

Estudos conceituais para a máquina intermediária

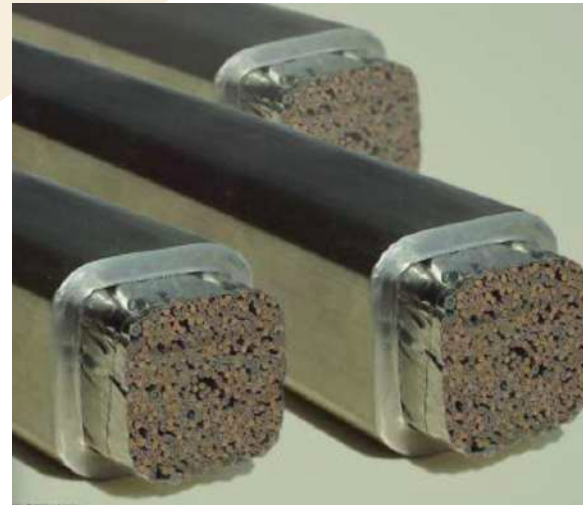
Apresentado por
Gustavo Paganini Canal, IFUSP
Gerson Otto Ludwig, CNEN

Durante o
I Seminário de Fusão Nuclear

Organizado por
Comissão Nacional de Energia Nuclear
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Instituto de Física da USP

São Paulo, 12 de agosto de 2021

Supercondutores



Volantes de inércia



Novos materiais

Estudos conceituais para a máquina intermediária

- Estudos conceituais da máquina intermediária
- Bobinas supercondutoras
- Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente
- Materiais resistentes à altas temperaturas, altos fluxos de calor e radiação
- Diagnósticos de plasma
- Volantes de inércia de alta potência
- Fontes de potência de alto desempenho e sistema de controle de plasma

Estudos conceituais para a máquina intermediária

- Estudos conceituais da máquina intermediária
- Bobinas supercondutoras
- Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente
- Materiais resistentes à altas temperaturas, altos fluxos de calor e radiação
- Diagnósticos de plasma
- Volantes de inércia de alta potência
- Fontes de potência de alto desempenho e sistema de controle de plasma

A RNF deverá apoiar grupos atuantes em fusão e em áreas correlatas em estudos conceituais para a máquina intermediária

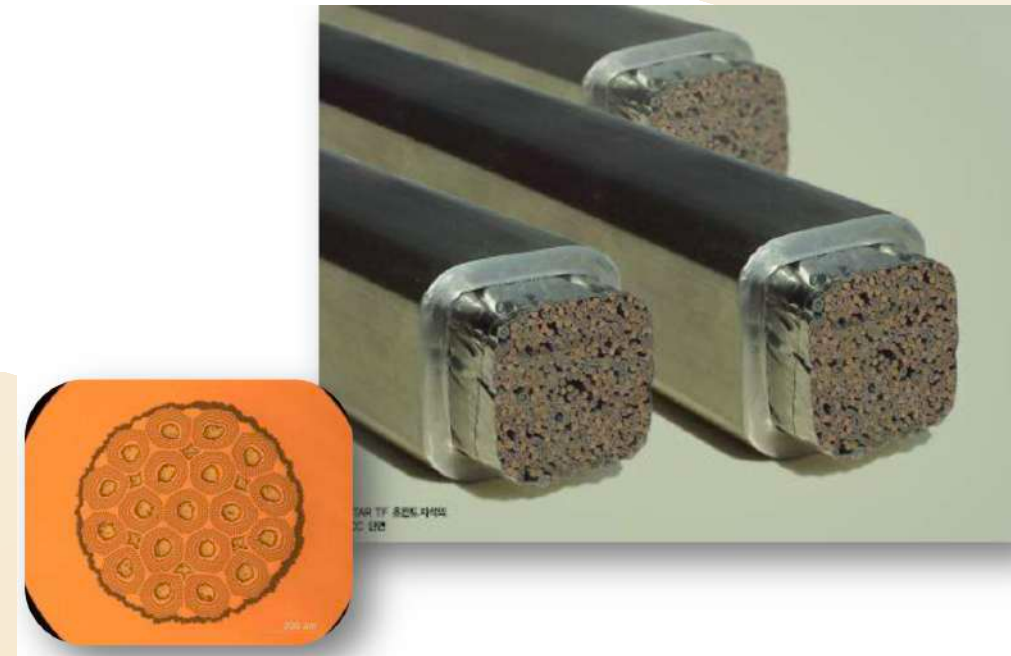
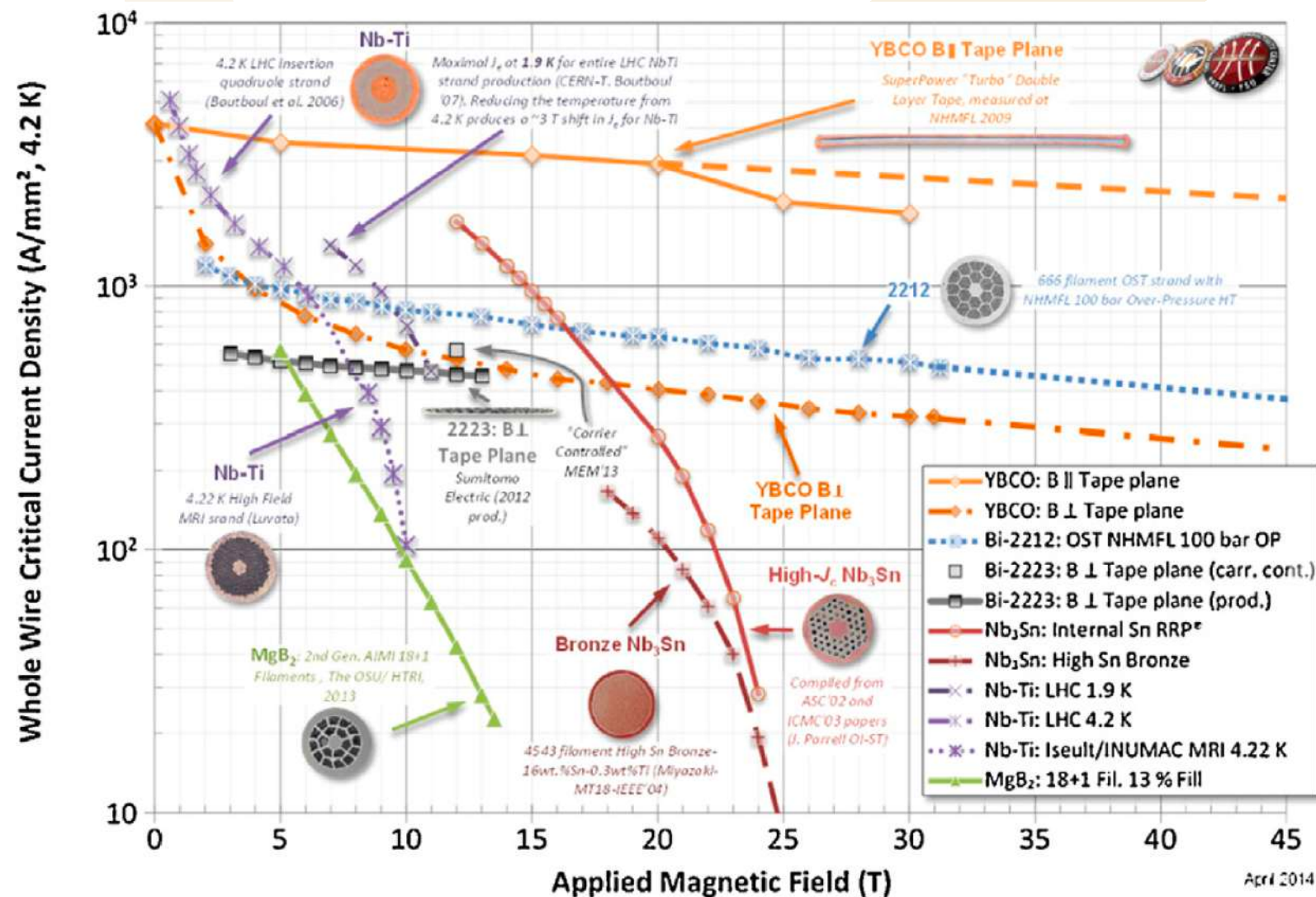
- Estudos conceituais deverão ser realizados para definir as características físicas principais do plasma (R_0 , a , I_P , B_0 , P_{aux} , K , δ) da máquina intermediária
 - Simulação de cenários avançados (equilíbrio e estabilidade)
 - Especificação básica do desviador, primeira parede e câmara de vácuo
 - Otimização das bobinas ôhmica, PF e TF (geometria, corrente máxima, etc)
 - Sistemas de controle de plasma (técnicas de aprendizagem de máquina)
 - Técnicas de aquecimento auxiliar e geração não-indutiva de corrente

