

Scelte strategiche per lo sviluppo dell'energia nucleare

Un approccio alla manutenzione basato su tecniche di Intelligenza Artificiale

Gualtiero Bestetti

Studente di Ingegneria Nucleare presso il Politecnico di Milano

Il buon funzionamento di un impianto nucleare ed il suo ruolo nel quadro energetico mondiale dipendono sostanzialmente da tre fattori: *sicurezza, economicità ed affidabilità*.

La *sicurezza operativa* e l'impatto ambientale sono sicuramente il punto di partenza nello studio di una nuova tecnologia industriale, qualunque essa sia. Sin dagli albori del nucleare questo problema è stato molto sentito e studiato, a causa dell'enorme pericolo potenziale derivante dall'accumulo di sostanze radioattive. Oggi possiamo considerarlo risolto dal punto di vista tecnico. Tuttavia, vi sono due aspetti ancora in discussione: la proliferazione, che è un problema di carattere politico, e la gestione delle scorie, che è un problema prevalentemente di accettazione sociale. Trascuriamo questi aspetti –che potranno essere sviluppati in seguito– per dedicarci a questioni più propriamente tecniche.

Il secondo fattore di interesse è l'*economicità* dell'opzione nucleare: senza convenienza economica, infatti, la validità tecnica e le garanzie di sicurezza precedentemente citate hanno significato puramente accademico.

Infine, abbiamo l'*affidabilità* che è forse il parametro più significativo ed è quello su cui focalizzeremo principalmente la nostra attenzione.

Tre parametri interdipendenti

I tre fattori evidenziati sono tra loro strettamente legati. Infatti, un impianto affidabile è di conseguenza sicuro (se nessun componente si rompe non avremo mai un incidente) ed economico (se non produciamo non guadagniamo); parallelamente, un'eccessiva enfasi sui problemi legati alla sicurezza rendono l'impianto più costoso e soprattutto più complesso e quindi più delicato dal punto di vista dell'affidabilità. Di conseguenza, è necessario ricercare quel compromesso ottimale tipico dell'ingegneria.

Come già anticipato, l'affidabilità è il miglior indicatore di sicurezza e di economicità di un impianto; essa può essere definita come "la probabilità che gli oggetti considerati adempiano alla loro funzione specifica, sotto condizioni operative fissate, per un determinato periodo di tempo" (AA.VV., *Dizionario d'Ingegneria*, UTET, 1968-

1979). L'affidabilità dipende fortemente dalla progettazione, dalla manutenzione e dalla gestione dell'impianto. Vediamo quindi alcune considerazioni sull'importanza che questa riveste nella vita di un impianto (*Fattore di carico: un indice della economicità*) ed in seguito studiamo come poterne migliorare le prestazioni (*On-line monitoring e Intelligenza artificiale nell'industria nucleare*).

Fattore di carico: un indice della economicità

L'affidabilità di un impianto nucleare riveste un ruolo particolarmente importante per le seguenti considerazioni:

- l'incidenza del capitale sul costo dell'energia prodotta è elevata in assoluto e maggiore di quella delle centrali tradizionali (si veda *Tabella 1*);
- l'affidabilità è un indice del valore tecnologico dell'impianto e quindi della relativa sicurezza;
- la riparazione di eventuali guasti al sistema è molto più difficile e onerosa se riguarda sistemi in cui sono presenti radiazioni.

Tabella 1. Ripartizione indicativa dei costi del KWh prodotto da diversi tipi di centrali (dati in %)

	Nucleare	Carbone	Olio/Gas
Investimento	60*	55	15
Esercizio	20	10	5
Combustione	20	35	80
TOTALE	100	100	100

* Incluso il costo di smantellamento pari a circa il 3% (attualizzato)
Fonte: Carlo Lombardi, *Impianti nucleari*, CUSL, VI ed., 2004

Proprio per questi motivi, capita quindi che, in seguito ad un guasto difficile da riparare, costi di più la fermata dell'impianto che la riparazione in sé. Vediamo un esempio per quantificare il problema ed avere un'idea degli ordini di grandezza in gioco. Il reattore di Trino Vercellese I (reattore di tipo PWR di proprietà dell'Enel, potenza 257 MWe, periodo di attività 1964-1986) ha avuto un problema ai bulloni all'interno del recipiente in pressione. Tra valutazione del problema, decisione e preparazione delle

operazioni, oltre che tutte le attività connesse alla riparazione vera e propria, il fermo è durato 800 giorni. Considerando $30 \div 40$ lire/KWh come costo capitale giornaliero e $250 \text{ MW} \times 24 \text{ h}$ (ovvero $6 \cdot 10^6$ kWh/giorno) come potenza giornaliera prodotta, otteniamo un costo indicativo di 200 milioni al giorno, ovvero 160 miliardi per tutto il fermo. A fronte di un costo di qualche miliardo per la riparazione in sé.

