

SOLUZIONE DI PROBLEMI INGEGNERISTICI PER IL PROGETTO E LA PROTEZIONE DI MACCHINE PER LA FUSIONE TERMONUCLEARE CONTROLLATA

*E. Aymerich, B. Cannas, A. Fanni, M. Lacquaniti, L. Milia, A. Montisci, F. Pisano, G. Sias
Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica, Università di Cagliari
Piazza d'Armi, 09123 Cagliari*

Le attività del gruppo di ricerca dell'Università di Cagliari nell'ambito della Fusione termonucleare controllata hanno riguardato diversi campi, dall'applicazione di tecniche di machine learning (ML) per l'individuazione e caratterizzazione dei carichi termici nei divertori di Wendelstein 7-X (W7-X), alla proposta di algoritmi per la risoluzione in real-time di problemi inversi, allo studio delle strategie di protezione della prima parete nei tokamak.

Monitoraggio e caratterizzazione dei carichi termici a W7-X

Il rilevamento dei sovraccarichi termici è un elemento cruciale per garantire il funzionamento sicuro ed efficace dei dispositivi di fusione nucleare, come Wendelstein 7-X (W7-X). I sovraccarichi termici si verificano quando un eccesso di calore si accumula in componenti che entrano in contatto diretto con il plasma, ponendo il rischio di danni ai materiali e altri problemi di sicurezza. L'obiettivo del rilevamento del sovraccarico termico è la supervisione e la gestione di temperature eccezionalmente elevate per prevenire l'accumulo di calore eccessivo che potrebbe minacciare l'integrità strutturale degli elementi chiave, in particolare i divertori. Inoltre, il rilevamento del sovraccarico termico può comportare il monitoraggio delle prestazioni dei sistemi di raffreddamento, che sono attivi sui dieci divertori raffreddati ad acqua di W7-X, per garantire l'efficiente dissipazione del calore dai componenti critici e mantenere un intervallo di temperatura di esercizio in condizioni di sicurezza.

È quindi necessario sviluppare sistemi in tempo reale in grado di prevedere e controllare i carichi termici al fine di prevenire sovraccarichi sui componenti a contatto col plasma. Per questo motivo, è necessario studiare la relazione tra la distribuzione del carico termico sui componenti rivolti al plasma e gli ingressi degli attuatori del sistema di controllo insieme ai parametri del plasma. In questo modo è possibile collegare le condizioni del plasma con il rischio di sovraccarico e intraprendere le azioni più opportune per operare in condizioni di sicurezza e ad alte prestazioni. Verso questo obiettivo, in [1] è stato dimostrato che le reti neurali convoluzionali profonde possono apprendere la relazione tra la distribuzione del carico termico, ottenuta dall'analisi di dati termografici, e le correnti della bobina di controllo applicate in esperimenti di configurazione magnetica standard. Le correnti della bobina di controllo permettono, infatti, di modificare la posizione e l'ampiezza della linea d'urto nei dieci divertori e la relativa distribuzione del carico termico. Quindi, in linea di principio, conoscendo una distribuzione del carico termico preferita nel divertore, è possibile prevedere quali bobine di controllo applicare per ottenere tale distribuzione.

Per sviluppare un sistema di controllo in retroazione, è anche necessario conoscere qual è l'effetto di una certa configurazione magnetica, dei parametri sperimentali e dei vari attuatori sulla distribuzione del carico termico e sulle sue proprietà e sul rischio di sovraccarico. In questo contesto, le tecniche di machine learning e deep learning possono essere utilizzate per modellare questa relazione. In particolare, una Self Organizing Map (SOM) è stata utilizzata per proiettare lo spazio operativo W7-X su una mappa 2D, sulla quale è stato possibile individuare delle regioni con diversi livelli di rischio di sovraccarico termico [2]. Il livello di rischio è stato definito sulla base della funzione di criticità definita in [3]. Ogni campione di test può essere proiettato sulla mappa, questo permette di assegnare un livello di rischio pari a quello della zona nel quale viene proiettato. Il tracking dei campioni di un intero esperimento sulla mappa 2D permette di visualizzare l'evoluzione dell'impulso attraverso le zone a diverso rischio di sovraccarico.

