

# Progettazione Ottimizzata di Magneti Resistivi per il progetto Muon Collider

M. Breschi, L. Cavallucci, A. Macchiagodena

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione  
Università di Bologna  
Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

Nell'ambito del progetto europeo MuCol [1], l'unità di ricerca dell'Università di Bologna collabora con il CERN alla progettazione dei magneti dipolari resistivi per il Muon Collider, un acceleratore di nuova generazione in fase di progettazione. Questo lavoro si inserisce nell'ambito delle attività della International Muon Collider Collaboration (IMCC), che riunisce diversi centri di ricerca nazionali e internazionali che condividono l'obiettivo di valutare la fattibilità tecnica di un collisore di muoni che operi con energie fino a 10 TeV.

Il Muon Collider rappresenta una possibile evoluzione dei presenti acceleratori: i muoni, essendo particelle puntiformi e circa 200 volte più massivi degli elettroni, permettono di limitare l'emissione di sincrotrone e pertanto le perdite di energia del fascio durante la rotazione nell'acceleratore. Tuttavia, la breve vita media dei muoni ( $2,2 \mu\text{s}$  a riposo) impone l'impiego di sistemi di accelerazione estremamente rapidi, capaci di sfruttare la dilatazione temporale relativistica.

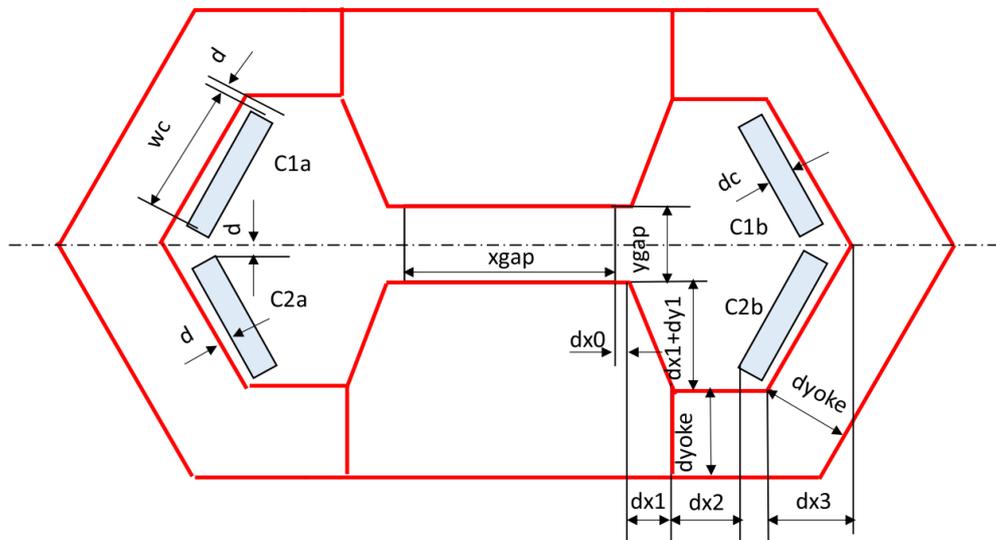


Figura 1. Geometria di un magnete resistivo dipolare con configurazione a clessidra (hourglass) e principali parametri geometrici utilizzati nell'ottimizzazione [2].

Il sistema di accelerazione previsto per il Muon Collider si basa su una catena di Rapid Cycling Synchrotrons (RCS), nei quali i magneti resistivi devono generare campi fino a 2.0 T in fenditure di  $30 \times 100 \text{ mm}$ , con omogeneità dell'ordine di  $10^{-4}$  e tempi di salita tra 0.4 e 10 millisecondi. La progettazione dei magneti è particolarmente complessa a causa delle elevate potenze richieste, che per l'intero acceleratore raggiungono le decine di gigawatt, e della necessità di minimizzare sia l'energia elettromagnetica immagazzinata nei magneti sia le perdite in transitorio nei materiali conduttori e ferromagnetici che li costituiscono.

Lo studio eseguito presso l'Università di Bologna ha confrontato tre configurazioni geometriche, mostrate in Fig. 1: il magnete a clessidra ('hourglass magnet'), il magnete di tipo

windowframe e il magnete di tipo H. Per lo studio è stata sviluppata una procedura di ottimizzazione mirata alla riduzione dell'energia immagazzinata e delle perdite totali durante un ciclo di corrente operativo, mantenendo come vincolo il raggiungimento del campo di induzione magnetica desiderato. La procedura di ottimizzazione è stata applicata a diversi valori di densità di corrente nei conduttori di rame, compresi tra 10 e 30 A/mm<sup>2</sup>, per ogni configurazione.