Per quanto detto, in un sistema elettrico misto si cerca sempre di far funzionare le centrali nucleari a piena potenza (ovvero al massimo carico consentito); si dice quindi che le centrali nucleari fanno il *carico di base* (si veda *Il nucleare e l'economia dell'Idrogeno* per altri impieghi). Questo è sicuramente vero con l'esclusione del caso francese, dove il nucleare è la fonte energetica di gran lunga predominante.

In questo contesto, si usa quantificare l'affidabilità di un impianto riferendosi al suo *fattore di carico* (f), ovvero la "percentuale delle ore equivalenti a piena potenza sulle ore totali in un periodo di tempo prefissato" (Carlo Lombardi, *Impianti nucleari*, CUSL, VI ed., 2004). Non bisogna confondere il fattore di carico con la *disponibilità*, che indica la frazione di tempo in cui il reattore è operativo o è disponibile (cioè funziona ma non lavora perché la rete non lo richiede). Ricordiamo che, a parità di tempo di riferimento, vale la relazione:

$$f \leq d \leq 1$$

Se la disponibilità è un indice della sola affidabilità, il fattore di carico è un ottimo indice anche dell'economicità dell'impianto, considerando poi che se un impianto nucleare non funziona o funziona a potenza ridotta è perché per qualche guasto non può funzionare a piena potenza. Per una visione quantitativa dei fattori di carico delle centrali nucleari italiane e mondiali, si rimanda alla *Tabella 2* ed alla *Fig. 1* rispettivamente.

Concludiamo questo capitolo indicando le principali cause che rendono indisponibile un impianto nucleare:

- Carico e scarico del combustibile e procedure correlate (nei capitoli che seguono verrà approfondito questo aspetto);
- Guasti (in ordine crescente di importanza):
 - turbina;
 - generatore di vapore;
 - condensatore, vessel, core;
 - pompe;
 - alternatore.

On-line monitoring: una sfida da vincere subito

In un contesto attuale in cui vediamo crescere sempre di più il prezzo del petrolio ed in cui il mercato mondiale dell'energia è ormai orientato verso la *deregulation*, il nucleare *deve* essere competitivo. Sin dagli anni '80 si è imposto un approccio *Risk informed* alla manutenzione, che ha permesso di ridurre i costi aumentando contempora-

Tabella 2. Fattori di carico annuale per le tre centrali nucleari della prima generazione e per la centrale di Caorso

Centrale	Tipo reattore	Potenza (MWe)	Periodo attività considerato	Fattori di carico annuale medio
Latina	Magnox	200-160	1964-1986 ¹	73,4 (62,8)
Garigliano	BWR	160	1965-1978 ²	59,8
Trino Vercellese	PWR	257	1965-1986 ³	49,6
Caorso	BWR	862	1979-1986 ⁴	46,4

¹ Dal 1970 è stata adottata una potenza nominale di 160 MWe contro i 200 MWe originari; il fattore di carico indicato tra parentesi si riferisce alla potenza originaria.

² È stato arrestato nel 1978 in quanto l'Autorità di Controllo chiese una riqualificazione sismica dell'impianto, a causa del terremoto dell'Irpinia; tale riqualificazione risultò non conveniente e quindi alla fine del 1981 fu messo definitivamente fuori servizio.

³ È stato arrestato tra il giugno 1979 e l'aprile 1984 per effettuare sostanziali rifacimenti ai sistemi di sicurezza.

⁴ Venne posto fuori servizio nel 1990.