I deep auto-encoder sono stati utilizzati come strumento per comprimere la distribuzione del carico termico sul divertore e produrre una serie di caratteristiche dalle immagini del flusso di calore.

Inoltre, sono stati investigati preliminarmente metodi data-driven (DBSCAN, PCA e regressione lineare) per studiare e classificare i modi a dente di sega (sawteeth) nel plasma, basandosi su un dataset

con parametri di plasma [4]. La classificazione dei sawteeth è importante per capire come controllare il riscaldamento ECCD senza compromettere lo stato del plasma.

Nell'ambito dello sviluppo di un tool per la stima dei sovraccarichi termici, un modello basato sulle *Physics-Informed Neural Networks* (PINN) è stata addestrato per risolvere l'equazione del calore e stimare in real-time i flussi di calore sulle tile del divertore di W7-X. I modelli PINN sono reti neurali che apprendono le equazioni differenziali parziali (PDE) minimizzando la *loss* associata alla PDE. Gli input di una PINN sono le variabili indipendenti della PDE, ad esempio le coordinate spazio-temporali, mentre la *loss* è progettata per far sì che la rete neurale soddisfi l'equazione differenziale e le relative condizioni iniziali e al contorno. Pertanto, il modello è stato addestrato senza alcun dato sperimentale, ma assumendo le condizioni iniziali e al contorno della PDE da risolvere. Risultati molto incoraggianti di sono ottenuti in [5] considerando una tile normalizzata e assumendo una diffusività termica costante.

Algoritmi per la risoluzione real-time di problemi inversi

Nell'ambito della risoluzione real-time di problemi inversi con approccio ML, viene affrontato il problema della ricostruzione del profilo del flusso potenza incidente nelle tegole del calorimetro diagnostico STRIKE (Short-Time Retractable Instrumented Kalorimeter Experiment) di SPIDER, la sorgente di ioni negativi del prototipo del Neutral Beam Injector di ITER (in funzione presso Consorzio RFX di Padova). Il problema inverso, non lineare e matematicamente mal posto, della ricostruzione del flusso di potenza incidente sul fronte delle tegole di STRIKE a partire dall'immagine di temperatura proveniente dalla termocamera posta sul retro, viene affrontato in [6-8] con una Multi-layer Perceptron, proponendo diversa soluzione per il trattamento delle immagini della termocamera. In [9] le performance del modello MLP sono state confrontate a quelle di una Convolutional Neural Network (CNN), andrebbe addestrate per ricavare per ogni beamlet i 5 parametri del fitting gaussiano. Mentre la MLP stima i parametri della potenza incidente a partire dai 5 parametri del fitting gaussiano del profilo della temperatura, la CNN utilizza l'immagine direttamente l'immagine di temperatura, evitando la necessità di effettuare il fitting dell'immagine di temperatura. Il database per l'addestramento del metodo neurale è stato realizzato mettendo a punto un metodo automatico per la creazione di un database 160 esempi sperimentali selezionati dalle campagne del 2021-22, effettuati usando una maschera con cinque fori. La procedura, basata sulla soluzione diretta dell'equazione del calore con un codice FEM, ottimizza 5 parametri del flusso incidente per ogni gaussiana, minimizzando la differenza tra la distribuzione della temperatura simulata e la temperatura delle immagini sperimentali provenienti dalla termocamera. Inoltre, è stata utilizzata una CNN per costruire un modello inverso che permetta di ricostruire l'immagine della distribuzione della potenza incidente a partire dall'immagine della termocamera [10]. Per realizzare questo modello sono stati usati 256 esperimenti provenienti dalle campagne del 2021, condotte usando una maschera con diverso numero di fori e in diverse posizioni a seconda della tegola. A questo scopo, il codice FEM per la costruzione del database è stato adattato a fare una ottimizzazione sulla base dei pixel dell'immagine del flusso.

