

INAIL

Quaderni di ricerca

Valutazione dinamica del rischio nel contesto Seveso

Patrizia Agnello, Giusi Ancione, Vincenzo Bartolozzi,
Paolo Bragatto, Bruno Fabiano, Maria Francesca Milazzo,
Margherita Pettinato, Tomaso Vairo

24

settembre 2024

INAIL

Quaderni di ricerca

Valutazione dinamica del rischio nel contesto Seveso

Patrizia Agnello, Giusi Ancione, Vincenzo Bartolozzi,
Paolo Bragatto, Bruno Fabiano, Maria Francesca Milazzo,
Margherita Pettinato, Tomaso Vairo

24

settembre 2024

I *Quaderni di ricerca* dell'Inail sono lo strumento a disposizione dei ricercatori e dei ruoli professionali dell'Istituto per rendere pubblici i risultati più rilevanti delle loro attività; accolgono anche contributi di ricercatori esterni, che partecipano ai progetti dell'Inail.

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nei *Quaderni*, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

I *Quaderni* sono disponibili online all'indirizzo www.inail.it.

Comitato di redazione: Fabrizio D'Ascenzo, Maria Paola Bogliolo, Benedetta Persechino, Patrizio Rossi

Segreteria di redazione: Cristina Francesca Giombini

Inail - Piazzale Giulio Pastore, 6 | 00144 Roma

ISBN 978-88-7484-872-0

Stampato presso la Tipografia Inail - Milano, settembre 2024

Valutazione dinamica del rischio nel contesto Seveso

Patrizia Agnello, Giusi Ancione, Silvia Maria Ansaldi, Vincenzo Bartolozzi, Paolo Bragatto, Bruno Fabiano, Maria Francesca Milazzo, Tomaso Vairo

Sommario - Il presente contributo rientra nei risultati del progetto “DYN-RISK - Analisi di rischio dinamiche integrate con dati provenienti da tecnologie abilitanti per la gestione di eventi critici derivanti da fattori emergenti”, finanziato da INAIL nell’ambito del bando di ricerca in collaborazione BRiC 2019 per l’ID02 e svoltosi fra ottobre 2020 e marzo 2023.

Il primo capitolo è dedicato all’inquadramento tecnico-normativo del problema, il secondo all’inquadramento scientifico. Il terzo capitolo discute una metodologia sviluppata nell’ambito del progetto, che, sfruttando in modo combinato reti bayesiane, reti neurali dense e catene di Markov a stati nascosti, permette di individuare con anticipo, a partire dai dati di monitoraggio, le deviazioni dal normale andamento del processo, in modo da evitare che possano evolvere in incidenti. Quarto e quinto capitolo sono dedicati a due casi industriali distinti. Uno si occupa della gestione dell’integrità in un impianto di raffinazione, in relazione all’estrema variabilità del greggio lavorato e propone una soluzione ad hoc basata su reti Bayesiane e catene di Markov, mentre nell’altro, la metodologia presentata nel terzo capitolo è applicata alla gestione del rischio in un impianto recupero vapori di un terminale petrolchimico. L’ultimo capitolo discute le potenzialità dei risultati presentati al fine di raggiungere l’obiettivo di azzerare gli incidenti nell’industria di processo.

Il quaderno è destinato al mondo della ricerca, dell’industria e degli enti di controllo. Il lavoro è di interesse particolare per i gestori degli stabilimenti Seveso e per i responsabili e gli addetti del servizio di prevenzione e protezione (RSPP), nonché per i consulenti della sicurezza. Riguardo le autorità competenti per la prevenzione degli incidenti rilevanti ex d.lgs.105/2015 è importante essere aggiornati sui metodi innovativi, che stanno già entrando nella pratica della valutazione del rischio.

Parole chiave: Pericolo Incidenti Rilevanti, Analisi Dinamica del Rischio, Reti Bayesiane, Catene di Markov, Reti Neurali, Corrosione da Sulfidazione a caldo, Recupero Vapori, Incidenti Zero.

Gli autori sono: per Inail, Patrizia Agnello primo ricercatore e referente scientifico del progetto DYN-RISK, Paolo Bragatto già referente del progetto, primo ricercatore attualmente in quiescenza. Per l’Università di Messina, Giusi Ancione, assegnista di ricerca post-doc, Maria Francesca Milazzo professore associato di Impianti Chimici e responsabile scientifico del progetto. Per l’Università di Genova, Bruno Fabiano professore ordinario di Impianti Chimici e responsabile dell’unità operativa e Margherita Pettinato ricercatore RTDA; per Arpa Ligure Tomaso Vairo, già funzionario e responsabile dell’unità operativa, attualmente presso altro ente. Per Arpa Sicilia, Vincenzo Bartolozzi, funzionario e responsabile dell’unità operativa. La sperimentazione presso gli stabilimenti è stata svolta nell’ambito del protocollo d’intesa fra Inail e Unem (Unione energie per la mobilità, ex Unione Petrolifera).

Indice degli argomenti

Acronimi	7	
1	Contesto Tecnico Normativo	9
1.1	La valutazione del rischio nel contesto “Seveso”	9
1.2	La valutazione del rischio nella gestione dell’integrità	12
1.3	L’approccio delle finestre operative (IOW)	13
1.4	Necessità di maggiore dinamicità nella valutazione del rischio	13
2	Inquadramento Scientifico	15
3	Metodi innovativi	18
3.1	Reti Neurali	19
3.2	Modelli di Markov a stati nascosti	20
3.3	Il modello DYN-RISK	22
4	Gestione dinamica di attrezzature critiche.	23
4.1	La corrosione da sulfidazione a caldo	24
4.2	Limiti teorici della pratica corrente.	27
4.3	Gestione dei problemi di corrosione con la tecnica IOW	28
4.4	Limiti della tecnica IOW	30
4.5	RUL dinamico	31
4.6	Applicazione ad un impianto rappresentativo	35
4.7	Set di dati utilizzato	36
4.7.1	Temperatura: Dati di misura	36
4.7.2	Temperatura: Dati di sintesi	37
4.7.3	Composizione delle cariche	38
4.8	Gestione RUL per scambiatore di calore in acciaio al carbonio	38
4.9	Gestione RUL per tubazione in acciaio Cr5%	41
5	Previsione di deviazioni dall’andamento normale	43
5.1	Sicurezza dell’impianto recupero vapori in un terminale petrolifero	43
5.2	Applicazione del modello DYN-RISK all’impianto VRU	45
5.3	Segnali deboli ed esercizio sicuro degli impianti	45
6	Potenzialità della valutazione dinamica nel settore Seveso	47
6.1	Per un’industria chimica e petrolifera senza incidenti	47
6.2	La valutazione dinamica del rischio nella transizione energetica	48
Appendice A - Brevi cenni sui metodi Bayesiani		50
A.1	L’analisi Bayesiana	50
A.1.1	Quando e perché usare l’analisi bayesiana	50
A.1.2	Come usare l’analisi bayesiana	51
A.2	Le Reti bayesiane	51
A.2.1	Quando e perché usare le reti BN	52
A.2.2	Come usare le reti BN	52
Riferimenti bibliografici	54	

Acronimi e definizioni

AI - Artificial Intelligence - Intelligenza Artificiale

ANN - Artificial Neural Network - Rete Neurale Artificiale

API - American Petroleum Institute

BN - Bayesian Belief Network - Rete Bayesiana

CS - Carbon Steel - Acciaio al Carbonio

DNN - Deep Neural Network - Rete Neurale Densa

EM - Expectation Maximization - Massimizzazione delle Aspettative

ET/ETA - Event Tree (Analysis) - Albero degli Eventi (Tecnica di Analisi)

FT/FTA - Fault Tree (Analysis) - Albero dei guasti (Tecnica di Analisi)

HBN - Hierarchical Bayesian Network - Rete Bayesiana Gerarchica

HMM - Hidden Markov Model - Reti di Markov a stati Nascosti

IOW - Integrity Operating Window - Metodo delle Finestre Operative

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development

PNRR - Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza

PSA - Pressure Swing Absorption

QRA - Quantitative Risk Analysis - Analisi Quantitativa del Rischio

RBI - Risk Based Inspection - Pianificazione delle Ispezioni basata sul Rischio

RSPP - Responsabile Servizio Prevenzione e Protezione

RUL - Residual Useful Life - Vita Utile Rimanente

TAN - Total Acidity Number - Misura dell'acidità del Petrolio.

VRU - Vapour Recovery Unit - Unità Recupero Vapori

1. Contesto Tecnico Normativo

Della valutazione dinamica del rischio la letteratura scientifica discute da oltre un decennio, ma le applicazioni concrete riguardano solo situazioni di particolare criticità. Nella pratica dell'industria italiana e in particolare nell'industria di processo, rappresentano ancora una novità quasi assoluta. Mancano ancora soluzioni pratiche, applicazioni specifiche e criteri di sviluppo che possano introdurre nel mondo industriale la pratica della valutazione dinamica del rischio. Il quaderno è destinato al mondo della ricerca, dell'industria e degli enti di controllo. In particolare, per la parte industriale il quaderno è di interesse per i gestori degli impianti di processo e per i responsabili e gli addetti del servizio di prevenzione e protezione RSPP. Anche i consulenti di sicurezza industriale, che spesso hanno l'onere di sviluppare nel dettaglio l'analisi del rischio, sono fra i potenziali interessati. Per quanto riguarda gli enti di controllo, la questione della valutazione dinamica del rischio potrà in futuro entrare anche nei rapporti con le Autorità Competenti ed è importante che esse abbiano gli strumenti scientifici necessari. La valutazione del rischio dinamico è ancora un campo aperto e sicuramente occorreranno ancora anni per arrivare ad una standardizzazione dei metodi. C'è quindi ampio spazio per la ricerca e sono molte le opportunità per i giovani ricercatori che vogliono dedicarsi ad un argomento che ha grande rilievo pratico e che utilizza i metodi matematici fra i più avanzati.

1.1 La valutazione del rischio nel contesto “Seveso”

Il contesto nel quale si muove la presente ricerca è quello degli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante, soggetti alla Direttiva EU/2012/18 Seveso III, recepita a livello nazionale con il d.lgs. 105/2015. La legislazione stabilisce una serie di obblighi specifici per la prevenzione degli incidenti e si applica agli stabilimenti che trattano sostanze chimiche pericolose in quantitativi superiori a limiti fissati dalla Direttiva stessa. In Italia interessa circa mille stabilimenti, divisi fra stabilimenti di soglia superiore e inferiore, incluse raffinerie, depositi di prodotti petroliferi, petrolchimici, chimiche e magazzini di prodotti chimici. L'adozione di un sistema di gestione della sicurezza per la prevenzione degli incidenti, secondo requisiti fissati, è il primo obbligo del gestore; mentre le autorità competenti hanno obbligo di valutare l'adeguatezza delle misure adottate. Cuore e base della gestione del rischio è la valutazione del rischio, al quale è dedicato il quaderno presente.

Per chiarezza di trattazione si fa riferimento alle definizioni date dallo standard ISO 31000 [UI-018], anche se non vincolanti nella legislazione. Per usare la terminologia rigorosa dello standard la valutazione del rischio (risk assesment) si articola in cinque fasi che sono: la definizione del contesto, l'identificazione del pericolo (risk identification), analisi del rischio (risk analysis), ponderazione del rischio (risk evaluation) e la trattazione del rischio (risk treatment). Purtroppo, parlando in lingua italiana la confusione è facile, e spesso si sente il termine valutazione sia per tradurre “evaluation”, il cui significato originale è ristretto al confronto con i criteri e relativa decisione, sia per tradurre “assessment”, che costituisce il complessivo processo metodologico.

Nella pratica corrente, sono in uso tecniche specifiche, definite da standard internazionali riconosciuti, per le diverse fasi. Per l'identificazione del rischio il metodo utilizzato nella grande maggioranza dei casi è l'analisi dei pericoli e di operabilità (Hazop) in accordo con lo standard IEC 61882 [IE-016] oppure l'analisi dei modi e degli effetti (e della criticità) dei guasti (Failure

Mode, Effects and Criticality Analysis FMEA/FMECA) in accordo con lo standard IEC 60812 [IE-018]. Questi metodi permettono di individuare tutte le fonti di pericolo e le zone in cui si possano manifestare ed in particolare le linee e apparecchiature critiche e consentono di definire gli eventi di rilascio di sostanze pericolose, i cosiddetti “top-event”, che saranno oggetto di successive analisi. L’analisi consiste nella valutazione dei rischi connessi ai possibili eventi incidentali identificati, sia in termini di potenziali conseguenze che di probabilità di accadimento. Essa comprende in particolare la valutazione della probabilità degli eventi critici precedentemente individuati, discriminando sulla credibilità degli eventi possibili in base a soglie definite a priori. A questo, segue una valutazione delle probabilità dei diversi scenari di rilascio, conseguenti al verificarsi degli eventi critici valutati credibili e, infine, una valutazione, possibilmente quantitativa, delle conseguenze dei diversi scenari incidentali, incluse le aree di danno e gli elementi vulnerabili presenti entro tali aree. Anche per queste fasi esistono da anni degli standard internazionali riconosciuti: in particolare per la valutazione della probabilità di accadimento degli eventi critici il metodo più consolidato è l’analisi dell’albero dei guasti (FTA) secondo lo standard IEC 61025 [IE-006], mentre per la valutazione degli scenari l’albero degli eventi (ETA) secondo lo standard IEC 62502 [IE-010]. Per la valutazione delle conseguenze si usano software di simulazione numerica dei fenomeni di rilascio, dispersione, incendio ed esplosione. I software, sia commerciali che di pubblico dominio, si basano su alcune ipotesi semplificatorie e sono scelti tenendo conto della vulnerabilità del contesto e dei livelli di incertezza accettati. In questo campo non esistono degli standard di riferimento. Esistono solo dei software modellistici che essendo più diffusi degli altri garantiscono quanto meno una certa uniformità di risultato. La linea guida UNI 10616 riporta indicazioni dettagliate su disponibilità e applicabilità di tali software [UN-022]. Essi forniscono, sulla base dei diversi scenari ipotizzati, l’estensione spaziale delle conseguenze, le cosiddette aree di danno, in relazione ai diversi tipi di fenomeno coinvolto, fra i quali: irraggiamento termico, onda di pressione, concentrazione di sostanze tossiche in atmosfera. La proiezione sul territorio delle aree di danno attira sempre il maggiore interesse del pubblico potenzialmente coinvolto, ma è importante ricordare che, al di là delle ipotesi semplificatorie della modellistica, alla base di tutto ci stanno sempre gli scenari ritenuti credibili, calcolati sulla base delle probabilità di guasto dei numerosi sistemi tecnici inseriti nell’albero dei guasti e nell’albero degli eventi. Nella prassi comune le probabilità di guasto vengono assunte come costanti nel tempo. Si tratta però solo di un’ipotesi semplificatoria perché le probabilità di guasto cambiano nel tempo in funzione delle attività di verifica e di manutenzione, nonché per le modifiche che intervengono continuamente e per le varie forme di deterioramento possibile. In questo modo scenari inizialmente esclusi potrebbero, a causa di fenomeni di deterioramento incontrollati, diventare credibili, con aree di danno anche più estese. Allo stesso modo una gestione attenta degli impianti potrebbe rendere non più credibile un certo scenario, con eventuale riduzione delle aree di danno. È importante che la valutazione del rischio sia qualcosa di più di uno studio accurato ma risulti un documento vivo che, all’interno del sistema di gestione della sicurezza, sia la base per tutte le varie attività per la sicurezza, incluse la formazione e informazione, le procedure e le istruzioni di sicurezza, i programmi di manutenzione, la preparazione per le emergenze.

La legislazione Seveso richiede, fra le altre cose, che la valutazione del rischio sia riportata all’interno dei Rapporti di Sicurezza, documenti obbligatori per gli stabilimenti di soglia superiore e soggetti all’approvazione da parte delle Autorità Competenti. La legislazione Seveso richiede la re-

visione del “rapporto di sicurezza” ogni cinque anni, nonché in occasione di modifiche impiantistiche che costituissero aggravio di rischio oppure in caso di nuove conoscenze derivanti da incidenti o quasi-incidenti occorsi nel frattempo. La richiesta di aggiornamento periodico è esplicitamente indicata al comma 5 dell’articolo 10 della Direttiva EU/2012/18 Seveso III, recepito all’articolo 15 comma 8 del D.Lgs 105/2015.

La valutazione del rischio è comunque parte del sistema di gestione della sicurezza per la prevenzione degli incidenti rilevanti, richiesto sia per gli stabilimenti di soglia inferiore che superiore. Già nel 2008, l’Organisation for Economic Cooperation and Development OECD aveva condotto uno studio comparativo su 22 paesi confrontando i diversi tipi di documenti di sicurezza, le richieste delle normative nazionali e sovranazionali. Il documento, sviluppato da un gruppo di lavoro transnazionale aveva sottolineato l’importanza di avere la valutazione del rischio costantemente aggiornata, che possa essere una base solida per la gestione della sicurezza [OE -008]. È essenziale che all’interno del sistema di gestione sia assicurato un circolo virtuoso fra la gestione di tutti i cambiamenti e l’aggiornamento della valutazione del rischio. I cambiamenti da considerare non sono solo le modifiche impiantistiche per le quali esiste una vincolante procedura di legge, ma anche tutti i cambiamenti organizzativi e gestionali, le modifiche nei parametri operativi, delle materie prime e dei prodotti, nonché del contesto di stabilimento (es. invecchiamento) e del contesto esterno (es. urbanizzazione, cambiamenti climatici). Anche i dati su incidenti, quasi incidenti ed anomalie, raccolti sistematicamente per anni, forniscono elementi utili a individuare meglio i pericoli ed affinare la valutazione del rischio.

L’aggiornamento frequente della valutazione del rischio è sicuramente un passo importante per ottenere un sistema di gestione più efficace, idoneo a facilitare in modo significativo anche il lavoro di lavoro di revisione del Rapporto di Sicurezza, quando richiesto dalla legislazione vigente. Per gli stabilimenti di soglia inferiore il procedimento è più fluido, perché la valutazione del rischio risulta all’interno del sistema di gestione e non è richiesta una valutazione da parte delle autorità, non essendo previsto il Rapporto di Sicurezza. L’aggiornamento frequente della valutazione del rischio per garantire la massima aderenza alla realtà di stabilimento è una pratica già attuata da alcuni gestori e talvolta raccomandata nell’ambito delle ispezioni ex art. 27 del d.lgs. 105/2015. È importante che ad ogni passo del processo valutativo ci sia la comunicazione e consultazione con i soggetti interessati e un allineamento fra le valutazioni e la realtà della gestione. La valutazione del rischio è finalizzata, poi, al trattamento del rischio che dovrebbe portare a migliorare il controllo sui pericoli e quindi a ridurre i rischi.

Grazie alle Direttive Seveso che si sono succedute fin da metà degli anni Ottanta, all’impegno dei gestori e all’attività degli enti di controllo, si è avuta una notevole riduzione degli incidenti nel settore chimico e di processo. Gli stessi infortuni sul lavoro all’interno degli stabilimenti Seveso risultano molto inferiori per gravità e frequenza rispetto a quelli degli stabilimenti similari non ricadenti nell’ambito di applicazione della Direttiva. La nuova sfida è quella della completa eliminazione degli incidenti chimici. Le tecnologie di controllo dei processi, degli impianti e degli ambienti si sono sviluppate enormemente nell’ultimo decennio e rendono questo traguardo non più così utopistico. Il perseguimento di tale ambizioso obiettivo richiede di andare oltre la valutazione del rischio tradizionale, superandone le intrinseche limitazioni metodologiche.

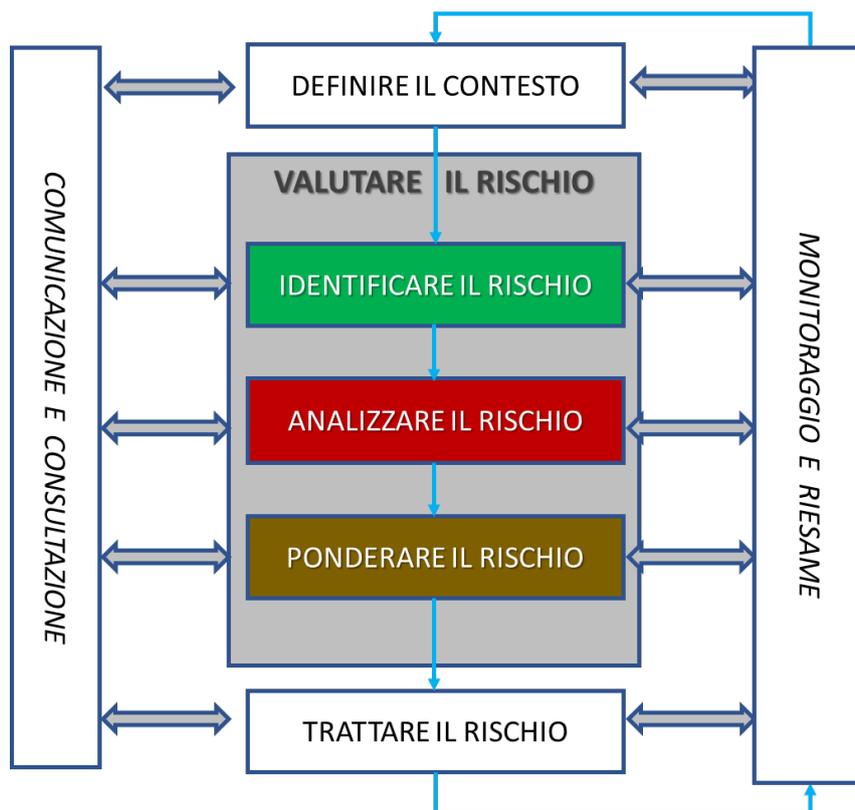


Figura 1 - La gestione del rischio secondo lo schema ISO31000, adattato da [ISO 019]

Gli standard citati all’inizio, infatti, si basano tutti su una ipotesi stazionaria. In altre parole, i pericoli si immaginano o costanti o al più soggetti a cicli ricorrenti, facilmente prevedibili. I singoli fattori probabilistici, come ad esempio i ratei di guasto, sono assunti costanti nel tempo. Anche nello schema ISO 31000 riprodotto in Figura 1, risulta evidente come più che sulla dinamicità l’accento sia posto sulla ricorsività o ciclicità del processo.

In particolare, nello schema si prevede esplicitamente che ad ogni passo del processo valutativo ci sia un riscontro con i soggetti interessati attraverso la comunicazione e consultazione e il monitoraggio e riesame di quanto raggiunto con le attività di prevenzione, il tutto per assicurare un adeguato allineamento fra il ciclo valutativo ed il ciclo operativo. Si tenga presente che comunque lo schema ISO 31000 non è neppure obbligatorio negli stabilimenti Seveso. Esiste uno standard UNI per i sistemi di gestione per la prevenzione degli incidenti rilevanti, UNI 10617 [UN-019], che fa riferimento ad ISO 31000, ma neppure questo è obbligatorio e di fatto viene adottato dalle aziende più avanzate, che vedono la sicurezza non come un obbligo da rispettare ma come una opportunità di sviluppo e di successo.

