

Sicurezza tecnologica

Articolo di giornale

Articolo *“Impianti nucleari, il vento soffia verso est”* di Katherine Tweed / Scientific American, pubblicato il 02/06/2014 su *Le Scienze*.

https://www.lescienze.it/news/2014/06/02/news/impianti_nucleari_asia_occidente-2165011/

L'articolo analizza lo sviluppo dei reattori nucleari di nuova generazione, confrontando in particolare due diversi approcci alla sicurezza: quello dell'EPR europeo e quello dell'AP statunitense. Nel primo caso, la sicurezza si basa anche sulla presenza di più sistemi di raffreddamento separati e indipendenti; nel secondo, invece, si punta maggiormente sulla semplificazione dell'impianto e sull'impiego di sistemi di sicurezza passivi.

L'AP, ad esempio, utilizza fenomeni fisici naturali come la gravità e la circolazione dei fluidi per garantire alcune funzioni di sicurezza anche senza l'intervento immediato degli operatori o l'utilizzo di pompe elettriche. Un grande serbatoio collocato sopra il reattore può permettere all'acqua di scendere per gravità contribuendo al raffreddamento in condizioni di emergenza. Il confronto mostra come la sicurezza di un impianto nucleare non dipenda da un singolo dispositivo, ma dalla combinazione di soluzioni diverse capaci di intervenire anche quando uno o più componenti non funzionano come previsto.

Introduzione

La sicurezza di una centrale nucleare nasce già nella fase di progettazione. Scelta del sito, qualità dei materiali, caratteristiche fisiche del reattore, sistemi di controllo, barriere di contenimento, manutenzione e preparazione del personale concorrono tutti allo stesso obiettivo: prevenire gli incidenti e limitarne le eventuali conseguenze.

La progettazione moderna considera fin dall'inizio un'ampia gamma di condizioni operative e di possibili eventi, prevedendo più livelli indipendenti di protezione. Questo approccio, definito **difesa in profondità**, integra sistemi attivi e passivi e consente all'impianto di mantenere le funzioni fondamentali di sicurezza anche in condizioni anomale.

1. La difesa in profondità e le barriere di sicurezza

Nel nocciolo di un reattore la fissione dei nuclei del combustibile produce energia sotto forma di calore, che viene trasferito a un fluido refrigerante. Il fluido refrigerante riscaldato viene utilizzato per produrre vapore, il quale produrrà energia elettrica attraverso una turbina. Per mantenere il reattore in condizioni sicure è necessario controllare la reazione nucleare, rimuovere continuamente il calore prodotto e impedire che le sostanze radioattive raggiungano l'ambiente esterno.

Anche quando il reattore viene spento, il raffreddamento deve continuare. L'arresto della reazione a catena interrompe infatti la fissione, ma i prodotti radioattivi presenti nel combustibile continuano a decadere e a produrre il cosiddetto **calore residuo**. La sua intensità diminuisce progressivamente, ma deve comunque essere asportata. Per questo spegnere un reattore e raffreddarlo sono due funzioni diverse ed entrambe devono essere garantite anche durante un'emergenza.

Il principio fondamentale utilizzato per raggiungere questo obiettivo è quello della **difesa in profondità** (*defence in depth*). La sicurezza viene costruita attraverso livelli successivi e il più possibile indipendenti, che accompagnano l'impianto dalla prevenzione delle anomalie alla loro individuazione e gestione, fino alla mitigazione delle possibili conseguenze.

La prevenzione inizia dalla progettazione e dalla costruzione. Materiali e componenti devono rispettare requisiti rigorosi e anche il sito deve essere studiato considerando eventi come terremoti, alluvioni e condizioni meteorologiche estreme. Durante il funzionamento, sensori e strumenti controllano continuamente temperatura, pressione, potenza, flusso del refrigerante e altri parametri. Quando viene rilevata un'anomalia, sistemi automatici e operatori possono intervenire per riportare l'impianto in condizioni normali o arrestarlo.

Un altro elemento fondamentale è costituito dalle **barriere fisiche** poste tra il materiale radioattivo e l'ambiente. I prodotti di fissione sono innanzitutto trattenuti nel combustibile; le pastiglie di combustibile sono racchiuse in guaine metalliche; a queste si aggiungono il circuito primario e il recipiente in pressione del reattore, il *vessel*. Infine, l'edificio di contenimento costituisce una barriera progettata per impedire o limitare la dispersione di sostanze radioattive anche in condizioni incidentali. L'edificio di contenimento, inoltre, è progettato per resistere anche ad attacchi missilistici o incidenti aerei.

