

	SPECIFICA TECNICA	Pag. di 8
<i>Titolo:</i>	FORNITURA DEL CRIOSTATO E DEGLI ADDUTTORI DI CORRENTE PER LA FRASCATI COIL COLD TEST FACILITY (FCCTF) DEL PROGETTO DTT PRESSO IL C.R. ENEA DI FRASCATI	Rev 01 del 10-10-2022

SPECIFICHE TECNICHE

Fornitura del criostato e degli adduttori di corrente per la Frascati Coil Cold Test Facility (FCCTF) del Progetto DTT presso il C.R. di Frascati

EDIZIONE 2022

INDICE

1 Sintesi.....	2
2 Introduzione.....	2
3 Scopo della fornitura.....	3
4 Criteri per la partecipazione alla gara	3
5 Dimensione dei magneti da collaudare.....	4
6 Requisiti tecnici.....	8
7 Il criostato.....	9
8 Lo schermo termico.....	10
9 La struttura di sostegno dei magneti	11
10 I discendenti di corrente	11
11 Il sistema da vuoto	12
12 Test di collaudo	12

Riferimenti	Autore Gianluca De Marzi	Preso visione/Approvato Fabio Fabbri
Firme		
Storico delle revisioni		

	<p style="text-align: center;">2</p> <p style="text-align: center;">SPECIFICA TECNICA</p>	<p style="text-align: right;">Pag. di 8</p>
<p style="text-align: center;"><i>Titolo:</i></p>	<p style="text-align: center;">FORNITURA DEL CRIOSTATO E DEGLI ADDUTTORI DI CORRENTE PER LA FRASCATI COIL COLD TEST FACILITY (FCCTF) DEL PROGETTO DTT PRESSO IL C.R. ENEA DI FRASCATI</p>	<p style="text-align: right;">Rev 01 del 10-10-2022</p>

1 Sintesi

Queste specifiche tecniche riguardano la fornitura di un criostato per il collaudo dei magneti superconduttivi del reattore Divertor Tokamak Test (DTT), che permetta di operare a 4.5 K e sia comprensivo di adduttori di corrente superconduttivi, valvole di controllo e sistema di pompaggio per il vuoto.

La ditta appaltante dovrà eseguire la progettazione esecutiva, la costruzione, il collaudo e il trasporto presso il centro ENEA di Frascati del criostato, completo di tutti i suoi componenti.

2 Introduzione

L'ENEA, attraverso il Consorzio DTT S.C.a.r.l., è attualmente impegnata nella progettazione e costruzione di un reattore nucleare sperimentale denominato "Divertor Tokamak Test" facility (DTT), il cui "cuore" tecnologico è costituito da un insieme di magneti superconduttivi: 18 magneti che producono il campo toroidale (Toroidal Field coils, "TF"), 6 moduli impilati che producono il flusso necessario ad accendere il plasma (Central Solenoid, "CS") e 6 solenoidi che producono un campo poloidale necessario a controllare il plasma (Poloidal Field coils, "PF").

