>CAPO III</u>	<u>OPERAZIONI DI CONTROLLO</u>
<u>CAPO IV</u>	<u>DISPOSIZIONI RIGUARDANTI LA CESSIONE, LA SOSTITUZIONE E LA COSTRUZIONE DI APPARECCHI E IMPIANTI DI COMBUSTIONE</u>

Figura 72 – Raffigurazione dei titoli della legge Regio Decreto n.824 del 1927

La matematica probabilistica offre in dotazione uno strumento potente: "Il teorema di Bayes". Esso permette di calcolare la probabilità di un determinato evento A considerando le informazioni disponibili sull'evento B.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

Figura 73 – Rappresentazione della formula del teorema di Bayes [44]

“La formula di Bayes consente di quantificare in un contesto probabilistico lavorativo le informazioni che un Ingegnere deduce dall’esperienza (probabilità probativa $p(B/A)$), nonché le informazioni precedenti (probabilità a priori $p(A)$). In tal modo egli potrà prendere decisioni a favore di una certa ipotesi, paragonando la probabilità a posteriori $p(B/A)$ ” [45].

Maggiore è quindi la conoscenza, ovvero il grado di fiducia che l’esperto può attribuire alle probabilità a posteriori $P(B/A)$, migliore sarà la qualità della risposta finale che offre la formula nella probabilità condizionata $P(A/B)$.

A pag. 70 de “Introduzione alla Sicurezza Civile e Industriale” del Prof. Nicola Marotta si trova un esempio pratico di applicazione del teorema di Bayes “sulle cause del crollo di un ponteggio”, che enfatizza appunto come esso modifichi l’informazione iniziale per l’attribuzione di quale fosse la probabilità a posteriori. Tale caso applicativo può essere trasposto a tantissimi altri casi di eventi incidentali, al fine di costituire un valido aiuto ai progettisti, i quali affineranno le loro strategie di pianificazione dei lavori, facendo così prevenzione.

È importante evidenziare la definizione di rischio ai sensi della ISO 45001:

“La ISO 45001 definisce il rischio come effetto dell’incertezza. Il rischio è uno scostamento positivo o negativo da quanto atteso, collegato alla carenza di informazioni circa gli eventi, le loro conseguenze o probabilità”.

Confrontandola con la attuale del D. Lgs.81 /08 e smi:

“s) «rischio»: probabilità di raggiungimento del livello potenziale di danno nelle condizioni di impiego o di esposizione ad un determinato fattore o agente oppure alla loro combinazione”.

Se ne deduce che la prima è sicuramente più potente dal punto di vista logico-matematico, in quanto si riferisce ad un ente primitivo rispetto alla probabilità della seconda definizione.

Un fattore cardine in qualsiasi contesto lavorativo, e che diventa uno dei primi elementi di indagine della magistratura nell'ambito di un'organizzazione in cui si sia verificato un incidente sul lavoro, è il concetto giuridico "**Ripartizione Intersoggettiva degli obblighi di sicurezza tra i vari ruoli**" che si evince dall'art.28 com.2 let. d del D. Lgs.81 / 08 e smi:

Articolo 28 - Oggetto della valutazione dei rischi

...omissis....

2. Il documento di cui all'articolo 17, comma 1, lettera a), redatto a conclusione della valutazione può essere tenuto, nel rispetto delle previsioni di cui all'articolo 53 del decreto, su supporto informatico e, deve essere munito anche tramite le procedure applicabili ai supporti informatici di cui all'articolo 53, di data certa o attestata dalla sottoscrizione del documento medesimo da parte del datore di lavoro, nonché, ai soli fini della prova della data, dalla sottoscrizione del responsabile del servizio di prevenzione e protezione, del rappresentante dei lavoratori per la sicurezza o del rappresentante dei lavoratori per la sicurezza territoriale e del medico competente, ove nominato e contenere:

*d) l'individuazione delle procedure per l'attuazione delle misure da realizzare, **nonché dei ruoli dell'organizzazione aziendale che vi debbono provvedere, a cui devono essere assegnati unicamente soggetti in possesso di adeguate competenze e poteri.***

L'organigramma dei ruoli in ambito sicurezza spesso coincide con quello dei ruoli gerarchici funzionali aziendali.

Si elencheranno di seguito una serie di punti (che denomineremo simbolicamente "cassetta degli attrezzi"), sicuramente non esaustivi, ma che, se ben progettati e concretamente applicati, renderebbero qualsiasi organizzazione molto meno vulnerabile agli incidenti e malattie professionali:



CASSETTA DEGLI ATTREZZI INDISPENSABILE PER LAVORARE IN SICUREZZA



Leadership: il management deve assicurare l'impegno in prima persona per il sistema di gestione e per il miglioramento continuo



Documento Valutazione dei Rischi: deve essere snello ed efficace, i cui contenuti siano compresi da tutti, e non soltanto dal Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione



Il piano di Emergenza Interno: deve essere snello ed efficace, i cui contenuti siano compresi da tutti, e non soltanto dal Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione



Permesso di Lavoro: E' il documento con cui i tre attori principali del lavoro «richiedente» «autorizzante» «esecutore» formalizzano con una loro firma che tutte le precauzioni sono state analizzate e concretamente messe in atto



Tool Box Talk: è una analisi di inizio lavori che si svolge poco prima di iniziare l'attività per capire se tutti hanno compreso tutto. E' istruito dal preposto della squadra



Log out, Tag out : Sistema di bloccaggio con lucchetto ed etichettatura di tutti gli apparecchi di manovra (elettrici e idraulici) interessati a disenergizzare l'area di lavoro



Stop Work Authority : Chiunque ravvisi un pericolo grave ed imminente blocca il lavoro per poi riprenderlo quando e se le condizioni di sicurezza sono ripristinate



Near Miss: Invogliare a non occultare i quasi incidenti ma a discuterne insieme con preposto e responsabile del servizio di prevenzione e protezione



Manutenzione: Manutenzione programmata ed anche predittiva se ci sono organi meccanici in movimento soggetti a vibrazioni. Manutenzione a guasto all'occorrenza



Relazioni: Creare un clima aziendale disteso e basato sulla relazione e buona comunicazione interna. I preposti devono saper ascoltare e valorizzare i propri collaboratori affinché si automotivino a comportamenti virtuosi

Figura 74 – Elencazione delle attività e modalità operative strategiche ai fini della prevenzione

7.1 Imparare dagli errori: “lesson learned” e breve rassegna di incidenti storicamente rilevanti dei generatori di vapore

Fare tesoro delle esperienze del passato (sia progressi che errori) è compito dell’umanità affinché preservi sé stessa e le generazioni future.

Nel campo della scienza, della tecnica, della sicurezza su lavoro si è ormai radicata la prassi, sia da parte di soggetti pubblici, sia privati, di istituire banche dati in cui viene raccolta una quantità notevole di informazioni inerenti agli incidenti e ai quasi incidenti. In molte aziende che aderiscono allo standard ISO45001 (salute e sicurezza sul lavoro) i quasi incidenti vengono processati alla stessa stregua degli incidenti, per un approccio conservativo alla prevenzione.