Estudos conceituais para a máquina intermediária

- Estudos conceituais da máquina intermediária
- **Bobinas supercondutoras**
- Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente
- Materiais resistentes à altas temperaturas, altos fluxos de calor e radiação
- Diagnósticos de plasma
- Volantes de inércia de alta potência
- Fontes de potência de alto desempenho e sistema de controle de plasma

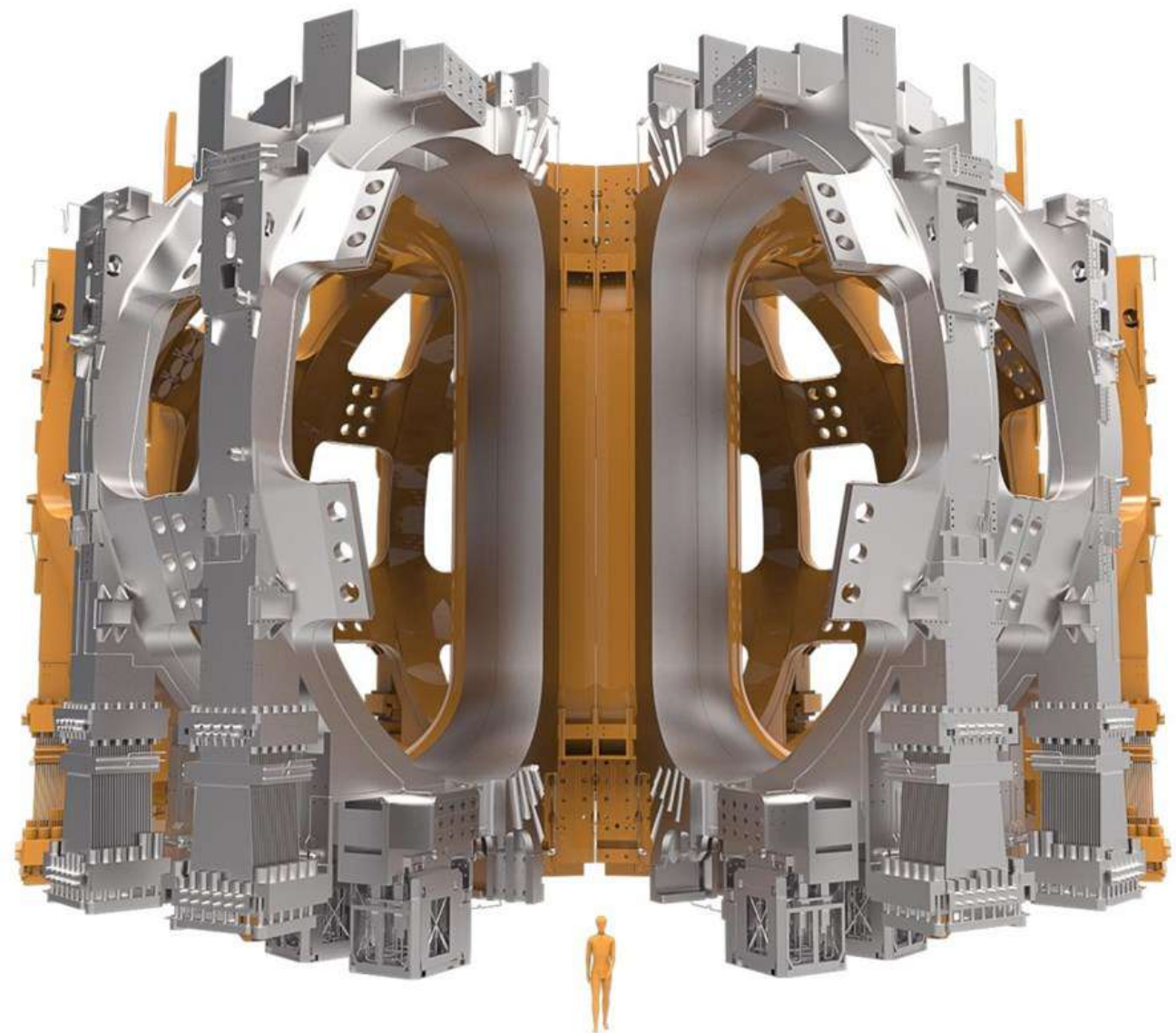
O desenvolvimento de bobinas supercondutoras é crucial para a fusão mas é também de grande interesse para outras áreas no País

- Supercondutores (SCs) de baixa temperatura (LTS) operam com He líquido
 - Por exemplo, Nb-Ti e Nb₃Sn