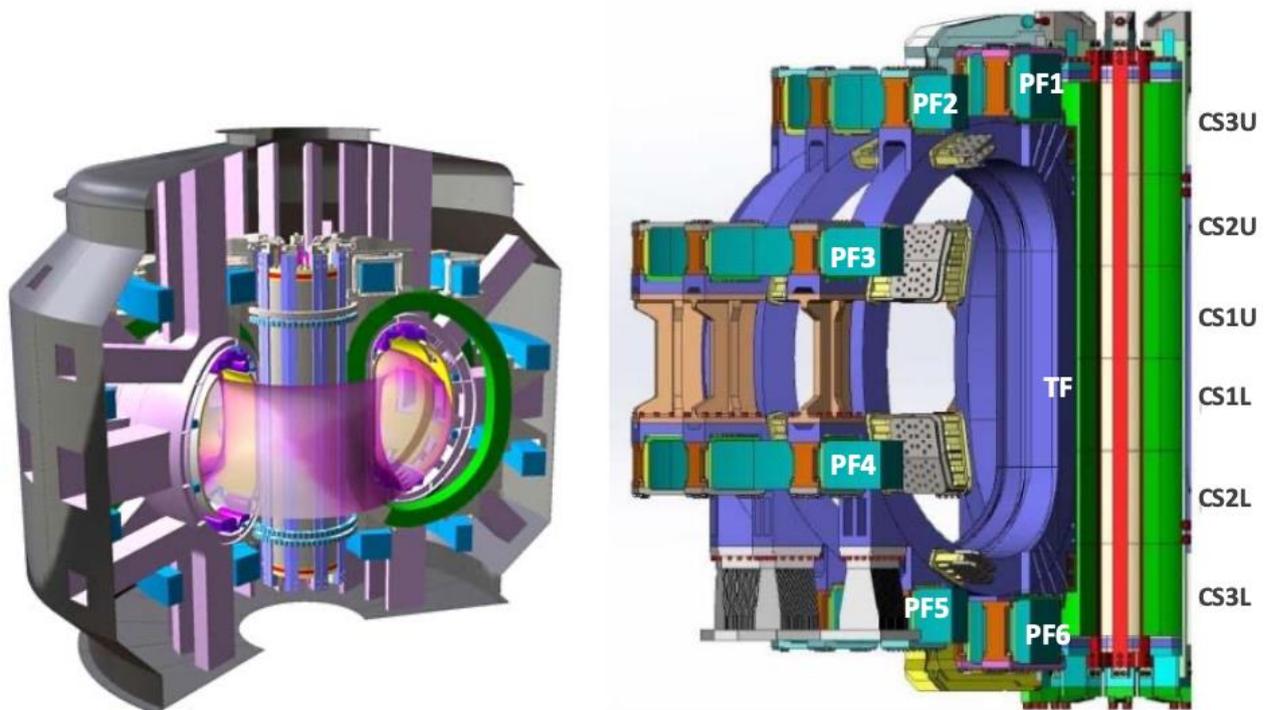


Fig.1: Una visione artistica di DTT (sx) ed in particolare del sistema magnetico (dx).

	SPECIFICA TECNICA	Pag. di 8
Titolo:	FORNITURA DEL CRIOSTATO E DEGLI ADDUTTORI DI CORRENTE PER LA FRASCATI COIL COLD TEST FACILITY (FCCTF) DEL PROGETTO DTT PRESSO IL C.R. ENEA DI FRASCATI	Rev 01 del 10-10-2022

Per garantire il corretto funzionamento dei suddetti magneti, si è deciso che i più critici (18 TF, 2 PF e 6 CS, oltre ad una bobina di prova superconduttiva per il CS), dopo la loro manifattura e prima del loro assemblaggio in macchina, vengano testati presso i laboratori ENEA di Frascati, alla temperatura e corrente di esercizio.

Scopo del presente documento è illustrare le caratteristiche tecniche e funzionali del criostato per la infrastruttura **Frascati Coil Cold Test Facility (FCCTF)**.

3 Scopo della fornitura

La fornitura del criostato deve comprendere:

- disegno costruttivo di tutti i componenti e analisi strutturale;
- costruzione del criostato con schermo radiativo raffreddato ad azoto liquido;
- costruzione della struttura di sostegno dei magneti;
- costruzione dei discendenti di corrente superconduttivi;
- fornitura del sistema da vuoto;
- prova da vuoto e controllo perdite con fuga calibrata;
- raffreddamento dello schermo radiativo e verifica temperature;
- trasporto presso i laboratori dell'ENEA di Frascati.

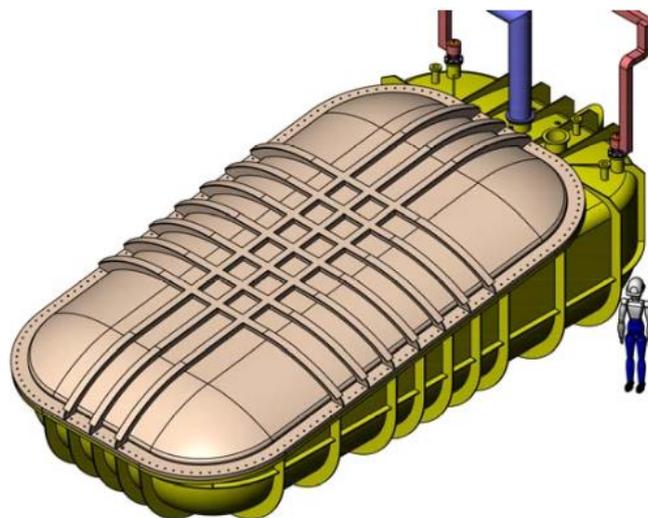


Fig. 2: Vista artistica del criostato.