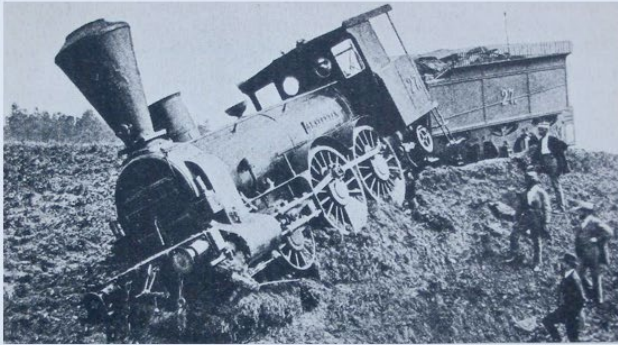
Si riporta come esempio la banca dati InforMO dell’INAIL (Istituto nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro).



Figura 75 – Banca dati INAL degli infortuni sul lavoro [46]

Esiste però una difficoltà conclamata da parte di tutti i soggetti nell’attingere a questa miriade di informazioni, che rischiano così di perdere la loro reale funzione. Un caso emblematico si riscontra con l’incidente ferroviario di Viareggio del 29 giugno 2009, in cui persero la vita 32 persone e con centinaia di feriti: la causa radice ossia la “*rottura di un assile per fatica*”, è la medesima del 19 ottobre del 1875, che provocò il deragliamento locomotiva Amstetten sulla rotta Salisburgo-Linz. Fu uno dei numerosi incidenti dell’epoca che indusse August Wöhler ad effettuare i suoi studi sulla fatica dei metalli: un uomo caro a tutti gli ingegneri del mondo, poiché tutt’oggi si utilizzano le sue ricerche.

Medesima Causa Radice: Rottura Assile per Fatica



Deragliamento dell'AMSTETTEN, 19 ottobre 1875



Incidente di Viareggio del 29 giugno 2009

Figura 76 – Raffigurazione di due incidenti ferroviari a più di un secolo di distanza ma con stessa causa radice [47]

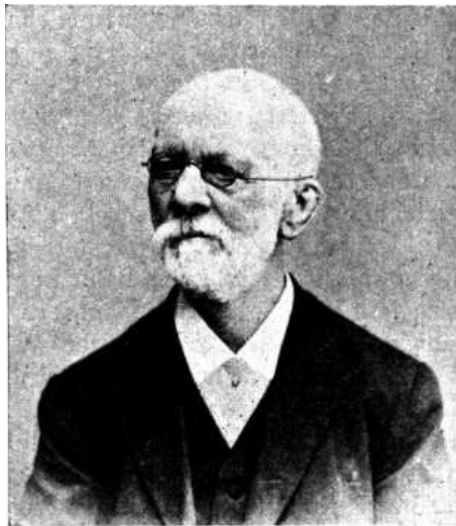


Figura 77 – Ritratto fotografico di August Wöhler [48]

Si analizzeranno ora in rassegna alcuni incidenti storicamente rilevanti in cui sono state coinvolte le caldaie.

Esplosione della caldaia di una locomotiva nel 1850

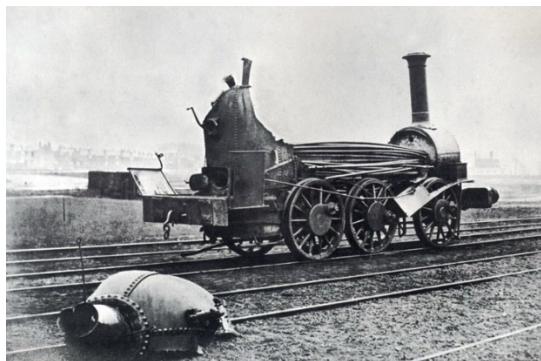


Figura 78 – Esplosione della locomotiva a vapore [49]

27 aprile 1865

Sul fiume Mississippi ci fu una esplosione a bordo nave SS Sultana; tre delle quattro caldaie esplosero e 1.800 dei 2.400 passeggeri furono uccisi. La causa fu un basso livello di acqua e una riparazione inadeguata. [50]

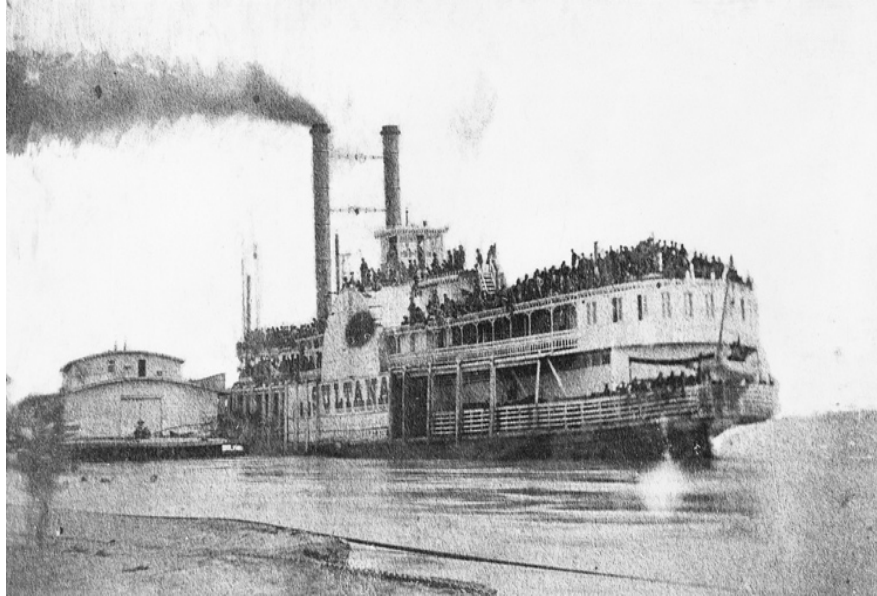


Figura 79 – Nave SS Sultana [50]

1905 – Incidente Brockton USA

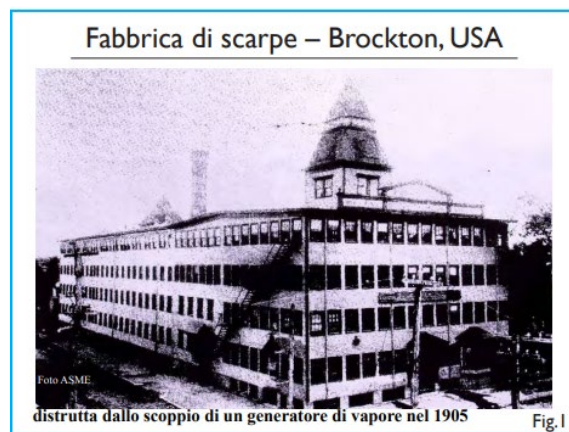


Figura 80 – Fabbrica di scarpe [51]

Disastrosa esplosione caldaia di una fabbrica di scarpe che uccise 58 persone ferendone altre 117.

7.2 Pericoli e rischi nella conduzione di un generatore di vapore

Osservando la corposità del programma ministeriale che un aspirante conduttore generatore di vapore deve affrontare per il conseguimento del patentino (esame scritto-orale - pratico), si intuisce l'importanza e la delicatezza del ruolo legato alla conduzione di tale tipologia di impianto, sostanzialmente paragonabile ad una medaglia con due facce ben distinte di livello di rischio:

- **Scoppio della caldaia:** cedimento meccanico dovuto ad un eccesso di pressione all'interno di un recipiente e/o per riduzione della resistenza del materiale.
- **Esplosione della caldaia:** improvviso e violento rilascio di calore e di energia meccanica da parte di una fonte di energia chimica, con conseguente liberazione di gas a temperatura elevata.