Fonte: estratto da Carlo Lombardi, *Impianti nucleari*, CUSL, VI ed., 2004

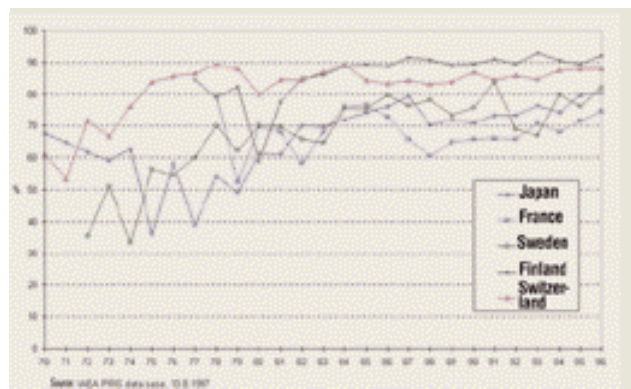


Fig. 1 *Andamento dei fattori di carico nel periodo 1970-1996 dei reattori nucleari di potenza di cinque diverse nazioni

neamente la sicurezza dell'impianto. Infatti, questo ha permesso di ridurre il numero di SCRAM (ovvero degli arresti rapidi o di emergenza), dimostrando che aumentare la sicurezza non implica aumentare i costi: al contrario, ridurre il numero di SCRAM significa non solo avere un impianto più affidabile, poiché ogni interruzione di emergenza comporta un notevole stress per tutto l'impianto, ma anche avere meno fermi inattesi e quindi costi minori.

Vediamo finalmente come far crescere il fattore di carico, prestando particolare attenzione agli strumenti di misura degli impianti nucleari. Ovviamente queste considerazioni possono essere estese anche ad altri settori della manutenzione, ma trattiamo questo perché particolarmente importante ed indicativo.

Durante il *refuelling* (ovvero il ricambio di combusti-

* Fonte: <http://www.stuk.fi>

bile; si veda *Il Refuelling: cos'è e come viene gestito*), tutti gli strumenti vengono ispezionati manualmente e se il loro comportamento non è conforme vengono tarati. Il *refuelling* viene fatto ogni anno o anno e mezzo (si cerca ovviamente di allungare il più possibile questo tempo); gli strumenti da verificare variano da 100 a 400 e sono principalmente sensori di pressione, ma anche di temperatura, di livello di liquido, di portata e neutronici. La durata di un'ispezione ad un sensore è indicativamente 4 ore e quindi la verifica di tutti gli strumenti è molto dispendiosa in termini di tempo e di denaro. Inoltre, ricordiamo che parte degli strumenti da ispezionare è installata in luoghi contaminati, esponendo quindi l'operatore a radiazioni, il che implica costi e tempistiche maggiori.

Per dare un'idea quantitativa della situazione, è stato visto che in 12 anni, su 100 impianti nucleari degli Stati Uniti, tra i sensori di pressione solo il 10% delle ispezioni ha dato esito negativo e quindi ha evidenziato la necessità di tarare: il 90% dei test è stato fatto inutilmente!

E' proprio in seguito a queste considerazioni che nasce la proposta di *On-line monitoring*, ovvero di un approccio alla manutenzione basato su tecniche che riescono a stimare il parametro che vogliamo misurare e quindi a verificare la funzionalità del relativo sensore.

Intelligenza artificiale nell'industria nucleare: il Calibration monitoring

L'*On-line monitoring* è composto da diverse attività tra cui le principali sono il *Calibration monitoring* e l'*Early Fault Detection*, oltre che la *Signal Validation & Reconstruction* e il *Virtual Sensing*. Prestiamo la nostra attenzione sul *Calibration monitoring*, in quanto particolarmente significativo per le considerazioni fatte finora.

Il concetto di base è piuttosto semplice in quanto si tratta di fare una stima del parametro di processo che si vuole misurare e di calcolarne la deviazione dalla relativa misura: se tale deviazione supera un valore di soglia, lo strumento deve essere tarato. Ovvero, dato il valore della misura $S(t)$, si calcola la stima ottima $\hat{S}^{opt}(t)$; la condizione di test sarà quindi:

$$|S(t) - \hat{S}^{opt}(t)| > th$$

Se il test dà esito positivo, significa che la misura è inattendibile e che quindi è necessario procedere alla taratura.