4 Criteri per la partecipazione alla gara

L'industria deve dimostrare di avere maturato negli anni competenze in campo criogenico ed in particolare il *know-how* e l'esperienza nella progettazione e costruzione di grossi criostati (volume ≥ 50 metri cubi) che siano stati realizzati per collaudare componenti che opereranno alla temperatura

	<p style="text-align: center;">4</p> <p style="text-align: center;">SPECIFICA TECNICA</p>	<p style="text-align: right;">Pag. di 8</p>
<p style="text-align: center;"><i>Titolo:</i></p>	<p style="text-align: center;">FORNITURA DEL CRIOSTATO E DEGLI ADDUTTORI DI CORRENTE PER LA FRASCATI COIL COLD TEST FACILITY (FCCTF) DEL PROGETTO DTT PRESSO IL C.R. ENEA DI FRASCATI</p>	<p style="text-align: right;">Rev 01 del 10-10-2022</p>

di 4.5 K e che siano stati dotati di schermi radiativi raffreddati attivamente alla temperatura di 77 K con azoto liquido o elio gas. Inoltre devono dimostrare di avere realizzato linee criogeniche per il trasferimento di elio alla temperatura di 4.2 K e di avere esperienza nella progettazione e costruzione di adduttori di corrente superconduttivi ad alta temperatura critica utilizzando materiali del tipo BSCCO o REBCO e per correnti di esercizio superiori a 10000 A.

5 Dimensione dei magneti da collaudare

I magneti da collaudare sono:

- il toroidale fig.3;
- il poloidale fig.4;
- il modulo del solenoide centrale fig.5.

Nelle tre figure seguenti vengono riportate le dimensioni dei magneti al fine di dimensionare in maniera appropriata il criostato con i supporti di sostegno per le tre differenti bobine.

Titolo:

FORNITURA DEL CRIOSTATO E DEGLI
ADDUTTORI DI CORRENTE PER LA FRASCATI
COIL COLD TEST FACILITY (FCCTF) DEL
PROGETTO DTT PRESSO IL C.R. ENEA DI FRASCATI