Studio di scenari DEMO-relevant

Il gruppo di ricerca da anni collabora con il DEMO Central Team (DCT) del Fusion Technology Department (FTD), EUROfusion Consortium. Nell'ambito di questa collaborazione, nel 2022 sono state applicate tecniche di data mining e signal processing allo scopo di creare un database di impulsi di JET compatibili con un possibile scenario di flux pumping. Questo fenomeno è un meccanismo per l'autoregolazione del flusso magnetico nel cuore del plasma, che permette di mantenere un $q \approx 1$, prevenendo la formazione dei sawteeth. Il flux pumping è stato ottenuto sperimentalmente in AUG e DIII-D, ma non è stato ancora osservato al JET. Perciò, è stata eseguita un'analisi su un database di esperimenti di JET, 941 in ILW e 280 in CW eseguiti in regime ibrido, con l'obiettivo di selezionare i migliori impulsi candidati per lo studio del flux pumping. Lo scopo è stato quello di individuare impulsi utili a preparare lo scenario ottimale per esperimenti futuri. L'analisi ha portato a selezionare 28 impulsi, i cui scenari sono degli ottimi candidati per ottenere sperimentalmente il flux pumping al JET. Successivamente, su alcuni impulsi di questa lista sono state effettuate simulazioni con il codice di trasporto TRANSP, per confrontare l'andamento del q_0 e del q_{min} con quello sperimentale, con l'obiettivo di identificare impulsi in cui è presente in fenomeno del flux pumping. I parametri delle simulazioni TRANSP sono stati impostati su una serie di impulsi ohmici di esperimenti recenti.

Successivamente, le simulazioni TRANSP effettuate su impulsi recenti hanno ottenuto risultati promettenti e sono state utilizzate come indicazione del meccanismo di flux pumping a JET [11].

Caratterizzazione del rumore bianco e analisi termomeccanica delle pick-up coils di DTT

Nella costruzione di una macchina a confinamento magnetico, tra le diverse diagnostiche, quelle magnetiche hanno priorità per l'installazione e la messa in servizio al momento dell'assemblaggio della camera da vuoto. Nell'ambito dello studio concettuale delle pickup coil di DTT, è stato valutato l'errore sistematico sulla ricostruzione della posizione del plasma, dovuto al rumore bianco sulle più recente configurazione delle pick-up coil interne, costituita da 68 misure magnetiche (34 componenti radiali e 34 componenti tangenziali) [12].

Inoltre, è stata eseguita un'analisi termomeccanica FEM per lo studio di fattibilità del montaggio di una pickup coil esterna in torlon e rame, posizionata tra il vacuum vessel (VV) ed il Thermal Shield in condizioni operative, adottando il design definitivo della pickup. La condizione considerata non presenta criticità. Lo studio è stato svolto assumendo un modello semplificato 2D della geometria, nella quale il VV e le porte sono stati disegnati come un corpo unico. Questa assunzione permette di non definire i contatti tra il VV e le porte e di ridurre il numero dei nodi della mesh. Per una valutazione più attendibile dello spazio disponibile per il montaggio della pickup esterna è stata svolta un'ottimizzazione dello spessore del corpo 2D tra 15 mm e 18 mm, che equipara le la temperatura minima raggiunta sulle porte del modello con quella dell'equivalente modello 3D [12]. Inoltre, sono stati valutati gli stress equivalenti di Von Mises sul supporto di montaggio della bobina (fronte) al VV e sulla pickup (retro) assumendo una saldatura come soluzione di montaggio.