Il principio è quindi che il cedimento di un singolo elemento non debba comportare il cedimento dell'intero sistema. Per questo vengono utilizzati i criteri di **ridondanza, diversità e separazione fisica**. La ridondanza consiste nel disporre di più apparecchiature capaci di svolgere la stessa funzione; la diversità prevede l'impiego di soluzioni differenti per evitare che lo stesso tipo di guasto comprometta tutti i sistemi; la separazione fisica riduce invece la possibilità che un unico incendio, allagamento o altro evento danneggi contemporaneamente sistemi progettati per sostituirsi a vicenda.

L'EPR descritto nell'articolo di *Le Scienze* rappresenta un esempio di questa filosofia: dispone di quattro sistemi di raffreddamento separati, dotati di propri componenti. La presenza di più sistemi indipendenti contribuisce a mantenere disponibile la funzione di raffreddamento anche quando uno di essi non è operativo.

2. Sistemi di sicurezza attivi e passivi

Una distinzione importante nella sicurezza nucleare riguarda i **sistemi attivi e passivi**. I sistemi attivi utilizzano apparecchiature che devono essere azionate e alimentate, come pompe, motori e valvole controllate. Se, ad esempio, occorre immettere acqua nel circuito del reattore, una pompa può trasferire il refrigerante da un serbatoio alla zona che deve essere raffreddata.

Questi dispositivi sono normalmente presenti in più copie e possono essere alimentati da sorgenti diverse. Per garantire la continuità delle funzioni essenziali anche in caso di indisponibilità della rete elettrica, le centrali dispongono inoltre di generatori di emergenza, batterie e altre sorgenti di alimentazione.

L'incidente di Fukushima Daiichi del 2011 ha mostrato chiaramente l'importanza di garantire il raffreddamento anche in condizioni particolarmente severe. Il terremoto provocò l'arresto automatico dei reattori in funzione, mentre il successivo tsunami danneggiò diversi sistemi elettrici necessari al raffreddamento. L'esperienza ha contribuito a rafforzare ulteriormente i criteri con cui vengono considerate le situazioni in cui più sistemi possono diventare indisponibili contemporaneamente.

I **sistemi passivi** cercano di ridurre questa dipendenza sfruttando fenomeni fisici naturali come gravità, evaporazione, condensazione e circolazione naturale. Se un serbatoio viene collocato a un livello superiore rispetto alla zona da raffreddare, per esempio, l'acqua può scendere senza essere spinta da una pompa. Analogamente, un fluido caldo tende a diventare meno denso e a salire, mentre quello più freddo scende: progettando opportunamente il circuito, questo movimento può essere sfruttato per trasferire calore anche senza pompaggio meccanico.

L'**AP**, descritto nell'articolo di *Le Scienze*, utilizza proprio questo approccio. Il progetto riduce il numero di alcuni componenti attivi e impiega sistemi passivi per garantire funzioni come l'iniezione di acqua e la rimozione del calore. Il grande serbatoio collocato nella parte superiore dell'impianto costituisce un esempio intuitivo: la gravità diventa parte del sistema di sicurezza.

Il vantaggio è evidente: alcune funzioni possono continuare a essere garantite anche quando viene meno l'alimentazione elettrica o prima che gli operatori possano intervenire. Come ogni sistema di sicurezza, anche le soluzioni passive vengono progettate, mantenute e validate attraverso calcoli, simulazioni e prove sperimentali, così da verificarne le prestazioni nelle diverse condizioni previste.

La sicurezza di un reattore moderno nasce quindi dall'integrazione tra sistemi attivi e passivi, ai quali si aggiungono la **manutenzione programmata** e il ruolo del personale. I dispositivi destinati a intervenire durante un'emergenza vengono controllati periodicamente, mentre gli operatori si esercitano anche attraverso simulatori per affrontare condizioni operative diverse da quelle ordinarie.

3. La sicurezza nei reattori nucleari avanzati

L'esperienza maturata durante decenni di funzionamento delle centrali ha portato allo sviluppo dei cosiddetti reattori di **terza generazione** e di **terza generazione avanzata**, o III+. Tra gli obiettivi principali vi sono il miglioramento dei sistemi di controllo, una maggiore robustezza delle barriere, una migliore gestione degli incidenti gravi e, in alcuni progetti, un maggiore ricorso alla sicurezza passiva.