Il punto delicato è, ovviamente, come stimare il parametro di processo. Esistono diverse tecniche, quali ad esempio la *Cross Calibration* che utilizza tanti sensori ridondanti per la misura della stessa grandezza. Questo approccio diventa critico quando si ha un *Common Mode*

Il Refuelling: cos'è e come viene gestito

Per *refuelling* si intende il ricambio del combustibile. La durata del combustibile in reattore nucleare dipende dalla sua vita neutronica, e quindi da considerazioni di tipo "nucleare", e dalla sua vita tecnologica, e quindi dal cimento termomeccanico a cui è sottoposto. Si cerca di uguagliare queste due vite al fine di sfruttare al massimo il combustibile.

Il ricambio del combustibile può essere:

1. *totale*, ma è molto penalizzante da un punto di vista energetico e di controllo;
2. *continuo*, che permette di allungare la vita del combustibile dell'80%; tuttavia è molto complesso e possibile solo nei reattori ad acqua naturale e a grafite, non negli LWR (reattori ad acqua leggera), che sono circa l'85% dei reattori installati nel mondo;
3. *a denti di sega*, in cui alcune sezioni del nocciolo vengono periodicamente cambiate: è la soluzione che offre il migliore compromesso tecnico, economico e di controllo del reattore.

Il *refuelling* a denti di sega avviene ogni anno o anno e mezzo ed è un'operazione piuttosto complessa, poiché si deve spegnere il reattore, raffreddarlo, depressurizzare l'ambiente, aprire il coperchio, togliere le barre di combustibile esausto, spostare le barre che devono essere sostituite, inserire le barre di combustibile fresco, richiudere il coperchio, ripressurizzare e riavviare il reattore. E' quindi una fase molto delicata che richiede un'attenta progettazione e delle procedure ottimizzate al fine di ridurre al minimo gli svantaggi evidenziati.

Un risparmio
dell'ordine di
50.000 – 500.000\$
per ogni fermo

Failure, cioè nella situazione in cui tutti gli strumenti hanno uno stesso scostamento dal valore del processo. Un'altra tecnica è quella del *Canale di misura di riferimento*: se abbiamo 4 sensori di processo, ad ogni fermo di impianto ne tariamo uno diverso che prendiamo come riferimento fino al successivo fermo. Un nuovo approccio arriva dalla tecnica della *Ridondanza analitica*, che -dati alcuni parametri di processo di cui ci fidiamo- utilizza un modello analitico per stimare la grandezza di interesse. Ad esempio, data la misura di temperatura e

di pressione, stimiamo il valore della portata. Fondamentale risulta a questo punto la scelta del modello analitico, che può essere di tipo fisico o di tipo empirico; il primo risulta essere troppo complesso per una centrale nucleare e quindi la scelta ricade sul secondo, che consiste nel creare un modello in grado di imparare dai dati passati dell'impianto. Possiamo quindi scrivere un polinomio non lineare, nel caso dell'esempio sopra citato, del tipo

$$\phi = \alpha_0 + \alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_1^2 + \alpha_3 \beta_3 T_1 p_1 + \beta_1 p_1 + \beta_2 p_1^2$$

ma resta difficile stabilire di che ordine fare i polinomi ed inoltre se ci sono tanti dati da trattare si avranno altrettanti parametri da determinare.

La scelta ricade quindi su tecniche di intelligenza artificiale quali le reti neurali e la logica fuzzy. Queste tecniche permettono di ottenere modelli che elaborano una relazione complessa basandosi su tante relazioni semplici.

Non è tra gli obiettivi di questo articolo entrare nel dettaglio di queste tecniche, piuttosto si vuole porre l'attenzione sulle relative applicazioni ed implicazioni.

Grazie quindi all'intelligenza artificiale, creiamo un modello che viene successivamente addestrato utilizzando i dati storici dell'impianto. A questo punto possiamo passare effettivamente alla *Calibration monitoring*, traendone i seguenti benefici:

- Vantaggi di carattere prevalentemente tecnico:
 - è una tecnica non intrusiva;
 - segnala subito che il sensore ha avuto dei problemi; questo è importante perché nel caso della manutenzione programmata, può passare anche un anno e mezzo prima che possiamo eseguire dei test ed accorgerci della presenza di anomalie: per tutto questo intervallo di tempo la misura è stata inaffidabile, pur essendo stata considerata affidabile;
 - evita test non necessari;
 - riduce le incertezze nella misura e quindi aumenta il margine operativo, riducendo così il numero di SCRAM;
 - verifica l'affidabilità di tutto il canale di misura e non solo dello strumento.
- Vantaggi (e svantaggi) di carattere prevalentemente economico:
 - diminuiscono le ore di lavoro;