Si va quindi ad affinare una prevenzione di tipo "soggettivo", ossia della persona a cui si deve affidare il lavoro di conduzione della caldaia. Si è analizzato nei capitoli precedenti come una disattenzione nel presidio e controllo delle grandezze fisiche e chimiche gestionali possano arrecare gravi danni alle persone, all'ambiente, agli asset.

Un classico esempio che viene proposto agli aspiranti conduttori per familiarizzare con gli argomenti è: "il comportamento di due pentole sul fornello a gas metano: una piena di acqua, l'altra completamente vuota". La similitudine è perfetta in quanto la fenomenologia in caldaia è la medesima:

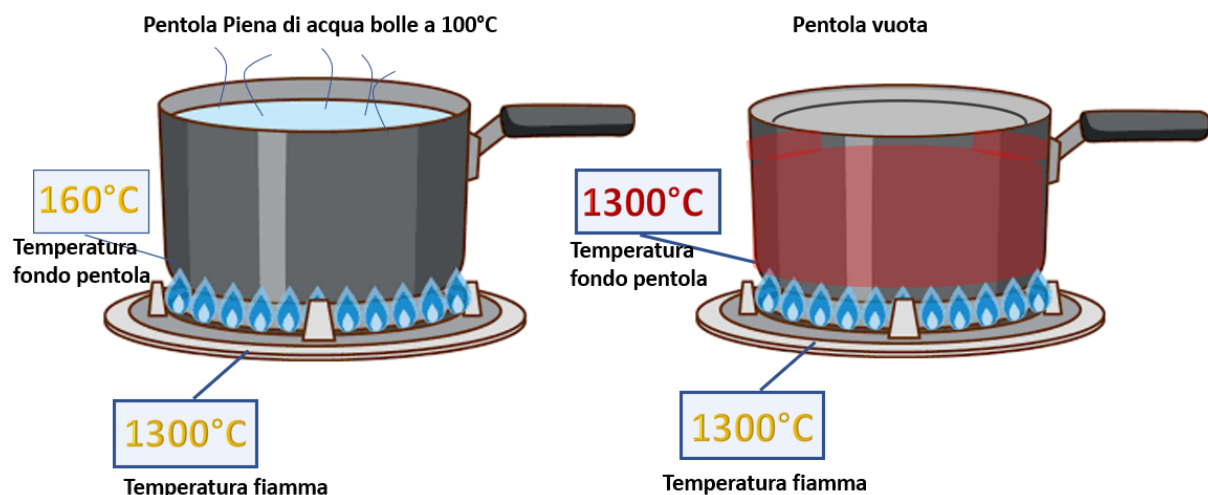


Figura 81 - Confronto della fenomenologia fisica di un riscaldamento con fiamma di una pentola piena d'acqua con un medesimo riscaldamento di pentola vuota

Se la massa d'acqua è presente, essa assorbe la maggiore aliquota di energia termica erogata dalle fiamme sottostanti, ed il fondo della pentola avrà una temperatura maggiorata di 60°C rispetto la massa d'acqua a 100° C costanti.

Qualora la pentola fosse vuota, la superficie del suo fondo raggiungerebbe sostanzialmente la stessa temperatura di fiamma di circa 1300°C, con ovvio arroventamento e perdita della resistenza del materiale.

Si ipotizzi che in un generico generatore di vapore in marcia, con una certa massa di acqua alla stessa pressione di esercizio del vapore in uscita p , si verifichi uno squarcio al circuito acqua vapore. Accadrà che l'intera massa subirà un'espansione repentina dalla pressione iniziale p alla pressione atmosferica $p' = 1,013$ bar e temperatura di 100°C. L'energia che si sprigionerà per ogni chilogrammo di acqua sarà pari alla differenza della entalpia del liquido saturo alla pressione iniziale e l'entalpia corrispondente a 100°C e 1,013 bar. Se si moltiplica tale valore ottenuto in kJ/kg per l'intera massa d'acqua in kg otteniamo l'energia totale in kJ. Se dividiamo tale valore per il calore latente di vaporizzazione disponibile otteniamo la quantità in peso del liquido che rievapora istantaneamente.

Il problema consta nel fatto che 1 kg di acqua a 100°C e 1,013 bar occupa il volume di 1 litro, ma che 1 kg di vapore sempre a 100°C e 1,013 bar occupa un volume di 1.725 litri: si otterrà un importante incremento di volume al momento dello scoppio.

7.3 Esplosioni in caldaia

Quando esplode un generatore di vapore si verifica una sovrappressione nel focolare generata dall'esplosione deflagrante di una miscela di gas in aria in ambiente "parzialmente confinato": non è totalmente confinato in quanto il circuito fumi è comunque aperto verso l'atmosfera attraverso il camino. Tale rischio è confermato dalla letteratura come non basso se tutte le precauzioni da adottare non sono valide e/o non sufficientemente ridondanti.


 National Fire Protection Association	«l'esplosione e l'incendio sono il rischio principale di un generatore di vapore. Le esplosioni sono il risultato dell'accensione di miscele costituite da combustibile ed aria accumulate in uno spazio confinato quale la camera di combustione»
Prof. Donatello Annaratone	«Il metano forma facilmente con l'aria delle miscele esplosive che, in mancanza di controllo di fiamma possono da luogo a scoppi anche di notevole gravità»

Figura 82 - Riferimenti da letteratura [52] [53]

Composto	Densità del gas o vapore*	Limiti di esplosività con aria in % di volume		Temperatura di autoaccensione in aria [°C]
		Inferiore	Superiore	
Metano: CH ₄	0,554	5,3	13,9	537
Ossido di carbonio: CO	0,967	12,5	74,2	650
Idrogeno: H ₂	0,069	4,1	74,3	580
Propano: C ₃ H ₈	1,56	2,37	9,5	466
Butano: C ₄ H ₁₀	2,05	1,86	8,41	430
Acetilene: C ₂ H ₂	0,906	2,5	78	335
Vapori di olio combustibile	—	2	5	300
Benzina	3-4	1,3	6	230 ÷ 260
Gas di città	—	6,9	35	

*Valore adimensionale corrispondente al rapporto tra la massa volumica della sostanza e quella dell'aria riferite alle condizioni normali (0°C, 1,013 bar).

Figura 83 – Tabella dei limiti di esplosività delle sostanze combustibili [54]

Una raffigurazione della suddivisione delle tre fasce di concentrazione di gas in aria è meglio rappresentata dalla seguente:

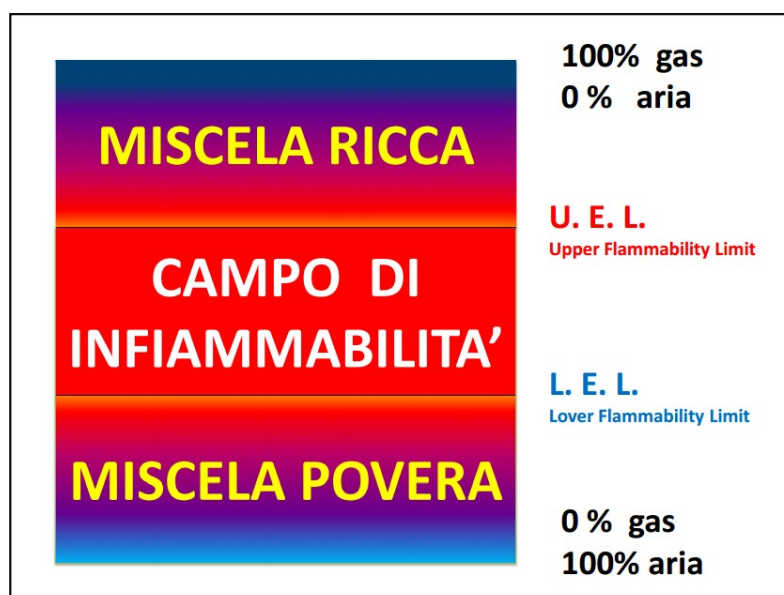


Figura 84 – Suddivisione in fasce di miscela povera – infiammabile – ricca [55]

I limiti di esplosività nei gas variano al variare delle condizioni ambientali in cui sono misurati, ovvero:

- Un incremento dell'ossigeno aumenta l'UEL e quindi il campo di esplosività; non influisce sul LEL;

- Un aumento di temperatura tende ad aumentare il campo di esplosività con aumento dell'UEL;
- Un aumento della pressione tende a far aumentare in maniera importante dell'UEL determinando alla fine un aumento dell'intero campo di esplosività.