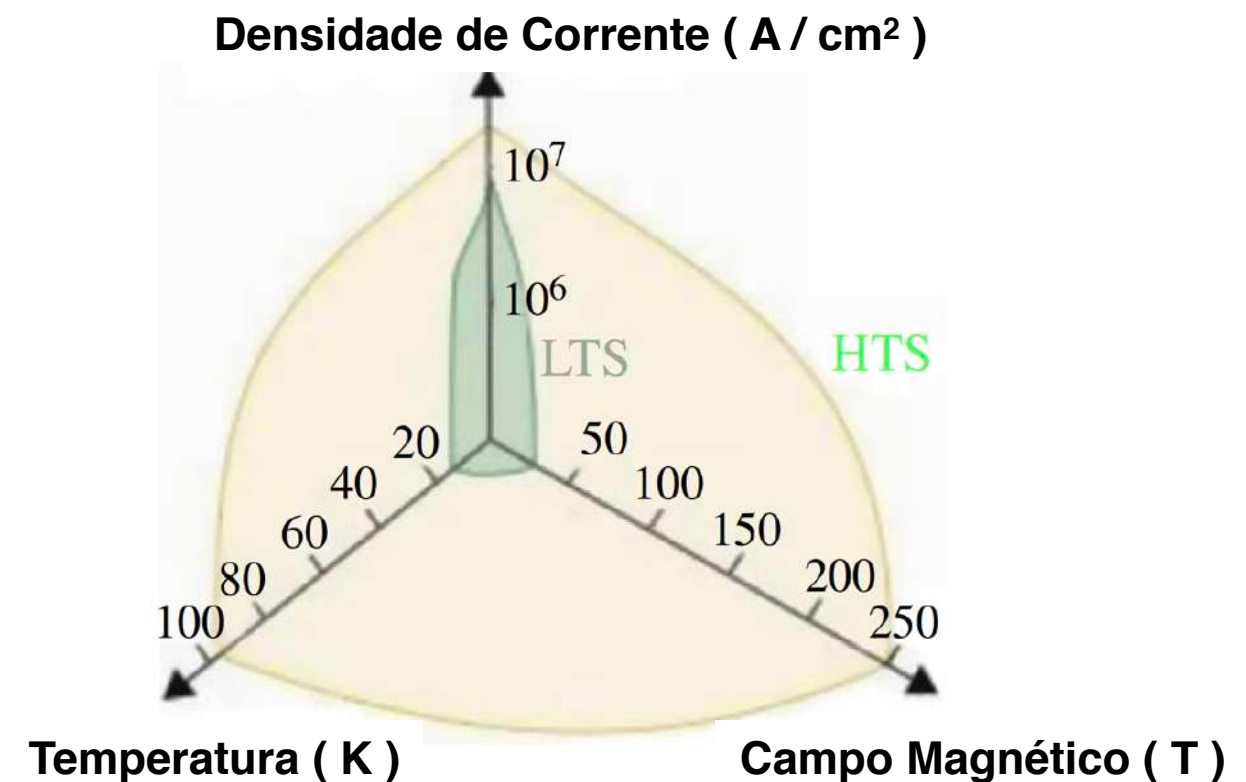
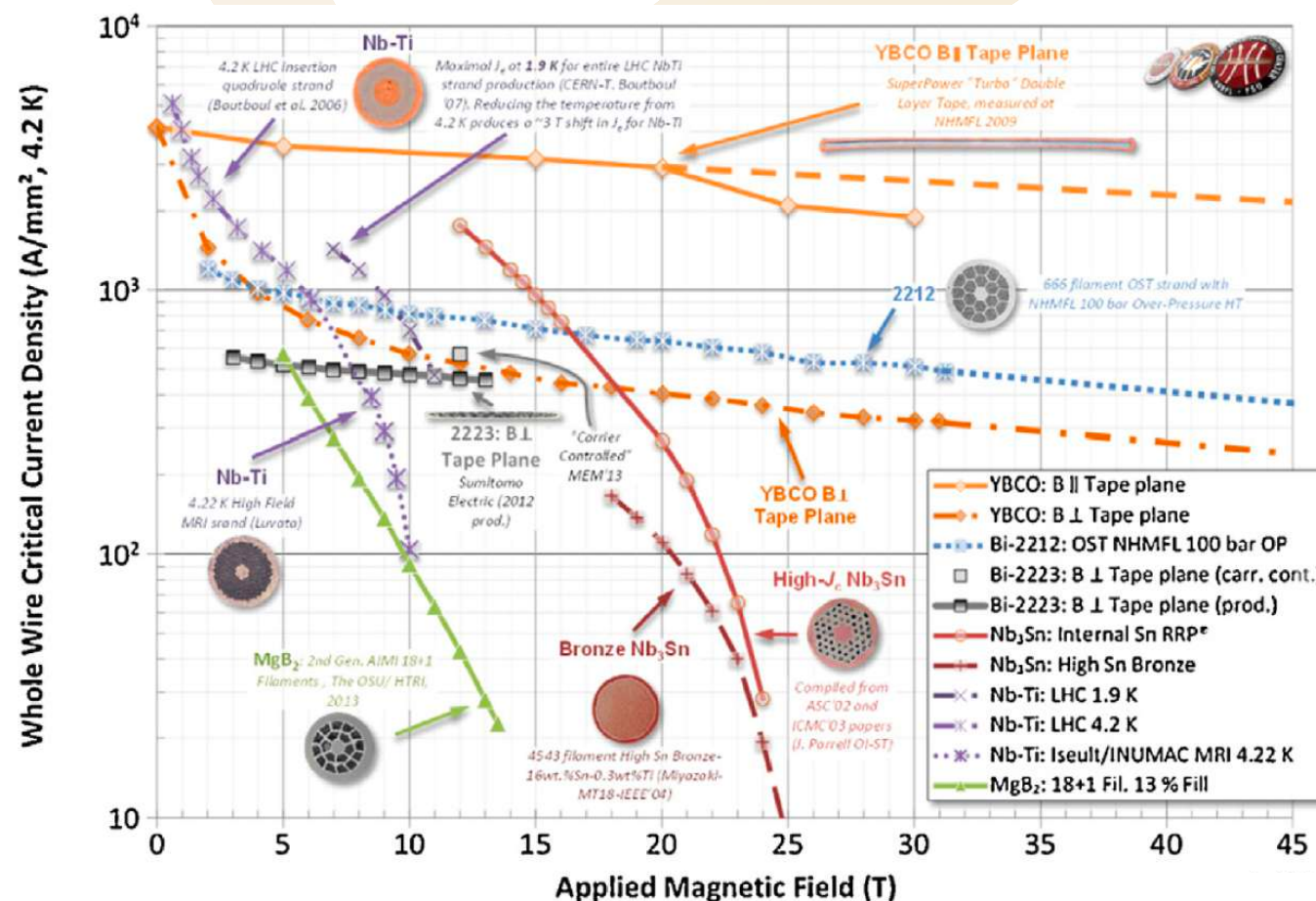
O desenvolvimento de bobinas supercondutoras é crucial para a fusão mas é também de grande interesse para outras áreas no País