1.2 La valutazione del rischio nella gestione dell’integrità

In ambito industriale, da circa venti anni è stato adottato da molti gestori l’approccio RBI, acronimo per Risk Based Inspection. L’approccio RBI è specifico per la gestione dell’integrità delle attrezzature impiantistiche e in particolare dei sistemi di contenimento primari statici. In buona sostanza, recipienti e tubazioni, atmosferiche o in pressione. Lo scopo della RBI è di massimizzare contempo-

raneamente affidabilità delle attrezzature e disponibilità dell'impianto, riducendo i tempi di fermo ed ottimizzando frequenza e tipologia delle ispezioni. La RBI è di grande importanza per il controllo operativo dell'impianto e la manutenzione, che sono parti essenziali della gestione della sicurezza. Nella normativa tecnica italiana ed europea si esplicita la necessità di una coerenza fra le valutazioni del rischio fatte in ambito RBI e quelle fatte in ambito prevenzione degli incidenti rilevanti [UN-013; EN-018]. Non rientra nello scopo del presente quaderno entrare nella discussione sulle diverse linee guida che seguono l'approccio RBI, sviluppandolo in termini sia qualitativi che quantitativi e calandolo in contesti industriali specifici. Ai fini del "rischio dinamico" è invece importante ricordare che il documento più diffuso e completo è la linea guida API 581 [AP-016]. In tale linea guida le probabilità di guasto sono calcolate partendo dai dati storici di frequenza (ratei di guasto) noti a priori dalla letteratura tecnica e sono oggetto di periodica rivalutazione, tenendo conto di

- ✓ conoscenze aggiornate sui meccanismi conosciuti,
- ✓ condizioni reali rilevate nelle ispezioni,
- ✓ efficacia delle tecniche di misura utilizzate.

Senza entrare troppo nei dettagli, si può dire che l'API 581 sfrutta al massimo la forza dell'approccio bayesiano e riesce così ad incorporare i dati, provenienti dalle nuove prove e misure, nelle credenze precedenti per formare una stima aggiornata. I dati raccolti nell'esperienza operativa e in particolare le registrazioni di rotture e guasti di famiglie omogenee di attrezzature rientrano bene nello schema bayesiano dell'API 581 e possono contribuire a rivalutare le probabilità di guasto utilizzabili anche nell'analisi del rischio svolta in ambito Seveso [MI-022].

1.3 L'approccio delle finestre operative (IOW)

Un punto debole dell'approccio RBI è che le ispezioni vengono fatte ad un certo tempo t , facendo una serie di ipotesi a priori sull'esercizio dell'impianto. Nel caso di molti meccanismi, inclusa la corrosione da sulfidazione a caldo, le condizioni ipotizzate possono cambiare successivamente cosicché le valutazioni RBI perdono di attendibilità, prima che venga completato il periodo Δt entro il quale si sarebbero dovute condurre le ispezioni. A parziale rimedio con la norma API 584 [API-022] sono state introdotte le cosiddette finestre operative. Le ipotesi formulate nell'analisi RBI sono ritenute valide a condizione che i parametri di processo restino dentro dei limiti fissati, detti appunto finestre operative. I parametri possono essere temperatura, pressione, velocità di flusso, acidità, ecc. Per ciascun parametro rilevante ci saranno un limite superiore ed un limite inferiore (limiti standard) che definiscono le condizioni normali di esercizio e due ulteriori limiti (limiti critici) che definiscono le condizioni di tollerabilità. L'esercizio nella zona di tolleranza fra limite standard e limite critico è possibile solo per intervalli di tempo e con l'applicazione di misure specifiche, indicate nella linea guida stessa. Resta escluso l'esercizio al di fuori dei limiti critici, che indurrebbe rischi non gestibili. Nel tempo esercito fuori dalle finestre, gli effetti dei meccanismi di deterioramento saranno accelerati rispetto al normale decorso, implicando una riduzione temporale della frequenza dell'ispezione successiva.

1.4 Necessità di maggiore dinamicità nella valutazione del rischio

In molti settori, la realtà si dimostra più complessa da gestire di quanto indicato negli standard.

I cambiamenti sono continui, per star dietro a mercati particolarmente complessi, come quello dell'energia o per rispettare standard ambientali sempre più stringenti, come nel caso della chimica "green". Se si avesse a disposizione momento per momento una valutazione del livello di rischio aggiornata si potrebbero intercettare più facilmente quelle condizioni che rendono poi possibile l'evento incidentale. Per ridurre a zero gli incidenti di processo non è necessario seguire un approccio particolarmente cautelativo, che indurrebbe costi non sostenibili, ma è più efficace seguire un approccio dinamico, che consente di inseguire il rischio, tallonarlo, così da attuare misure mirate al momento giusto. Qualcuno utilizza la metafora del barometro [BU-017], che dà riscontro immediato dei cambiamenti di pressione che preannunciano i fenomeni meteorologici. Allo stesso modo si immagina un sistema che avvisi di potenziali situazioni pericolose con un certo anticipo, in modo che si possano prendere le decisioni giuste al momento opportuno.

La spinta della transizione energetica, che negli ultimissimi anni è diventata fortissima, è senz'altro uno dei fattori primari che spingono ad un approccio "dinamico" nella valutazione del rischio. Non bisogna, tuttavia, dimenticare altri fattori che sostengono la "domanda" di dinamismo che emerge dal contesto applicativo "Seveso". Fra questi sicuramente la questione invecchiamento è di significativa importanza. L'attenzione verso la questione è nata da circa un decennio, ma al momento si è tradotta in una aumentata attenzione alla tematica nelle attività ispettive svolte su incarico dell'autorità competente. L'invecchiamento degli impianti mette però in crisi una delle ipotesi fondamentali dell'analisi del rischio classico, cioè che le frequenze di guasto siano costanti nel tempo. Questa ipotesi è alla base i metodi standard citati al precedente paragrafo, inclusi FTA e ETA. L'invecchiamento delle apparecchiature, invece, può portare ad una maggiore probabilità di guasto e conseguentemente rendere nel tempo superate le valutazioni fatte in anni precedenti, pur in assenza di cambiamenti impiantistici o di processo. Anche l'esistenza di concentrazione industriale, a volte soggetta a valutazioni del rischio d'area, è un ulteriore fattore che motiva la valutazione dinamica del rischio.

Un obiettivo per il quale la valutazione dinamica è decisiva è quello dei poli industriali senza incidenti. Le concentrazioni di impianti in aree ristrette risale agli anni del boom economico ed è presente in tutta Europa. Nonostante i vari problemi, tali aree sono una formidabile risorsa, per la condivisione di servizi, impianti e strutture, nonché per la presenza di una diffusa cultura della sicurezza. Le aree sono spesso individuate per nuove installazioni industriali in sostituzioni di quelle obsolete, proprio per le sinergie presenti. Per potersi mantenere attrattive queste aree devono però liberarsi del preconetto negativo che le accompagna, proponendosi come "accident free". Questo è quello che sta facendo da alcuni anni l'area industriale del Delta, nei pressi di Rotterdam, che è, fra impianti e depositi, la maggiore concentrazione petrolchimica d'Europa. Questo dovranno fare anche aree come quelle di Priolo, Brindisi o Genova per restare poli economici ed occupazionali di primordine.

Nei decenni passati l'ambito Seveso è stato fra i primi ad introdurre l'osservazione dei mancati incidenti, i cosiddetti near-miss che consentono di osservare il sistema in profondo, identificando in una sorta di catena causale, le cause sottese, correggendone gli errori anche a livello di quadri intermedi e cultura aziendale, così da prevenire eventi più gravi, o potenziali effetti a cascata [FA-012; AN-019].

Nel tempo si è estesa l'osservazione anche alle anomalie e situazioni di pericoli, fornendo sempre più dati per aggiustare il tiro. Il passaggio da una valutazione di massima del rischio ad una valutazione di precisione è la condizione per un controllo stringente sui possibili eventi incidentali.

Lo sviluppo della sensoristica e le possibilità di comunicazione sono fra le tecnologie abilitanti di industria 4.0. Le segnalazioni di anomalie possono diventare automatiche o quasi ed aumentare di alcuni ordini di grandezza i dati a disposizione per le valutazioni richieste. I near-miss inizialmente furono visti come una efficace strategia gestionale per individuare la debolezza del sistema e rimediarle, nel tempo sono andati acquisendo importanza anche nella valutazione del rischio. Infatti, specialmente in impianti che hanno una lunga storia, l'individuazione a priori delle possibili deviazioni, sulle quali si concentra il citato metodo Hazop, può essere aggiornata confrontandola a posteriori con le anomalie effettivamente registrate in fase di esercizio.

Per ottenere la dinamicità richiesta non basta aggiornare con buona frequenza le valutazioni condotte con i metodi standard. Questo in parte è già entrato nella pratica corrente, almeno nelle situazioni che possono essere considerate virtuose. Occorre pensare anche a strumenti innovativi di valutazione e calcolo. I metodi principali, quali ad esempio albero dei guasti e albero degli eventi possono ancora essere utilizzati, ma potenziati ed aggiornati con metodi di calcolo del tutto innovativi.

Nell'ambito della presente ricerca sono stati valutati e utilizzati diversi metodi per dare dinamicità alla valutazione del rischio. L'idea è sempre quella di utilizzare metodi matematici innovativi, sfruttandone le potenzialità in diversi contesti, sempre legati al contesto Seveso. Le questioni prese in considerazione sono diverse e riguardano la gestione sicura dell'invecchiamento degli impianti, la gestione di greggi difficili con differenti effetti corrosivi e le ricadute su affidabilità e rischio incidentale nell'ambito della raffinazione, la gestione di terminali petroliferi complessi, che scaricano prodotti molto diversi da imbarcazioni di vario tipo, con differenti livelli di rischio. I metodi utilizzati includono le reti bayesiane, le reti neurali e le catene di Markov. Nei capitoli successivi vengono descritti nel dettaglio i metodi messi a punto e le loro applicazioni in situazioni operative.

Le tipologie di stabilimento considerate nella sperimentazione sono significative per l'importanza dei pericoli esistenti e rappresentative di realtà presenti in molte regioni italiane: la raffinazione del petrolio, lo stoccaggio e il trasferimento di prodotti petroliferi. Questi stabilimenti sono particolarmente interessati dalla transizione energetica che, prevedendo nuovi prodotti e nuove materie prime, pone sfide importanti al settore, anche sul piano della sicurezza. La valutazione dinamica del rischio consente di affrontare meglio queste sfide. Queste tipologie di stabilimenti si trovano in contesti fortemente urbanizzati, dove le autorità locali pongono, giustamente, richieste più alte in termini di sicurezza per i cittadini, il territorio e l'ambiente. La valutazione dinamica del rischio, attuata con i metodi qui presentati, può essere un fattore importante verso l'obiettivo di zero incidenti, presupposto per migliore convivenza fra industria e comunità locali.

2 Inquadramento Scientifico

L'approccio convenzionale all'analisi quantitativa del rischio prevede l'utilizzo di un set di metodologie quantitative pervenendo a risultati che, sebbene affetti da margini di incertezza e discrezionalità, fino a tempi recenti sono stati considerati come la stima più affidabile a disposizione per la previsione del rischio associato ai processi complessi, che coinvolgono le operazioni pertinenti a diverse tipologie di industria, dai trasporti alla petrolchimica [PR-014].

Tuttavia, l'Analisi del Rischio Quantitativa convenzionale (QRA) risulta fortemente condizionata

dall'intrinseca staticità dell'approccio utilizzato, limitando così la capacità di captare le variazioni cui l'impianto, il sito produttivo o, più in generale, il dominio d'analisi è soggetto durante il proprio ciclo di vita (Figura 2).

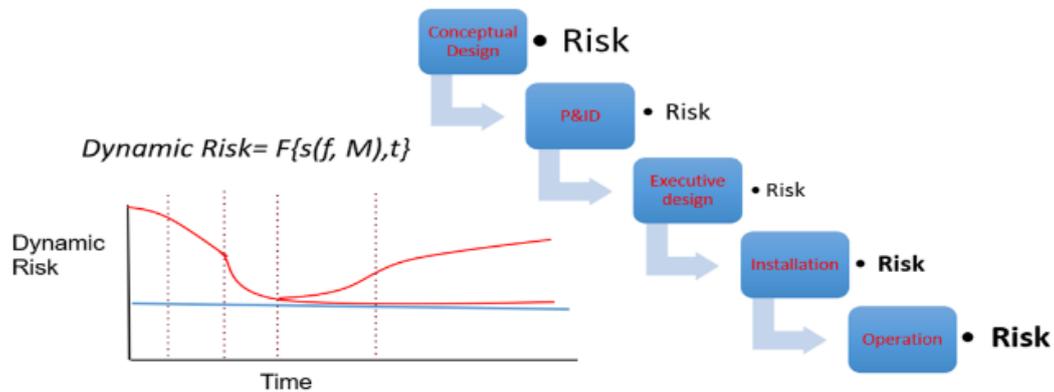


Figura 2 - Variazione del livello di rischio associato ad un processo nelle fasi di progettazione, start-up e di esercizio (s= scenario; f = frequenza; M magnitudo; t= tempo)

Nonostante la comprovata efficacia nell'identificazione di pericoli potenziali in diverse applicazioni e settori, essa manca di quella dimensione dinamica che presuppone la capacità di imparare da nuove nozioni, da esperienze e da allarmi precoci, e la capacità di cogliere le interazioni e interdipendenze tra sistemi complessi che il continuo monitoraggio delle variabili coinvolte nel processo suggerisce mediante le informazioni estraibili.

Nell'era di un'industria sempre più digitalizzata, capace di fornire informazioni dettagliate istante per istante sullo stato delle operazioni in essere, mediante sensoristica diffusa e capacità di immagazzinamento e gestione di dati, un'analisi del rischio basata su approcci convenzionali risulta pertanto quantomeno limitante, stante l'evidente impossibilità di rilevare "early signals", indicativi del verificarsi di una deviazione potenzialmente pericolosa [PA-021]. La possibilità di sfruttare efficacemente la mole di informazioni resa disponibile dai dati di monitoraggio, come strumento di supporto alla conoscenza degli esperti, è attualmente la migliore opportunità che l'ingegneria della sicurezza ha a disposizione per ridurre il livello di rischio e permettere simultaneamente un miglioramento delle prestazioni dei processi. L'analisi dinamica del rischio è infatti concepita come una metodologia che aggiorna il rischio stimato di un processo in base alle prestazioni del sistema di controllo, delle barriere e delle attività di ispezione e manutenzione.

L'estesa ed approfondita fase di analisi critica riguardante lo stato dell'arte, ha evidenziato la emergente necessità di un processo di valutazione del rischio più dinamico e conveniente come sottolineato da diversi autori [JA-018; LE-020; NA-021; OS-021; VA-019; VA-021].

Il rilevamento e il riconoscimento dei segnali di allerta precoce rappresentano fattori essenziali per garantire risposte di emergenza efficaci. A questo proposito, l'intelligenza artificiale AI rappresenta uno strumento importante per monitorare continuamente il livello di rischio degli impianti, consentendo una migliore identificazione semiautomatica dei pericoli, una valutazione del rischio più accurata e statistiche avanzate e rivelando strutture causa-effetto [PA-021]. Recentemente, si sono diffusi approcci all'analisi del rischio basati sui dati, che mostrano una buona

capacità di rappresentare dinamicamente il rischio e di cogliere le co-dipendenze di sistemi complessi [MA-021; NH-020; SA-019] possibilmente consentendo il rilevamento precoce dei guasti sulla base di una soluzione efficace al problema di apprendimento della sequenza dipendente dal tempo [AR-021]. L'approccio più utilizzato prevede l'estensione delle reti bayesiane BN, originate dall'esplorazione dell'incertezza nel campo dell'AI, alle tradizionali tecniche di valutazione del rischio [KA-009; ME-022; TA-022; VA-020, YA-013]. A tale riguardo, le BN si sono dimostrate uno dei modelli teorici più efficaci per rappresentare l'incertezza [GU-021]. Tali modelli hanno mostrato prestazioni soddisfacenti ed affidabili nel calcolo quantitativo di sistemi complessi in applicazioni, quali la valutazione della sicurezza dei processi [GH-020], l'analisi del rischio di attacchi terroristici [ZH-021] e l'analisi dei fattori di rischio nella perforazione in acque profonde [LI-021].

A tale riguardo, la maggior parte delle strategie proposte riguardano un profondo cambiamento nel processo inferenziale [GA-019; PL-019; SR-021]. L'inferenza è stata identificata quale il modo di ragionare e di prendere decisioni in condizioni di incertezza. La statistica inferenziale è la procedura in base alla quale le osservazioni di un campione di dati vengono utilizzate per fare considerazioni sulla più ampia popolazione da cui il campione è stato estratto. È ovvio che il campione considerato deve rispecchiare in modo accurato e significativo la popolazione. Tale requisito, tuttavia, non sempre è di agevole raggiungimento. Nei sistemi complessi reali, infatti, non si hanno a disposizione tutti i dati, ma solo sottoinsiemi spesso scarsamente rappresentativi.

Nella pratica corrente, la QRA si basa su un "approccio frequentista" che calibra la plausibilità delle proposizioni considerando campionamenti ripetuti di una distribuzione di popolazione [XU-023]. La valutazione delle proprietà "frequentiste" di una proposizione statistica fornisce valori fissi, dalle quali origina la staticità intrinseca dell'approccio tradizionale di cui si è accennato sopra. Per progettare un modello di valutazione del rischio dinamico, è quindi necessario esplorare un altro ramo della statistica inferenziale, ovvero l'inferenza abduttiva [PR-013]. La definizione di abduzione la indica come "un sillogismo" composto da una premessa maggiore evidente e una premessa minore probabile, da cui deriva una conclusione solo probabile. In sostanza, la conclusione viene tratta dalle informazioni conosciute, e pertanto, è sempre soggetta a modifiche, cambiamenti e miglioramenti, quando l'informazione conosciuta aumenta.

Il ragionamento abduttivo inizia tipicamente con una serie incompleta di osservazioni e procede alla spiegazione più probabile per l'insieme [TS-997].

Nell'approccio abduttivo, la conclusione è sempre una "best guess" che viene continuamente aggiornata da nuove evidenze. Questo è un approccio intrinsecamente dinamico [GR-021]. Il quadro sviluppato nel presente lavoro si basa sull'inferenza abduttiva bayesiana, che è il cuore del modello implementato. Infatti, come ampiamente noto, il teorema di Bayes è proprio la rappresentazione matematica dell'approccio abduttivo, definendo, di volta in volta, la migliore previsione possibile sulla base delle osservazioni che si presentano.

Le distribuzioni posteriori di probabilità così ricavate possono pertanto essere utilizzate per rappresentare la più probabile previsione sulla propagazione dinamica di una condizione potenzialmente dannosa.

Il modello dinamico proposto risulta altamente versatile, potendo essere utilizzato sia per la valutazione del rischio di incidente durante le normali operazioni di processo, sia per la manutenzione predittiva degli impianti, integrando le metodologie RBI e tenendo conto del loro complessivo ciclo di vita.

3 Metodi innovativi

L'abduzione è la logica che permette di ricavare le migliori spiegazioni per le osservazioni parziali che si hanno a disposizione. L'abduzione statistica tenta di definire una distribuzione di probabilità sulle spiegazioni, valutandole in base alle loro probabilità.

L'inferenza abduttiva è utilizzata in molti noti modelli probabilistici, come le reti bayesiane BNN, i modelli di Markov a stati nascosti HMM e i modelli probabilistici ad albero [SK-021].

Il processo inferenziale abduttivo si può definire come segue:

- *Dati*: Conoscenza di base B e osservazioni O , entrambe rappresentate come insiemi logici del primo ordine;
- *Trovare*: Un'ipotesi H , anch'essa un insieme di logiche, tale che $B \cup H \neq \perp$ e $B \cup H = O$ (dove $=$ significa implicazione logica e \perp significa falso, cioè trovare un insieme di ipotesi che sia coerente con la teoria di base e che spieghi le osservazioni).

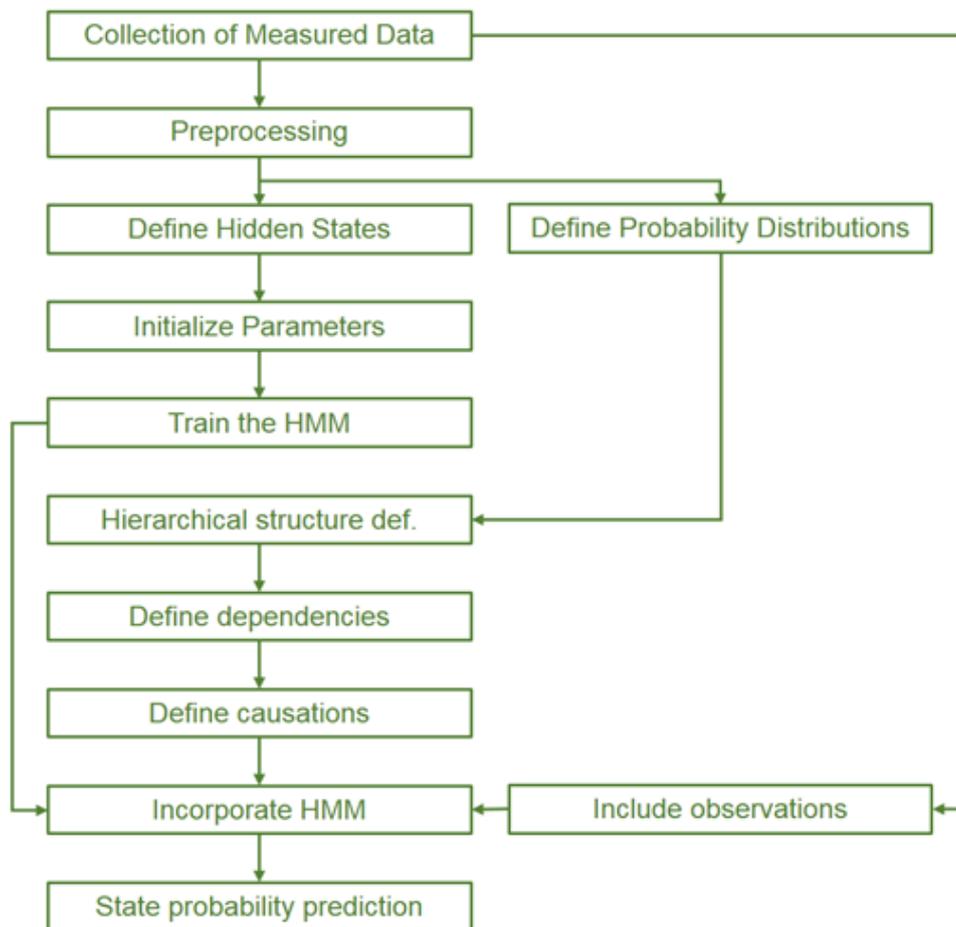


Figura 3 - Schema logico del complessivo modello DYN-RISK

In Figura 3 viene proposta la schematizzazione logico sequenziale del complessivo modello sviluppato. Diversi ricercatori hanno applicato l'abduzione logica a compiti come il riconoscimento di pattern e la diagnosi [NG-992].

I passaggi logici del modello DYN-RISK sono sintetizzabili secondo la sequenza:

- previsione dei valori delle variabili critiche
- previsione della sequenza di stati del sistema
- aggiornamento in tempo reale dei parametri di rischio, che definiscono un indicatore di rischio dinamico.