Ci sono equazioni empiriche che permettono di ragguagliare i limiti di esplosività alla temperatura (Zabetakis et, al,1959; Crowl et al 2002):

$$LEL = LEL_{25} - \frac{0,75}{\Delta H_c} (T - 25)$$

$$UEL = UEL_{25} + \frac{0,75}{\Delta H_c} (T - 25)$$

ΔH_c è il calore netto di combustione (Kcal/mole), T è la temperatura(°C) (Il pedice 25 è il riferimento alla temperatura ambiente).

7.4 Esplosione di un generatore di vapore da 180 t/h Lesson Learned trattate dal Prof. Carlo Ortolani del Politecnico di Milano nel Libro "Casi di combustioni accidentali"

Il caso preso in esame dal Prof. Ortolani è tratto dalla sua raccolta di rapporti di indagine, che ha sintetizzato nel suo libro in due tomi "Casi di Combustione Accidentali".

Si analizzeranno le circostanze che hanno portato all'evento incidentale di esplosione di un generatore di vapore a tubi d'acqua, di producibilità di 180 t/h, a piccolo volume d'acqua e policom bustibile (gas e nafta). Ci sono delle evidenze che, prima dell'esplosione, la miscela di gas che doveva bruciare fosse nella fascia più ricca del campo di esplosività (o infiammabilità) a causa di adduzioni ingiustificate di sostanze inerti (vapor d'acqua e azoto) in camera di combustione che, insufflate, hanno ridotto la percentuale di ossigeno e ristretto il range di infiammabilità.



Figura 85 – Immagini generatore dopo l’esplosione

Le testimonianze del personale in sala controllo raccontano un evento istantaneo, compatibile con il picco di sovrappressione dovuta alla deflagrazione in camera di combustione. Le modalità di frammentazione delle vetrate degli edifici adiacenti sono altrettanto compatibili con la forma che assume il vetro per sovrappressione istantanea.

Il volume della sacca di combustibile ipotizzato presente in camera di combustione prima dell’esplosione è compatibile con il volume della camera di combustione: 650 m^3 .

Dalle immagini si denotano le pareti laterali deformate e proiettate verso l’esterno: ciò dimostra che la sollecitazione alla deformazione proviene necessariamente dall’interno verso l’esterno, e la cinetica di reazione con sviluppo di energia chimica e di pressione è stata tale da far preferire oltrepassare ai suoi prodotti di reazione la membratura in acciaio nelle vicinanze, anziché defluire in atmosfera attraverso la condotta al camino.

È esclusa l'ipotesi che sia stata la sovrappressione dovuta al vapore a causare il danno: sebbene si tratti di un fenomeno frequentemente causato dalla rottura di tubi bollitori e surriscaldatori, non è documentato un solo caso in cui tali eventi abbiano causato il collasso delle pareti.

La presenza di gas inerti e vapor d'acqua abbassa notevolmente il limite superiore di infiammabilità del combustibile senza far variare sensibilmente quello inferiore: si ottiene quindi un restringimento del campo.

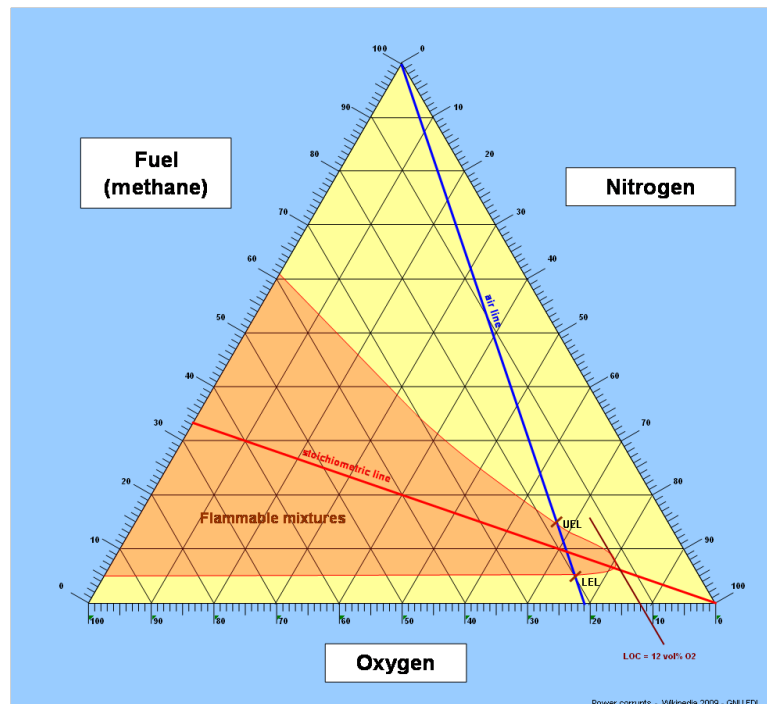


Figura 86 - Diagramma ternario Metano-Azoto-Ossigeno

8 Conclusioni e sviluppi futuri

In questo lavoro si è voluto evidenziare una importante connessione tra la progettazione e l'esercizio dei sistemi energetici per l'ambiente, nella fattispecie dei generatori di vapore, in perfetta linea con i principi fondanti dell'approccio "asset integrity" e "RAMSE" (Affidabilità, Disponibilità, Manutenibilità, Sicurezza, Ambiente).

Si è visto quali siano i benefici, in tempi immediati e lunghi, dell'approccio sistemico ed integrato di tutte le fasi organizzative del lavoro; si è visto anche quali siano le difficoltà interconnesse ai ruoli dei vertici aziendali strategici, affinché siano in grado di: orientarsi ad un approccio multidisciplinare; esplicitare a pieno le proprie abilità di "leader"; curare il fattore "relazione umana" con i propri collaboratori. Quest'ultimo rappresenta un elemento di importanza incommensurabile al fine di ottenere una sana organizzazione del lavoro in pieno benessere lavorativo. Se tutti questi ingredienti sono presenti in una organizzazione, si otterrà una eccellente efficienza energetica, altrimenti tutti gli sforzi rischiano di essere vanificati.

Altrettanto significativa è l'importanza della manutenzione nella "transizione industriale" in corso, in perfetta sinergia con uno scenario mondiale caratterizzato da obiettivi strategici dell'umanità, quali la salvaguardia dell'ambiente, la neutralità carbonica, il benessere lavorativo, l'economia circolare, l'inclusione sociale.