EPR e AP mostrano due approcci differenti. Il primo punta molto sulla ridondanza e sulla separazione dei sistemi di sicurezza; il secondo introduce una maggiore semplificazione e sfrutta più ampiamente fenomeni naturali. Entrambe le soluzioni cercano di raggiungere lo stesso risultato: garantire che un singolo guasto non faccia perdere le funzioni fondamentali del reattore.

Accanto alla sicurezza passiva si parla anche di **sicurezza intrinseca**. Un sistema passivo sfrutta un fenomeno naturale per svolgere una determinata funzione; una sicurezza intrinseca deriva invece direttamente dal comportamento fisico del reattore. Un esempio può essere quello di una configurazione in cui un aumento della temperatura provochi naturalmente una diminuzione della reattività nucleare: il sistema tende così a contrastare autonomamente l'aumento di potenza.

Questa impostazione è particolarmente importante nello sviluppo dei cosiddetti **reattori di quarta generazione**. Non si tratta di un unico tipo di reattore, ma di diverse tecnologie in fase di ricerca e sviluppo, tra cui sistemi raffreddati a sodio o piombo liquidi, reattori a sali fusi e reattori ad altissima temperatura. Uno degli obiettivi è integrare fin dall'origine caratteristiche capaci di migliorare sicurezza, affidabilità e sostenibilità.

Le nuove tecnologie possono offrire ulteriori opportunità grazie a materiali, refrigeranti e caratteristiche passive o intrinseche innovative. Il loro contributo viene valutato attraverso simulazioni, sperimentazioni e controlli, così da verificarne le prestazioni e qualificarne l'impiego.

Un altro settore di ricerca riguarda gli **Small Modular Reactors (SMR)**, caratterizzati da dimensioni più contenute e da una progettazione modulare. In alcuni progetti queste caratteristiche possono facilitare il ricorso alla circolazione naturale e ad altre soluzioni passive. Gli SMR possono utilizzare sia tecnologie consolidate sia soluzioni più innovative: per questo il concetto di SMR e quello di reattore di quarta generazione indicano caratteristiche differenti.

La sicurezza accompagna l'intera vita dell'impianto attraverso controlli, manutenzione, ispezioni e aggiornamenti. L'esperienza maturata negli impianti di tutto il mondo viene utilizzata per affinare criteri progettuali e procedure e introdurre nuove misure. Anche le lezioni apprese da incidenti come Fukushima hanno contribuito a rafforzare la capacità delle centrali di affrontare eventi naturali estremi e perdite prolungate dell'alimentazione elettrica.

Alla domanda **“Quali soluzioni consentono di avere un impianto nucleare ancora più sicuro?”** la risposta sta quindi nell'integrazione di più strumenti: barriere fisiche, sistemi ridondanti e indipendenti, dispositivi attivi e passivi, caratteristiche intrinseche, manutenzione e preparazione del personale. Il principio della difesa in profondità permette di combinare più livelli complementari di prevenzione, controllo e mitigazione, contribuendo a mantenere nel tempo le funzioni fondamentali di sicurezza.

Traccia per l'attività in classe

1. La difesa in profondità

- Che cosa si intende per difesa in profondità? Individua nel testo almeno tre barriere o livelli di sicurezza.
- *Discussione:* perché una centrale non può affidare la propria sicurezza a un unico sistema?

2. Ridondanza, diversità e separazione

- Spiega la differenza tra questi tre principi e individua nell'articolo di *Le Scienze* un esempio di ridondanza.
- *Discussione:* in quali situazioni avere più sistemi identici potrebbe non essere sufficiente a garantire la sicurezza dell'impianto.

3. Sistemi attivi e passivi

- Qual è la differenza tra un sistema attivo e uno passivo? Descrivi in che modo l'AP1000 utilizza la gravità e la circolazione naturale.
- *Discussione:* quali vantaggi offre un sistema capace di funzionare anche senza alimentazione elettrica?

4. Le lezioni di Fukushima

- Approfondisci quali problemi interessarono l'alimentazione elettrica e il raffreddamento durante l'incidente di Fukushima.
- *Discussione*: perché gli incidenti avvenuti in una centrale possono modificare i criteri di progettazione degli impianti successivi?

5. I reattori del futuro

- Individua la differenza tra sicurezza passiva e sicurezza intrinseca e approfondisci una delle tecnologie previste per i reattori avanzati.
- *Discussione*: quali prove sono necessarie prima di poter affermare che una nuova tecnologia sia realmente più sicura?