3.1 Reti Neurali

La componente del modello che ha il compito di predire i valori delle variabili critiche è una serie di reti neurali dense o Deep Neural Networks (DNN). Una rete neurale densa è una rete neurale artificiale (ANN) caratterizzata da più strati tra lo strato di input e quello di output. Esistono diversi tipi di reti neurali, ma sono sempre costituite dagli stessi componenti: neuroni, sinapsi, pesi, bias (letteralmente pregiudizi) e funzioni. Le DNN possono modellare complesse relazioni non lineari.

Le architetture DNN generano modelli compositivi in cui l'oggetto è espresso come composizione stratificata delle primitive. I livelli aggiuntivi consentono la composizione di funzionalità dai livelli inferiori, modellando potenzialmente dati complessi con meno unità rispetto a una rete poco densa con prestazioni simili. Le architetture dense includono molte varianti di alcuni approcci di base. Ciascuna architettura ha riscontrato successo in domini specifici e non è sempre possibile confrontare le prestazioni di più architetture, a meno che non siano state valutate sugli stessi set di dati.

Le DNN sono in genere reti *feed forward* in cui i dati fluiscono dallo strato di input allo strato di output senza tornare indietro. Inizialmente, la DNN crea una mappa di neuroni virtuali e assegna valori numerici casuali, o "pesi", alle connessioni tra di loro. I pesi e gli input vengono moltiplicati e restituiscono un output compreso tra 0 e 1. Se la rete non riconoscesse accuratamente un particolare modello, un algoritmo regolerebbe i pesi, rendendo alcuni parametri più influenti, fino a determinare la corretta manipolazione matematica per elaborare completamente i dati [VA-021].

La funzione di attivazione esegue l'analisi e l'elaborazione dei dati; quando la somma degli ingressi ponderati e dei bias supera una precisa soglia di attivazione, la funzione di attivazione considera l'argomento valido ed elaborabile. Il parametro del peso quantifica l'importanza degli input. I pesi e i bias vengono corretti dall'algoritmo di apprendimento per adattare la rete all'insieme di dati in ingresso. Lo schema di elaborazione dei dati è illustrato nella Figura 4.

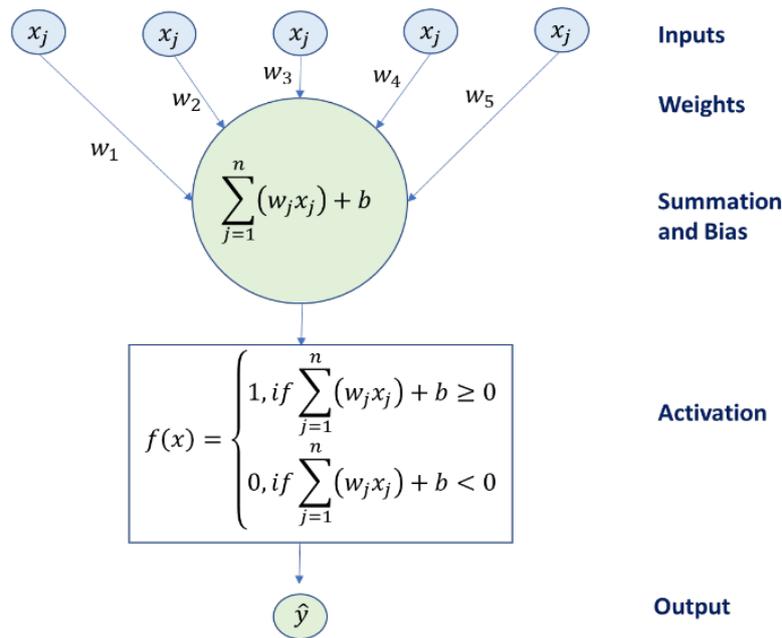


Figura 4 - Schema logico di una rete neurale

3.2 Modelli di Markov a stati nascosti

Un modello di Markov a stati nascosti (HMM - Hidden Markov Model) è un modello statistico utilizzato per modellare sequenze di osservazioni. È particolarmente utile per i problemi in cui lo stato di un sistema non è osservabile direttamente, ma può essere solo dedotto dalle osservazioni effettuate. Gli HMM sono ampiamente utilizzati nel riconoscimento vocale, nel riconoscimento della scrittura a mano e in altre applicazioni che coinvolgono dati sequenziali [NI-014; RY-012; RE-018; SG-018; SB-018].

L'algoritmo di Baum-Welch, noto anche come algoritmo *forward-backward* o algoritmo di massimizzazione delle aspettative (EM, Expectation Maximization), è un metodo estesamente adottato e validato nella comunità scientifica per l'addestramento degli HMM. Si tratta di un algoritmo iterativo che stima i parametri di un HMM in base a un insieme di osservazioni [AB-016].

Il processo di apprendimento di un HMM mediante l'algoritmo di Baum-Welch può essere descritto nelle seguenti fasi:

1. *Inizializzazione*: L'algoritmo inizia con una stima iniziale dei parametri dell'HMM, come le probabilità di transizione e le probabilità di emissione.
2. *Forward-Backward*: L'algoritmo esegue un passaggio avanti-indietro sulle osservazioni. Il passaggio in avanti calcola la probabilità di osservare ogni sequenza fino a un determinato passo temporale, data la stima corrente dei parametri. Il passaggio all'indietro calcola la probabilità di osservare ogni sequenza da un particolare passo temporale alla fine, data la stima corrente dei parametri. Queste probabilità sono utilizzate per stimare il numero atteso di volte in cui il modello si trova in ogni stato e il numero atteso di volte in cui ogni stato emette ogni osservazione.
3. *Stima dei parametri*: I risultati della fase 2 vengono utilizzati per aggiornare i parametri dell'HMM. In particolare, le probabilità di transizione vengono aggiornate utilizzando il numero previsto di transizioni tra gli stati e le probabilità di emissione vengono aggiornate utilizzando

il numero previsto di volte che ogni stato emette ogni osservazione.

4. *Ripetizione*: Le fasi 2 e 3 vengono ripetute fino alla convergenza. I criteri di convergenza possono variare, ma un approccio comune è quello di fermarsi quando la variazione della log-likelihood delle osservazioni è inferiore a una certa soglia.
5. *Output*: L'algoritmo produce i parametri stimati dell'HMM, che costituiscono la base delle previsioni.

Il HMM rappresenta pertanto un modello predittivo. Infatti, una volta definiti i parametri secondo lo sviluppo logico di apprendimento multistep sopra richiamata, risulta in grado di prevedere una sequenza di stati nascosti in base ad una sequenza di eventi osservati.

Il processo predittivo in un HMM prevede tipicamente due fasi: il filtraggio e la previsione.

1. *Filtraggio*: Nella fase di filtraggio, si utilizzano i dati osservati fino al momento attuale per stimare la distribuzione di probabilità dello stato nascosto corrente. Questo viene fatto utilizzando l'algoritmo forward, che calcola la verosimiglianza dei dati osservati fino al momento attuale, dato lo stato nascosto corrente. Il risultato di questa fase è una stima della distribuzione di probabilità dello stato nascosto attuale, dati i dati osservati fino al momento attuale.
2. *Previsione*: Nella fase di previsione, si utilizza la distribuzione di probabilità stimata dello stato nascosto attuale per prevedere la distribuzione di probabilità degli stati nascosti futuri. Tale risultato si ottiene utilizzando le probabilità di transizione del modello, che descrivono la probabilità di passare da uno stato nascosto a un altro. Moltiplicando la distribuzione di probabilità stimata dello stato nascosto corrente per le probabilità di transizione, si ottiene la distribuzione di probabilità predetta dello stato nascosto successivo. Il processo in questione può essere reiterato onde pervenire alla completa previsione di un esteso numero di stati futuri.

Se il modello si adatta bene ai dati e i dati osservati sono affidabili, la previsione degli stati futuri del sistema è robusta.

Dato un HMM con spazio degli stati S , probabilità iniziali π_i di essere nello stato i , probabilità di transizione a_{ij} di passare dallo stato i allo stato j , e un insieme di osservazioni y_1, \dots, y_T , la sequenza di stati più probabile x_1, \dots, x_T , che produce le osservazioni è data dalle equazioni (1) e (2).

$$V_{1,k} = P(y_1 | k) \pi_i \tag{1}$$

$$V_{t,k} = \max_{x \in S} (P(y_t | k) a_{x,k} V_{t-1,x}) \tag{2}$$

Dove $V_{t,k}$ è la probabilità della sequenza di stati più probabile $P(x_1, \dots, x_t, y_1, \dots, y_t)$ responsabile delle prime osservazioni che hanno k come stato finale.

La rappresentazione schematica di un HMM è in Figura 5.

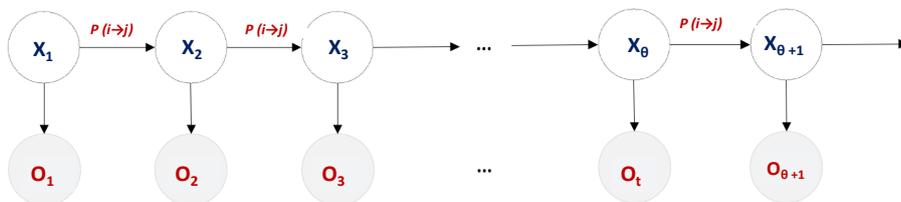


Figura 5 - Schema Hidden Markov Model

3.3 Il modello DYN-RISK

Gli elementi booleani dell'analisi del rischio e le previsioni della sequenza di stati del sistema sono integrati in una rete bayesiana. In una rete bayesiana, o Bayesian Network BN, i nodi sono connessi da archi direzionali che rappresentano i nessi causali fra variabili. I nodi che puntano ad un certo nodo sono i "genitore" del nodo; i genitori all'inizio della catena sono chiamati anche nodi radice. Le relazioni fra variabili sono quantificate da distribuzioni di probabilità condizionale associate con ciascun nodo, dove gli stati dei nodi figli dipendono dai nodi genitore. Per un approfondimento sulle reti Bayesiane, vedi A2 in appendice.

Gli alberi dei guasti (FT) vengono rimappati come nodi di una rete bayesiana, secondo lo schema logico riportato nella Figura 6.

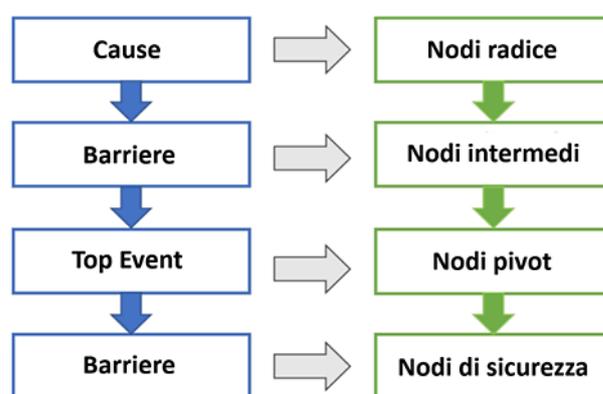


Figura 6 - Schema applicativo di sviluppo della rete bayesiana gerarchica basata sui risultati dell'analisi mediante alberi di guasto. (Adattata da Vairo et al., 2022).

L'analisi quantitativa di una rete bayesiana può procedere secondo due linee. Un'analisi in avanti (o predittiva), in cui la probabilità di occorrenza di un qualsiasi nodo della rete viene calcolata sulla base delle probabilità precedenti dei nodi radice e delle probabilità condizionali dei nodi radice, e sulla dipendenza condizionale di ciascun nodo; e un'analisi retrospettiva (diagnostica) che riguarda il calcolo della probabilità posteriore di un dato insieme di variabili date alcune osservazioni (l'evidenza), rappresentate come istanze di alcune variabili a uno dei loro valori ammissibili.

Nel modello DYN-RISK, le probabilità a priori dei nodi sono rappresentate dai tassi di guasto utilizzati nella FTA. L'approccio incorpora diversi sistemi di intelligenza artificiale in una logica completa e interconnessa, vale a dire sensori soft, che hanno una solida capacità predittiva sulle variabili di processo e sistemi inferenziali gerarchici, che esplorano le interdipendenze tra i componenti del sistema in relazione alla fluttuazione delle variabili di processo. I *soft sensor*, basati su reti neurali profonde, si appoggiano alla rete di monitoraggio in tempo reale delle variabili critiche di processo e sono in grado di prevedere l'andamento delle stesse variabili su una opportuna scala temporale durante le operazioni in corso. I parametri vengono aggiornati, da un lato, dalle previsioni dei valori delle variabili di processo, ad opera delle reti neurali e, dall'altro, dalle previsioni degli stati di sistema ad opera dei HMM che definiscono i parametri delle distribuzioni di probabilità per ogni nodo della rete [BD-013; AL-021]. I sotto-modelli si combinano per formare il modello gerarchico e il teorema di Bayes viene utilizzato per integrarli con i dati osservati e tenere conto di tutta l'incertezza presente.

L'architettura generale del modello DYN-RISK è rappresentata nella Figura 7.

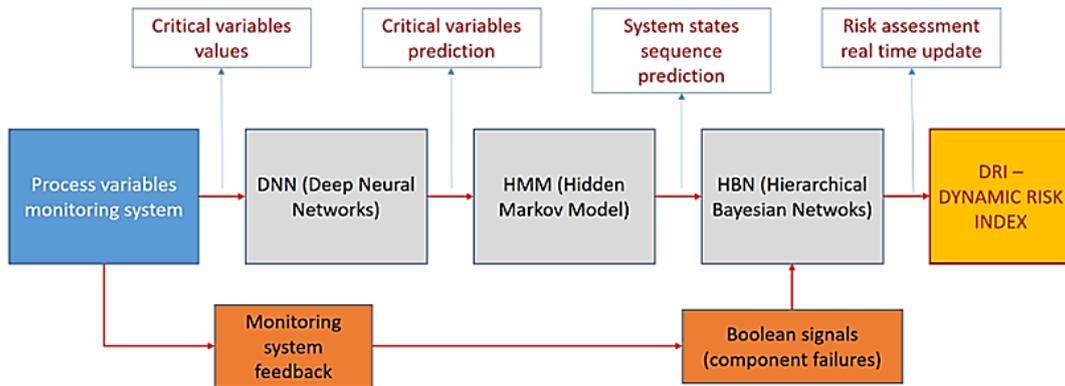


Figura 7 - Architettura generale modello DYN-RISK. Adattata da [VA-022].

4 Gestione dinamica delle attrezzature critiche in una raffineria

Nell'ambito del metodo RBI, discusso in dettaglio nel §1.2, uno dei parametri più rappresentativi per indicare il grado di affidabilità di un'attrezzatura lungo il periodo di esercizio è la vita utile residua, di solito indicata con l'acronimo RUL, che sta per Residual Useful Life. Esso rappresenta l'intervallo di tempo a partire dal momento presente per il quale l'attrezzatura può essere esercitata in sicurezza. Il concetto di RUL è legato al concetto di accettabilità / non accettabilità del rischio e al fatto che la probabilità di rottura aumenta in funzione del tempo trascorso. In termini probabilistici il RUL è l'intervallo di tempo entro il quale la probabilità di rottura resta largamente al di sotto del limite accettabile. Esercizio un impianto quando il RUL è pari o inferiore a zero, implica un aumento inaccettabile del rischio. Al momento di messa in esercizio RUL coincide con il tempo di vita utile t_0 . Questo sarà definito sulla base della distribuzione della probabilità di rottura, nota a priori sulla base dei dati storici e della valutazione soggettiva del progettista, fatta in base ai materiali e alle condizioni ipotizzate di esercizio, inclusi temperatura, pressione, flusso, composizione chimica dei fluidi contenuti. Nella vita reale dell'impianto le condizioni di esercizio possono essere diverse ed il processo di deterioramento dei materiali può essere accelerato o ritardato rispetto a quanto immaginato. Se i materiali all'epoca della costruzione erano materiali di nuovo tipo, si aggiunge anche l'incertezza dovuta ai pochi dati allora disponibili sulla risposta dei materiali stessi alle condizioni operative. Attraverso le successive ispezioni è possibile verificare lo stato reale dei materiali nonché le eventuali esperienze operative e rivalutare con la matematica bayesiana le probabilità di rottura in funzione del tempo e ricalcolare finalmente il nuovo RUL.

Questo approccio è attualmente in uso nella maggior parte degli impianti di processo, inclusi raffinerie e petrolchimici. Il punto di forza è che contiene in sé già una certa dinamicità rispetto agli approcci più convenzionali, essendo previsto un periodico aggiornamento sulla base dei nuovi dati. Questi aggiornamenti, per la maggior parte delle attrezzature, possono essere fatti solo in occasione delle fermate, che hanno cadenze tipicamente decennali. Nel caso di impianti soggetti ad una forte variabilità delle condizioni di esercizio questo può essere un limite importante, come pure per le situazioni dove la conoscenza dei materiali e dei meccanismi di deterioramento abbia elementi di incertezza. La corrosione da sulfidazione a caldo, alla quale è dedicato il successivo

paragrafo, presenta sia il fattore di variabilità che il fattore di incertezza. Il calcolo del RUL con i metodi classici RBI può risultare insufficiente ed è emersa, quindi, la necessità di investigare soluzioni innovative.

4.1 La corrosione da sulfidazione a caldo

Nel settore petrolifero i costi di approvvigionamento della materia prima incidono fortemente sul costo totale delle operazioni, e quindi una riduzione dei costi del greggio si traduce in aumenti diretti della redditività. I greggi con elevati contenuti di zolfo ed elevata acidità vengono venduti a prezzi molto scontati rispetto ai greggi più pregiati e possono essere un'opportunità per le compagnie, specialmente in questi tempi difficili. I risparmi sui costi di approvvigionamento devono essere bilanciati con i rischi. In particolare, l'utilizzo di greggi "difficili" senza misure di controllo adeguate potrebbe ridurre la vita utile degli impianti ed aumentare la probabilità di incidente [FA-010]. Fra i problemi indotti dai greggi ad alto contenuto di zolfo, particolare preoccupazione desta quello della corrosione da sulfidazione. Un report del 2019 dell'American Petroleum Institute [AP-019] riporta, su un arco di tempo di 30 anni, 45 incidenti gravi dovuti alla corrosione da sulfidazione registrati in raffinerie, tutti legati ai contenuti di zolfo nelle cariche. Le conoscenze scientifiche disponibili sull'argomento sono alla base del metodo pratico normalmente adottato nelle raffinerie per controllare il fenomeno, ma molti aspetti non sono ancora ben compresi e richiederebbero approfondimenti di ricerca [RE-011].

La corrosione da sulfidazione si manifesta sulle attrezzature a contatto con idrocarburi a temperature superiori a 220°C. La corrosione risultante provoca un assottigliamento generale ma può anche apparire come corrosione localizzata. La corrosione può rapidamente assottigliare tubazioni e recipienti in pressione, con rilascio di sostanze infiammabili, spesso al di sopra della loro temperatura di autoaccensione. In particolare, si distinguono due meccanismi diversi in funzione del contenuto di idrogeno. L'idrogeno può essere in forma libera H_2 o come idrogeno solforato H_2S . Se non è presente idrogeno si parla di sulfidazione H_2 -free. Questo è il fenomeno più diffuso e sul quale si concentra l'attenzione della presente trattazione. Fra le unità di una raffineria, quella più colpita dalla sulfidazione H_2 -free è l'unità di distillazione atmosferica [DE-019]. Gli effetti si fanno però sentire anche nella distillazione sottovuoto, nel trattamento del coke, nell'unità di Catalytic Cracking [JO-004]. Le attrezzature di solito più colpite sono gli scambiatori di calore. L'erosione e la corrosione localizzata dovuta alla presenza di zolfo nella carica sono cause concorrenti di migliaia di guasti degli scambiatori, in particolare in quelli realizzati in acciaio al carbonio [AL-021]. La scelta attenta dei materiali è essenziale per portare ad un livello accettabile l'affidabilità degli scambiatori [FA-019]. Nel caso in cui vengano normalmente trattati greggi ad alto tenore di zolfo, l'uso di scambiatori con tubi ad alto tenore di cromo o addirittura acciaio inossidabile è una opzione che può risultare alla lunga conveniente per ridurre il rischio di rotture e conseguenti incidenti e interruzioni [GH-011]. La rottura di linee dovuta a corrosione da sulfidazione è meno frequente, ma può portare a conseguenze più disastrose [GR-015].

La sulfidazione H_2 -free è guidata da quattro fattori principali: le caratteristiche del materiale, la temperatura, il contenuto di zolfo, e l'acidità. In particolare, l'acidità totale è dovuta alla presenza degli acidi naftenici, acidi organici che concorrono all'azione corrosiva. In linea di massima la velocità di corrosione aumenta all'aumentare della temperatura, dell'acidità e dello zolfo. La presenza

di composti dello zolfo, tuttavia, ha un effetto inibitore sugli acidi naftenici, per cui si crea una parziale compensazione fra i due fattori. L'effetto inibitore sugli acidi naftenici comincia attorno ai 220 °C ed è particolarmente attivo fra i 300 e i 380 °C, intervallo in cui la sulfidazione è al massimo. Mentre il contributo dello zolfo è assente per temperature al di sotto dei 220 °C la corrosione naftenica si manifesta già con temperature superiori ai 140°C [HA-009].

L'acciaio al carbonio CS è il materiale più utilizzato negli impianti petroliferi, anche per ragioni di costo. Il CS non è, tuttavia, particolarmente resistente agli attacchi della sulfidazione e in condizioni più severe si utilizzano acciai basso legati con contenuti crescenti di cromo, fino anche al 12%. Le prove di laboratorio confermano che più alto è il contenuto di cromo più alta la resistenza alla corrosione [HU-006]. Contribuisce alla resistenza del materiale anche la presenza di molibdeno nella lega per una percentuale attorno allo 1%. Resistenze molto elevate si registrano con gli acciai inox di tipo austenitico [WH-993]. Bisogna tenere comunque conto che in molti paesi le raffinerie sono state tutte costruite più di cinquanta anni fa, secondo le conoscenze dell'epoca, e che anche negli eventuali adeguamenti i materiali verranno scelti in base a criteri di sostenibilità economica. Nella situazione reale si trova normalmente il CS usato per temperature fino a 260°C, per temperature più alte si usa acciaio basso legato al cromo al 5% che resiste bene fino a circa 340°C. Per temperature ancora superiori, fino ai 400°C si usa anche acciaio al 9% di Cromo [RE-011].