Il vapor d'acqua è sempre stato il fluido termovettore e fluido motore per eccellenza per la sua qualità di "bene economico". Si ritiene che lo sarà ancora per un lungo periodo, nel pieno rispetto dell'obiettivo n.7 della Agenda 2030 (assicurare l'accesso universale a servizi energetici economici, affidabili, sostenibili e moderni).

9 Tabellario

Temperatura			Temperatura		
Calore specifico			Calore specifico		
°C	kcal/kg °C	kJ/kg K	°C	kcal/kg °C	kJ/kg K
0	1,0091	4,2240	55	0,9982	4,1785
5	1,0050	4,2070	60	0,9988	4,1810
10	1,0020	4,1944	65	0,9994	4,1835
15	1,0000	4,1860	70	1,0001	4,1864
20	0,9987	4,1806	75	1,0007	4,1889
25	0,9978	4,1768	80	1,0014	4,1919
30	0,9973	4,1747	85	1,0021	4,1948
35	0,9971	4,1739	90	1,0028	4,1977
40	0,9971	4,1739	95	1,0034	4,2002
45	0,9973	4,1747	100	1,0043	4,2040
50	0,9977	4,1764			

Il calore specifico medio fra 0°C e t°C, secondo Dieterici, è: $c_m = 0,9983 - 0,005184 t/100 + 0,006912 (t/100)^2$

Tabella 1 - Calore specifico dell'acqua per alcune temperature

vapore saturo	tens. di vapore (bar)	0,5	2	6	10	14	16	25	30	40	60	80	100	120	
	temp. di saturaz. (°C)	81,3	120,2	158,8	179,9	195	201,4	223,9	233,8	250,3	275,4	295	311	324,6	
	calore specif. (kcal/kg °C)	0,474	0,498	0,552	0,606	0,664	0,695	0,830	0,88	0,99	1,21	1,45	1,80	2,32	
vapore surriscaldato	tens. di vapore (bar)	0,5	2	6	10	14	16	25	30	40	60	80	100	120	
	120	0,467	0,497												
	160	0,464	0,482	0,549											
	200	0,466	0,477	0,515	0,568	0,644									
	240	0,468	0,477	0,501	0,531	0,567	0,589	0,725	0,81						
	280	0,472	0,479	0,496	0,515	0,536	0,548	0,607	0,65	0,75	1,15				
	320	0,477	0,480	0,496	0,509	0,523	0,529	0,562	0,59	0,64	0,78	1,01	1,41		
	360	0,483	0,487	0,497	0,507	0,516	0,521	0,542	0,57	0,60	0,67	0,77	0,90		
	400	0,489	0,492	0,500	0,508	0,515	0,518	0,533	0,56	0,58	0,62	0,68	0,75		
	440	0,496	0,498	0,505	0,510	0,515	0,518	0,529	0,55	0,57	0,60	0,64	0,68	0,73	
	480	0,502	0,504	0,510	0,515	0,519	0,520	0,529	0,54	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	

Tabella 2 - Calore specifico del vapore d'acqua in kcal/kg °C

Sostanza	Temperatura critica (°C)	Pressione critica (bar)
Elio	—268	2,16
Idrogeno	—240	12,55
Azoto	—147	33,9
Ossigeno	—119	48,7
Anidride carbonica	31	72
Ammoniaca	132	110
Anidride solforosa	157	76,2
Acqua	374	221

Tabella 3 - Temperatura e pressioni critiche di alcune sostanze

quota sul livello del mare (m)	pressione atmosferica (millibar)	temperatura di ebollizione (°C)
—1 000	1 139	103
—500	1 075	101,7
0	1 013	100
500	955	98,3
1 000	899	96,7
1 500	846	95,2
2 000	795	93,4
2 500	747	91,6
3 000	701	89,9
3 500	658	88,4
4 000	616	86,7
4 500	577	85
5 000	541	83,4
5 500	505	81,6
6 000	472	79,9
6 500	440	78,3
7 000	410	76,5
7 500	382	74,8
8 000	356	73,1
8 500	331	71,4
9 000	307	69,7
9 500	285	67,9
10 000	264	66,3
11 000	226	62,8
12 000	193	43,4
13 000	165	40,5
14 000	141	37,6
15 000	121	34,7
16 000	103	59,4
17 000	88	56,1
18 000	76	52,8
19 000	65	49,6
20 000	55	46,5

Tabella 4 - Temperatura di ebollizione dell'acqua in °C in funzione dell'altitudine

Sostanza	Temperatura		Pressione
	(°C)	(K)	(bar)
Neon	—248,58	24,57	0,432
Azoto	—209,97	63,18	0,125
Ossigeno	—218,79	54,36	0,00152
Ammoniaca	— 77,75	195,40	0,0607
Anidride carbonica	— 56,60	216,55	5,172
Anidride solforosa	— 75,47	197,68	0,00167
Acqua	0,01	273,16	0,0061

Tabella 5 - Punti tripli di alcune sostanze

Pressione assoluta (bar)	Temperatura (°C)	Entalpia o contenuto termico (kJ/kg)		Pressione assoluta (bar)	Temperatura (°C)	Entalpia o contenuto termico (kJ/kg)	
		del liquido h_l	del vapore h_v			del liquido h_l	del vapore h_v
0,01	7,0	29,3	2514,4	8,5	172,9	732,0	2769,9
0,015	13,0	54,7	2525,6	9,0	175,4	742,6	2772,1
0,02	17,5	73,5	2533,6	9,5	177,7	752,8	2774,2
0,025	21,1	88,4	2540,2	10	179,9	762,6	2776,2
0,03	24,1	101,0	2545,6	11	184,1	781,1	2779,7
0,04	29,0	121,4	2554,5	12	188,0	798,4	2782,7
0,05	32,9	137,8	2561,6	13	191,6	814,7	2785,4
0,06	36,2	151,5	2567,8	14	195	830,1	2787,8
0,08	41,5	173,9	2577,1	15	198,3	844,7	2789,9
0,1	45,8	191,8	2584,8	16	201,4	858,6	2791,7
0,12	49,4	206,9	2591,2	17	204,3	871,8	2793,4
0,15	54,0	226,0	2599,2	18	207,1	884,6	2794,8
0,20	60,1	251,4	2609,9	19	209,8	896,8	2796,1
0,25	65,0	272,0	2618,3	20	212,2	908,6	2797,2
0,30	69,1	289,3	2625,4	22	217,2	930,9	2799,1
0,35	72,7	304,3	2631,5	24	221,8	951,9	2800,4
0,40	75,9	317,6	2636,9	26	226,0	971,7	2801,4
0,50	81,3	340,6	2646,0	28	230,0	990,5	2802,0
0,60	85,9	359,9	2653,6	30	233,8	1008,4	2802,3
0,70	89,9	376,8	2660,1	32	237,4	1025,4	2802,3
0,80	93,5	391,7	2665,8	34	240,9	1041,8	2802,1
0,90	96,7	405,2	2670,9	36	244,2	1057,6	2801,7
1,0	99,6	417,5	2675,4	38	247,3	1072,7	2801,1
1,1	102,3	428,8	2679,6	40	250,3	1087,4	2800,3
1,2	104,8	439,4	2683,4	42	253,2	1101,6	2799,4
1,3	107,1	449,2	2687,0	44	256,0	1115,4	2798,3
1,4	109,3	458,4	2690,3	46	258,7	1128,8	2797,0
1,5	111,4	467,1	2693,4	48	261,4	1141,8	2795,7
1,6	113,3	475,4	2696,2	50	263,9	1154,5	2794,2
1,8	116,9	490,7	2701,5	55	269,9	1184,9	2789,9
2,0	120,2	504,7	2706,3	60	275,5	1213,7	2785,0
2,2	123,3	517,6	2710,6	65	280,8	1241,1	2779,5
2,4	121,1	529,6	2714,5	70	285,8	1267,4	2773,5
2,6	128,7	540,9	2718,2	75	280,5	1292,8	2766,9
2,8	131,2	551,4	2721,5	80	295,0	1317,1	2759,9
3,0	133,5	561,4	2724,7	85	299,2	1340,7	2752,5
3,2	135,7	570,9	2727,6	90	303,3	1363,7	2744,6
3,4	137,5	579,9	2730,3	95	307,2	1386,1	2736,4
3,6	139,8	588,5	2732,9	100	311,0	1408,0	2727,7
3,8	141,8	596,8	2735,3	110	318,0	1450,6	2709,3
4,0	143,6	604,7	2737,6	120	324,6	1491,8	2689,2
4,5	147,9	623,2	2742,9	130	330,8	1532,0	2667,0
5,0	151,8	640,1	2747,5	140	336,6	1571,6	2642,4
5,5	155,5	665,8	2751,7	150	342,1	1611,0	2615,0
6,0	158,8	670,4	2755,5	160	347,3	1650,5	2584,9
6,5	162,0	684,1	2758,8	180	357,0	1734,8	2513,9
7,0	165,0	697,1	2762,0	200	365,7	1826,5	2418,4
7,5	167,8	709,3	2764,8	221,20	374,15	2107,4	2107,4
8,0	170,4	720,9	2767,5				