Rev 01
del 10-10-2022

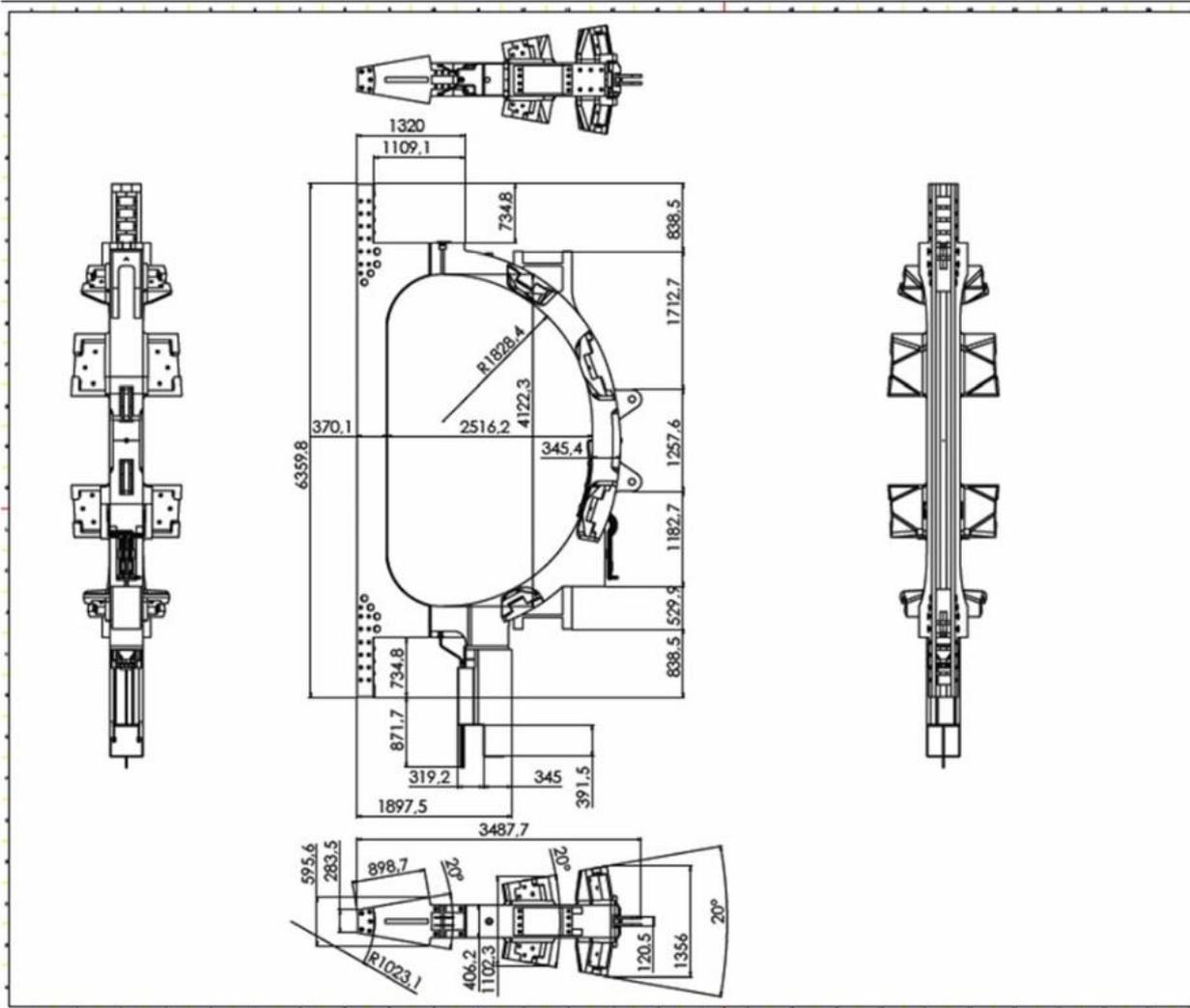


Fig. 3: Bobina toroidale (TF coil).

	6 SPECIFICA TECNICA	Pag. di 8
<i>Titolo:</i>	FORNITURA DEL CRIOSTATO E DEGLI ADDUTTORI DI CORRENTE PER LA FRASCATI COIL COLD TEST FACILITY (FCCTF) DEL PROGETTO DTT PRESSO IL C.R. ENEA DI FRASCATI	Rev 01 del 10-10-2022

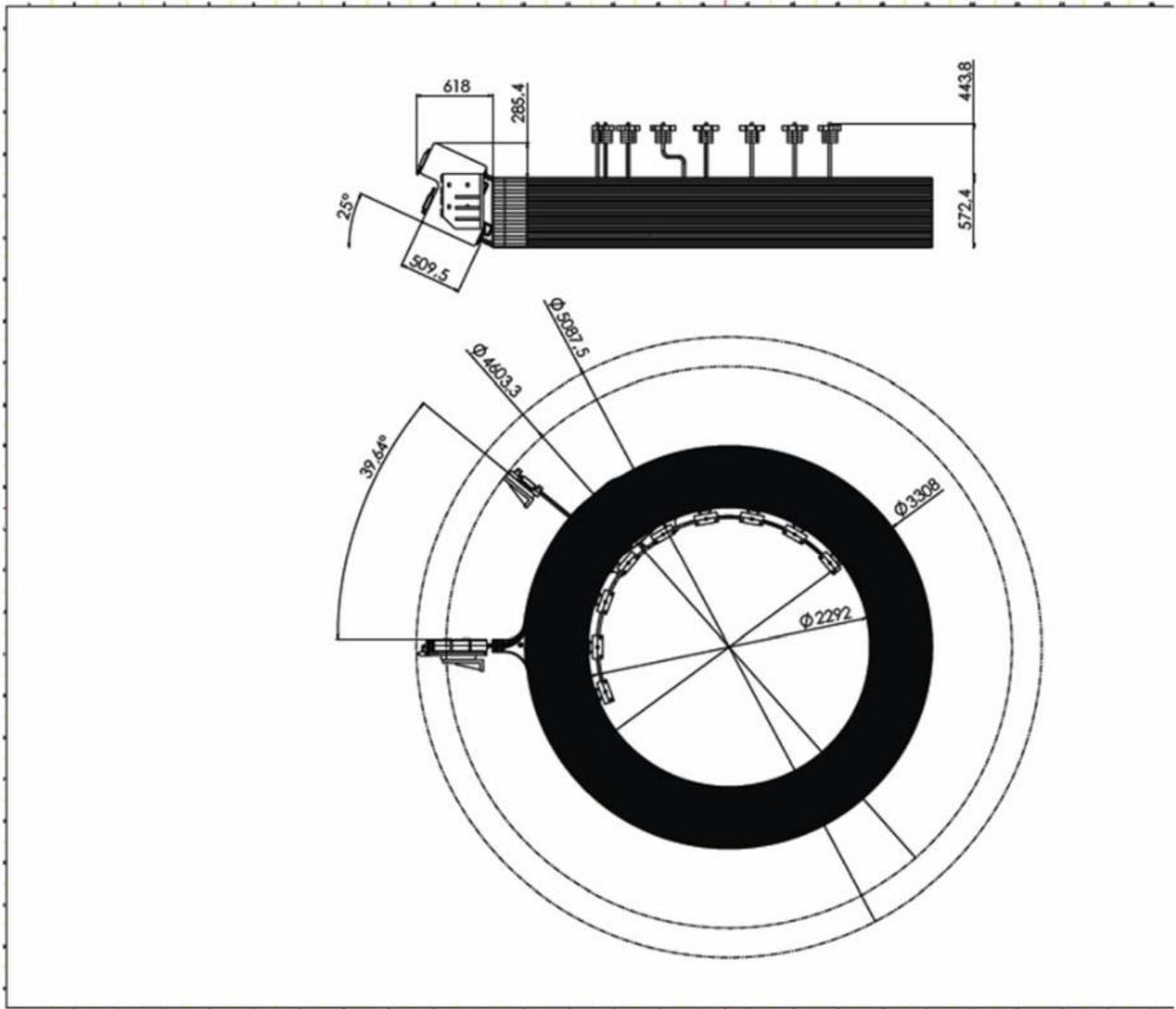


Fig. 4: Bobina poloidale (PF coil).