- Supercondutores (SCs) de baixa temperatura (LTS) operam com He líquido
 - Por exemplo, Nb-Ti e Nb₃Sn
 - As bobinas supercondutoras do ITER são de baixa temperatura



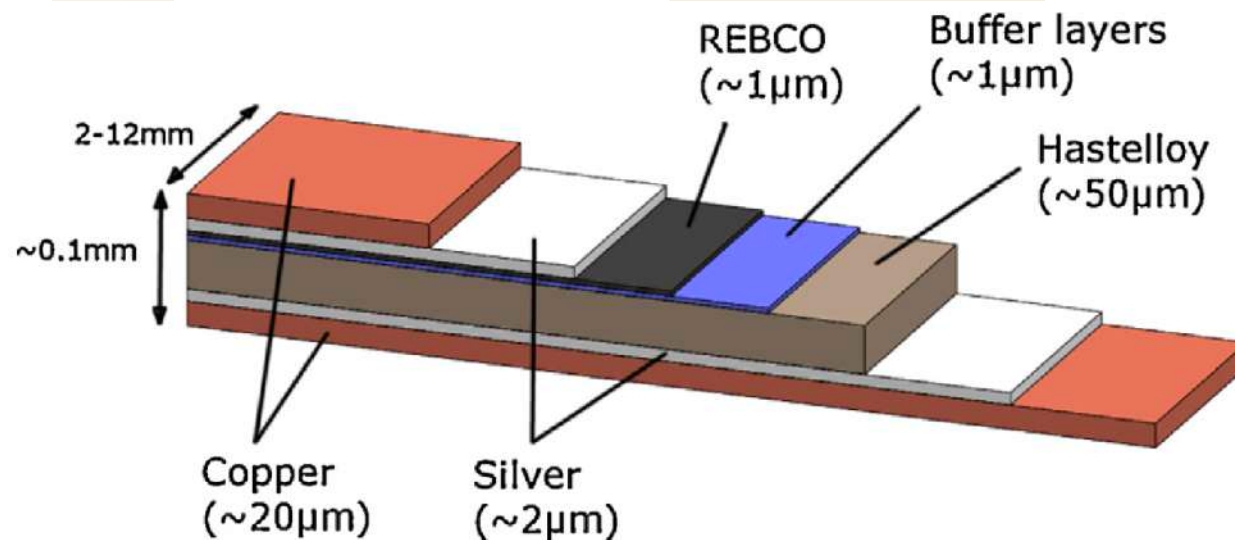
O desenvolvimento de bobinas supercondutoras é crucial para a fusão mas é também de grande interesse para outras áreas no País

- **Supercondutores (SCs) de alta temperatura (HTS) operam com N líquido**
 - *Rare-earth barium copper oxide (ReBCO)*
 - *Qualquer elemento terra-rara pode ser usado em SCs ReBCO*
 - *Ítrio (YBCO), lantanídeo (LBCO), samário, neodímeo e gadolínio*

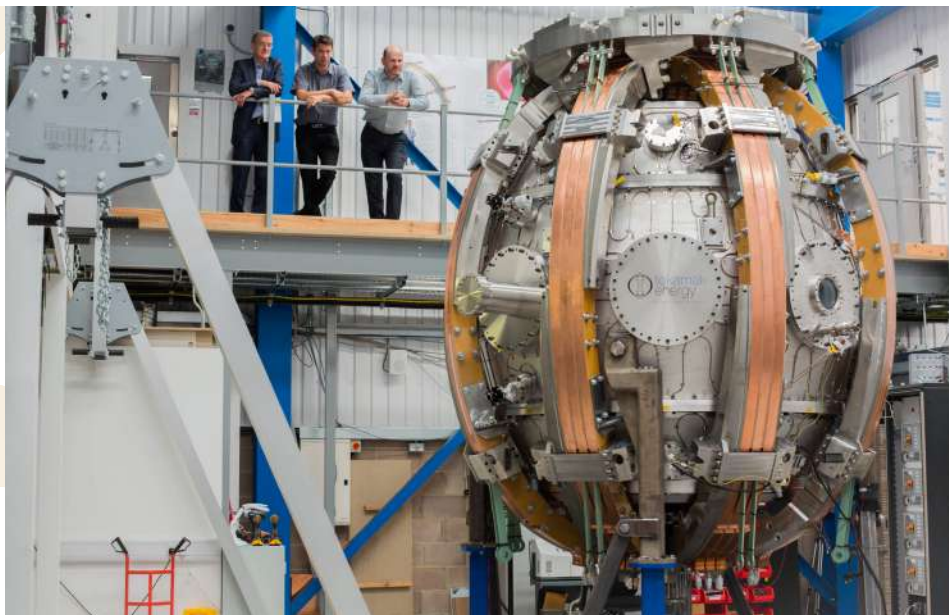
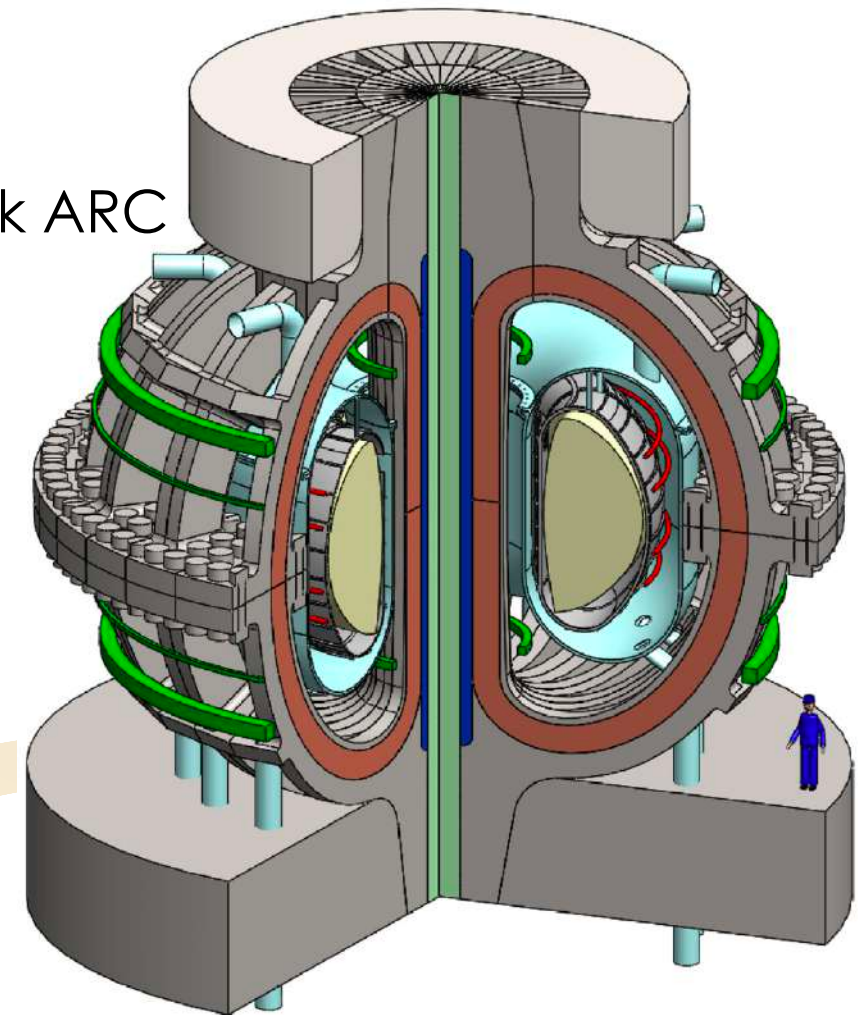