Tabella 6 - Tabella del vapore saturo secco

Pressione (bar)	Entalpia o contenuto termico del vapore surriscaldato, h_s (kJ/kg)								
	Temperatura del vapore (°C)								
	150	200	250	300	350	400	450	500	550
1	2776,3	2875,4	2974,5	3074,5	3175,6	3278,2	3382,4	3488,1	3595,6
2	2768,5	2870,5	2971,2	3072,1	3173,8	3276,7	3381,1	3487,0	3594,7
4	2752,0	2860,4	2964,5	3067,2	3170,0	3273,6	3378,5	3484,9	3592,8
6		2849,7	2957,6	3062,3	3166,2	3270,6	3376,0	3482,7	3590,9
8		2838,6	2950,4	3057,3	3162,4	3267,5	3373,4	3480,5	3589,0
10		2826,8	2943,0	3052,1	3158,5	3264,4	3370,8	3478,3	3587,1
12		2814,4	2935,4	3049,9	3154,6	3261,3	3368,2	3476,1	3585,2
14		2801,3	2927,6	3041,6	3150,7	3258,2	3365,6	3473,9	3583,3
16			2919,4	3036,2	3146,7	3255,0	3363,0	3471,7	3581,4
18			2911,0	3030,7	3142,7	3251,9	3360,4	3469,5	3579,5
20			2902,4	3025,0	3138,6	3248,7	3357,8	3467,3	3577,6
25			2879,5	3010,4	3128,2	3240,7	3351,3	3461,7	3572,9
30			2850,8	2995,1	3117,5	3232,5	3344,0	3456,2	3568,1
40				2962,0	3095,1	3215,7	3331,2	3445,0	3558,6
50				2925,5	3071,2	3198,3	3317,5	3433,7	3549,0
60				2885,0	3045,8	3180,1	3303,5	3422,2	3539,3
80				2786,8	2989,9	3141,6	3274,3	3798,8	3519,7
100					2925,8	3099,9	3243,6	3374,6	3499,8
125					2828,0	3042,9	3203,0	3343,3	3474,4
150					2694,8	2979,1	3159,7	3310,6	3448,3
175						2906,3	3113,6	3276,5	3421,6
200						2820,5	3064,3	3241,1	3394,1
221,20						2733,5	3018,1	3214,9	3378,1

Tabella 7 - Tabella del vapore surriscaldato

Sostanza	Conduttività k	
	kcal/mh °C	W/m K
Acqua	0,54	0,63
Alluminio	178	206
Asfalto	0,55	0,64
Basalto	1,1 ÷ 2,4	1,28 ÷ 2,78
Calcestruzzo	0,7 ÷ 1,2	0,81 ÷ 1,39
Cartone	0,12 ÷ 0,25	0,14 ÷ 0,29
Cemento	0,8 ÷ 1,10	0,93 ÷ 1,28
Ferro e acciaio	40 ÷ 50	46 ÷ 58
Gesso	0,4 ÷ 0,6	0,46 ÷ 0,70
Ghiaccio	1,2 ÷ 1,9	1,39 ÷ 2,20
Granito	2,7 ÷ 3,5	3,13 ÷ 4,06
Quercia	0,18 ÷ 0,22	0,21 ÷ 0,26
Linoleum	0,16	0,19
Marmo	1,8 ÷ 3	2,09 ÷ 3,48
Mattoni pieni	0,6 ÷ 0,9	0,70 ÷ 1,04
Mattoni forati	0,3 ÷ 0,7	0,35 ÷ 0,81
Muratura di pietrame	1,2 ÷ 2,1	1,39 ÷ 2,44
Pietra arenaria	1,1 ÷ 1,5	1,28 ÷ 1,74
Pietra calcarea	0,6 ÷ 0,8	0,70 ÷ 0,93
Piombo	30	35
Sabbia asciutta	0,28	0,32
Vetro	0,4 ÷ 0,8	0,46 ÷ 0,93

Tabella 8 - Coefficiente di conduttività k, di differenti materiali alla temperatura ambiente

Tipo di fluido	Coefficiente di convezione h (W/m²K)
Aria stagnante	5—60
Aria o gas in moto	50—1 100
Oli minerali in moto	50—3 400
Acqua stagnante	100—2 300
Acqua in moto	200—10 000
Acqua in cambiamento di fase	1 000—100 000
Metalli liquidi in moto	10 000—200 000

Tabella 9 - Intervallo di variabilità del coefficiente di convezione h per alcuni tipi di fluido

10 Bibliografia

- [1] Iuri Mazzearelli – Articolo rivista “Energia & Dintorni” di luglio 2023 intitolato: “Generatori di vapore a tubi da fumo l’evoluzione delle norme armonizzate” pag. 6 di 9
- [2] Appunti delle lezioni “Misure e Strumentazioni Industriali” Prof. Marzio Falco Politecnico Milano
- [3] Ing. Marino Diaferia ARPA PUGLIA U.O. Sicurezza Industriale e Atex Dipart. di Brindisi
- [4] Prof. Andrea Carpignano – Manuale di manutenzione industriale Cap 1 - Festo
- [5] https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_di_controllo_distribuito
- [6] Andreini – Pierini – La conduzione dei generatori di vapore VII Ediz. – pag.m28
- [7] Andreini – Pierini – La conduzione dei generatori di vapore – VII Ediz. – pag. 266
- [8] Andreini – Pierini – La conduzione dei generatori di vapore – VII Ediz. – pag. 405
- [9] <https://www.prospersrl.it/prodotto/generatore-di-vapore-lcz-da-2250-kg-h-a-12-bar/>
- [10] https://it.wikipedia.org/wiki/Caldaia_a_tubi_di_fumo
- [11] https://it.wikipedia.org/wiki/File:Boiler_explosion_1850.jpg
- [12] https://it.wikipedia.org/wiki/Caldaia_a_tubi_d%27acqua
- [13] Direttiva PED 2014/68/UE
- [14] Fernando Pierini – Generatori di Vapore – Hoepli pag. 371
- [15] Fernando Pierini – Generatori di Vapore – Hoepli pag. 440
- [16] Fernando Pierini – Generatori di Vapore – Hoepli pag. 442
- [17] Luciano Piovan “Progettare impianti a vapore” Dario Flaccovio Editore pag. 138
- [18] Ing. Vincenzo Annoscia Ing. Francesco Boenzi Ing. Raffaello Iavagnilio Ing. Pierluigi Polledro Ing. Vincenzo Rizzi Anno 2017 - ISPESL – Bari. . Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale – Politecnico di Bari. Italgestra – MILANO
- [19] <https://it.hzmy-power.com/desuperheater/steam-atomizing-desuperheater.html>
- [20] Fernando Pierini – Generatori di Vapore – Hoepli pag 364
- [21] <https://www.campanologia.it/contenuto/pagine/01-ATS/ATS-G01/ATS-G01-06-PCDifettiS.htm>
- [22] https://www.researchgate.net/figure/Intergranular-crack-propagation-and-secondary-cracking-which-confirm-the-intergranular_fig5_340130213