	SPECIFICA TECNICA	Pag. di 8
Titolo:	FORNITURA DEL CRIOSTATO E DEGLI ADDUTTORI DI CORRENTE PER LA FRASCATI COIL COLD TEST FACILITY (FCCTF) DEL PROGETTO DTT PRESSO IL C.R. ENEA DI FRASCATI	Rev 01 del 10-10-2022

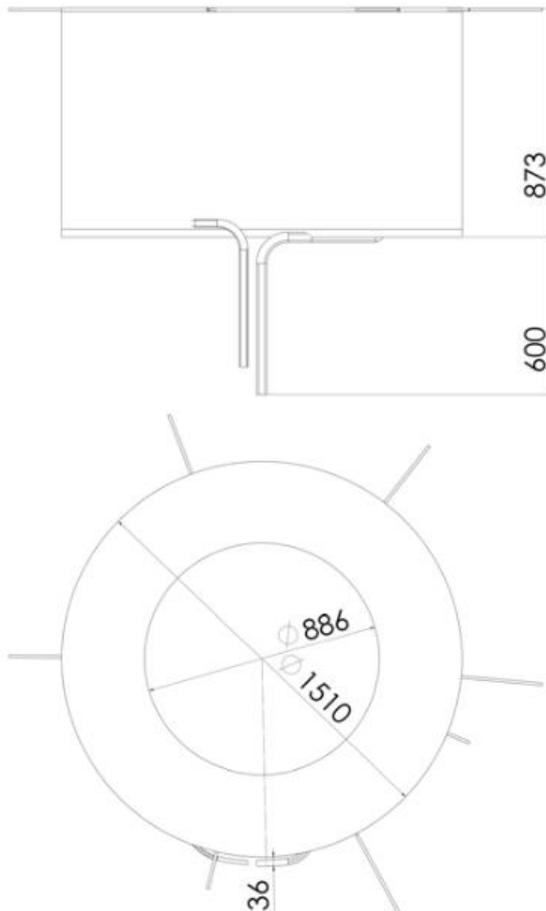


Fig. 5: Modulo del solenoide centrale (CS coil).

6 Requisiti tecnici

Il disegno preliminare del criostato è riportato in fig. 5. I principali componenti sono:

- il recipiente con il coperchio superiore;
- una coppia di discendenti di corrente;
- due valvole criogeniche di regolazione del flusso di elio;
- lo schermo attivo, raffreddato a 77 K, in alluminio con isolamento multistrato;
- la struttura di sostegno del magnete toroidale (fig. 3), poloidale (fig. 4) e solenoidale (fig. 5);
- un opportuno sistema di pompaggio con valvola di chiusura pneumatica (*vacuum gate*).

	8 SPECIFICA TECNICA	Pag. di 8
Titolo:	FORNITURA DEL CRIOSTATO E DEGLI ADDUTTORI DI CORRENTE PER LA FRASCATI COIL COLD TEST FACILITY (FCCTF) DEL PROGETTO DTT PRESSO IL C.R. ENEA DI FRASCATI	Rev 01 del 10-10-2022