O desenvolvimento de bobinas supercondutoras é crucial para a fusão mas é também de grande interesse para outras áreas no País

- Supercondutores (SCs) de alta temperatura (HTS) operam com N líquido
 - Rare-earth barium copper oxide (ReBCO)
 - Qualquer elemento terra-rara pode ser usado em SCs ReBCO
 - Ítrio (YBCO), lantanídeo (LBCO), samário, neodímeo e gadolínio



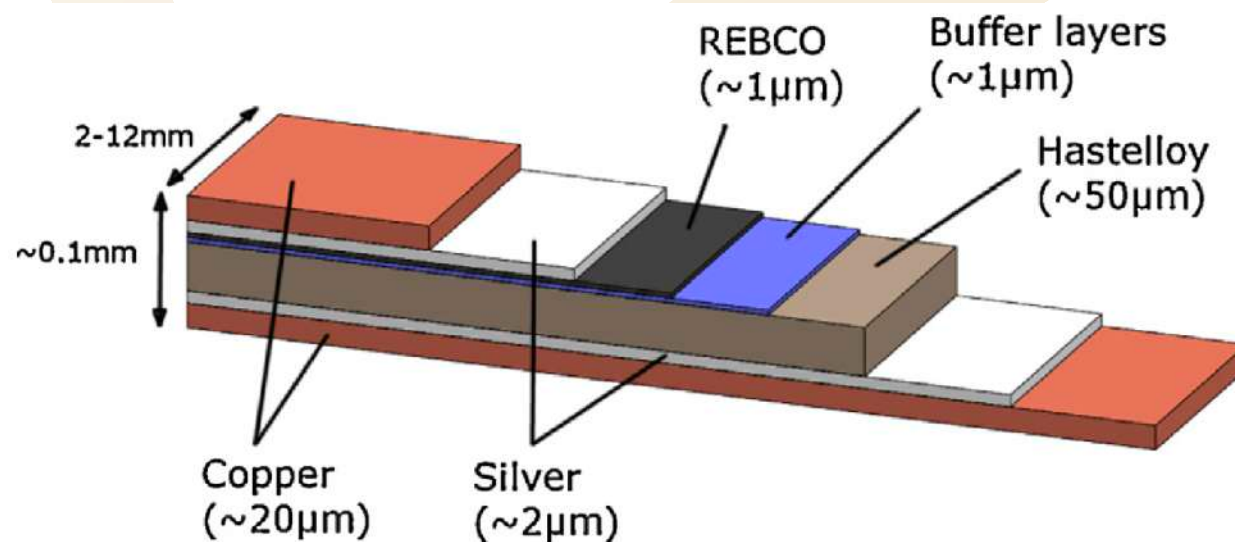
Tokamak ARC



Tokamak ST-40

O desenvolvimento de bobinas supercondutoras é crucial para a fusão mas é também de grande interesse para outras áreas no País

- Supercondutores (SCs) de alta temperatura (HTS) operam com N líquido
 - Rare-earth barium copper oxide (ReBCO)
 - Qualquer elemento terra-rara pode ser usado em SCs ReBCO
 - Ítrio (YBCO), lantanídeo (LBCO), samário, neodímeo e gadolínio



Cabos e bobinas supercondutoras LTS e HTS desenvolvidos poderão ser testados no ETE



Tokamak ETE



O desenvolvimento de bobinas supercondutoras é crucial para a fusão mas é também de grande interesse para outras áreas no País

- Supercondutores (SCs) de baixa e alta temperatura são de interesse para várias outras áreas no País