La corrosione H₂ free è descritta adeguatamente dalle curve di McConomy, introdotte su base sperimentale già negli anni 60. Le curve sono state originariamente sviluppate da H.F. McConomy e successivamente modificate dopo ulteriori sperimentazioni, perché ritenute troppo conservative. [AP-019]

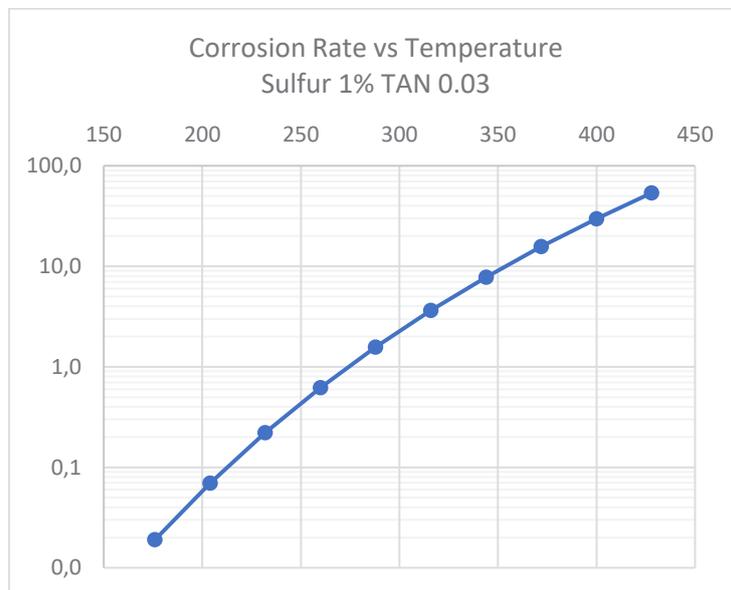


Figura 8 - Velocità di corrosione mm/anno per il Carbon Steel in funzione della temperatura. Contenuto di zolfo 1% TAN 0,03

Le curve sono state sviluppate da dati empirici validati in varie condizioni operative. Esse coprono una serie di metallurgie cromo/acciaio che riflettono una crescente resistenza. Nell'allegato dedicato al meccanismo di sulfidazione all'interno delle linee guida API 581 [AP-016], le curve

di McConomy modificate riportano le velocità di corrosione in forma tabellare, in funzione della temperatura, del contenuto di zolfo (espresso come percentuale di massa) e dell'acidità, espressa come numero di acidità totale TAN.

Il TAN è una misura dell'acidità determinata dalla quantità di idrossido di potassio in milligrammi necessaria per neutralizzare gli acidi in un grammo di olio. Nel dettaglio, le curve sono presentate come una serie di 7 tabelle distinte per i diversi materiali partendo dall'acciaio al carbonio per andare ad acciai con percentuali crescenti di cromo da 1% a 12% e di molibdeno da 0,2 a 1%. Le tabelle API includono due ulteriori tabelle per gli acciai inossidabili, con e senza molibdeno. Nelle tabelle le temperature vanno da meno di 230 a più di 400 °C, temperature tipiche dei processi in raffineria. Il TAN è tabellato da 0,3 a 4,0 e la percentuale di zolfo da 0,2 a 4,0 %. Le tabelle non riportano contenuti di zolfo ancora superiori, anche se è noto che alle concentrazioni più alte le curve tendono ad appiattirsi. Per il CS le velocità di corrosione aumentano di oltre un ordine di grandezza passando fra i due estremi di temperatura (vedi Figura 8) e così pure in funzione del TAN. Per il contenuto di zolfo la differenza fra gli estremi è inferiore all'ordine di grandezza e la curva tende molto ad appiattirsi (vedi Figura 9). I valori della velocità di corrosione nel CS vanno così da 0,03 mm/anno ad un massimo di 7,62 mm/anno. Nelle situazioni pratiche il CS non viene utilizzato per temperature oltre i 350 °C perché anche con acidità e zolfo non troppo elevati la velocità di corrosione diventa inaccettabile. Con l'aumentare della percentuale di cromo nel materiale le velocità di corrosione si abbassano decisamente e restano generalmente sotto i valori del mm/anno anche per contenuti di zolfo e acidità abbastanza elevati. Per gli inossidabili la resistenza è ancora più alta restando la velocità di corrosione di pochi decimi di millimetro anche con i contenuti di zolfo e il TAN particolarmente alti.

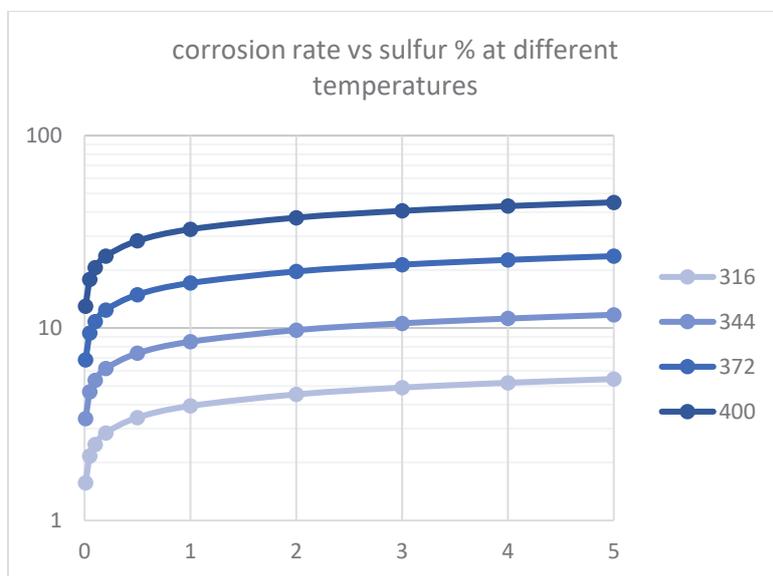


Figura 9 - Velocità di corrosione (mm/anno) per il Carbon Steel in funzione del contenuto di zolfo a temperature differenti (°C) TAN 0.03

Le curve di McConomy, o meglio, le tabelle API che le rappresentano in modo particolarmente efficace, sono l'unico riferimento ai quali i gestori degli impianti possono riferirsi per prevedere

e controllare la corrosione. Le varie procedure di valutazione del rischio e programmazione dei controlli e della manutenzione delle attrezzature sono tutte basate su queste curve, che tuttavia presentano molte approssimazioni delle quali spesso non si tiene conto, ma che possono portare a perdita di attendibilità.

4.2 Limiti teorici della pratica corrente

Le approssimazioni principali dell'approccio di McConomy, che permangono anche nella forma modificata adottata nelle tabelle API, sono almeno le seguenti:

- 1) Il tenore di zolfo è determinato dalla presenza di vari composti che includono mercaptani, solfuri, polisolfuri, tiofeni, acido solfidrico nonché di zolfo elementare. Le curve di McConomy non tengono conto che alcuni composti sono meno attivi ai fini corrosione. Lo stesso per il TAN, essendo gli "acidi naftenici" una intera famiglia di composti carbossilici ciclici, diversi per peso molecolare e volatilità, che non agiscono con la stessa forza sui materiali [OR-020].
- 2) Per il CS al di sopra dei 320°C, secondo lavori recenti, la velocità di corrosione effettiva sarebbe inferiore a quanto stimato dalle curve di McConomy [SC-019].
- 3) L'esposizione prolungata può portare ad un forte rallentamento della corrosione, dovuta a fenomeni di passivazione del materiale, favoriti dalla presenza di ossigeno nel fluido [AD-015]. Lo strato di solfuri sulla superficie può avere spessori nanometrici [EK-010] ma è anche possibile la formazione delle cosiddette "scale" di dimensioni anche visibili che mitigano ulteriormente l'effetto corrosivo [SH-017].
- 4) Si considerano le temperature misurate al centro del flusso. Non si tiene conto che le temperature sulle pareti possono essere più elevate e in alcuni casi bastano solo 10°C in più per aumentare la velocità di corrosione anche del 50% [SI-021].
- 5) Non si tiene conto che la presenza di particelle solide in sospensione, bolle o vortici nel fluido possano avere effetti erosivi, sinergici con il fenomeno corrosivo [RE-020].
- 6) Non si tiene conto dell'effetto che può avere sulla corrosione la presenza in percentuali variabili di altre sostanze chimiche inclusi metalli pesanti (Vanadio) e vapore acqueo [RE-011].
- 7) La presenza di percentuali di silicio superiori allo 0,2 % aumenta di un ordine di grandezza la resistenza alla corrosione per l'acciaio al carbonio. Dalla metà degli anni 80 le specifiche degli acciai prevedono, per questo motivo, la presenza di piccoli quantitativi di silicio, mentre per i materiali precedenti questo elemento non era oggetto di attenzione e si possono trovare ancora in uso materiali più vulnerabili del previsto per l'assenza del silicio all'interno della lega [GR-015].
- 8) Si tiene conto dell'effetto della fluidodinamica solo con l'introduzione di un fattore moltiplicativo pari a 5 nel caso di velocità di flusso superiori a 30,5 m/s [AP-016]. Si tratta di una approssimazione piuttosto sbrigativa. Sicuramente i flussi al di sopra della soglia sono in grado di staccare in tutto o in parte le "scale" protettive di cui al punto 3). Prove di laboratorio fatte su campioni hanno dimostrato che la velocità di flusso non ha un diretto effetto sulla corrosione [HA-009]; tuttavia il flusso troppo lento o stagnante in attrezzature a temperatura elevata può accelerare la corrosione, poiché i composti dello zolfo tendono a rompersi, liberando vapori di H₂S che tendono ad attaccare le parti più alte. Questo è particolarmente evidente nel caso di tubature orizzontali, che possono risultare più corrose nella parte alta [AP-019].
- 9) Per le alte temperature le frazioni possono dar luogo alla formazione di coke di petrolio che aderisce alle pareti. Nei reattori a ciclone delle unità di cracking catalitico queste formazioni

hanno un effetto protettivo rispetto alla corrosione, mentre, nelle tubature sottoposte a fiamma sul lato esterno, riducono lo scambio termico, aumentano la temperatura del materiale e quindi la velocità di corrosione [AP-019].

Le ipotesi semplificative adottate per costruire le curve McConomy modificate e le tabelle API sono nel complesso ragionevoli, perché permettono di gestire il problema sulfidazione in modo pratico. Non vanno tuttavia prese come regole deterministiche. Gli elementi di incertezza che le ipotesi semplificative introducono sono molti e le tabelle vanno considerate per quelle che sono, cioè delle ipotesi a priori abbastanza attendibili, utilissime per una stima di massima. L'acquisizione dell'esperienza nelle operazioni del singolo impianto consente di avere i dati a posteriori per aggiustare al contesto le ipotesi a priori. In generale questo appare un tipico problema bayesiano: ci sono delle conoscenze a priori che hanno una certa validità pratica generale e si vuole sfruttare le nuove esperienze per aggiornare la conoscenza ed adattarla al contesto specifico. In altre parole, si possono vedere le curve di McConomy e le tabelle API come regole probabilistiche definite a priori; acquisendo su un periodo di tempo abbastanza lungo i dati di esercizio relativi ad un impianto specifico si possono correggere le probabilità a priori (generiche) ed ottenere le velocità di corrosione aggiornate, o meglio, la distribuzione di probabilità per le diverse velocità di corrosione, aggiornate in base al contesto attuale. Questo approccio appare la via migliore, per evitare di dovere trattare ancora in modo deterministico i troppi fattori di incertezza prima indicati. Nel seguito della trattazione vedremo come l'approccio bayesiano possa essere declinato in alcune situazioni pratiche, che si presentano in una raffineria che lavora anche greggi ad alto contenuto di zolfo.

4.3 Gestione dei problemi di corrosione con la tecnica IOW

Una grande raffineria è in grado di lavorare nel giro di un paio di giorni o poco più il carico di un'intera petroliera. Questi tipi di impianti sono adeguati a trattare praticamente ogni tipo di greggio disponibile sul mercato. I greggi presenti sul mercato provengono da giacimenti in tutto il mondo e sono classificati in base a varie caratteristiche, inclusa la densità, la viscosità, il contenuto di zolfo e l'acidità. Questi ultimi sono i parametri di maggiore interesse ai fini della sulfidazione a caldo e, in particolare, delle curve o tabelle di McConomy. Nel giro di due giorni la carica può variare composizione chimica, con effetti diversi sulla corrosione. In generale, più sono alti i valori di zolfo e acidità, maggiore la corrosione e minore il tempo di vita utile delle attrezzature. Nel caso studio l'attenzione si concentra, quindi, sul concetto di vita utile residua.

L'approccio IOW illustrato nel primo capitolo (§1.3) è utilizzabile anche per la corrosione da sulfidazione a caldo: se infatti sono stati lavorati dei greggi chimicamente più "difficili" di quelli mediamente previsti ai tempi dello studio RBI, se ne dovrà tenere conto riducendo il tempo di esercizio prima dell'ultima ispezione. I parametri da considerare sono, la temperatura, l'acidità e il contenuto di zolfo; giocando su di essi si possono stabilire i limiti al di sopra dei quali la corrosione sul materiale utilizzato possa richiedere una attenzione particolare o addirittura diventare critica per possibili rotture. Nel caso specifico della corrosione da sulfidazione non esistono limiti inferiori al contenuto di zolfo e all'acidità che possano creare problemi. Va tenuto invece presente che non è possibile intervenire con riduzioni significative delle temperature, perché pur diminuendo i problemi di corrosione ne sorgerebbero di beni più gravi per il processo.

Nella Figura 10 è mostrato come il periodo di esercizio fuori dalla finestra operativa, influisca sul livello di rischio e sul tempo di vita atteso. Nel dettaglio il RUL risulta ridotto a causa del tempo passato fuori della finestra operativa. La Figura è basata su un lavoro recente [LZ-015] che discute l'applicazione del metodo delle finestre operative ad un caso pratico. Nel lavoro citato viene riportato un aumento lineare anche per il rischio a causa del periodo di sovraesposizione alla corrosione.

L'approccio IOW ha molti punti di forza ed alcuni punti deboli. Uno dei punti di forza è l'integrità con il classico approccio RBI. Grazie all'introduzione delle finestre operative si introduce un maggiore dinamismo nella analisi RBI. Nell'approccio RBI tradizionale, l'analisi RBI fornisce previsione sull'integrità di recipienti e tubazioni a medio e lungo termine. In particolare, l'analisi RBI fornisce ad una certa data, la previsione della vita utile residua RUL e dell'intervallo prima della prossima ispezione, tipicamente dopo alcuni anni. Introducendo le finestre operative, la previsione iniziale può essere aggiustata per reggere il passo con il cambiare del contesto operativo. In particolare, nel caso specifico della sulfidazione, la lavorazione di greggi più ricchi di zolfo del previsto, può far sì che temporaneamente l'impianto debba lavorare "fuori" dalle finestre operative, in condizioni cioè di corrosione accelerata, delle quali poi occorrerà tener conto nella rivalutazione del tempo di vita utile e nella definizione del programma ispettivo. Tutto questo porta indubbiamente grandi vantaggi rispetto all'approccio tradizionale, costituendo di fatto il primo passo verso la RBI dinamica.

L'approccio IOW ha avuto fin dall'inizio un buon successo nell'industria e le "finestre operative" nel giro di meno di un decennio sono diventate popolari nell'industria petrolifera. Le indicazioni della linea guida API [AP-022] si sono dimostrate ben integrabili nella valutazione e gestione del rischio, sia nelle raffinerie che negli impianti petrolchimici. In particolare, come discusso in un lavoro recente [WI-022], è possibile gestire i top event, individuati nello Hazop, con i relativi livelli di protezione, sfruttando appunto le "finestre operative" per mantenere il rischio di incidente rilevante nei limiti ragionevolmente accettati. Le finestre operative sono ben integrabili con le linee guida dell'API sulle ispezioni basate sul rischio o RBI [AP-016]. Gli sforamenti controllati dei limiti operativi per i parametri d'esercizio possono essere controllati e, in particolare, essere sfruttati per aggiornare dinamicamente il piano d'ispezione RBI. Anche la linea guida europea per la gestione delle ispezioni basate sul rischio fa esplicito riferimento alle finestre operative, indicate come idonee per controllare nel tempo il degrado delle attrezzature [UN-018]. L'approccio integrato fra RBI e IOW può essere applicato anche per i più complessi processi della petrolchimica, dove entrano in gioco un numero elevato di parametri operativi, rilevati in molti punti dell'impianto [AR-022].

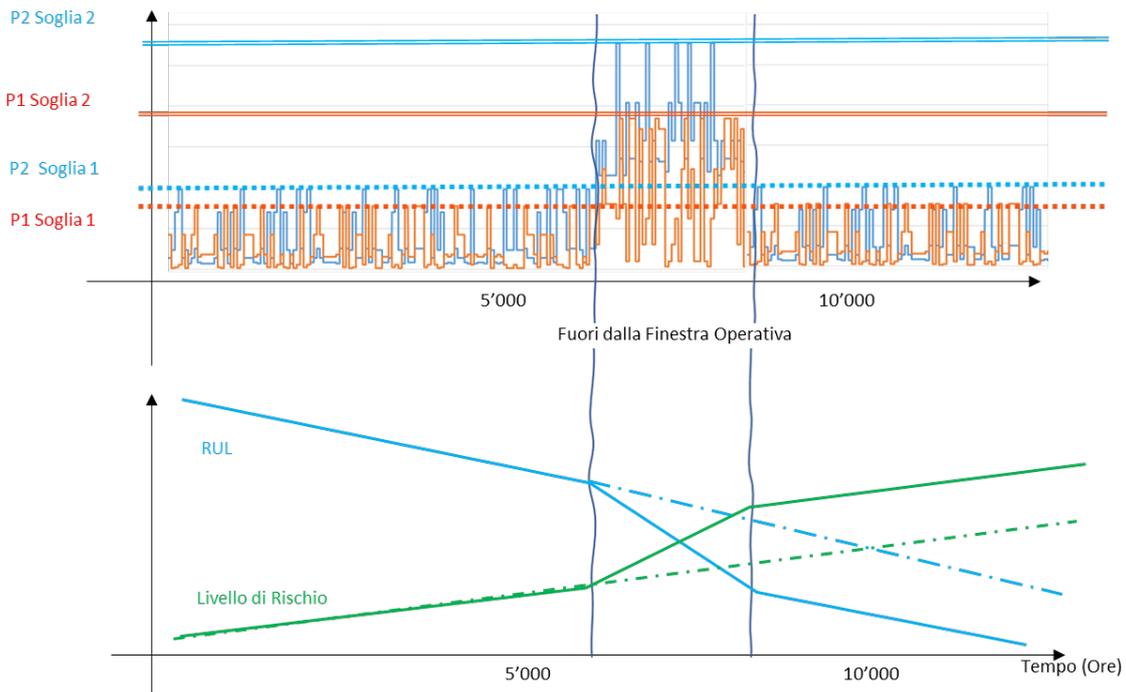


Figura 10 - Il concetto di IOW o Finestra Operativa: in alto l'andamento nel tempo di due parametri, in basso l'andamento del RUL e del rischio in corrispondenza del superamento delle soglie di attenzione.

Il disegno è liberamente ispirato all'articolo [LZ-015].

4.4 Limiti della tecnica IOW

L'approccio delle finestre operative presenta, tuttavia, alcuni punti di debolezza che lasciano aperti spazi di miglioramento e di ricerca. Di seguito se ne elencano alcuni:

- 1) Nelle applicazioni usuali della linea guida si presuppone che il rischio cresca in modo lineare al diminuire del RUL [LZ-015]. Tutto ciò non è coerente con il ben noto effetto della cosiddetta curva a vasca da bagno o bath tube (BT) curve. Questa è una ipotesi dimostrata da un'infinità di prove e dice che la probabilità di guasto in funzione del tempo di vita consumato, dopo una fase iniziale, è praticamente costante, a parte crescere decisamente quando esso è ormai prossimo al tempo di vita atteso, con un andamento di solito descritto con la distribuzione di Weibull.
- 2) I parametri operativi presi in considerazione nelle applicazioni IOW riportate in letteratura includono parametri elementari quali pressione, temperature e flussi. Nel caso di impianti e processi complessi la letteratura riporta casi in cui si sia riusciti a trattare contemporaneamente un numero elevato di parametri elementari indipendenti [AR-022; PM-023], ma non si trovano lavori sistematici in cui si sia riusciti a trattare parametri complessi, quali la composizione chimica, la presenza di particolato sospeso o la turbolenza, che sono spesso importanti. Nel caso della corrosione da sulfidazione a caldo, l'effetto indesiderato all'interno dei vari tubi e recipienti è regolato da più parametri complessi indipendenti fra loro.
- 3) Non è possibile includere le incertezze dovute alla insufficiente conoscenza dei meccanismi di deterioramento, che nel caso della corrosione da sulfidazione a caldo è un aspetto importante, come discusso nel § 4.2.

In sintesi, le finestre operative funzionano molto bene con parametri semplici, come temperatura o

pressione, per i quali è anche più facile definire le soglie. In casi dove sono coinvolti parametri più complessi, inclusa la corrosione da sulfidazione guidata da contenuto di zolfo e TAN, c'è una certa gradualità degli effetti in funzione del variare dei parametri, che verrebbe tagliata drasticamente introducendo, in maniera artificiosa, dei valori di soglia.

In situazioni molto dinamiche, l'aggiustamento in corso d'opera dei risultati dell'analisi RBI fatta in precedenza può essere insufficiente a controllare la situazione. Questo può essere il caso di un contesto economico e politico molto incerto che implichi una variazione continua dei greggi da trattare e conseguentemente dei fenomeni corrosivi collegati.

4.5 RUL dinamico

Nella soluzione alternativa qui proposta, invece, la valutazione del RUL è completamente dinamica, nel senso che mese per mese, settimana per settimana, fino anche giorno per giorno è possibile sapere quanta vita utile resta ad una particolare attrezzatura, aggiustando continuamente i risultati. Le regole che associano la velocità di corrosione a temperatura, acidità (TAN) e contenuto percentuale di zolfo, sono usate in senso probabilistico, permettendo di gestire le incertezze connesse al fenomeno della corrosione, tenendo conto meglio della continuità del fenomeno rispetto ai parametri. Per trattare questo problema si è sviluppata una rete bayesiana di tipo predittiva (vedi 3.3), che include una parte più intuitiva nella quale i parametri principali diventano i nodi radice, legati in modo causale alla corrosione.

La perdita di vita utile nel periodo di osservazione ΔRUL è il nodo finale della rete che ha come nodi genitore la velocità di corrosione "Corrosion rate" e le condizioni "Condition" dell'attrezzatura all'inizio del periodo di osservazione. Questo termine non è meno importante della velocità di corrosione perché quando si è vicini al termine della vita utile aumenta la vulnerabilità del materiale, secondo la citata BT curve. La velocità di corrosione a sua volta ha come nodi genitore i nodi "Temperature", "TAN" e "Sulfur" - contenuto percentuale di zolfo. La rete BN viene usata per rappresentare le principali variabili che conducono al consumo di vita utile, tenendo conto del carattere di incertezza associato. La rete sviluppata combina dati quantitativi, cioè dati di misura veri e propri, con valutazioni qualitative fornite degli esperti.

La Figura 11 rappresenta in modo grafico la rete BN sviluppata. "Sulfur", "TAN" "Temperature" e "Corrosion rate" sono nodi quantitativi, mentre le condizioni sono termini qualitativi. Lo scopo della rete è calcolare, a partire da un certo tempo t_i , la probabilità di perdita di vita utile ΔRUL dopo un certo tempo ΔT . In prima battuta ΔRUL dipenderà della distribuzione probabilistica dei tre parametri principali della sulfidazione: contenuto in zolfo, acidità espressa come TAN e temperatura. Gli stati dei tre nodi sono definiti in base ai rispettivi intervalli di variazione. La velocità di corrosione è un nodo intermedio ed è direttamente collegato ai tre nodi precedenti in base alle curve di McConomy. Gli stati sono definiti anche in questo nodo in base all'intervallo di variazione. C'è un ulteriore elemento che entra in gioco, ovvero le condizioni iniziali dell'attrezzatura. Quando l'attrezzatura si avvicina al termine della vita utile, le probabilità di guasto crescono, aumentando di conseguenza la probabilità di una maggiore perdita di vita utile, tenendo conto dell'effetto della BT curve, la cosiddetta "curva a vasca da bagno" discussa al punto 4.4. In pratica si individuano quattro condizioni possibili, una normale, una di attenzione, una critica ed una molto critica in funzione delle percentuali di vita utile persa o, per dire in altro modo, consumata.