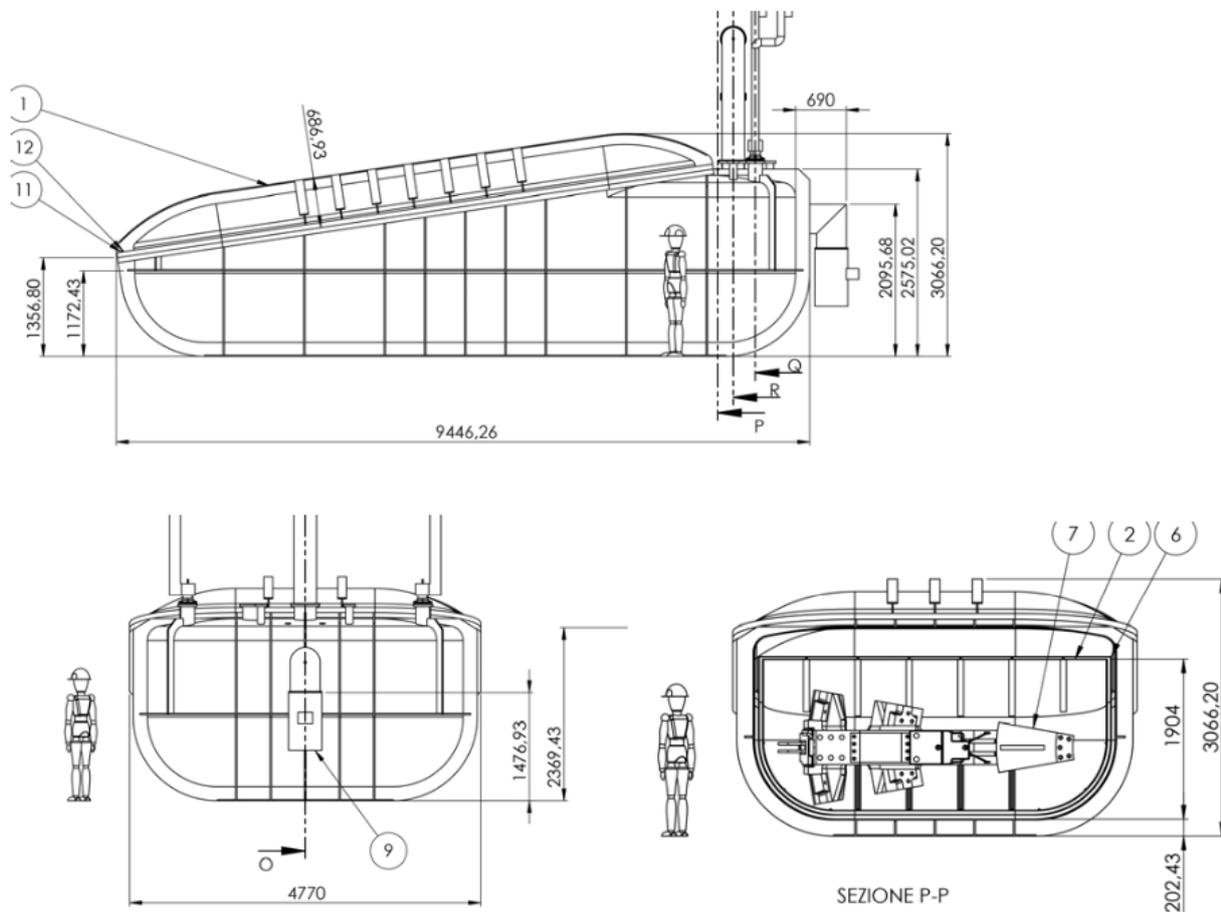


Fig. 6: Dimensioni del criostato.

7 Il criostato

Il criostato in acciaio inox AISI 304L sarà composto da laminati dello spessore suggerito di 10 mm e da travi di rinforzo dimensionate per resistere al carico della pressione atmosferica, considerando il raggiungimento di un vuoto minore di 10^{-2} Pa (10^{-4} millibar) a temperatura ambiente. Si è scelto di non bombare completamente il fondo per cercare di contenere al massimo l'altezza del criostato, il che ha richiesto la già citata forte travatura di rinforzo. La ditta dovrà calcolare e dimensionare l'intero criostato, sotto la propria responsabilità, come meglio ritiene, al fine di contenerne il costo senza inficiarne il funzionamento. Le flange di accoppiamento tra coperchio e serbatoio dovranno essere lavorate con una fresatrice una volta completata la costruzione, al fine di ricavare la sede dell'anello di tenuta da vuoto, i fori per i bulloni di fissaggio, due o più perni che garantiscano la posizione di accoppiamento del coperchio con il criostato. La lavorazione dovrà inoltre permettere il perfetto accoppiamento coperchio/criostato, tale da garantire il raggiungimento del livello di vuoto indicato.

	<p>9</p> <p>SPECIFICA TECNICA</p>	<p>Pag. di 8</p>
<p>Titolo:</p>	<p>FORNITURA DEL CRIOSTATO E DEGLI ADDUTTORI DI CORRENTE PER LA FRASCATI COIL COLD TEST FACILITY (FCCTF) DEL PROGETTO DTT PRESSO IL C.R. ENEA DI FRASCATI</p>	<p>Rev 01 del 10-10-2022</p>

Anche la base di appoggio del criostato dovrà essere lavorata per garantirne la planarità, in modo da permettere una corretta distribuzione del peso sul pavimento.