Equipamentos de RMN



Turbina eólica supercondutora



Maior motor naval supercondutor



Linhas de distribuição de energia



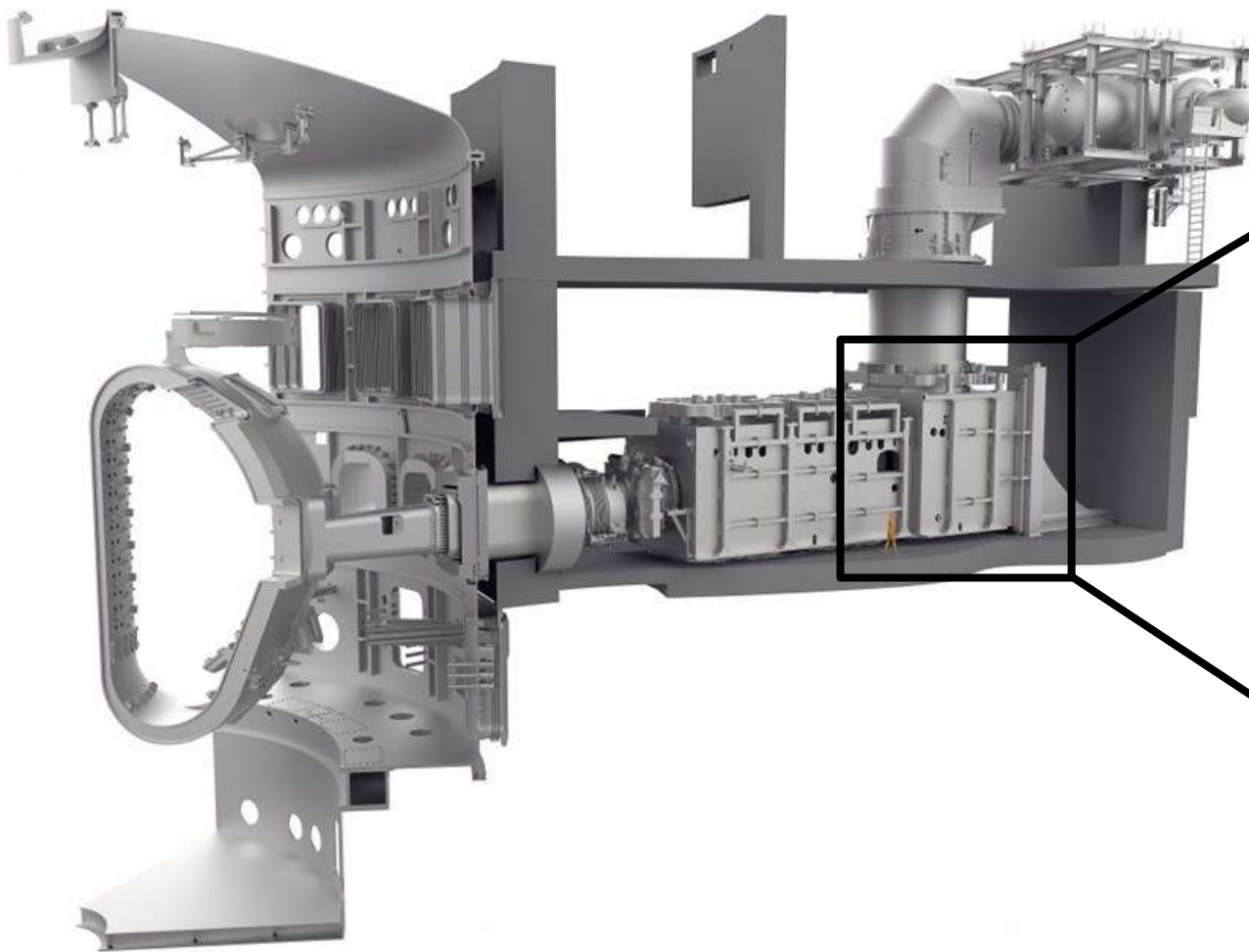
Trem com levitação magnética

Estudos conceituais para a máquina intermediária

- Estudos conceituais da máquina intermediária
- Bobinas supercondutoras
- **Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente**
- Materiais resistentes à altas temperaturas, altos fluxos de calor e radiação
- Diagnósticos de plasma
- Volantes de inércia de alta potência
- Fontes de potência de alto desempenho e sistema de controle de plasma

Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente são necessários para operar em condições próximas à $Q = 1$

- **Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente**
 - *Injeção de partículas neutras (NBI)*

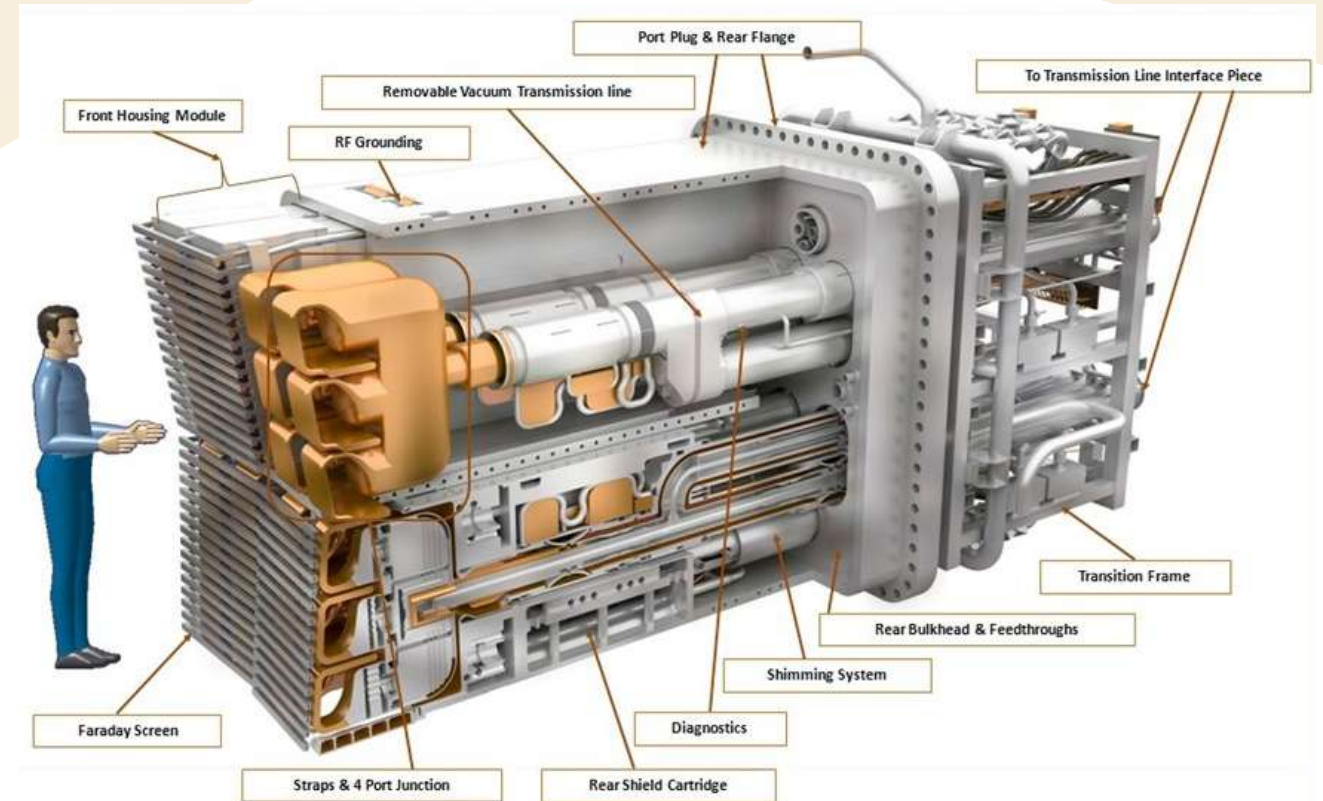


Teste de vácuo de componente do NBI do ITER

O objetivo atual não é desenvolver sistemas de NBI, mas treinar pesquisadores e engenheiros nessa área para operar tais sistemas

Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente são necessários para operar em condições próximas à $Q = 1$