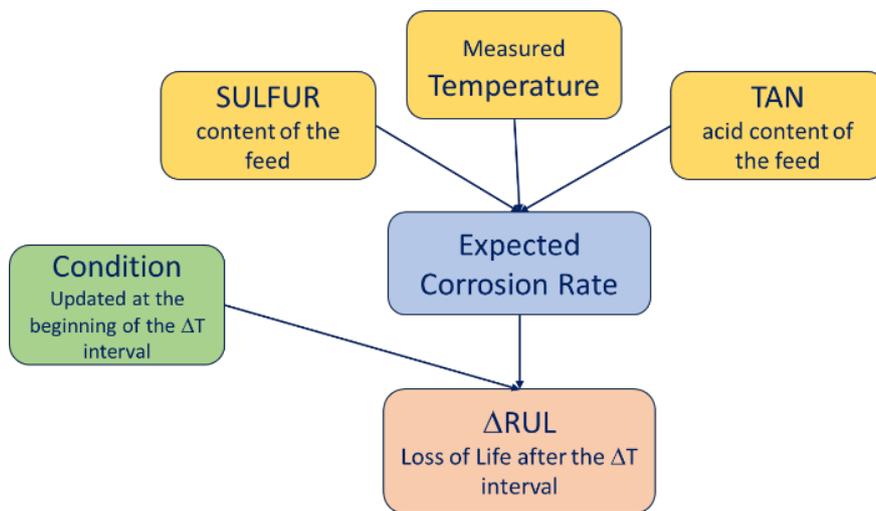


Figura 11 - Rete Bayesiana che collega le caratteristiche del fluido, la velocità di corrosione e la diminuzione di RUL

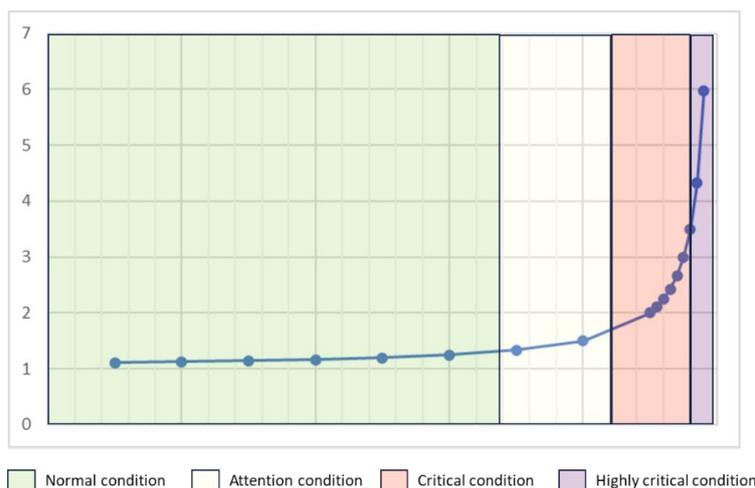


Figura 12 - La cosiddetta curva a vasca da bagno in forma idealizzata. In ascissa il tempo, in ordinata la probabilità di guasto.

La Figura 12 descrive il fattore “condizione” in funzione del tempo di vita seguendo la BT Curve. Nella Tabella 1 i cinque nodi TAN, Sulfur, Condition, Temperature e Corrosion Rate, con i rispettivi stati sono riportati per una visione d’insieme.

La rete bayesiana BN sopra descritta serve a calcolare ogni volta le probabilità di vita consumata dopo un tempo ΔT . Il nodo ΔRUL rappresenta il risultato ottenuto ed ha cinque possibili stati. Per ogni stato la perdita di vita utile è confrontata con il tempo trascorso. Secondo le aspettative a priori il tempo trascorso e la perdita di vita utile coincidono. Se la corrosione è meno aggressiva di quanto previsto e le condizioni sono buone il consumo di vita utile sarà minore del tempo trascorso. Al contrario, se la corrosione sarà più aggressiva e magari le condizioni peggiori, il consumo di vita utile sarà un multiplo del tempo trascorso. In modo più formale si ha:

$$\Delta RUL = \sum_{j=1}^N w_j * p_j \Delta \tag{3}$$

dove N è il numero di stati, w_j fattore moltiplicativo associato allo stato j-esimo per conversione da tempo trascorso a vita consumata, p_j probabilità stato j-esimo. Il numero di stati e il relativo “peso” saranno definiti sulla base del parere degli esperti, tenendo conto dell’impianto specifico. A titolo di esempio viene riportata la Tabella 2, dove i valori w_i e N sono relativi al caso al caso studio illustrato in dettaglio nel § 4.6. Il risultato, trattandosi di rete Bayesiana, sarà una distribuzione sugli stati del nodo ($p_1 \dots p_5$), cosicché la equazione 3 andrà riscritta in forma media dei diversi valori ΔT pesata con le probabilità risultanti, secondo la formula

$$\Delta RUL = (w_1 \cdot p_1 + w_2 \cdot p_2 + w_3 \cdot p_3 + w_4 \cdot p_4 + w_5 \cdot p_5) \cdot \Delta t \tag{4}$$

La RUL risultante all’intervallo di tempo i-esimo sarà

$$RUL_{i+1} = RUL_i - \Delta RUL_i \tag{5}$$

Il valore iniziale RUL_0 sarà il valore calcolato a priori in occasione dell’avvio ovvero dell’ultima fermata con ispezione completa dell’impianto. La RUL ad ogni ciclo di calcolo sarà aggiornata al tempo t_{i+1} e occorrerà verificare se le condizioni da usare al successivo ciclo di calcolo vadano aggiornate secondo la Tabella 2. Ad ogni intervallo di tempo ΔT gli stati dei tre nodi zolfo, temperatura e TAN, vengono aggiornati in base ai dati rilevati nell’intervallo di tempo ΔT , mentre per il nodo condizioni si fa riferimento ai risultati del ciclo precedente. Ad ogni ciclo la RUL risultante andrà confrontata con RUL_0 per ricalcolare il nuovo stato del nodo condizione. Con questa soluzione è stato possibile introdurre anche l’elemento temporale, che nella versione classica delle BN non è presente. In sostanza si tratta di utilizzare i risultati della BN ad un certo tempo t per aggiornare al tempo successivo i valori del nodo condizione e ripetere ricorsivamente il calcolo della BN (vedi Figura 13). Si aggira così, in modo molto semplice, il limite delle BN classiche ottenendo una sorta di BN dinamica.

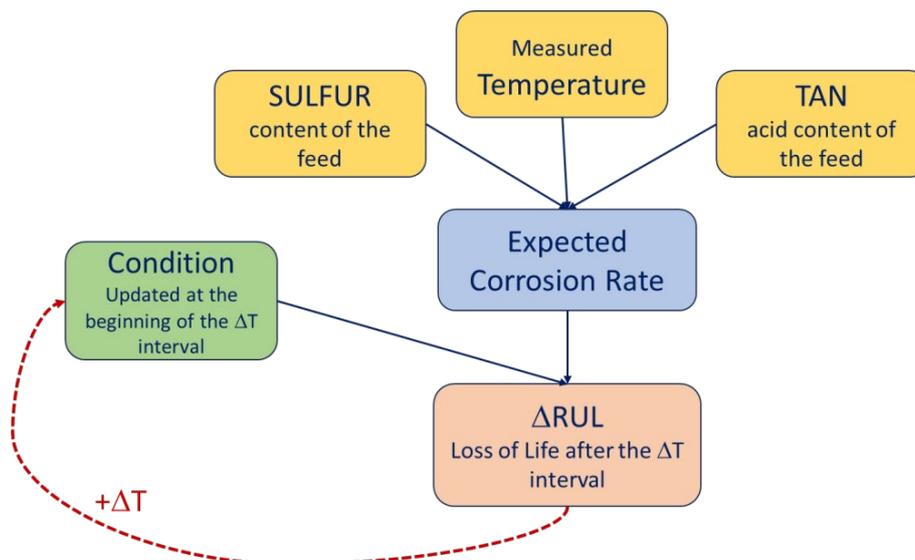


Figura 13 - La BN resa dinamica grazie all’aggiornamento delle condizioni in base alla RUL, applicando la BT curve.

Gli stati del nodo condizione devono anche pilotare la scelta del ΔT . Infatti, se le condizioni sono buone si potrà prendere un valore abbastanza lungo, ad esempio annuale, e su quella base raccogliere i dati e ripetere il ciclo di aggiornamento del RUL. Quando le condizioni passano via via negli stati attenzione, critica e molto critica gli intervalli ΔT vanno ridotti drasticamente. I valori suggeriti sono 6, 3 e 1 mesi rispettivamente per gli stati di attenzione, critico e molto critico. Il ciclo di calcolo verrà ripetuto dal tempo iniziale quando la RUL sarà RUL_0 fino a quando si arriverà alle condizioni

$$RUL_{fin+1} \leq 0 \quad (6)$$

Sotto queste condizioni l'esercizio dell'attrezzatura per un ulteriore intervallo ΔT non è consentito. Quando, applicando la equazione 5, si prevede che la RUL dopo un intervallo ΔT vada a valori negativi è d'obbligo fermare l'esercizio per non incorrere in condizioni inaccettabili.

Tabella 1 - Stati dei nodi della rete: a) Nodo "Sulfur" b) Nodo "TAN" c) Nodo "Temperature" d) Nodo "Corrosion Rate" e) Nodo "Condition"

Nodo Sulfur - stati (% weight)		Nodo TAN - stati		Nodo Temperature - stati	
da 0 a 0.3	molto-basso	da 0 a 0.48	molto basso	fino a 232°C	
da 0.3 a 0.5	basso	a 0.48 a 1.08	basso	da 232 a 260	
da 0.5 a 1.05	medio-basso	da 1.08 a 2.25	medio	da 260 a 288	
da 1.05 a 2	medio-alto	da 2.25 a 3.5	alto	da 288 a 315	
da 2 a 2.75	alto	da 3.5 a 8	molto alto	da 315 a 343	
da 2.75 a 10	molto alto		b)	da 343 a 371	
	a)			da 371 a 399	
				oltre 399°C	
				c)	
Nodo Corrosion Rate - stati (mm/y)		Nodo Condition - stati (% vita utile consumata)			
Fino a 0.075	molto-basso	Normale	< 90%		
Da 0.075 a 0.150	basso	Attenzione	< 95%		
Da 0.15 a 0.25	medio-basso	Critica	< 97,5		
Da 0.25 a 0.35	medio	Molto Critica	> 97,5%		
Da 0.35 a 0.50	medio-alto				
Da 0.50 a 1.00	alto				
Da 1.00 a 1.50	molto alto				
Oltre 1.50	troppo alto				
	d)		e)		

Tabella 2 - Nodo Risultato (Perdita di Vita Utile = ΔRUL)

Stato	w_i	Significato	corrosione
ridotto	0,5	meglio rispetto alle aspettative	corrosione rallentata
normale	1,0	allineato rispetto alle aspettative	corrosione costante
alto	2,0	peggio rispetto alle aspettative	corrosione accelerata
molto alto	3,0	molto peggio rispetto alle aspettative	corrosione altissima
inaccettabile	4,0	estremamente peggio	Condizione inaccettabile

4.6 Applicazione ad un impianto rappresentativo

Come riportato al §4.3, l'unità di distillazione atmosferica (topping) è probabilmente quella più vulnerabile rispetto alla corrosione da sulfidazione a caldo e quindi l'attenzione si è concentrata su due attrezzature presenti all'interno di qualsiasi impianto di topping. Uno è l'ultimo scambiatore posto in testa ad un treno di preriscaldamento che porta la temperatura del greggio, prima di entrare nel forno, ad una temperatura di circa 240 °C. Si tratta tipicamente di uno scambiatore a fascio tubiero e mantello.

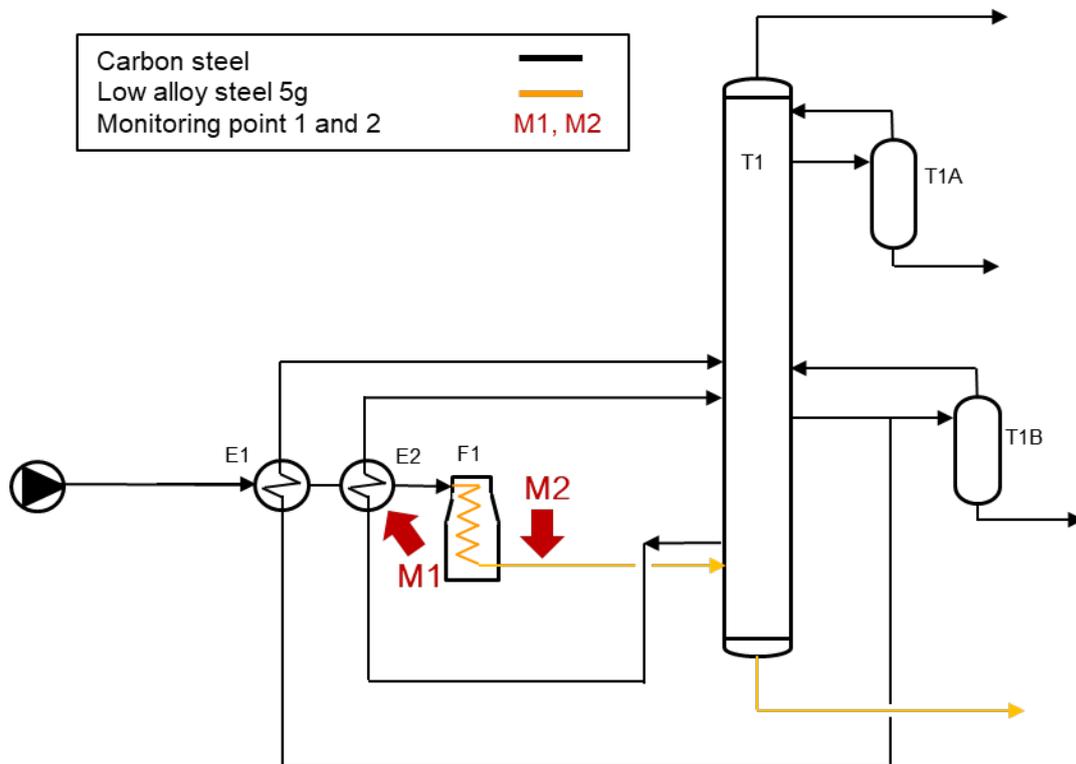


Figura 14 - Schema del tipo d'impianto considerato nel caso studio (topping)

Nel caso studio il materiale è acciaio al carbonio; ma in alcune raffinerie questo elemento può essere, per una maggiore resistenza, in acciaio basso legato con cromo e molibdeno (tipicamente 5%

Cr). I sovrappessori sono definiti in modo tale che le parti dello scambiatore possono avere un'aspettativa di vita utile sufficientemente lunga (tipicamente 15-20 anni) anche se eserciti con cariche relativamente aggressive, in termini di TAN e di contenuti di percentuali di zolfo. La seconda attrezzatura è la linea che collega il forno alla colonna di frazionamento. Si tratta di un tubo che è attraversato da greggio parzialmente vaporizzato alla temperatura di circa 350 °C. Per resistere agli attacchi corrosivi il materiale del tubo è tipicamente costituito di materiale più resistente acciaio basso legato con cromo al 5%. Lo schema dell'impianto generico è riportato in modo semplificato nella Figura 14. Nei due paragrafi successivi si illustra nel dettaglio come la BN delineata al § 4.5 presente paragrafo viene concretamente applicata alle due attrezzature in questione.

4.7 Set di dati utilizzato

Prima di ogni altro dato, sono stati i considerati i dati di letteratura disponibili sulla velocità di corrosione in funzione di temperatura, TAN e contenuto di zolfo. In particolare, i dati contenuti nelle tabelle della già citata linea guida API [AP-016] sono risultati preziosi per l'avvio della rete. In particolare, i materiali di costruzione nei punti di monitoraggio sono diversi in quanto la temperatura è diversa, ovvero di circa 260°C in M1 e 350°C in M2. L'acciaio al carbonio e l'acciaio basso-legato al cromo 5% sono utilizzati rispettivamente per le temperature più basse e quelle più alte. Le tabelle API relative ai rispettivi materiali¹ sono state utilizzate come probabilità a priori con le quali alimentare le reti bayesiane.

4.7.1 Temperatura: Dati di Misura

Per lo studio dinamico della RUL è necessario un periodo di osservazione sufficientemente lungo. La RUL viene utilizzata, fra l'altro, per pianificare su base pluriennale le ispezioni da fare ad impianto fermo e gli ulteriori controlli da fare con l'impianto in esercizio. Per uno studio significativo, in grado di mettere alla prova il metodo proposto, era necessario disporre dei dati di temperatura misurati con frequenza almeno oraria su una durata pluriennale. Sullo stesso periodo era necessario disporre dei dati sul greggio lavorato, in particolare, contenuto percentuale di zolfo e acidità espressa come TAN. Purtroppo, ottenere una massa di dati così grande non è stato possibile per varie ragioni. I dati realmente misurati coprono un periodo molto più breve, un mese per l'esattezza. La frequenza delle misure era fortunatamente quella desiderata, cioè quella oraria e i dati erano stati misurati sia al punto M1 che al punto M2. I dati reali disponibili sono stati esaminati rispetto alle classi di temperatura di cui alla Tabella 1. Facendo riferimento nel dettaglio all'elemento M1 le temperature realmente registrate oscillano fra i 220 e i 253 °C; mentre all'elemento M2 le temperature oscillano fra i 337 e i 354 °C. Facendo riferimento agli stati della Tabella 1 le temperature dell'elemento M1 sono fra il primo ed il secondo stato; mentre per l'elemento M2 sono fra lo stato 6 e lo stato 7. I dati "veri", cioè realmente misurati, coprivano solo 27 giorni di esercizio con intervalli di misura di un'ora, per un totale di 648 ore. Considerando le dinamiche relativamente lente dei fenomeni di corrosione studiati, i dati sono stati ritenuti poco numerosi ai fini di una verifica

¹ Nella linea guida API581 la tabella relativa all'acciaio al carbonio è la tabella A.2.B.3.2M, mentre quella relativa all'acciaio al cromo 5% è la tabella A.2.B.3.4M.

soddisfacente dell’approccio proposto. Si è così sviluppato un insieme di dati artificiali compatibili con l’andamento dei dati nel periodo di misura.

4.7.2 Temperatura: Dati di Sintesi

Per la generazione dei dati sintetici si è utilizzata una catena di Markov omogenea, che è un sistema abbastanza semplice per generare dati simili a partire da un campione relativamente ridotto. Le applicazioni del metodo sono definite anche a livello di standard internazionali [IE-006a]. Nella catena di Markov omogenea la probabilità di una certa variabile di trovarsi in un certo stato ad un certo tempo t_{i+1} dipende solo dallo stato in cui si trovava al tempo precedente t_i . In altre parole, per descrivere l’andamento nel tempo di un sistema caratterizzato da una certa variabile X per la quale sono possibili un insieme di n stati è sufficiente la matrice di transizione di dimensione $n \times n$ in cui ogni valore a_{jk} rappresenta la probabilità di passare, in ogni intervallo di tempo, dallo stato j allo stato k .

$$a_{jk} = P(X_j(t_{j+1}) | X_k(t)) \tag{7}$$

Nella Figura 15 è rappresentato un sistema Markoviano omogeneo a due stati.

Accoppiando un generatore casuale di numeri con la matrice di transizione si ottiene un andamento variabile della temperatura, che è simile, ma non identico, all’andamento nel periodo iniziale. Per applicare tale procedura occorre avere degli stati discreti e delle transizioni da uno all’altro stato; la probabilità di transizione dipende solo dallo stato precedente. Gli stati di temperatura considerati sono esattamente quelli della Tabella 1. Le probabilità di transizione da uno stato all’altro sono state derivate dalla frequenza delle transizioni fra stati nel periodo in esame. Le matrici di transizione per i due elementi M1 e M2 sono riportate nella Tabella 3. Per l’elemento M1 j e k vanno da 1 a 2; per M2 vanno da 6 a 7. Per la determinazione delle probabilità si sono semplicemente utilizzate le frequenze calcolate nel periodo campione. Ipotesi ragionevole perché il periodo di osservazione è abbastanza lungo. I due sistemi M1 ed M2 sono considerati ai fini dell’applicazione indipendenti, anche se in realtà sussiste una debole correlazione fra le due variabili rilevata nei dati “veri”, rappresentata da un valore di correlazione pari a circa 0,4.

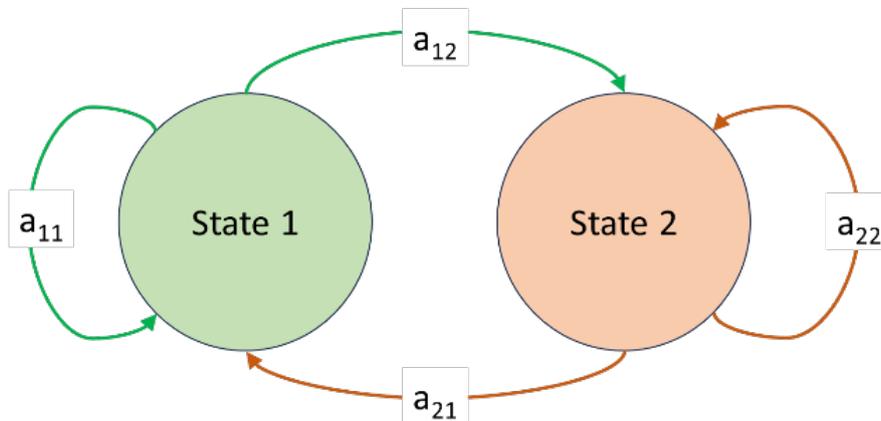


Figura 15 - rete markoviana omogenea a due stati

Tabella 3

	State 1	State 2			State 6	State 7	
State 1	91.6%	8.4%	Item M1	State 6	91.1%	8.9%	Item M2
State 2	2.6%	97.4%		State 7	1.9%	98.1%	

a) b)

4.7.3 Composizione delle cariche

Per quanto riguarda invece la qualità delle cariche di greggio, essa è determinata non solo da un fatto di casualità, ma dalla disponibilità dei vari prodotti. Si è quindi immaginata una rotazione continua entro un numero fissato di greggi, dei quali erano noti i contenuti di zolfo e TAN.

Tabella 4

Crude type	SULFUR	TAN	Crude type	SULFUR	TAN
Crude 01	0.14	0.36	Crude 09	2.3	1.6
Crude 02	0.17	0.31	Crude 10	2.64	3.44
Crude 03	0.28	0.85	Crude 11	2.71	3.7
Crude 04	0.47	0.03	Crude 12	3.15	2.46
Crude 05	0.51	1.55	Crude 13	3.15	0.61
Crude 06	1.4	0.05	Crude 14	4.08	0.2
Crude 07	1.96	0.11	Crude 15	5.54	1.24
Crude 08	2.39	0.07			

Nella Tabella 4 sono inserite le caratteristiche dei greggi lavorati, in termini di contenuto di zolfo e TAN. Per rendere più significativi i dati abbiamo anche immaginato che in certi periodi si scegliesse di lavorare solo greggi di migliore qualità (cioè quelli con bassi contenuti di zolfo e acidi naftenici), cioè i primi otto tipi della citata Tabella 4; mentre in altri periodi non ci fossero limitazioni e si lavorassero anche i greggi peggiori, per motivo di ipotizzate opportunità commerciali. A parte la regola suddetta, l'alternanza fra i vari tipi di greggio segue, nelle simulazioni, un andamento assolutamente casuale, proprio per emulare al meglio l'andamento degli approvvigionamenti che segue un criterio sostanzialmente opportunistico in relazione al mercato ed ai vincoli geopolitici. Nella Figura 16 un esempio di generazione casuale su base annuale dei dati di temperatura, contenuto di zolfo e TAN, in base alla normale alternanza fra greggi di diversa qualità.