Il criostato dovrà inoltre prevedere i seguenti componenti:

- 5 supporti all'interno del criostato perfettamente isolati termicamente ed elettricamente (20kV) per il sostegno dei 3 tipi di magnete;
- 2 supporti meccanici isolati termicamente ed elettricamente all'interno del criostato per il fissaggio dei discendenti atti a contrastare le forze elettro magnetiche agenti sui medesimi;
- 2 bocchelli flangiati per i discendenti di corrente;
- 2 bocchelli flangiati per le valvole di regolazione del flusso di elio;
- 1 bocchello per la linea criogenica;
- 1 bocchello con flangia del diametro di 30 cm per i segnali di misura della temperatura, pressione e tensione;
- 1 bocchello per le termocoppie di misura della temperatura degli schermi;
- 1 o più bocchelli per il sistema di pompaggio;
- 2 o più ingressi criogenici in base allo schema idraulico, rispettivamente per l'ingresso e l'uscita dell'azoto dagli schermi;
- 2 bocchelli per le teste di misura del vuoto;
- 1 bocchello per l'ingresso di elio a 20K secondo un disegno fornito da ENEA.

8 Lo schermo termico

Lo schermo termico, che invilupperà completamente i magneti oggetto di test, dovrà essere di alluminio e dovrà prevedere la tuberia per la circolazione dell'azoto liquido a 77 K. Il circuito idraulico dovrà garantire la perfetta omogeneità della temperatura su tutte le superfici dello schermo. La parte superiore dello schermo in corrispondenza del coperchio del criostato dovrà essere facilmente smontabile e prevedere degli ancoraggi per il suo sollevamento e smontaggio per poterne consentire la rimozione durante l'introduzione dei magneti di prova. Una possibile soluzione costruttiva è quella di utilizzare un estruso in alluminio del tipo riportato in fig. 6. Attraverso lo schermo dovranno passare i piedi di sostegno dei magneti vincolati al fondo del criostato che andranno poi collegati termicamente allo schermo, in maniera appropriata, per limitare l'ingresso di calore sui componenti operanti a 4.5 K (taglio termico). Dovranno inoltre essere previsti i fori di passaggio attraverso lo schermo per l'alimentazione elettrica e la circuiteria idraulica dei magneti. La ditta dovrà anche provvedere alla fornitura e posizionamento dell'isolante multistrato da inserire tra lo schermo e le pareti del criostato a temperatura ambiente. Il dimensionamento del circuito idraulico dovrà garantire a regime una completa omogeneità della temperatura tra tutte le zone dello schermo con temperature massime di 85 K. Al fine di verificare l'omogeneità della temperatura la ditta dovrà

	<p style="text-align: center;">10</p> <p style="text-align: center;">SPECIFICA TECNICA</p>	<p style="text-align: right;">Pag. di 8</p>
<p style="text-align: center;">Titolo:</p>	<p style="text-align: center;">FORNITURA DEL CRIOSTATO E DEGLI ADDUTTORI DI CORRENTE PER LA FRASCATI COIL COLD TEST FACILITY (FCCTF) DEL PROGETTO DTT PRESSO IL C.R. ENEA DI FRASCATI</p>	<p style="text-align: right;">Rev 01 del 10-10-2022</p>

provvedere all'installazione, in posizioni che verranno concordate con ENEA, di 12 termocoppie tarate e collegate ad una flangia per portare all'esterno del criostato i segnali di misura.

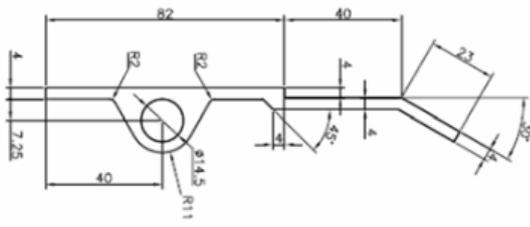


Fig. 7: Estruso di alluminio per lo schermo (esempio).

L'ingresso e l'uscita dell'azoto di raffreddamento dello schermo dovranno essere collegati al criostato tramite una connessione criogenica che eviti la formazione di condensa/ghiaccio sulla superficie esterna del criostato e dovranno inoltre prevedere un appropriato attacco filettato per la connessione delle linee di adduzione e scarico dell'azoto.

9 La struttura di sostegno dei magneti

I magneti toroidale, poloidale e solenoidale dovranno avere ognuno dei piedi di sostegno dedicati su cui venire appoggiati e fissati all'interno del criostato, per un totale di 5 supporti. I piedi saranno ancorati da un lato al fondo del criostato a temperatura ambiente e dall'altro al magnete di prova. Il materiale dei piedi dovrà essere composto da acciaio e materiale isolante (G10) e dovrà essere ancorato in maniera opportuna allo schermo radiativo a 77 K (taglio termico) in modo da limitare l'ingresso termico sul magnete ad un massimo di 3 W termici per ogni singolo piede. La parte in contatto con i magneti dovrà essere propriamente sagomata per garantire un sostegno delle bobine sicuro ed affidabile. La posizione dei piedi all'interno del criostato sarà fornita da ENEA alla ditta aggiudicataria.