Il nucleare e l'economia dell'Idrogeno

In un sistema elettrico misto, le centrali nucleari forniscono il *carico di base*, come spiegato nel testo. Tuttavia, nell'ottica di un' *economia dell'Idrogeno* e di un rinnovamento dell'opzione nucleare, si potrebbe pensare di utilizzare il nucleare di giorno per la produzione di energia elettrica e di notte per la produzione di Idrogeno. Si ricorda che l'Idrogeno è un vettore energetico e come tale va prodotto; non serve quindi per "produrre" energia, ma potrebbe rivelarsi utile per ridurre l'inquinamento localizzato, anche se a fronte di costi maggiori. Attualmente i metodi principali per produrlo sono due:

1. per via elettrolitica, che però è troppo poco conveniente, anche affiancandola al nucleare (l'elettrolisi ha un rendimento intorno al 70% a cui va associato il rendimento per la produzione dell'energia elettrica necessaria a far avvenire la reazione);
2. per via termica, sfruttando reazioni di termosclissione. Quest'ultima opzione, ancora da sviluppare, richiede temperature che vanno dai 500 ai 1000°C e potrebbe quindi essere associata ai reattori nucleari HTGR, *High Temperature Gas Reactor*.

- diminuisce il numero di lavoratori esposti;
- diminuisce il tempo di fermo;
- diminuisce il numero di SCRAM;
- aumentano i costi delle attrezzature *on-line*;
- aumentano i costi per l'addestramento del personale;
- aumentano i costi di gestione dei dati storici e dell'analisi degli stessi.

Questi possono essere quantificati in un risparmio dell'ordine di 50.000 – 500.000\$ per ogni fermo.

Ovviamente, come in tutte le soluzioni ingegneristiche, dobbiamo pesare questi vantaggi con alcuni problemi ed alcune lacune che si stanno ancora studiando. Due sono i principali punti deboli su cui lavorare:

- questi modelli incontrano dei problemi durante l'avviamento dell'impianto, perché in questa zona di lavoro vi sono pochi dati disponibili con i quali addestrare la rete; poiché la taratura va fatta su tutto lo spettro utile, l'Ente di Controllo non ha ancora autorizzato l'utilizzo di queste tecniche;



Fig. 2 * Centrale nucleare di Trino Vercellese (PWR, 257 MWe), in funzione dal 1964 al 1986.

- queste tecniche di intelligenza artificiale funzionano molto bene in numerose applicazioni, ma hanno il difetto di essere una *scatola nera* (*black-box*), cioè non permettono di accedere alla fisica del problema; inoltre, danno sempre un risultato, anche se sbagliato: per far fronte a quest'ultimo aspetto, si può associare ad ogni risultato un indice di affidabilità che permetta di evidenziare situazioni dubbie.

Infine, occorre sottolineare che l'ambiente dell'industria nucleare è molto conservativo e quindi queste nuove tecniche hanno bisogno ancora di tempo per essere del tutto accettate, anche se sono già operative alcune applicazioni nell'industria tradizionale.

In conclusione, descriviamo brevemente un problema tipicamente nucleare risolvibile, o per lo meno mitigabile, con le tecniche proposte.

* Fonte: <http://thesacramentosessions.com>

Principali tipologie di Impianti Nucleari di potenza

Nel testo e negli approfondimenti sono più volte citate alcune classi di reattori nucleari; è quindi opportuno dedicare alcune righe, seppure molto sommarie, alle tipologie più diffuse oggi in ambito commerciale. Verrà qui utilizzata la classificazione per moderatore, attualmente la più diffusa; per *moderatore* si intende una sostanza che ha la proprietà di rallentare i neutroni prodotti dalle reazioni di fissione al fine di avviare e mantenere una reazione a catena.

Reattori a grafite. Storicamente i primi perché, consentendo l'utilizzo di uranio naturale ed essendo particolarmente adatti a produrre plutonio, furono scelti da paesi quali la Gran Bretagna e la Francia per arrivare velocemente alla costruzione della bomba atomica; apparve quindi ovvio sfruttare tutto il retroterra tecnologico ed industriale già presente, adattando questi reattori allo sfruttamento commerciale.