- [23] Fernando Pierini – Generatori di Vapore – Hoepli pag. 309
- [24] Fernando Pierini – Generatori di Vapore – Hoepli pag. 328
- [25] Claudio Peri – Oltre i sistemi di qualità -pag. 7
- [26] Dichiarazione Ambientale Enipower al 31-12-2021 – Allegato 3
- [27] Politica societaria Enipower - 2022
- [28] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.slideserve.com%2FLucy%2Fnessun-titolo-diapositiva-powerpoint-ppt-presentation&psig=AOvVaw233Jq5-fxnDJB7gFwJckbH&ust=1712138714521000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBAQtaYDahcKEwi4ld_zo6OFaxUAAAAAHQAAAAAQEQ
- [29] Andreini – Pierini – La conduzione dei generatori di vapore VII Ediz. – pag.401
- [30] AziendaSpiraxsarco
<https://content.spiraxsarco.com//media/spiraxsarco/international/documents/it/sb/b850-sb-p408-02-it.ashx?rev=5ec8fb19179d495089e6105b69492bda>
- [31] Andreini – Pierini – La conduzione dei generatori di vapore VII Ediz. pag 600
- [32] https://www.ispeco.it/it/servizi/controlli-non-distruttivi-avanzati_105/termografia-e-termografia-su-fornaci-tir_131
- [33] https://www.unicalag.it/upload/blocchi/X380allegatoDEPLIANT1-1X_dear_it_05-2023.pdf
- [34] Luciano Piovan “Progettare impianti a vapore” Dario Flaccovio Editore - pag 111
- [35] <https://www.ved.it/it/eliminazione-perdite-con-impianto-in-marcia/>
- [36] <https://furmanitehk.com/wp-content/uploads/2020/11/Leak-Sealing.pdf>
- [37] Articolo dell’Ing. Franco Santini MCMA - Chairman EU TC 319 Maintenance, Past President Aiman
- [38] Articolo rivista “Energia e Dintorni” Novembre 2021 pag 15 di 28
- [39] Articolo rivista “Energia e Dintorni” Novembre 2021 pag 16 di 28
- [40] <https://cicgroup.com/nooter-eriksen/llte-low-low-temperature-economizers/>
- [41] <https://www.technoform.com/en/material/heat-conductive-polyphenylene-sulfide-pps-gr>
- [42] Nicola Marotta – Introduzione alla sicurezza civile e industriale – pag 21
- [43] Carlo Bisio – Gestione delle Sicurezza nei Sistemi Sociotecnici – pag 14
- [44] https://it.wikipedia.org/wiki/File:Bayes%27_Theorem_MMB_01.jpg

- [45] Nicola Marotta – Introduzione alla sicurezza civile e industriale – pag 70
- [46] https://www.inail.it/cs/internet/docs/allegato_attiinformo.pdf
- [47] https://it.wikipedia.org/wiki/August_W%C3%B6hler
- [47] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.anfp.it%2Fdisastro-viareggio-lindagine-piu-complessa-della-polizia-ferroviaria&psig=AOvVaw1QT3NZoc0tn9s3C_Xxb687&ust=1707984857418000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjhqFwoTCPCN1uCyqoQDFQAAAAAdAAAAABAE
- [48] https://it.wikipedia.org/wiki/August_W%C3%B6hler
- [49] https://it.wikipedia.org/wiki/Caldaia_a_tubi_di_fumo#/media/File:Boiler_explosion_1850.jpg
- [50] [https://it.wikipedia.org/wiki/Sultana_\(battello_a_vapore\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Sultana_(battello_a_vapore))
- [50] [https://it.wikipedia.org/wiki/Sultana_\(battello_a_vapore\)#/media/File:Ill-fated_Sultana,_Helena,_Arkansas,_April_27,_1865.jpg](https://it.wikipedia.org/wiki/Sultana_(battello_a_vapore)#/media/File:Ill-fated_Sultana,_Helena,_Arkansas,_April_27,_1865.jpg)
- [51] https://www.ndt.net/article/ndtnet/2015/1_Trentini.pdf
- [52] <https://www.nfpa.org/>
- [53] Donatello Annaratone – Generatori di vapore – Calcolo, progettazione, costruzione Milano 1975 pag. 737 -738
- [54] Andreini – Pierini – La conduzione dei generatori di vapore VII Ediz. Pag 553
- [55] http://www.ifiassociazione.it/wp-content/uploads/2015/04/01_Indice-Aspetti-chimic-e-classif.-incendi-.pdf
- [56] Guidelines Asset Integrity Management - Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers New York, NY anno 2017
- [57] <https://www.gberardi.com/info-tecniche/protezione-dalla-corrosione/>
- [58] Fernando Pierini – Generatori di Vapore – Hoepli pag. 308
- [59] Fernando Pierini – Generatori di Vapore – Hoepli pag. 316
- [60] https://www.centrogalileo.it/nuovaPA/Articoli%20tecnici/Fantoni/torri%20evaporative_60_61.htm
- [61] <https://www.ilsole24ore.com/art/viaggio--turbina-gas-piu-potente-d-europa--AEmGzx5D>