4.8 Gestione RUL per scambiatore di calore in acciaio al carbonio

I dati descritti al paragrafo precedente possono essere considerati “realistici”, perché comprendono dati reali di misura (temperatura e composizione delle cariche) estesi con dati generati con metodi matematici che assicurano la coerenza con i dati reali. I dati sono tutti resi disponibili su base oraria, per periodi di osservazione prolungati, che possono variar da pochi mesi a qualche anno a seconda della criticità della situazione. Per applicare la rete bayesiana, descritta in dettaglio al §4.5,

all'elemento critico M1, questi dati sono sufficienti; occorrono soltanto le condizioni iniziali, che vanno assegnate in accordo alla RUL iniziale, che si assume calcolata a seguito di un'ispezione approfondita eseguita in occasione dell'ultima fermata oppure sia esattamente quella definita in sede progettuale, nel caso si trattasse di attrezzatura nuova.

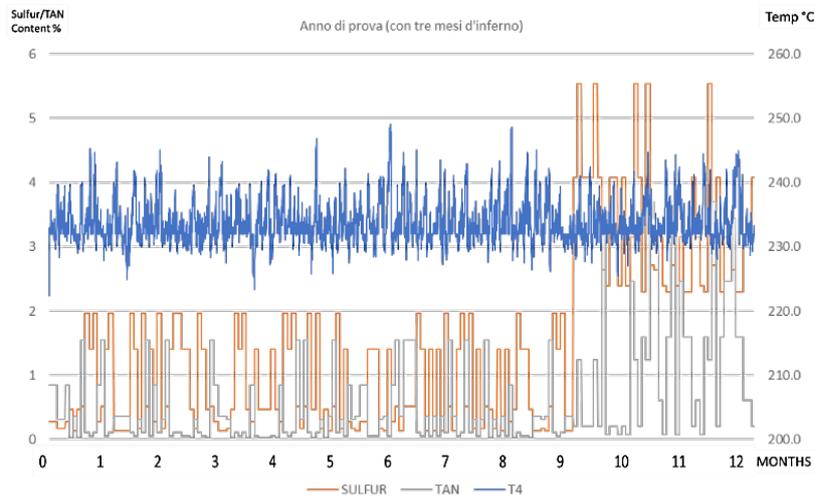


Figura 16 - Un anno di esercizio. Negli ultimi tre mesi sono state utilizzate anche cariche a elevato contenuto di zolfo e/o elevata acidità.

Attraverso un primo passaggio della rete si calcola il consumo di vita utile Δt al primo anno di servizio e utilizzando l'equazione 5, è possibile ricalcolare le condizioni e avviare una nuova elaborazione su un successivo periodo di monitoraggio. Il riferimento per la conversione della RUL ricalcolata è la Tabella 1 (e). La successione completa dei cicli di calcolo dinamico del RUL su un periodo decennale è riportata nella Tabella 5. Nelle Figure da 17 a 19 si riportano le elaborazioni rispettivamente a 7, 8 e 9 anni in servizio, il periodo di monitoraggio nei tre casi è un anno. Dopo 9 anni, il RUL è notevolmente ridotto e sarà necessario ridurre l'intervallo di monitoraggio oppure intraprendere delle azioni (riparazioni).

Tabella 5 Calcolo dinamico RUL per lo scambiatore M1 a successivi intervalli temporali

Periodo in servizio	Condizioni iniziali	Δt_i (mesi)	Consumo di vita (anni)	RUL_{t+1} (anni)	Condizione finale
6 anni	Normale	12	0.96	4.04	Normale
7 anni	Normale	12	1.06	2.98	Normale
8 anni	Normale	12	1.01	1.97	Normale
9 anni	Normale	12	0.94	1.03	Normale
9 anni 6 mesi	Normale	6	0.48	0.55	Attenzione
9 anni 9 mesi	Attenzione	3	0.31	0.24	Critica
9 anni 10 mesi	Critica	1	0.15	0.09	Molto-Critica
9 anni 11 mesi	Molto-Critica	--	--	--	--

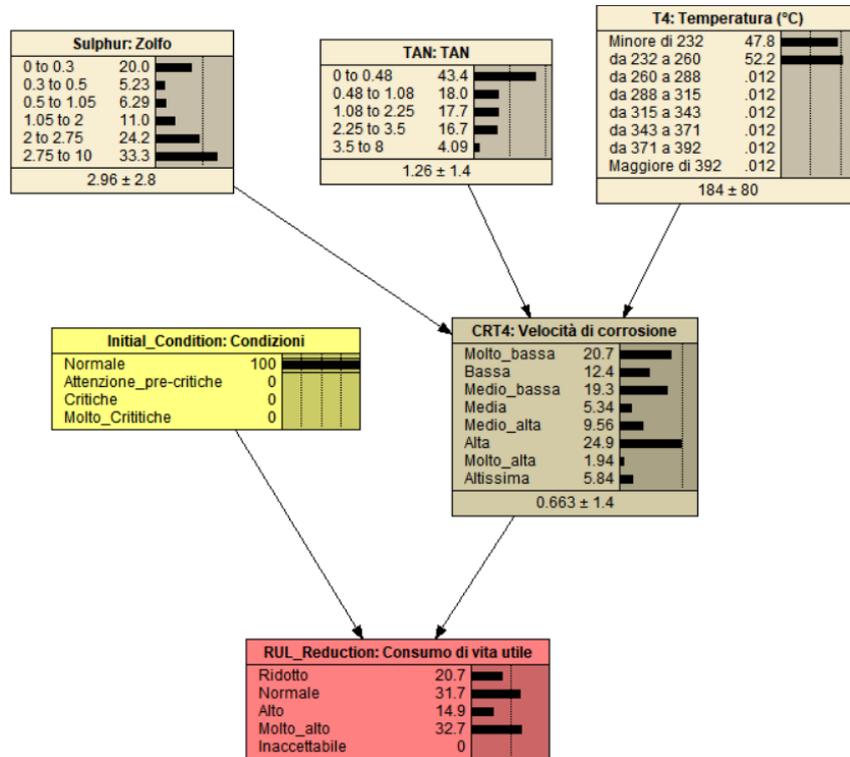


Figura 17 - Calcolo del consumo di vita utile dello scambiatore M1 a 7 anni di servizio

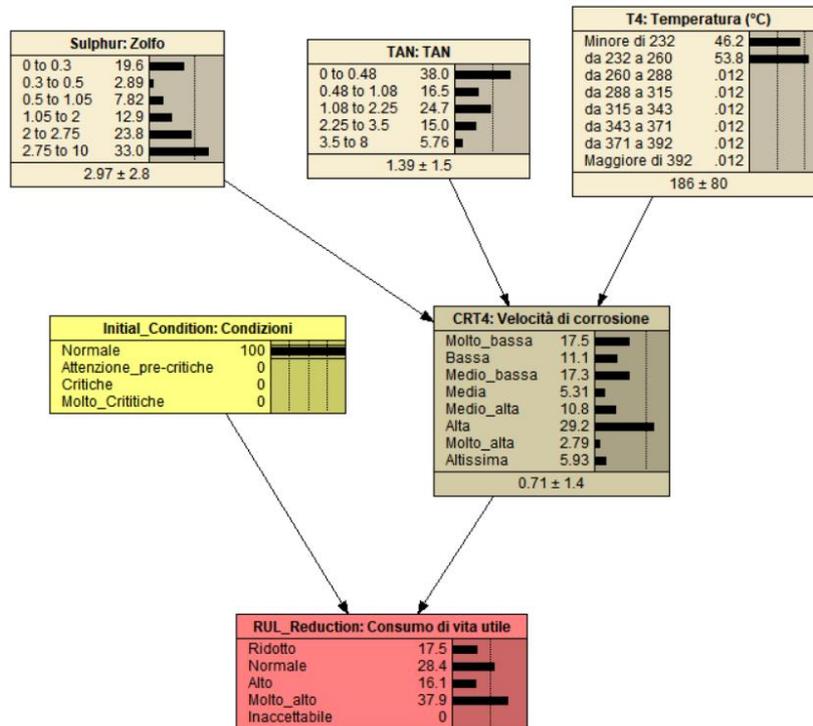


Figura 18 - Calcolo del consumo di vita utile dello scambiatore M1 a 8 anni di servizio

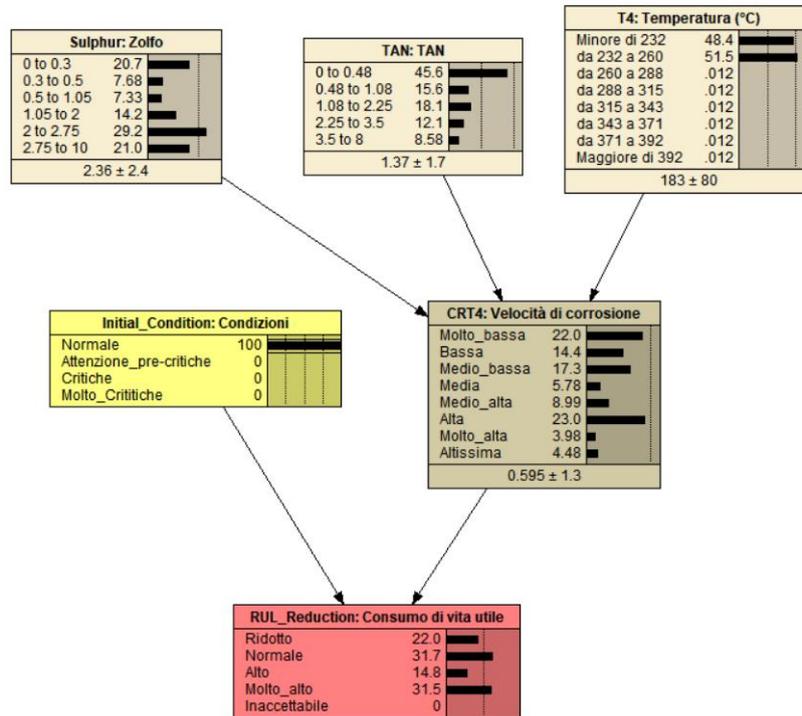


Figura 19 - Calcolo del consumo di vita utile dello scambiatore M1 a 9 anni di servizio

4.9 Gestione RUL per tubazione in acciaio Cr5%

L'applicazione del metodo all'elemento critico M2 è analoga a quella descritta al paragrafo precedente. Le caratteristiche chimiche delle cariche sono, ovviamente, le medesime rispetto a quelle dello scambiatore, mentre i dati di temperatura sono, in prima approssimazione, indipendenti dalle temperature al punto M1.

In Tabella 6 si riportano i risultati dei cicli di elaborazioni in M2. Analogamente a quanto accade per l'elemento M1, a partire dal quinto ciclo si passa a condizioni di attenzione e poi critica, con conseguente riduzione dei tempi di osservazione da 12 a 6, 3 e 1 mese. Nelle Figure 20 e 21 si riportano le elaborazioni rispettivamente a 9 anni e 6 mesi e 9 e 9 mesi.

Tabella 6 - RUL per la tubazione M2 a successivi intervalli temporali

Periodo in servizio	Condizioni iniziali	Δt_i (mesi)	Consumo di vita (anni)	RUL _{i+1} (anni)	Condizione finale
6 anni	Normale	12	0.96	4.04	Normale
7 anni	Normale	12	1.07	2.97	Normale
8 anni	Normale	12	1	1.97	Normale
9 anni	Normale	12	0.92	1.05	Normale
9 anni 6 mesi	Normale	6	0.45	0.60	Attenzione
9 anni 9 mesi	Attenzione	3	0.3	0.30	Critica
9 anni 10 mesi	Critica	1	0.15	0.15	Molto-Critica
9 anni 11 mesi	Molto-Critica	--	--	--	--

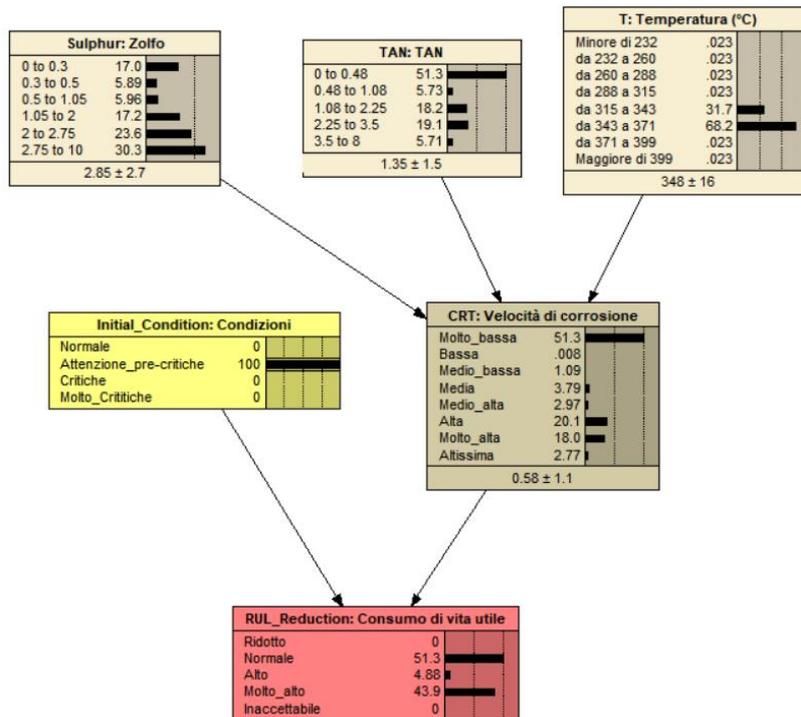


Figura 20 - Calcolo del consumo di vita utile della tubazione M2 a 9 anni e 6 mesi di servizio

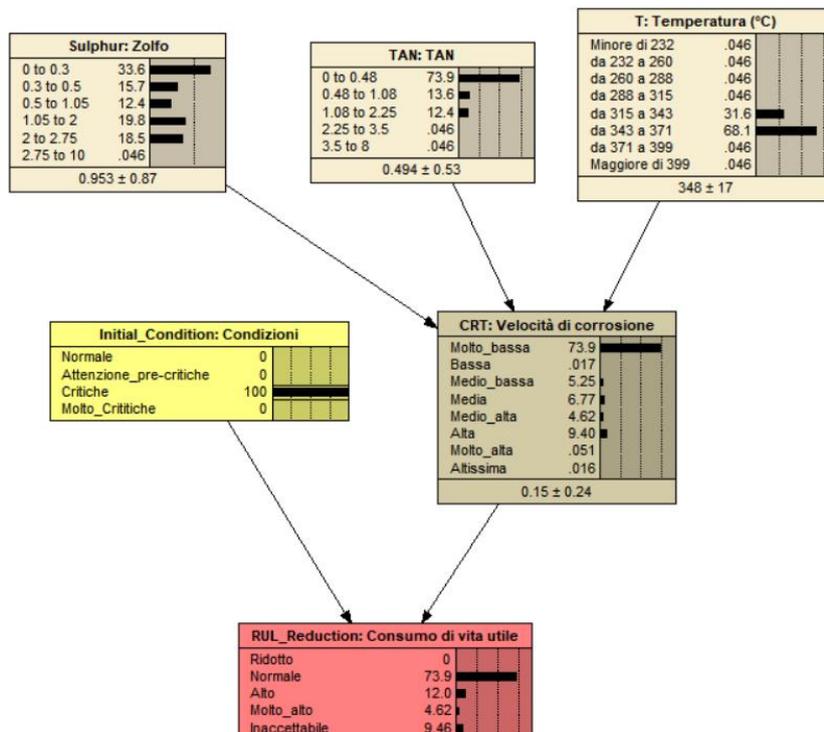


Figura 21 - Calcolo del consumo di vita utile della tubazione M2 a 9 anni e 9 mesi di servizio

5 Previsione di deviazioni dall'andamento normale

Nell'industria di processo, il controllo dei parametri di esercizio, quali temperatura, flusso o pressione, è uno dei fattori essenziali per prevenire gli incidenti. Tutti gli impianti a rischio di incidente rilevante sono infatti già dotati di complessi sistemi di allarme e blocco automatico, che hanno lo scopo di evitare il superamento delle soglie di attenzione e di sicurezza. La nuova sfida è quella di intercettare in anticipo le deviazioni dall'andamento normale dell'impianto, prima che esse degenerino, diventando critiche. Questo può ottenere il doppio vantaggio di accrescere il livello di sicurezza dell'impianto e di aumentarne la disponibilità. Questa necessità è particolarmente sentita nei terminali petroliferi e chimici. Si trattando di impianti relativamente semplici, dove però le condizioni di esercizio sono soggette ad una forte variabilità, in relazione al continuo alternarsi delle navi cisterna che scaricano prodotti differenti, inclusi prodotti petroliferi e prodotti chimici di varia natura e pericolosità. Per quest'impianti una valorizzazione dei dati di esercizio al fine di una previsione anticipata delle possibili deviazioni rappresenta una reale necessità, alla quale rispondono le tecniche illustrate in dettaglio al capitolo 3.

5.1 Sicurezza dell'impianto recupero vapori in un terminale petrolifero

Il modello DYN-RISK è stato testato in un terminale di distribuzione di prodotti petroliferi, concentrandosi sui rischi di incendio ed esplosione legati all'unità di recupero dei vapori (VRU). Il caso-studio pilota considera un impianto di stoccaggio che copre un'area costiera di 62.000 m² e risulta caratterizzato da una capacità di stoccaggio di circa 200.000 m³. È previsto il collegamento alla stazione di pompaggio del terminale petrolifero tramite due oleodotti rispettivamente caratterizzati da diametro nominale 10" e 16", attraverso i quali è possibile sia ricevere, sia inviare il prodotto via mare

L'impianto è dotato di un affidabile sistema di monitoraggio in tempo reale per trasferire i valori effettivi dei parametri di processo in sala controllo. Nella fase di upgrade è possibile provvedere ad un completo aggiornamento del sistema ed alla sua integrazione con il complessivo sistema predittivo oggetto di studio e sviluppo, finalizzato ad intercettare comportamenti impreveduti e all'elaborazione di sistemi di allerta affidabili. La Figura 22 illustra schematicamente la sezione VRU e le linee principali, tra cui la corrente di ingresso dei vapori, quella di recupero, rigenerazione e assorbimento, il circuito di aspirazione della pompa del vuoto e scarico dell'acqua.

ratura del letto a carboni attivi rappresenta il parametro di controllo dello stato fisico dell'unità e della sequenza delle fasi di rigenerazione. Inoltre, essa rappresenta anche il parametro critico per il sistema dinamico di allerta precoce (early warning) di possibili scenari evolutivi pericolosi, con set point posti cautelativamente a $T = 70^\circ \text{C}$ per l'attivazione dell'allarme e a $T = 93^\circ \text{C}$ per lo shutdown di emergenza.

5.2 Applicazione del modello DYN-RISK all'impianto VRU

L'applicazione concreta del modello DYN-RISK (vedi §3.3) mediante il sistema sopra descritto ha consentito la verifica delle effettive potenzialità della metodologia. Segnatamente, mediante un sistema di monitoraggio in real-time dei parametri di processo (sintetizzati in Tabella 7), risulta possibile ricavare la previsione degli stati di sistema.

L'intero set di dati utilizzati nello studio e sottoposti a processo di validazione include osservazioni raccolte direttamente in situ nell'arco di un anno. In particolare, la variabile target, che determina principalmente la sequenza degli stati, è la temperatura dei letti a carboni attivi (TT101, TT102, TT201, TT202). Il modello è progettato con 4 DNN basate sull'algoritmo di Resilient back propagation [PM-015].

Le Figure 23 a-d rappresentano i grafici a dispersione dei valori previsti rispetto ai valori osservati dall'impianto (dati empirici monitorati). La robusta e accurata capacità di previsione si riflette su una chiara sovrapposizione tra i dati previsti e i dati osservati. Le variabili analogiche sono utilizzate in un HBN (Hierarchical Bayesian Network) per predire la probabilità di guasto a posteriori del componente (BB-019; LI-016). Integrando le predizioni delle DNN basate su soft sensors nel HBN, è possibile ottenere un trend continuo della probabilità anche per quegli elementi caratterizzati da variabili booleane, come i guasti dei componenti dell'impianto. Il modello DNN fornisce le previsioni delle variabili. Nell'approccio del Deep Learning, i pesi sinaptici vengono modificati in ogni iterazione ciclica. Il principio della resilienza basato sulla keyword allerta precoce è utilizzato per determinare i set point delle variabili. Il modello BN si basa sui dati probabilistici e sui dati previsti dalle DNN. La parte BN del modello ibrido aggiorna le probabilità di rischio integrando le variabili previsioni di volta in volta, tenendo conto del passaggio precedente (gerarchico). Infine, ad opera del modello HMM, viene predetta la sequenza più probabile degli stati del sistema. Un esempio della sequenza degli stati che l'operatore riceve è riportato in Figura 24. Sulla base della previsione ricevuta, l'operatore riconosce una deviazione che può degenerare in un guasto nell'intervallo di tempo predetto e, sulla base dell'evidenza fornita, può agire in modo da prevenire la sequenza di stati predetta, ad esempio riducendo la velocità di trasferimento. L'azione compiuta genera una successiva previsione che fornisce un feedback all'operatore in merito all'efficacia preventiva dell'azione eseguita.

5.3 Segnali deboli ed esercizio sicuro degli impianti

Il modello di analisi di rischio dinamica risulta pertanto idoneo a captare "segnali deboli" fornendo così un valido strumento a supporto del processo di decision-making.

Le applicazioni in campo hanno evidenziato come sulla base della componente predittiva degli algoritmi utilizzati sia possibile prevedere, con un'elevata efficacia, le deviazioni delle variabili di processo ed il raggiungimento di un possibile stato intermedio di transizione, prodromico ad una

evoluzione a rischio, identificando le interdipendenze causali tra le componenti del sistema e le variazioni nelle condizioni operative, fornendo in tal modo indicazioni significative sulle complessive prestazioni dell'impianto, come riportato a titolo meramente esemplificativo in Figura 24.