Nacquero così i reattori *Magnox* (o reattori a gas-grafite), tra cui figura quello di Latina; di questo tipo fu anche la prima centrale al mondo collegata alla rete elettrica nazionale (UK, 1956). In seguito ad alcuni limiti piuttosto vincolanti, si decise di utilizzare uranio arricchito e si passò quindi ai reattori AGR (*Advanced Gas Reactor*) ed in seguito agli HTGR (*High Temperature Gas Reactor*), anche se solo allo stadio di prototipo.

Reattori ad acqua leggera (LWR, *Light Water Reactor*).

Sono i più diffusi (85% ca.) ed utilizzano come moderatore e termovettore l'acqua naturale. Richiedono uranio arricchito (dell'ordine del 3%) e si dividono in:

- PWR (*Pressurized Water Reactor*); nati negli Stati Uniti dalle ricerche sulla propulsione dei sottomarini, sono oggi commercializzati principalmente da Westinghouse; utilizzano acqua liquida alla pressione di 150 bar che deve poi scambiare calore col circuito secondario attraverso i generatori di vapore; in Italia fu costruita una centrale di questo tipo, Trino Vercellese;

- BWR (*Boiling Water Reactor*); risultato di un vasto programma di R&S negli Stati Uniti, hanno come principale fornitore la General Electric; utilizzano acqua bollente e quindi il vapore prodotto nel reattore viene indirizzato direttamente in turbina (ciclo diretto); in Italia due furono le centrali di questo tipo, Garigliano e Caorso, ed una terza, Montalto di Castro, fu interrotta in avanzato stato di costruzione.

Reattori ad acqua pesante. Questa famiglia, sicuramente meno diffusa delle altre, merita una menzione particolare perché in Canada è stato sviluppato un reattore di questo tipo, denominato *CANDU-PHWR* (*CANadian Deuterium Uranium - Pressurized Heavy Water Reactor*), che rappresenta l'unica alternativa concreta al "predominio" di Stati Uniti (LWR) e di Gran Bretagna (reattori a grafite).

Un caso particolare: la misura del Feedwater Flow

La misura della portata dell'acqua di alimento (*feedwater flow*) di una centrale nucleare è una misura importantissima perché è l'indice della potenza prodotta. Normalmente tale misura viene fatta con un tubo di Venturi che ha un errore in eccesso di circa l'1%.

Questo significa che quando produciamo poco più di 99 crediamo di produrre 100; per motivi di sicurezza non possiamo produrre una potenza superiore a quella nominale. Tutto ciò implica un mancato guadagno. Per un reattore PWR da 800MWe, l'1% di errore nella misura della portata dell'acqua di alimento porta ad una perdita di 10.000\$ al giorno (considerato un costo di 0,05\$/KWh negli Stati Uniti). ■

Bibliografia:

1. Piero Baraldi, *Calibration on-line per sensori di impianti nucleari*, seminario presso il Ce.S.N.E.F., Politecnico di Milano, 26 maggio 2004
2. Paolo Fantani, *Artificial Intelligence in the Nuclear Reactor Industry*, seminario presso il Ce.S.N.E.F., Politecnico di Milano, 31 maggio 2004
3. Carlo Lombardi, *Impianti nucleari*, CUSL, VI ed., 2004

4. Carlo Lombardi, Corso di *Impianti nucleari I*, Politecnico di Milano, a.a. 2003-2004

5. Enrico Zio, Corso di *Impianti nucleari II*, Politecnico di Milano, a.a. 2003-2004

Gualtiero Bestetti, studente al V anno di Ingegneria Nucleare presso il Politecnico di Milano, indirizzo Matematico e Fisico per le Tecnologie Nucleari. Presso il Ce.S.N.E.F. (Centro Studi Nucleari Enrico Fermi), approfondisce argomenti legati all'impiantistica nucleare e alla medicina nucleare, oltre che a sviluppare una certa passione per la storia della scienza e del nucleare in particolare.



Si interessa anche di reti informatiche, sicurezza ed applicazioni per internet, con particolare attenzione al mondo UNIX e Linux. Tra i precedenti scritti si ricorda "Automazione e controllo di un impianto nucleare. Alcune osservazioni sui principi guida utilizzati per le nuove generazioni di reattori" (Manutenzione, anno 10 n. 2, feb. 2003).

E-mail: g.bestetti@teiocomputers.com

l'Autore