Tutte le soluzioni ottimizzate consentono il raggiungimento della specifica di campo di induzione magnetica di 2 T nella fenditura, ma presentano differenze sostanziali in termini di efficienza energetica [2]. Le configurazioni windowframe permettono di contenere le perdite nel ferro grazie a un maggior volume del circuito magnetico, ma tendono a determinare maggiori perdite nel rame, a causa della concentrazione del flusso magnetico alle estremità dei poli. L'energia immagazzinata più bassa è stata ottenuta con le configurazioni windowframe: 5.38 kJ/m a 10 A/mm<sup>2</sup> e 5.36 kJ/m a 20 A/mm<sup>2</sup> rispettivamente (WF1 e WF3 in Fig. 2). Considerando il compromesso tra energia, perdite e qualità del campo, il magnete di tipo H è emerso come la configurazione più promettente, grazie al buon bilanciamento tra bassa energia immagazzinata e contenimento delle perdite totali. Il lavoro dimostra la possibilità, attraverso un processo di ottimizzazione, di progettare magneti resistivi compatibili con le specifiche tecniche particolarmente sfidanti del progetto Muon Collider.

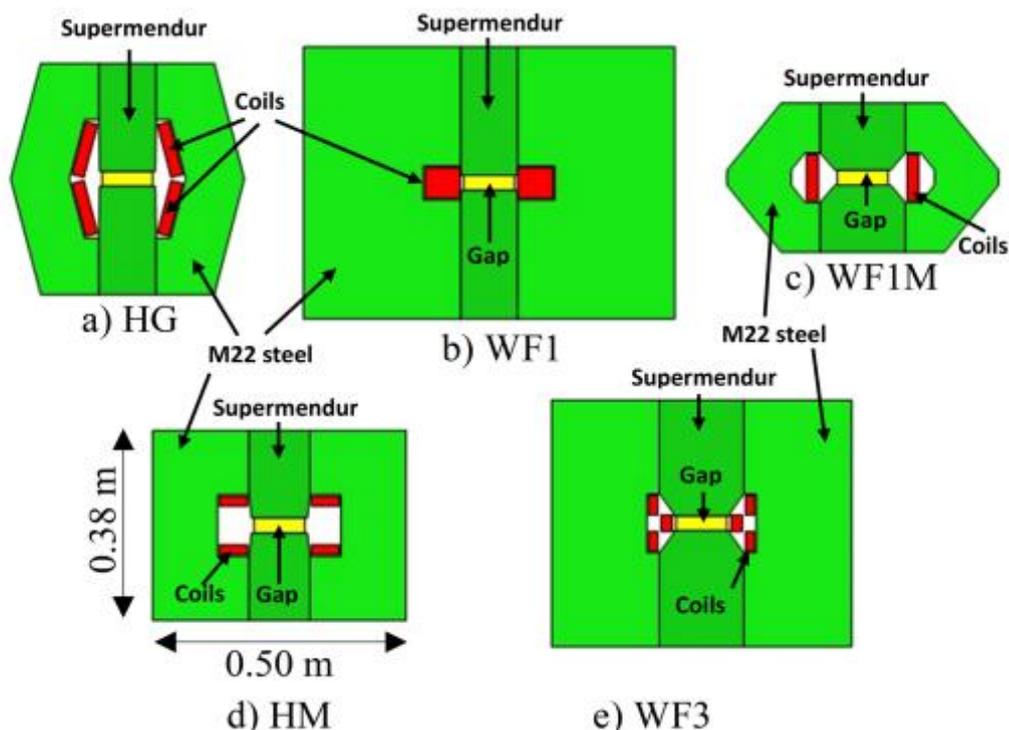


Figura 2. Configurazioni di dipoli resistivi studiate: a) configurazione a clessidra b) configurazione windowframe di tipo 1 c) configurazione windowframe di tipo 2 d) configurazione H e) configurazione windowframe di tipo 3 [2].

## Bibliografia

- [1] C. Accettura, et al., "Towards a muon collider," *The European Physical Journal C*, vol. 83, no. 9, p. 864, 2023.
- [2] M. Breschi, L. Cavallucci, R. Miceli, P. Ribani, L. Bottura, F. Boattini, S. Fabbri, and H. De Gersem, "Comparative analysis of resistive dipole accelerator magnets for a muon collider" *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 5, pp. 1–5, 2024.