10 I discendenti di corrente

La ditta dovrà progettare e costruire la coppia di discendenti superconduttivi che alimenteranno i magneti di prova. I discendenti saranno composti da uno scambiatore resistivo e da una parte superconduttiva collegate elettricamente tra loro. La parte superconduttiva dovrà essere costruita con superconduttore ad alta temperatura critica del tipo BSCCO o REBCO. Nel punto di giunzione tra le due parti sarà posizionato l'ingresso dell'elio gas a 40 K che rientrerà a temperatura ambiente nella tank di recupero. La parte resistiva dovrà essere progettata in maniera tale da evitare la formazione di condensa nella sua parte a temperatura ambiente. La fig. 7 riporta un disegno artistico del discendente. I dati di progetto per ogni singolo discendente sono:

- corrente operativa $I = 45$ kA;

	11 SPECIFICA TECNICA	Pag. di 8
Titolo:	FORNITURA DEL CRIOSTATO E DEGLI ADDUTTORI DI CORRENTE PER LA FRASCATI COIL COLD TEST FACILITY (FCCTF) DEL PROGETTO DTT PRESSO IL C.R. ENEA DI FRASCATI	Rev 01 del 10-10-2022

- temperatura ingresso scambiatore resistivo elio: $T_{in} = 40 \text{ K}$;
- temperatura uscita elio scambiatore resistivo: $T_{out} = 300 \text{ K}$;
- flusso elio: $dm/dt = 3 \text{ g/s}$ ciascuno;
- temperatura della terminazione di collegamento al magnete: $T_m = 5 \text{ K}$;
- ingresso massimo di calore per conduzione sulla terminazione a 5 K : $C = 2 \text{ W}$.

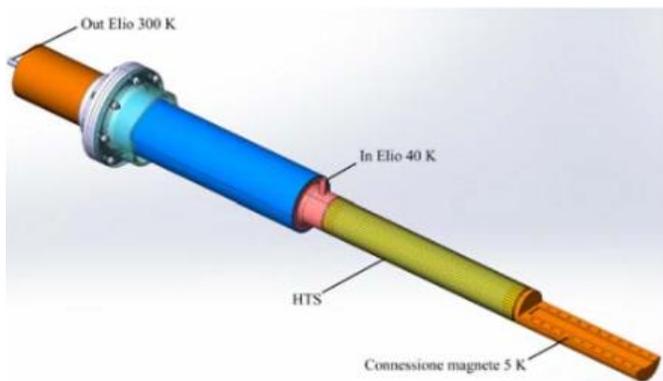


Fig. 8: Vista artistica del discendente.

I discendenti dovranno prevedere un isolamento contro massa e degli isolatori all'ingresso e uscita dell'elio. La lunghezza totale del discendente viene stimata in circa 200 cm. La parte resistiva del discendente dovrà essere anche ancorata alla parete interna del criostato con un giunto isolato termicamente ed elettricamente.

11 Il sistema da vuoto

La ditta dovrà calcolare e fornire una attrezzatura da vuoto in grado di garantire un vuoto a temperatura ambiente migliore di 10^{-2} Pa (10^{-4} mbar) mediante l'utilizzo di un sistema di pompaggio di sua scelta che tenga anche conto della presenza di un campo magnetico (la mappa di campo sarà fornita da ENEA). Il vuoto richiesto dovrà essere raggiunto entro 12 ore nella camera così come consegnata, senza i magneti da collaudare. Dovranno anche essere fornite due teste di misura del vuoto da posizionare alle due estremità del criostato. Questi strumenti dovranno fornire un segnale digitale standard che possa facilmente essere registrato dai più comuni sistemi di acquisizione dati (ad es. Labview®).

Si dovrà infine fornire una valvola pneumatica a tenuta di vuoto da installare tra criostato e sistema da vuoto.

	<p style="text-align: right;">12</p> <p style="text-align: center;">SPECIFICA TECNICA</p>	<p>Pag. di 8</p>
<p><i>Titolo:</i></p>	<p>FORNITURA DEL CRIOSTATO E DEGLI ADDUTTORI DI CORRENTE PER LA FRASCATI COIL COLD TEST FACILITY (FCCTF) DEL PROGETTO DTT PRESSO IL C.R. ENEA DI FRASCATI</p>	<p>Rev 01 del 10-10-2022</p>

12 Test di collaudo

Il collaudo del criostato verrà eseguito presso la ditta costruttrice e ripetuto dopo il trasporto e la consegna, il cui costo e responsabilità è a carico dell'impresa e deve essere incluso nell'offerta.

Il collaudo consisterà di:

- prova da vuoto;
- raffreddamento degli schermi e misura della loro temperatura.