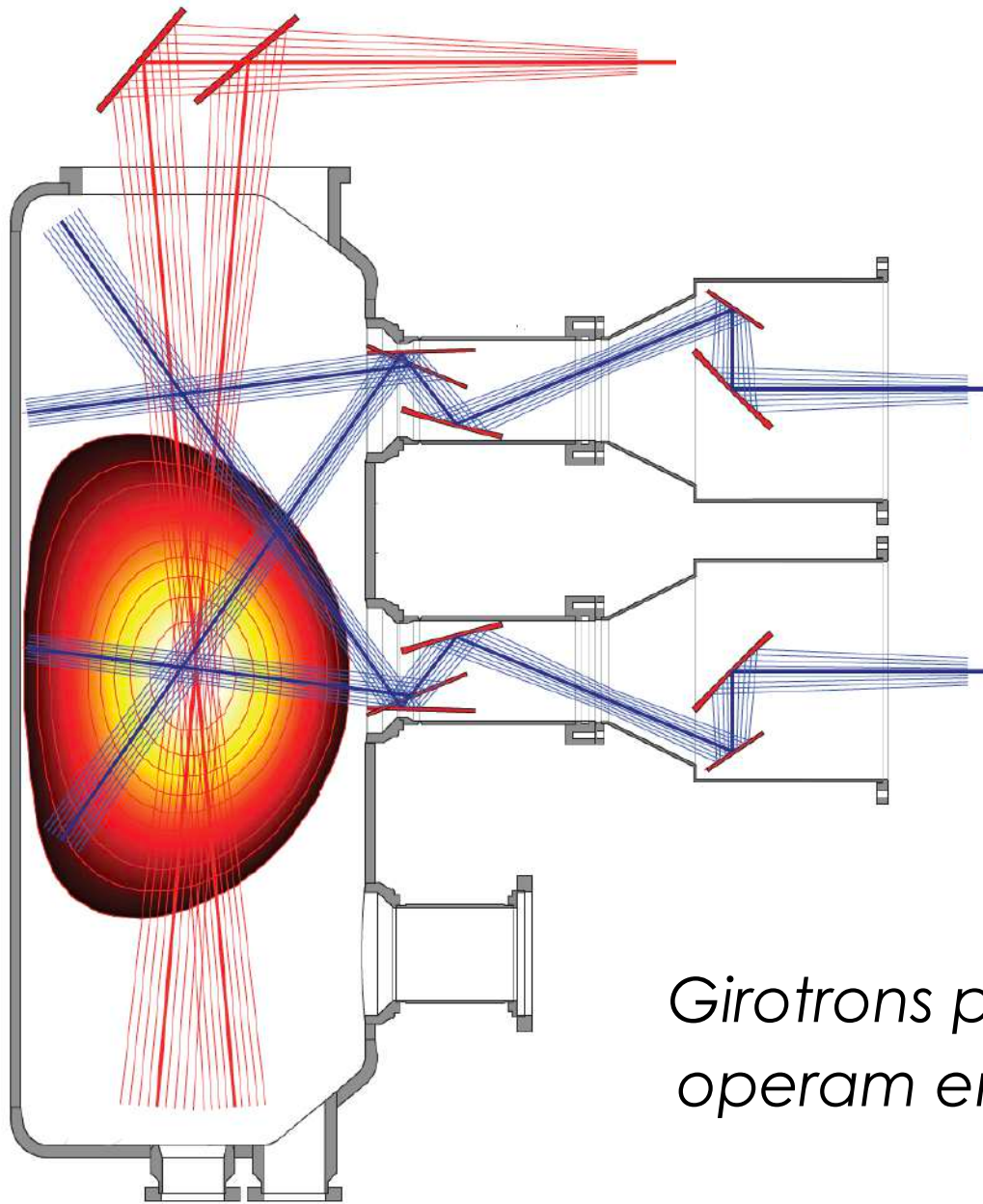
- Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente
 - Ressonância ionciclôtrônica (ICRH & ICCD)



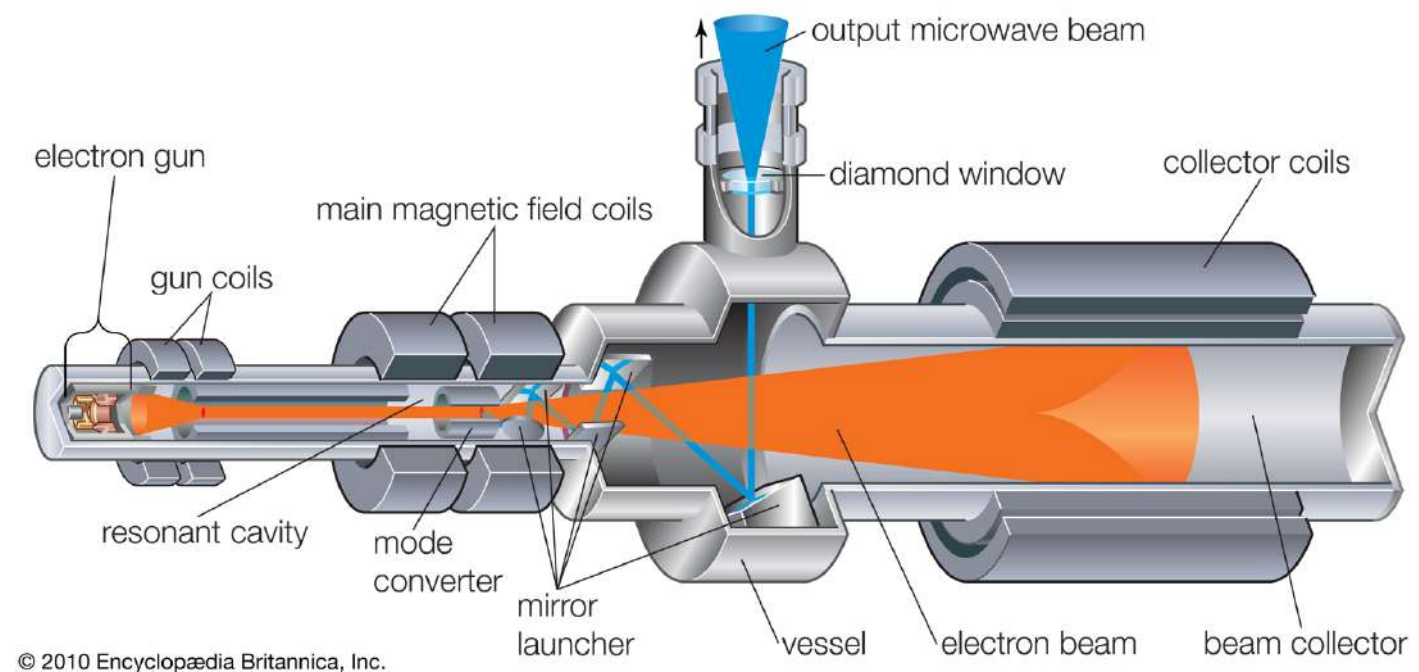
Antenas para excitação de ondas ionciclôtrônicas (IC) operam em frequências de dezenas de MHz

Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente são necessários para operar em condições próximas à $Q = 1$

- **Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente**
 - *Ressonância eletrociclôtrônica (ECRH & ECCD)*