11 Elenco delle figure

Figura 1 – Rappresentazione schematica di un processo di generazione di vapore e utilizzatore finale	10
Figura 2 – Schema semplificato di un generatore di vapore	11
Figura 3 - Energia = Pressione x Volume	11
Figura 4 – Evoluzione quadro normativo leggi dello Stato italiano	12
Figura 5 – Quadro completo di norme giuridiche e tecniche	13
Figura 6 - Flusso processo algoritmo PED (Pressure Equipment Directive) [3].....	14
Figura 7 – Obblighi del Datore di Lavoro	14
Figura 8 – Flusso verifiche di legge sui generatori di vapore.....	15
Figura 9 – Flusso di progettazione con approccio RAMSE [2]	16
Figura 10 – Principali vantaggi approccio RCM	18
Figura 11 – Potenziali difficoltà riscontrabili con approccio RCM	18
Figura 12 – Parti costituenti la caldaia	19
Figura 13 – Generatore di Vapore [7]	19
Figura 14 – Modello di rappresentazione di un generatore di vapore. Individuazione della potenza termica [8].....	20
Figura 15 – Targa dei valori nominali ai sensi Art. 14 Regio Decreto del 12 maggio 1927 n. 824 [9]	20
Figura 16 – Schematizzazione delle differenze strutturali tra caldaie a tubi di fumo e tubi d’acqua	21
Figura 17 – Schema semplificato rappresentativo caldaia a tubi di fumo [10]	22
Figura 18 - Esplosione della caldaia di una locomotiva nel 1850 [11]	23
Figura 19 – Schema semplificato rappresentativo caldaia a tubi di fumo [12]	23
Figura 20 – Schema degli obiettivi strategici in fase di progettazione linee di distribuzione vapore [15]	26
Figura 21 Recupero del condensato a seguito della condensazione della intera massa di vapore...	27
Figura 22 – Recupero di energia termica da perdite visibili e invisibili	28
Figura 23 – Importanza del presidio dell’operatore addetto alla conduzione del gdv anche in presenza di conduzione assistita da remoto in controllo automatico	29
Figura 24 – Corpo di capacità termica C che scambia calore con l’esterno	30
Figura 25 – Sistema di controllo semplice del livello nel corpo cilindrico superiore	31
Figura 26 -Nebulizzatore di un attemperatore [19]	33

Figura 27 – Rappresentazione delle sostanze chimiche che rendono l'acqua impura ai fini della produzione di vapore a scopi industriali	33
Figura 28 – Parametri chimo-fisici da misurare per il controllo delle acque di caldaia	34
Figura 29 – Norma UNI vigente in merito ai requisiti delle acque per i generatori di vapore e impianti	34
Figura 30 – Parametri da monitorare a cura del conduttore gdv in ambito qualità delle acque di caldaia e vapore	35
Figura 31 – Visualizzazione di un tubo incrostato	35
Figura 32 – Silice	36
Figura 33 – Principio di corrosione da ossigeno [57]	37
Figura 34 – Rappresentazione dei bordi di grano [21].....	38
Figura 35 – Corrosione intergranulare [22]	39
Figura 36 - Tabella dei valori della costante di Hassenstein.....	40
Figura 37 - Perdite per irraggiamento.....	41
Figura 38 – Modello semplificato per il bilancio termico [8]	41
Figura 39 – Requisiti comuni ai tre sistemi di gestione ISO45001 ISO14001 ISO5001	44
Figura 40 – Planimetria di Stabilimento	44
Figura 41 – Pianta prospettica dall'alto della zona industriale [26]	45
Figura 42 – Schema di impianto turbogas in ciclo combinato cogenerativo	45
Figura 43 – Estratto della politica societaria in materia di efficienza energetica [27]	46
Figura 44 - Elementi principali di una torre di raffreddamento evaporativa [60]	48
Figura 45 – Dichiarazione ambientale Enipower al 31-12-2022.....	49
Figura 46 – Rotore con calettamento palette turbina a gas [61]	49
Figura 47 – Nuovo cuscinetto Rotor Displacement System [28]	50
Figura 48 – Schemi dell'impianto prima e dopo la modifica di aggiunta dello scambiatore.....	52
Figura 49 – Rappresentazione del trend di miglioramento negli anni misurato in tonnellata equivalente di petrolio TEP	52
Figura 50 - Triangolo di Ostwald del gasolio [29]	55
Figura 51 – Rappresentazione della differenza del flusso di calore scambiato in una tubazione pulita e incrostata internamente	56
Figura 52 – Quantità di calore scambiata tra la superficie interna ed esterna alla tubazione.....	56
Figura 53 - Immagine di un testo degli anni Sessanta.....	57
Figura 54 – Rappresentazione di un sistema di drenaggio collettore acqua vapore [30].....	59

Figura 55 – Norma UNI 7550 – Parametri concentrazioni massime ammissibili [31]	60
Figura 56 – Esecuzione di una analisi termografica del refrattario [32]	60
Figura 57 – Schema semplificato di batteria di generatori di vapore in parallelo con riserva calda.61	
Figura 58 – Obiettivo 7 Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile.....	62
Figura 59 - Schema semplificato di una ipotetica filiera del processo trattamento acqua di alimento di una centrale termoelettrica	63
Figura 60 – Andamento della concentrazione dell’ossigeno in funzione della temperatura e della pressione di lavoro [33]	64
Figura 61 – Esempi di fughe di vapore.....	65
Figura 62 - Esempi di scatole di furmanite per contenimento provvisorio di una fuga pericolosa di vapore [35].....	66
Figura 63 - Operatore in azione durante l’applicazione della scatola di furmanite [36].....	66
Figura 64 – Tabella di sintesi dei lavori Cannon Bono Energia e Politecnico Milano [38].....	68
Figura 65 – Differenze di andamenti di grandezze (temperature e livello) [39]	69
Figura 66 – Differenze di andamenti di grandezze (temperature e livello) [39]	70
Figura 67 – Elencazione risultati ottenuti dalla ricerca Polimi/Cannon Bono Energia	70
Figura 68 - Raffigurazione di parte dell’economizzatore in materiale termoplastico [40]	71
Figura 69 – Immagine fotografica del Polifenilene solfuro termoconduttivo (PPS-GR) [41]	72
Figura 70 – Rappresentazione delle temperature che mediamente si ottengono nelle caldaie a recupero degli impianti di cogenerazione lato fumi e lato acqua in zona economizzatore [40]	73
Figura 71 – Valorizzazione del risparmio energetico [40]	74
Figura 72 – Raffigurazione dei titoli della legge Regio Decreto n.824 del 1972	76
Figura 73 – Raffigurazione della formula del teorema di Bayes [44]	77
Figura 74 – Elencazione delle attività e modalità operative strategiche ai fini della prevenzione....	79
Figura 75 – Banca dati INAL degli infortuni sul lavoro [46]	80
Figura 76 – Raffigurazione di due incidenti ferroviari a più di un secolo di distanza ma con stessa causa radice [47]	81
Figura 77 – Ritratto fotografico di August Wöhler [48]	81
Figura 78 – Esplosione della locomotiva a vapore [49]	81
Figura 79 – Nave SS Sultana [50].....	82
Figura 80 – Fabbrica di scarpe [51].....	82
Figura 81 - Confronto della fenomenologia fisica di un riscaldamento con fiamma di una pentola piena d’acqua con un medesimo riscaldamento di pentola vuota	83

Figura 82 - Riferimenti da letteratura [52] [53]	84
Figura 83 – Tabella dei limiti di esplosività delle sostanze combustibili [54].....	85
Figura 84 – Suddivisione in fasce di miscela povera – infiammabile – ricca [55].....	85
Figura 85 – Immagini generatore dopo l’esplosione	87
Figura 86 - Diagramma ternario Metano-Azoto-Ossigeno.....	88

12 Elenco delle tabelle

Tabella 1 - Calore specifico dell'acqua per alcune temperature	90
Tabella 2 - Calore specifico del vapore d'acqua in kcal/kg °C	90
Tabella 3 - Temperatura e pressioni critiche di alcune sostanze	91
Tabella 4 - Temperatura di ebollizione dell'acqua in °C in funzione dell'altitudine	91
Tabella 5 - Punti tripli di alcune sostanze	92
Tabella 6 - Tabella del vapore saturo secco	93
Tabella 7 - Tabella del vapore surriscaldato	94
Tabella 8 - Coefficiente di conduttività k , di differenti materiali alla temperatura ambiente	95
Tabella 9 - Intervallo di variabilità del coefficiente di convezione h per alcuni tipi di fluido	95