Referenze

- [1] F. Pisano, B. Cannas, A. Fanni, G. Sias, Y. Gao, M. Jakubowski, H. Niemann, A. Puig Sitjes and W7-X Team, Learning control coil currents from heat-flux images using convolutional neural networks at Wendelstein 7-X, 2020, Plasma Physics and Controlled Fusion vol. 63 no. 2, p. 025009, doi: 10.1088/1361-6587/abce19.
- [2] G. Sias, E. Corongiu *, E. Aymerich, B. Cannas, A. Fanni, Y. Gao, B. Jabłoński, M. Jakubowski, A. Puig Sitjes, F. Pisano, Predicting Overload Risk at Wendelstein 7-X Using Self-Organizing Maps, 2025, submitted to Energies.
- [3] Puig Sitjes, A.; Jakubowski, M.; Naujoks, D.; Gao, Y.; Drewelow, P.; Niemann, H.; Fellingner, J.; Moncada, V.; Pisano, F.; Belafdil, C.; et al. Real-Time Detection of Overloads on the Plasma-Facing Components of Wendelstein 7-X. Appl. Sci. 2021, 11, 11969. doi: 10.3390/app112411969.
- [4] M. Zanini, E. Aymerich, D. Böckenhoff, A. Merlo, K. Aleynikova, C. Brandt, H. Braune, K.J. Brunner, M. Hirsch, U. Höfel, J. Knauer, H.P. Laqua, S. Marsen, A. Pavone, K. Rahbarnia, J. Schilling, T. Smith, T. Stange, H. Thomsen, R.C. Wolf, A. Zocco and W7-X Team, Automated W7-X sawtooth crashes detection and characterisation, 2024, Nucl. Fusion 64, 076027, doi: 10.1088/1741-4326/ad490b.
- [5] E. Aymerich, F. Pisano, B. Cannas, G. Sias, A. Fanni, Y. Gao, D. Böckenhoff, M. Jakubowski, the W7-X Team, "Physics Informed Neural Networks towards the real-time calculation of heat fluxes at W7-X", 2023, Nucl. Mater. Energy. 34, 101401. Doi: 10.1016/j.nme.2023.101401.
- [6] R. S. Delogu, A. Montisci, A. Pimazzoni, M. Savarese, G. Serianni, and G. Sias, STRIKE Heat Flux Reconstruction by Using Neural Networks: Application to the Experimental Results, 2022, IEEE Trans. on Plasma Science 50, Issue: 11
- [7] R. S. Delogu, A. Montisci, A. Pimazzoni, G. Serianni, and G. Sias, Neural network based prediction of heat flux profiles on STRIKE, 2019 Fusion Engineering and Design, 146, pp. 2307–2313
- [8] E. Aymerich, L. Milia, A. Montisci, R. S. Delogu, A. Pimazzoni, G. Serianni, B. Cannas, A. Fanni, F. Pisano, G. Sias, Automatic Estimation of Heat Loads Distribution on STRIKE through Multi-Layer Perceptrons, 2025, submitted to Fusion Engineering and Design
- [9] E. Aymerich, L. Milia, A. Montisci, R. S. Delogu, A. Pimazzoni, G. Serianni, B. Cannas, A. Fanni, F. Pisano, G. Sias, Machine Learning for solving the Inverse Thermal Problem on STRIKE in Real-Time, 2025, submitted to Plasma Physics and Controlled fusion.
- [10] L. Milia, E. Aymerich, R. S. Delogu, A. Pimazzoni, G. Serianni, A Fanni, G. Sias, Image-to-Image estimation of Heat Flux in STRIKE tiles Using Convolutional Neural Networks, accepted for International Joint Conference on Neural Networks, 30th June – 5 July 2025, Rome.
- [11] Bueckhart, A Bock, F Auriemma, E Aymerich, M Baruzzo, C Challis, R Dumont, R Fischer, E Giovannozzi, A Gude1, N Hawkes, J Hobirk, V Igochine, P Jacquet, E Joffrin, D Keeling, D King, M Maraschek, C Piron, M Poradzinski, G Pucella, T Pütterich, M Reisner, R Schramm, J Stober, H Zohm, JET Contributors and the

ASDEX Upgrade Team, “Flux Pumping at ASDEX Upgrade and JET”, ITPA MDC meeting, May 2024.
<https://www.iter.org/scientists/itpa/itpa-meetings>

- [12] M. Lacquaniti, G. Sias, A. Fanni, A. Pironti, F. Giorgetti, G. Calabrò, E. Aymerich, M. Baruzzo, White noise characterization and thermo-mechanical analysis of DTT pick-up coils, 2023, Fusion Engineering and Design, vol. 192, 113775, doi: 10.1016/j.fusengdes.2023.113775.