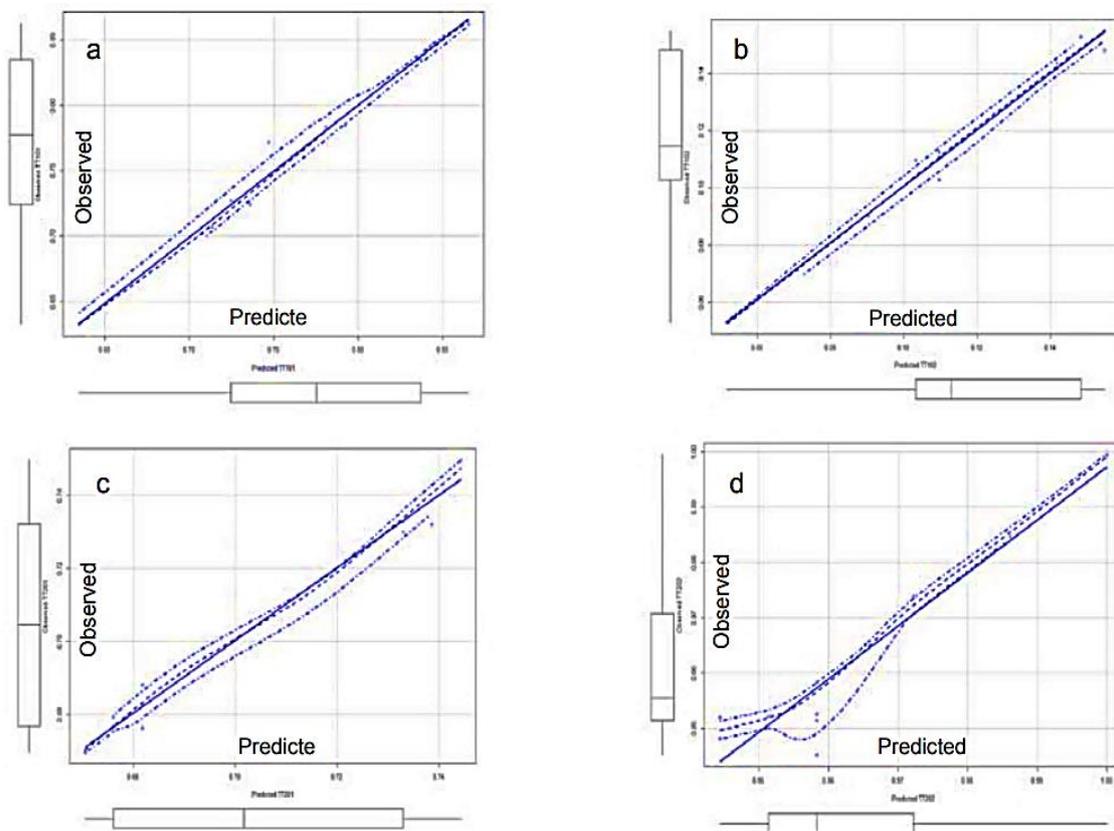


Figura 23 - Scatter plot dei valori predetti dal modello contro i valori osservati per i sensori di temperatura TT101 (a), TT102 (b), TT201 (c), TT202 (d).

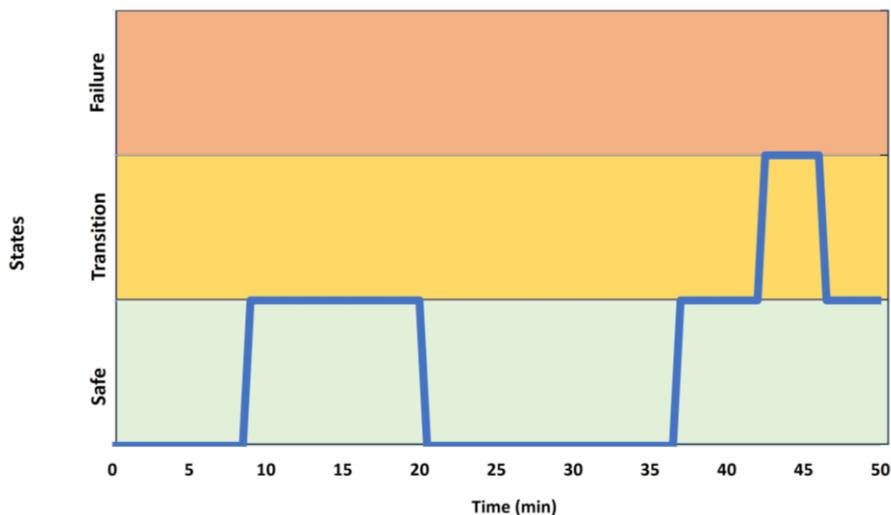


Figura 24 - Esempio di sequenza degli stati previsti.

6 L'applicazione della valutazione dinamica nel settore Seveso

In oltre 30 anni di applicazione della Seveso si è sviluppata una grande “cultura della sicurezza”, diffusa a tutti i livelli: proprietà, dirigenza, dipendenti e contrattisti. In questa “cultura della sicurezza” diffusa, hanno un ruolo essenziale gli enti pubblici: VVF, ISPRA, ARPA e Inail, che hanno al proprio interno profili particolarmente preparati per la gestione del pericolo d'incidente rilevante. Anche la ricerca dà un contributo importante, in particolare di alcune Università che, per tradizione e contiguità geografica, danno particolare attenzione al tema della sicurezza dell'industria di processo. Nel suo insieme, il sistema Seveso risulta abbastanza efficace, ma non ci si può nascondere che gli incidenti continuano ad accadere, in Italia come negli altri paesi che implementano la Seveso. In Italia abbiamo, negli ultimi anni, almeno un evento incidentale all'anno, su una base di un migliaio di stabilimenti, numero abbastanza costante nel tempo. Anche l'incidenza degli infortuni negli stabilimenti Seveso appare più bassa che negli stabilimenti simili, come discusso in un precedente quaderno della presente collana [DF-020]. L'azzeramento degli incidenti “rilevanti” e la contemporanea riduzione al minimo degli infortuni, almeno quelli legati alla presenza di sostanze pericolose, rappresentano obiettivi potenzialmente raggiungibili, grazie anche agli sviluppi recenti della ricerca scientifica e tecnologica ed ai nuovi paradigmi introdotti con la neologistica Safety 4.0 [PF-021].

6.1 Per un'industria chimica e petrolifera senza incidenti

Gli sviluppi della ricerca scientifica e tecnologica rendono disponibili già oggi nuovi strumenti per l'individuazione dei pericoli e l'analisi dei rischi. Per l'individuazione dei pericoli, lo sviluppo di sistemi cyber-fisici, che integrano sensoristica pervasiva e capacità di elaborazione distribuita, offre grandi opportunità. Nella presente collana è stato recentemente pubblicato un quaderno che illustra nel dettaglio le potenzialità per la sicurezza degli stabilimenti di processo dei sistemi cyber-fisici più evoluti [AB-023]. Per l'analisi del rischio, il presente quaderno ha già discusso le potenzialità dei nuovi metodi che sfruttano varie tecniche che vanno tutte sotto il termine-ombrello di intelligenza artificiale.

La sfida è utilizzare queste tecnologie per intercettare con grande anticipo situazioni che potrebbero evolvere verso eventi incidentali. Un'industria chimica e petrolifera senza incidenti rilevanti non è un'utopia o un obiettivo remoto da raggiungere fra molti decenni; la tecnologia di industria 4.0 lo rende possibile. I Paesi Bassi hanno adottato già nel 2016 un piano, il *Duurzame Veiligheid 2030* (RS-018) per arrivare a incidenti zero nel giro di quindici anni. Pensare ad una transizione ecologica, nella quale ci possa essere ancora spazio per gli incidenti è decisamente assurdo!

Il settore petrolifero, inclusa molta parte dell'industria chimica ad esso collegata, è fortemente interessato dalla transizione energetica, che vede, in particolare nel settore legato alla mobilità, cambiamenti che non è esagerato definire esponenziali. Gli investimenti per nuove filiere produttive carbon-free sono visti in tutta Europa come una delle maggiori leve per la ripresa economica e lo stesso PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza) le pone al centro della strategia per avviare un “Green Deal” italiano. Tutto questo avrà un impatto enorme su molte filiere dell'industria chimica e petrolifera italiana, con nuovi prodotti, nuovi processi e nuovi impianti. Probabilmente una parte degli impianti già esistenti potranno essere convertiti ai nuovi prodotti “green”. Questo nel caso in cui esistano dei prodotti con caratteristiche assimilabili a quelli esistenti, ma con impronta

di carbonio bassa o nulla. Tipico esempio i carburanti o i prodotti chimici “verdi”. In altri casi, si prospettano, invece, soluzioni più radicali, ed i prodotti sostitutivi sono totalmente diversi anche per caratteristiche fisiche, per i quali anche lo stoccaggio ed il trasporto richiedono strutture del tutto nuove.

I risultati del presente quaderno dimostrano che le tecniche di analisi dinamica del rischio sono applicabili in vari contesti industriali. Cosa ancora più importante l'intero processo di valutazione e gestione del rischio deve però essere dinamico. La dinamicità nell'analisi presuppone che l'identificazione dei rischi sia estremamente veloce. L'analisi fornisce poi una stima, più o meno accurata e aggiornata del livello di rischio, che deve essere la base per prendere decisioni operative attraverso una ponderazione del rischio che tenga conto in modo attento di tutti i soggetti interessati. Molti i benefici che si possono conseguire. Da un punto di vista dell'esercizio degli impianti le valutazioni dinamiche individuano con precisione anche il momento migliore per operare in sicurezza, senza le limitazioni potenzialmente bloccanti, che potrebbero derivare dalle ipotesi troppo conservative alla base dell'analisi stazionaria del rischio. Anche la gestione dell'integrità delle attrezzature e più in generale della manutenzione, che nella prassi corrente poggia su valutazione del rischio fatta a priori, può acquistare maggiore dinamicità, grazie alle tecniche di analisi dinamica discusse anche nel presente quaderno. Da un punto di vista della sicurezza, infine, l'analisi dinamica riduce fortemente il margine di incertezza che caratterizza i metodi convenzionali e, in particolare, permette di intercettare in anticipo anche le deviazioni minime che avrebbero comunque la potenzialità di sviluppare eventi incidentali.

6.2 La valutazione dinamica del rischio nella transizione energetica

L'approccio della valutazione dinamica del rischio può essere di grande beneficio anche per impianti completamente nuovi. Ovviamente in questo caso c'è minore preoccupazione per quanto riguarda i materiali ma, anche in questo caso, la sensoristica distribuita e connessa consente di avere valutazioni precise sulla scala temporale, così che, anche qui, è impensabile avviare sistemi altamente innovativi senza utilizzare quanto di meglio in termini di analisi del rischio, cioè l'analisi dinamica, che è poi la condizione per una gestione flessibile e sicura degli impianti. La valutazione dinamica del rischio è essenziale per gestire in modo efficace anche gli altri rischi emergenti, come quelli degli eventi naturali, che possono aumentare di intensità a causa dei cambiamenti climatici con ricadute sulla sicurezza. Grazie alle tecniche di analisi dinamica, si possono anche sviluppare strumenti efficaci come le valutazioni all'ultimo minuto del rischio, essenziali per gestire in sicurezza tutte le diverse operazioni, in particolare gli interventi di manutenzione.

È però estremamente importante, assieme alla tecnologia, il fattore umano ed organizzativo, cioè quella “cultura della sicurezza” che è andata sviluppandosi in tanti anni di applicazione della Seveso. Anche se di natura intangibile e difficilmente valutabile, questa risorsa è davvero preziosa, per consentire alle aree industriali italiane di maggiore importanza nella filiera petrolchimica di continuare a svolgere anche attraverso la transizione ecologica, un ruolo strategico nell'area mediterranea. L'importanza della cultura della sicurezza si è già vista durante il periodo del lock-down, durante il quale gli stabilimenti Seveso hanno mostrato una particolare capacità di resilienza.

In sintesi, la transizione ecologica decreterà in tempi rapidi, la fine di alcuni prodotti divenuti ormai troppo inquinanti per i nuovi standard ambientali. Questi prodotti hanno al momento ancora una grande importanza per raffinerie e terminali petroliferi. I prodotti “sporchi” saranno sostituiti

con prodotti più puliti. È essenziale, in questa fase delicatissima, mantenere alti i livelli di sicurezza, sia riguardo ai prodotti convenzionali, che comunque in misura minore continueranno ad essere ancora trattati, sia per i prodotti green. Il fatto di essere green non elimina per nulla la pericolosità intrinseca rispetto ad incendi ed esplosioni. La sicurezza, va ricordato, ha un grande valore economico; una massima ben nota nel mondo chimico e petrolifero, attribuita a Trevor Kletz, uno dei fondatori della sicurezza di processo, dice “se la sicurezza vi sembra costi troppo, provate un incidente!”. Il danno diretto che porta un incidente “chimico” è già considerevole rispetto ad altri settori, ma va poi aggiunta l'accettazione da parte della comunità (sociale e politica), che può essere compromessa in modo definitivo anche da un solo evento avverso.

Le tre leve principali per assicurare che questa transizione non introduca nuovi rischi poco controllabili sono, dunque:

- la sensoristica pervasiva fissa e indossabile per il monitoraggio di attrezzature e personale in situazioni critiche
- la modellistica e prognostica basata sull'intelligenza artificiale,
- la cultura della sicurezza essenziale per qualsiasi attività presente e futura

Per la sensoristica esistono già soluzioni disponibili, per la parte di AI sono in corso importanti sviluppi in progetti di ricerca, incluso DYN-RISK, che cominciano già ad essere disponibili. La cultura della sicurezza, invece, c'è già ed è una grande risorsa, si tratta di valorizzarla al massimo, assicurando continuità nella gestione dei pericoli di incidente rilevante.

Appendice A - Brevi cenni sui metodi Bayesiani

Nel testo del quaderno vi sono numerosi riferimenti ai metodi Bayesiani. Ancora in un recente passato questa matematica, seppur conosciuta da oltre due secoli, era coltivata da pochi e non entrava nei percorsi formativi usuali. Anche se oggi le cose sono molto cambiate, si è ritenuto utile aggiungere in appendice una breve trattazione dell'argomento. Certo insufficiente per diventare dei veri bayesiani, ma sufficiente per introdurre l'argomento e facilitare la comprensione del quaderno.

A.1 L'analisi Bayesiana

L'analisi bayesiana si basa su un teorema attribuito a Thomas Bayes (1760), un prete inglese che voleva risalire dalla probabilità degli effetti visibili alla probabilità delle cause, per giungere al fine a dimostrare l'esistenza di Dio. Nella sua forma più semplice, il teorema di Bayes fornisce una base probabilistica per cambiare una valutazione su un certo argomento, nel momento in cui appaiano nuove prove. Nella formulazione più classica il teorema di Bayes si esprime nel modo seguente:

$$\Pr(A | B) = \frac{\Pr(B | A) \Pr(A)}{\Pr(B)} \quad (\text{a1})$$

dove

$\Pr(A)$ è la valutazione preliminare della probabilità di A;

$\Pr(B)$ è la valutazione preliminare della probabilità di B;

$\Pr(A | B)$ è la probabilità di A dato che B si è verificato (la valutazione posteriore);

$\Pr(B | A)$ è la probabilità che B dato che A si sia verificato.

L'analisi bayesiana è un mezzo di inferenza dai dati, sia empirici che di giudizio e che può essere applicata a un'ampia gamma di parametri. I metodi bayesiani sono stati sviluppati per fornire inferenza per i parametri all'interno di un modello di rischio sviluppato per un particolare contesto, quali il calcolo della probabilità di un certo evento, inclusi anomalie, guasti, rotture o incidenti. Se ai tempi di Bayes la laboriosità dei calcoli aveva ostacolato l'applicazione pratica di questa matematica, la diffusione massiccia dei sistemi di calcolo automatico ha permesso di superare queste difficoltà e i metodi bayesiani hanno trovato applicazioni sempre più vaste in vari settori.

A.1.1 Quando e perché usare l'analisi Bayesiana.

L'analisi bayesiana viene utilizzata per fornire una stima preventiva di un parametro di interesse per i quali si abbiano dati a priori generici o comunque soggetti a larghi margini di incertezza. La distribuzione di probabilità di partenza sarà tipicamente associata a dati soggettivi poiché rappresenta le incertezze nello stato delle conoscenze. Un precedente può essere costruito utilizzando dati di letteratura che trattano in modo generico la questione. Un esempio possono essere i ratei di guasto, che si trovano in letteratura per i vari elementi critici dell'impianto, inclusi sistemi di contenimento, macchine rotanti, sistemi elettrici ed elettronici di regolazione e controllo, sistemi di sicurezza attivi e passivi. I ratei di guasto generici, ad esempio, possono fornire una previsione probabilistica della credibilità di un evento ed essere utile per la valutazione del rischio, quando non esistono dati empirici [IS-019].

I dati degli eventi osservati nell'esercizio dell'impianto possono quindi essere combinati con la distribuzione precedente attraverso un'analisi bayesiana per fornire una stima a posteriori del parametro di rischio di interesse. Se il parametro di interesse è il guasto di una certa attrezzatura, si partirà dai dati di letteratura, si raccoglieranno i dati dell'esperienza operativa e, usando la formula di Bayes, si aggiusteranno, adattandoli così al contesto specifico dell'impianto.

A.1.2 Come usare l'analisi Bayesiana

L'analisi bayesiana può fornire stime per i vari parametri di interesse nell'analisi del rischio, catturando le incertezze associate sia alla variabilità del dato che allo stato delle conoscenze. Questo è diverso dall'inferenza frequentista classica che rappresenta la variazione statistica casuale nella variabile di interesse. Per organizzare i dati con i quali alimentare l'analisi bayesiana si può usare una delle distribuzioni imparate dalla statistica classica e quantificare un modello di probabilità. In alcuni casi di interesse per il contesto impiantistico (guasti, rotture, anomalie, incidenti, errori umani) la distribuzione di Poisson o la distribuzione di Weibull forniscono un utile modello di base. Nella più volte citata API 581 [AP-016], la combinazione fra distribuzione di Weibull e formula di Bayes è usata in molti punti per raccogliere dati sperimentali e combinarli con le valutazioni a priori nelle formule per il calcolo della probabilità di guasto. L'analisi bayesiana si alimenta con i dati disponibili a priori, che servono per strutturare e quantificare il modello di probabilità e con i nuovi dati che servono ad aggiustare il tiro. Il risultato sono le stime aggiornate per il parametro di interesse, sia singoli numeri che intervalli. L'analisi Bayesiana permette di utilizzare anche le convinzioni soggettive su un problema, cambiando le convinzioni precedenti con nuovi dati; il tutto in un modo abbastanza semplice e intuitivo. Una criticità da tenere ben presente nell'analisi Bayesiana è la scelta della distribuzione a priori, che deve essere molto attenta, perché essa condiziona in modo molto pesante le distribuzioni a posteriori.

A.2 Le Reti bayesiane

Una rete bayesiana (Bayesian Network BN) è un modello grafico i cui nodi rappresentano le variabili aleatorie (discrete e/o continue). Gli archi diretti che collegano i nodi rappresentano dipendenze dirette tra variabili e che sono in buona sostanza le cause. I nodi che puntano a un nodo X sono chiamati nodi genitori (*parent nodes*) e sono indicati con $pa(X)$. La relazione tra le variabili è quantificata dalle distribuzioni di probabilità condizionali (CPD) associate a ciascun nodo. Lo stato dei nodi figlio dipende dalla combinazione dei valori dei nodi padre ed è indicato con $Pr(X | pa(X))$. La Figura rappresenta un esempio di rete dove le probabilità sono indicate da stime puntuali.

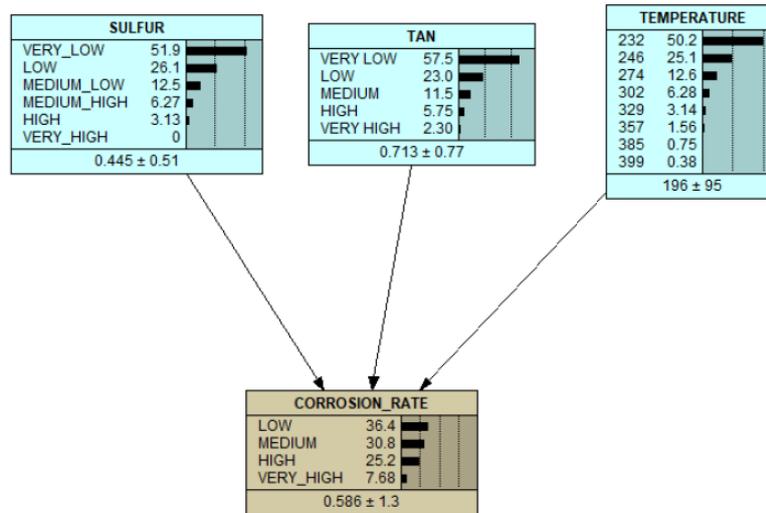


Figura A1 - esempio di rete bayesiana

Una BN di base contiene variabili che rappresentano eventi incerti e può essere utilizzata per dedurre i principali fattori di rischio che portano a conseguenze specifiche. Una BN può anche essere chiamata diagramma di influenza, includendo decisioni, valutazioni e incertezze. In questo caso viene utilizzato per valutare l'impatto dei vari controlli preventivi o mitigativi oppure per valutare opzioni di intervento alternative [IS-019].

A.2.1 Quando e perché usare le reti BN

Si può partire a costruire un modello BN da una rappresentazione qualitativa di un problema sentendo direttamente le parti interessate. Il modello potrà quindi essere quantificato utilizzando dati pertinenti e precisi. Il meccanismo di inferenza sottostante è basato sul teorema di Bayes di cui all'equazione A1 e possiede le proprietà generali dell'analisi bayesiana. Nella formulazione classica non sono inclusi cicli di feedback, ma nel quaderno è stato appunto discusso come sia anche possibile superare questo limite, introducendo il fattore temporale.

La gamma delle applicazioni delle BN è vastissima ed include la modellazione di immagini, il riconoscimento vocale, l'esplorazione dello spazio e i motori di ricerca web. Nel più specifico campo della sicurezza industriale, ha una certa diffusione la trasformazione dei classici grafi tipici dell'analisi dei rischi, inclusi alberi dei guasti, alberi degli eventi e bow-tie, in diagrammi BN. I nodi dei grafi diventano nodi della BN e i valori di probabilità stazionari associati ai nodi possono essere utilizzati come dati a priori e quindi aggiornati alimentando la rete con dati freschi. In questo modo i vari grafi possono diventare "dinamici", grazie al completo utilizzo della sensoristica diffusa implementata nell'impianto [MI-022].

A.2.2 Come usare le reti BN

In generale, i diagrammi BN forniscono modelli visivi che supportano l'articolazione dei problemi e la comunicazione tra le parti interessate. Alimentando opportunamente i modelli BN si possono

condurre analisi di sensibilità per esplorare la criticità dei diversi scenari. Nel caso ci sia da prendere decisioni caratterizzate da una divergenza di opinioni delle parti interessate, può essere utile usare una rappresentazione BN, che è facilmente comprensibile, anche se per farla è necessaria una certa esperienza e competenza. I BN possono essere utili per presentare la questione anche ai non tecnici, trattando l'incertezza in modo matematicamente valido e del tutto trasparente [IS-019]. Gli input per le BN richiedono una comprensione delle variabili di sistema (nodi), dei legami causali tra loro (archi diretti) e delle probabilità precedenti e condizionali per queste relazioni. L'impostazione dei parametri richiede la conoscenza di molte probabilità condizionali che sono generalmente fornite dal giudizio di esperti. Le BN forniscono distribuzioni condizionali e marginali in un output grafico generalmente considerato facile da interpretare. Il modello BN e i dati possono essere facilmente modificati per visualizzare facilmente le relazioni ed esplorare la sensibilità dei parametri a diversi input. Esistono vari software prontamente disponibili che implementano le BN e sono relativamente facili da usare e capire. In alcuni degli esempi discussi nel presente quaderno è stato utilizzato NETICA(c). Per altre applicazioni è stato sviluppato codice specifico.

