

## **MACHINE LEARNING E DEEP LEARNING PER LA PREDIZIONE E L'INTERPRETAZIONE DI DISRUZIONI NEI TOKAMAK**

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

Una disruzione è una perdita improvvisa e irreversibile della stabilità e del confinamento del plasma in una macchina a fusione nucleare Tokamak durante la quale vengono indotte grandi sollecitazioni termiche e meccaniche sulle strutture del Tokamak. Di conseguenza è di primaria importanza prevenire le disruzioni o predirne l'insorgenza al fine di mitigare le conseguenze per preservare l'integrità della macchina. Per questo motivo, sono necessari modelli che permettano di identificare le disruzioni in tempo reale durante gli esperimenti. Poiché al momento non esistono modelli fisici in grado di modellare esaurientemente il fenomeno e di operare in tempo reale durante gli esperimenti, vengono esplorate applicazioni di intelligenza artificiale. Quest'ultime permettono di sfruttare le ingenti quantità di dati che provengono da numerose diagnostiche in anni di esperimenti su diversi reattori sperimentali.

Diversi sistemi basati su machine learning e metodi statistici ad elevate prestazioni sono stati proposti, ad esempio utilizzando reti neurali convoluzionali (CNN), reti neurali multi-strato (MLP) o Self Organizing map (SOM) [1-4], tuttavia per l'implementazione di questi algoritmi vi sono crescenti requisiti di interpretabilità.

Per questo motivo, in [1] la Self Organizing Map (SOM), grazie alla sua capacità di auto organizzazione, identifica autonomamente le regioni che caratterizzano la fase pre-disruttiva dell'esperimento. Inoltre, il modello fornito permette di visualizzare lo spazio operativo multidimensionale e si presta all'interpretazione dei fenomeni che avvengono nel plasma grazie allo strumento dei Component Planes. L'analisi dello spazio operativo è stata approfondita in [2] con uno studio che permette di interpretare la SOM tramite un albero di decisione. L'estrazione di regole che delimitano la zona pre-disruttiva basate sulle feature originali permette di identificare quattro diverse regioni, di cui due pre-disruttive.

I modelli come le CNN invece, permettono l'elaborazione diretta delle immagini dei profili di temperatura, densità e radiazione del plasma insieme ad altri segnali diagnostici comunemente utilizzati in letteratura. L'utilizzo diretto dei profili in ingresso al modello permette di evitare una fase ulteriore di definizione di indicatori, necessari per l'estrazione delle informazioni spaziali, attraverso complicati algoritmi di pre-processing [3]. Sono stati comparati algoritmi, come Generative Topographic Mapping e Multi-Layer Perceptron per i quali è richiesta estrazione manuale di features, con la CNN, che permette invece di estrarre automaticamente le caratteristiche dalle immagini [4]. Inoltre, poiché il predittore precedentemente sviluppato analizzava solo le informazioni provenienti dalla camera orizzontale del bolometro, in questi casi la CNN non era in grado di localizzare correttamente la sorgente di radiazioni, innescando così un falso allarme. Questo fatto ha motivato lo sviluppo di un nuovo predittore basato sulle CNN, in cui la telecamera verticale del bolometro viene aggiunta all'insieme di caratteristiche 1-D del profilo del plasma [5]. È stato infine studiata la possibilità di includere le informazioni dagli spettrogrammi MHD come input del modello [6]. Tuttavia, i modelli CNN sono più difficilmente interpretabili. Per questo motivo, in [7] gli autori esplorano l'uso di algoritmi dell'intelligenza artificiale spiegabile (XAI) per interpretare il modello della CNN in [1]. Ad esempio, si sono concentrati sull'analisi della risposta del modello in caso di allarme per una imminente disruzione preceduta da raffreddamento dei bordi e appiattimento del profilo di temperatura. L'indagine rivela che la CNN si comporta in modo coerente con i fenomeni fisici che si verificano nel plasma.

Nell'ambito dello studio delle disruzioni, in [8] è stata presentata una analisi predittiva gli effetti di scenari di plasma disrotti per il tokamak sferico ST40. Il Machine learning è stato applicato per mappare lo spazio operativo in termini di spostamento verticale e variazione di specifici parametri interni del plasma, usando un database sperimentale da impulsi di plasma eseguiti durante la campagna sperimentale del 2021–2022. Il mappaggio dello spazio operativo, realizzato con una SOM, ha consentito sia una classificazione automatica delle disruzioni, che ha permesso l'estrapolazione di nuove configurazioni di plasma disrotto. Le nuove configurazioni hanno consentito di effettuare simulazioni predittive dello spostamento della colonna di plasma, in scenari non ancora investigati sperimentalmente. Fornendo così indicazioni utili per le campagne successive e per la progettazione di configurazioni future della macchina.

## Referenze

- [1] E. Aymerich, A. Fanni, F. Pisano, G. Sias, B. Cannas, A self-organised partition of the high dimensional plasma parameter space for plasma disruption prediction, Nucl. Fusion (2024). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad7474>.
- [2] S. Setzu, E. Aymerich, A. Fanni, F. Pisano, G. Sias, B. Cannas, the JET Contributors, WPTe Team, A procedure for rule extraction from a self-organising plasma disruption predictor for JET, EUROfusion Pinboard, to be submitted to Nature Communications.
- [3] E. Aymerich, G. Sias, F. Pisano, B. Cannas, S. Carcangiu, C. Sozzi, C. Stuart, P. Carvalho, A. Fanni and JET Contributors, "Disruption prediction at JET through Deep Convolutional Neural Networks using spatiotemporal information from plasma profiles", Nuclear Fusion 62 (2022) 066005. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac525e>.
- [4] E. Aymerich, B. Cannas, F. Pisano, G. Sias, C. Sozzi, C. Stuart, P. Carvalho, A. Fanni, the JET Contributors, "Performance Comparison of Machine Learning Disruption Predictors at JET", Applied Sciences 13 (2023) 2006. <https://doi.org/10.3390/app13032006>.
- [5] E. Aymerich, G. Sias, F. Pisano, B. Cannas, A. Fanni, the JET Contributors, "CNN disruption predictor at JET: Early versus late data fusion approach", Fusion Engineering and Design 193 (2023) 113668. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113668>.
- [6] E. Aymerich, G. Sias, S. Atzeni, F. Pisano, B. Cannas, A. Fanni, MHD spectrogram contribution to disruption prediction using Convolutional Neural Networks, Fusion Eng. Des. 204 (2024) 114472. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114472>.
- [7] L. Bonalumi, E. Aymerich, E. Alessi, B. Cannas, A. Fanni, E. Lazzaro, S. Nowak, F. Pisano, G. Sias, C. Sozzi, eXplainable Artificial Intelligence applied to algorithms for disruptions prediction in tokamak devices, Front. Phys. Sec. Complex Physical Systems, Volume 12 - 2024
- [8] M. Scarpari, S. Minucci, G. Sias, R. Lombroni, P.F. Buxton, M. Romanelli, G. Calabrò, ST40 electromagnetic predictive studies supported by machine learning applied to experimental database, 2024 Sci Rep 14, 27074