Riferimenti bibliografici

- [AB-016] Alqurashi, S., Batarfi, O., 2016. A Comparison of Malware Detection Techniques Based on Hidden Markov Model. *J. Inf. Secur.* 7, 215-223.
- [AB-023] Abrardo A., Agnello P., Ansaldi S.M., Belli L., Bragatto P., Davoli L., Fabiani F., Ferrari G., Parri L. 2023 CP-SEC: Sistema Cyber-Fisico per la sicurezza dei lavoratori in presenza di sostanze pericolose Inail Quaderni di Ricerca 22.
- [AD-015] Addepalli, S., Eiroa, D., Lieotrakool, S., François, A. L., Guisset, J., Sanjaime, D., Kazarian, M. Duda, J., Rajkumar R. & Phillips, P. 2015. Degradation study of heat exchangers. *Procedia Cirp*, 38, 137-142.
- [AL-021] Ali, M., Ul-Hamid, A., Khan, T., Bake, A., Butt, H., Bamidele, O. E., & Saeed, A. 2021 Corrosion-related failures in heat exchangers. *Corrosion Reviews*, 39(6), 519-546.
- [AL-021] Alves, D.T.S., Lima, G.B.A., 2021 Establishing an onshore pipeline incident database to support operational risk management in Brazil - Part 2: Bowtie proposition and statistics of failure. *Process Saf. Environ. Prot.* 155, 80-97.
- [AN-019] Ansaldi, S.M., Pirone, A., Vallerotonda, M.R., Agnello, P., Bragatto, P. 2019. Near misses from the seveso inspections: Use of knowledge-based methods for safety improvement. *Chem. Eng. Trans.* 77, 421-426. <https://doi.org/10.3303/CET1977071>.
- [AP-016] American Petroleum Institute API, RP 581 2016 Risk-Based Inspection Methodology 3rd edition Washington USA.
- [AP-019] API RP 939 Guidelines for Avoiding Sulfidation (Sulfidic) Corrosion Failures in Oil Refinery 2019 American Petroleum Institute Washington USA.
- [AP-022] American Petroleum Institute API RP 584 2022 Integrity Operating Windows 2nd edition Washington USA.
- [AR-021] Arunthavanathan, R., Khan, F., Ahmed, S., Imtiaz, S. 2021 A deep learning model for process fault prognosis. *Process Saf. Environ. Prot.* 154, 467-479.
- [AR-022] Arena, E., Fargione, G., Giudice, F., & Latona, E. 2022. RBI-IOWs integrated approach to risk assessment: Methodological framework and application. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 79, 104838.
- [BB-019] Babaleye, A.O., Emek, R., Khan, F. 2019 Hierarchical Bayesian model for failure analysis of off-shore wells during decommissioning and abandonment processes. *Process Saf. Environ. Prot.* 131, 307-319.

[BD-013] Badreddine, A., Amor, N. Ben, 2013 A Bayesian approach to construct bow tie diagrams for risk evaluation. *Process Saf. Environ. Prot.* 91, 159-171.

[BU-017] Bucelli M., Paltrinieri N., Landucci G., Cozzani V. 2017 Safety barrier management and risk assessment: Integration for safer operations in the Oil & Gas industry Institution of Chemical Engineers Symposium Series, 162.

[DE-019] Devianto, H., Eviani, M., Rahardi, R. A., & Yusupandi, F. 2019. The Effect of Total Sulfur Content and Total Acid Number (TAN) on Small Scale Oil Refinery. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 543, 1, 012027.

[DF-020] Di Francesco A., Iacono P., Nebbioso A., Pirone A., Saputi G., Simeoni C., Vallerotonda M.R., 2020 Settore Seveso: contesto normativo e caratterizzazione statistica degli infortuni Inail Quaderni di Ricerca 18.

[EK-010] El Kamel, M., Galtayries, A., Vermaut, P., Albinet, B., Foulonneau, G., Roumeau, X. Roncin, B. & Marcus, P. (2010). Sulfidation kinetics of industrial steels in a refinery crude oil at 300 C: reactivity at the nanometer scale. *Surface and Interface Analysis*, 42(6-7), 605-609.

[EN-018] EN 16991:2018 Framework for risk-based inspections CEN Bruxelles BE.

[FA-010] Farrell, D., & Roberts, L. 2010. A Study of High Temperature Sulfidation Under Actual Process Conditions. Paper presented at the CORROSION 2010, San Antonio, Texas, March 2010.

[FA-012] Fabiano, B., Currò, F., 2012. From a survey on accidents in the downstream oil industry to the development of a detailed near miss reporting system. *Process Saf. Environ. Prot.* 90, 357-367.

[FA-019] Faes, W., Lecompte, S., Ahmed, Z. Y., Van Bael, J., Salenbien, R., Verbeken, K., & De Paepe, M. 2019. Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers. *Corrosion reviews*, 37(2), 131-155.

[GA-019] Galagedarage Don, M., Khan, F., 2019. Process fault prognosis using hidden markov model-bayesian networks hybrid model. *Ind. Eng. Chem. Res.* 58.

[GH-011] Ghasemi, H. 2011. High temperature sulfidation of carbon steel heater tubes in gas condensate containing sulfur compounds. *Engineering Failure Analysis*, 18(3), 980-987.

[GH-020] Ghosh, A., Ahmed, S., Khan, F., Rusli, R., 2020. Process Safety Assessment Considering Multivariate Non-linear Dependence Among Process Variables. *Process Saf. Environ. Prot.* 135, 70-80.

[GR-015] Grim, L., Tillema, D., Cutchen, S., Wingard, M., & Johnson, A. 2015. CSB investigation of Chevron Richmond refinery pipe rupture and fire. *Process Safety Progress*, 34(4), 355-359.

- [GR-021] George, P.G., Renjith, V.R., 2021. Evolution of Safety and Security Risk Assessment methodologies towards the use of Bayesian Networks in Process Industries. *Process Saf. Environ. Prot.* 149, 758-775.
- [GU-021] Guo, X., Ji, J., Khan, F., Ding, L., Tong, Q., 2021. A novel fuzzy dynamic Bayesian network for dynamic risk assessment and uncertainty propagation quantification in uncertainty environment. *Saf. Sci.* 141, 105285.
- [HA-009] Hau, J. 2009. Predicting sulfidic and naphthenic acid corrosion. *Corrosion*, 65(12), 831-844.
- [HU-006] Hucińska, J. 2006. Influence of sulphur on high temperature degradation of steel structures in the refinery industry. *Advances in materials science*, 6(1), 16-25.
- [IE-006] IEC 61025:2006 Fault tree analysis (FTA) 2nd ed. International Electrotechnical Commission Geneva CH.
- [IE-006a] IEC 61165:2006 Application of Markov techniques 2nd edition IEC Geneva CH.
- [IE-010] IEC 62502:2010 Event Tree analysis (ETA) 2nd ed. International Electrotechnical Commission Geneva CH
- [IE-016] IEC 61882:2016 Hazop 2nd ed. International Electrotechnical Commission Geneva CH.
- [IE-018] IEC 60812:2018 Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA) 3rd ed. IEC International Electrotechnical Commission Geneva CH.
- [IS-019] ISO 31010:2019 Risk management - Risk assessment techniques 2nd ed. International organization for Standardization Geneva CH.
- [JA-018] Iain, P., Rogers, W.J., Pasmán, H.J., Mannan, M.S., 2018. A resilience-based integrated process systems hazard analysis (RIPSHA) approach: Part II management system layer. *Process Saf. Environ. Prot.* 118, 115-124.
- [JO-004] John, R. C., Pelton, A. D., Young, A. L., Thompson, W. T., Wright, I. G., & Besmann, T. M. 2004. Assessing corrosion in oil refining and petrochemical processing. *Materials research*, 7, 163-173.
- [KA-009] Kalantarnia, M., Khan, F., Hawboldt, K., 2009. Dynamic risk assessment using failure assessment and Bayesian theory. *J. Loss Prev. Process Ind.* 22, 600-606.
- [LE-020] Leveson, N.G., 2020. Safety III: A Systems Approach to Safety and Resilience [WWW Document]. MIT Eng. Syst. Lab. URL sunnyday.mit.edu/safety-3.pdf.

[LI-016] Li, S., Tryfonas, T., Russell, G., Andriotis, P., 2016. Risk Assessment for Mobile Systems Through a Multilayered Hierarchical Bayesian Network. *IEEE Trans. Cybern.* 46, 1749-1759.

[LI-021] Liu, Z., Ma, Q., Cai, B., Liu, Y., Zheng, C., 2021. Risk assessment on deepwater drilling well control based on dynamic Bayesian network. *Process Saf. Environ. Prot.* 149, 643-654.

[LZ-015] Lagad, V., & Zaman, V. 2015 Utilizing Integrity Operating Windows (IOWs) for enhanced plant reliability & safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 352-356.

[MA-021] Mamudu, A., Khan, F., Zendejboudi, S., Adedigba, S., 2021. Dynamic risk modeling of complex hydrocarbon production systems. *Process Saf. Environ. Prot.* 151, 71-84.

[ME-022] Meng, H., An, X., Xing, J., 2022. A data-driven Bayesian network model integrating physical knowledge for prioritization of risk influencing factors. *Process Saf. Environ. Prot.* 160, 434-449.

[MI-022] Milazzo, M.F., Bragatto, P., Bartolozzi, V., Vairo, T., Fabiano, B. 2022 Dynamic Assessment of the Probability of Release Caused by Equipment Deterioration *Chemical Engineering Transactions*, 91, pp. 229-234.

[NA-021] Nakhal A, A.J., Patriarca, R., Di Gravio, G., Antonioni, G., Paltrinieri, N., 2021. Investigating occupational and operational industrial safety data through Business Intelligence and Machine Learning. *J. Loss Prev. Process Ind.* 73, 104608.

[NG-992] Ng, H.T., Mooney, R.J., 1992 Abductive Plan Recognition and Diagnosis: A Comprehensive Empirical Evaluation., in: *3rd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*. Cambridge, MA, pp. 499-508.

[NH-020] Nhat, D.M., Venkatesan, R., Khan, F., 2020. Data-driven Bayesian network model for early kick detection in industrial drilling process. *Process Saf. Environ. Prot.* 138, 130-138.

[NI-014] Ning, C., Chen, M., Zhou, D., 2014. Hidden Markov Model-Based Statistics Pattern Analysis for Multimode Process Monitoring: An Index-Switching Scheme. *Ind. Eng. Chem. Res.* 53, 11084-11095.

[OE-008] OECD, 2008, Report of survey on the use of safety documents in the control of major accident hazards *Environment Directorate Series on Chemical Accidents Number 17* Paris.

[OR-020] Ott, B., & Reza, A. (2020, October). Considerations in Developing an Inspection Plan for Petrochemical Equipment in Sulfidation Service. In *The 30th International Ocean and Polar Engineering Conference*. OnePetro.

[OS-021] Osarogiagbon, A.U., Khan, F., Venkatesan, R., Gillard, P., 2021. Review and analysis of

supervised machine learning algorithms for hazardous events in drilling operations. *Process Saf. Environ. Prot.* 147, 367-384.

[PA-021] Pasma, H.J., 2021. Early warning signals noticed, but management doesn't act adequately or not at all: a brief analysis and direction of possible improvement. *J. Loss Prev. Process Ind.* 70, 104272.

[PF-021] Pasma, H.J., Fabiano, B., 2021. The Delft 1974 and 2019 European Loss Prevention Symposia: highlights and an impression of process safety evolutionary changes from the 1st to the 16th LPS. *Process Saf. Environ. Prot.* 147, 80-91.

[PL-019] Paltrinieri, N., Comfort, L., Reniers, G., 2019. Learning about risk: Machine learning for risk assessment. *Saf. Sci.* 118, 475-486.

[PM-015] Pani, A.K., Mohanta, H.K., 2015. Online monitoring and control of particle size in the grinding process using least square support vector regression and resilient back propagation neural network. *ISA Trans.* 56, 206-221.

[PM-023] Pazmiño-Mayorga, I., Jobson, M., & Kiss, A. A. 2023. Operating windows for early evaluation of the applicability of advanced reactive distillation technologies. *Chemical Engineering Research and Design*, 189, 485-499.

[PR-013] Pasma, H., Rogers, W., 2013. Bayesian networks make LOPA more effective, QRA more transparent and flexible, and thus safety more definable! *J. Loss Prev. Process Ind.* 26, 434-442.

[PR-014] Pasma, H. and Reniers, G., 2014. Past, present and future of Quantitative Risk Assessment (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning. *J. Loss Prev. Process Ind.* 28, 2-9.

[RE-011] R. B. Rebak 2011 Sulfidic corrosion in refineries - a review *Corrosion Reviews* 29 123-133.

[RE-018] Rebello, S., Yu, H., Ma, L., 2018. An integrated approach for system functional reliability assessment using Dynamic Bayesian Network and Hidden Markov Model. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 180, 124-135.

[RE-020] M. Rezaei, Z. Mahidashti, S. Eftekhari, E. Abdi, 2020 A corrosion failure analysis of heat exchanger tubes operating in petrochemical refinery *Engineering Failure Analysis*, 119, 105011.

[RS-018] Raas-Soeterbroek, S. 2018 Dutch programme Sustainable Safety 2030 www.safera.eu/static/pdf/SaskiaRaas_SAFERA-14062018.pdf accessed 22/03/2023.

[RY-012] Rashid, M.M., Yu, J., 2012. Hidden Markov Model Based Adaptive Independent Component Analysis Approach for Complex Chemical Process Monitoring and Fault Detection. *Ind. Eng. Chem. Res.* 51, 5506-5514.

[SA-019] Sarbayev, M., Yang, M., Wang, H., 2019. Risk assessment of process systems by mapping fault tree into artificial neural network. *J. Loss Prev. Process Ind.* 60, 203-212.

[SB-018] Shahmoradi, S., Bagheri Shouraki, S., 2018. Evaluation of a novel fuzzy sequential pattern recognition tool (fuzzy elastic matching machine) and its applications in speech and handwriting recognition. *Appl. Soft Comput. J.* 62, 315-327.

[SC-019] Schempp, P., Köhler, S., Preuss, K., & Tröger, M. 2019. New approach for sulphidation prediction in crude oil refineries EUROCORR 2019, Proceedings of the European Corrosion Congress September 9-13, 2019, Seville, Spain Paper No. 233938.

[SG-018] Sagayam, K.M., Hemanth, D.J., 2018. ABC algorithm-based optimization of 1-D hidden Markov model for hand gesture recognition applications. *Comput. Ind.* 99, 313-323.

[SH-017] Sharifi-Asl, S., Liang, A., Cooke, D., Chapman, D. R., Chaloner-Gill, B., & Kuperman, A. E. 2017. High-temperature sulfidic corrosion of carbon steel in model oil/sulfur compound blends. Presented in CORROSION 2017. OnePetro.

[SI-021] R. Siva, G. Mageshwaran, Sanjana Kallat & Jeya Jeevahan 2021 Experimental investigation on the effect of corrosion and erosion on the shell and tubetype heat exchanger, *International Journal of Ambient Energy*, 42:7, 816-822.

[SK-001] Sato, T., Kameya, Y., 2001. Parameter learning of logic programs for symbolic-statistical modeling. *J. Artif. Intell. Res.* 15, 391-454.

[SR-019] Sarkar, S., Vinay, S., Raj, R., Maiti, J., Mitra, P., 2019. Application of optimized machine learning techniques for prediction of occupational accidents. *Comput. Oper. Res.* 106, 210-224.

[TA-022] Tang, X., Chen, A., He, J., 2022. A modelling approach based on Bayesian networks for dam risk analysis: Integration of machine learning algorithm and domain knowledge. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 71, 102818.

[TS-997] Thagard, P., Shelley, C., 1997. Abductive reasoning: logic, visual thinking, and coherence, in: Dalla Chiara, M.L., Doets, K., Mundici, D., Van Benthem, J. (Eds.), *Logic and Scientific Methods*, Kluwer Academic Publishers, pp. 413-427.

[UI-018] UNI ISO 31000:2018 Gestione del rischio - Linee guida UNI Milano IT.

[UN-013] UNI TS 11325-8:2013 Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 8: Pianificazione delle manutenzioni su attrezzature a pressione attraverso metodologie basate sulla valutazione del rischio (RBI) UNI Milano IT.

[UN-019] UNI 10617:2019 Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Requisiti essenziali UNI Milano IT.

[UN-022] UNI 10616:2022 Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Linee guida per l'applicazione della UNI 10617.

[VA-019] Vairo, T., Milazzo, M.F., Bragatto, P., Fabiano, B., 2019 A Dynamic Approach to Fault Tree Analysis based on Bayesian Beliefs Networks *Chemical Engineering Transactions*, 77, pp. 829-834.

[VA-019] Vairo, T., Milazzo, M.F., Bragatto, P., Fabiano, B., 2019. A Dynamic Approach to Fault Tree Analysis based on Bayesian Beliefs Networks. *Chem. Eng. Trans.* 77, 829-834.

[VA-020] Vairo, T., Reverberi, A.P., Fabiano, B., 2020. From risk assessment to resilience assessment. an application to a hazmat storage plant. *Chem. Eng. Trans.* 82, 151-156.

[VA-021] Vairo, T., Reverberi, A.P., Bragatto, P.A., Milazzo, M.F., Fabiano, B., 2021. Predictive model and soft sensors application to dynamic process operative control. *Chem. Eng. Trans.* 86, 535-540.

[VA-022] Vairo, T., Bragatto, P., Milazzo, M.F., Pettinato, M., Fabiano, B., 2022. DYN-RISK- Design and Development of a Dynamic Risk Assessment Tool. *Chem. Eng. Trans.* 90, 325-330.

[WH-993] R A White; E.F. Ehaue 1993 *Materials Selection for Refineries & Associated Facilities* NACE ISBN 978-0915567454 Houston-TX USA

[WI-022] Wilson, P. T. 2022. Managing the mechanical integrity of pressure equipment using a layers of protection framework and incorporating integrity operating windows. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 79, 104821.

[XU-023] Xu, Y., Reniers, G., Yang, M., Yuan, S., Chen, C., 2023. Uncertainties and their treatment in the quantitative risk assessment of domino effects: Classification and review. *Process Saf. Environ. Prot.* 172, 971-985.

[YA-013] Yang, M., Khan, F.I., Lye, L., 2013. Precursor-based hierarchical Bayesian approach for rare event frequency estimation: A case of oil spill accidents. *Process Saf. Environ. Prot.* 91, 333-342.

[ZH-021] Zhu, R., Hu, X., Bai, Y., Li, X., 2021. Risk analysis of terrorist attacks on LNG storage tanks at ports. *Saf. Sci.* 137, 105192.

I Quaderni di ricerca

1 - G. Ciriello, M. De Felice, R. Mosca, M. Veltroni, *Infortuni sul lavoro. Un modello di lettura (della numerosità) su "open data" dell'Inail*

2 - L. Cortis, F. M. Fabiani, C. Ratti, L. Rossi, D. G. Svampa, C. Vitale, *Analisi e valutazione del comportamento dell'assorbitore di energia nei sistemi di arresto caduta con differenti masse di prova*

3 - P. Rossi, *Danno biologico: monitoraggio, criticità e prospettive d'interesse medico-legale a dieci anni dall'introduzione della nuova disciplina*

4 - M. De Felice, A. Goggiamani, R. Mosca, M. Veltroni, *Malattie professionali. Un modello di lettura (della numerosità) su "open data" dell'Inail*

5 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Nuovi strumenti per la valutazione dello scivolamento e ribaltamento delle scale portatili*

6 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Determinazione della resistenza caratteristica dei dispositivi di collegamento montante-traverso nei ponteggi metallici fissi di facciata*

7 - S. Carruba, R. Grimaldi, M. Sparro, S. Tomasini, *Vendor Rating: il modello di valutazione delle forniture IT dell'Inail*

8 - P. Agnello, S. M. Ansaldo, *Una proposta di ontologia per gli Open Data Inail sugli infortuni: dalla numerosità dei dati alla gestione della conoscenza*

9 - A. Alvino, A. Antonini, C. Delle Site, A. Di Loreto, F. Giacobbe, D. Lega, E. Pichini, M.A. Pierdominici, L. Ricciardi, A. Tonti, *Analisi delle cause di rottura di materiali metallici: esempi di Applicazione*

10 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Light workers e criticità dell'assorbitore di energia nei sistemi di arresto caduta*

11 - S. Carruba, R. Grimaldi, M. Sparro, S. Tomasini, *Vendor Rating: la valutazione delle forniture IT dell'Inail per il 2015*

12 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Metodologia per prove di rigidità e resistenza per i dispositivi di collegamento montante-traverso nei ponteggi metallici fissi di facciata*

13 - R. Giovinazzo, E. Guerrera, M. Mameli, D. Sarto, M. Veltroni, *Analisi della contaminazione microbiologica degli ambienti di lavoro. Valutazione della qualità del dato analitico nel conteggio microbico su piastra e nelle prestazioni dell'operatore*

14 - P. Agnello, F. Bracco, C. Brunel, M. Masini, T. F. Piccinno, A. Sedaoui, D. Tazi, *Promuovere la sicurezza nelle organizzazioni attraverso manager resilienti*

- 15 - L. Rossi, *Esecuzione in sicurezza dei lavori in copertura. Misure di prevenzione e protezione*
- 16 - F. Antonello, P. Bragatto, F. Di Maio, S. M. Hoseyni, E. Zio, *Stima adattiva del rischio di rottura di attrezzature in pressione, sulla base dei dati di monitoraggio*
- 17 - J. Cecca, N. L'Episcopo, L. Mainero Rocca, *Nuove tecniche analitiche al servizio della sicurezza dei lavoratori: sviluppo di un metodo di analisi diretta di fungicidi e insetticidi sulla superficie delle foglie*
- 18 - A. Di Francesco, P. Iacono, A. Nebbioso, A. Pirone, G. Saputi, C. Simeoni, M.R. Vallerotonda, *Settore Seveso: contesto normativo e caratterizzazione statistica degli infortuni*
- 19 - F. M. Fabiani, L. Rossi, *Criticità delle reti di sicurezza di piccole dimensioni*
- 20 - Bragatto, C. Mennuti, M. F. Milazzo, E. Proverbio, *Tecniche avanzate per la gestione dei serbatoi di stoccaggio atmosferico*
- 21 - E. Badellino, T. P. Baccolo, M. R. Marchetti, A. Papale, I. Rossi, E. Rotoli, S. Signorini
Il progetto Inail: La prevenzione alimentare al lavoro in ottica bio-psico-sociale - I risultati della ricerca-intervento
- 22 - A. Abrardo, P. Agnello, S. M. Ansaldi, L. Belli, P. Bragatto, L. Davoli, F. M. Fabiani, G. Ferrari, L. Parri, *CP-SEC: Sistema Cyber-Fisico per la sicurezza dei lavoratori in presenza di sostanze pericolose*
- 23 - D. Accordin, P. Agnello, S. M. Ansaldi, S. Arrigoni, F. Braghin, E. Cagno, C. Frascheri, E. Lenzi, D. Piantella, M. Roveri, L. Tanca, G. Viscardi, *RECKON: Tecnologie abilitanti per il monitoraggio degli elementi di contesto (Operatore-Macchina- Ambiente) per la prevenzione di incidenti sul lavoro*