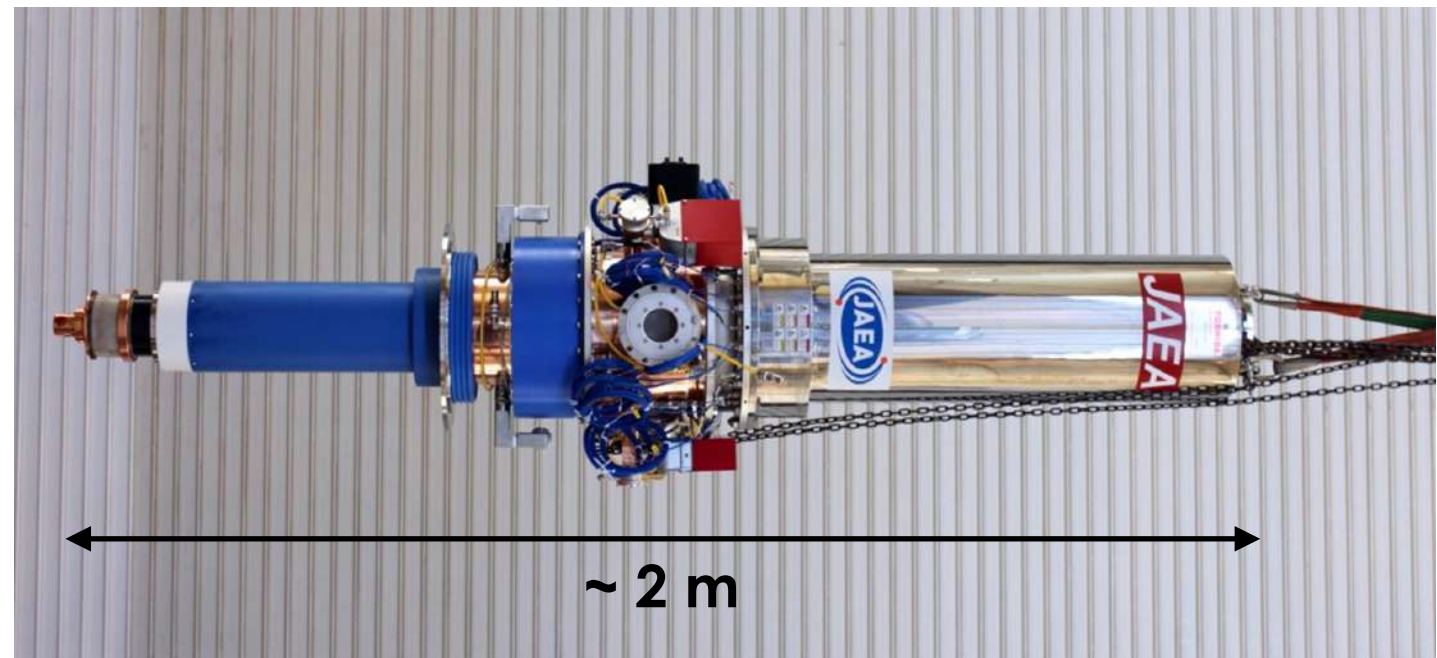
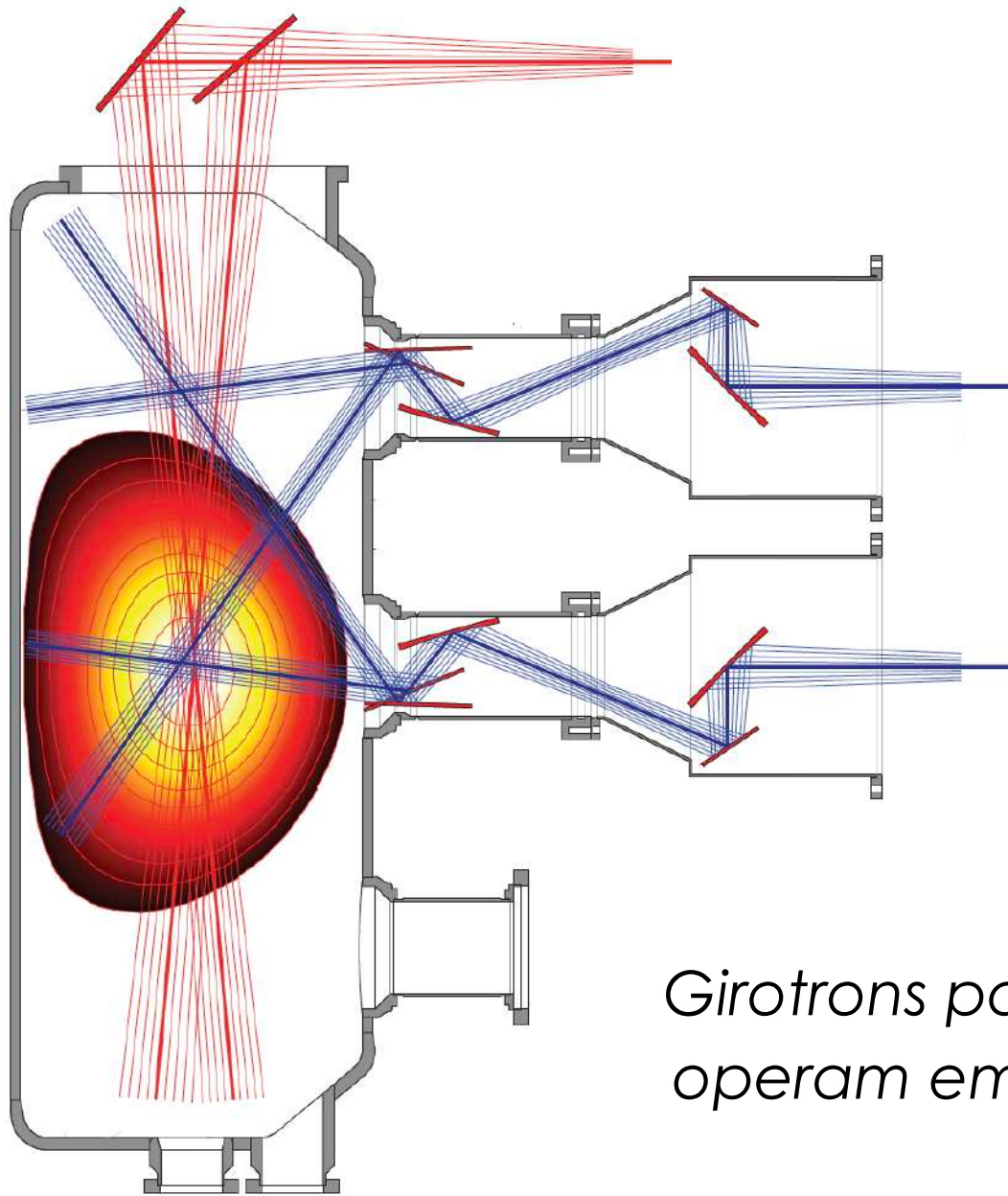
Sistema de injeção de ondas EC do tokamak TCV



Girotrons para excitação de ondas eletrociclôtrônicas (EC) operam em frequências de dezenas até centenas de GHz

Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente são necessários para operar em condições próximas à $Q = 1$

- **Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente**
 - *Ressonância eletrociclôtrônica (ECRH & ECCD)*

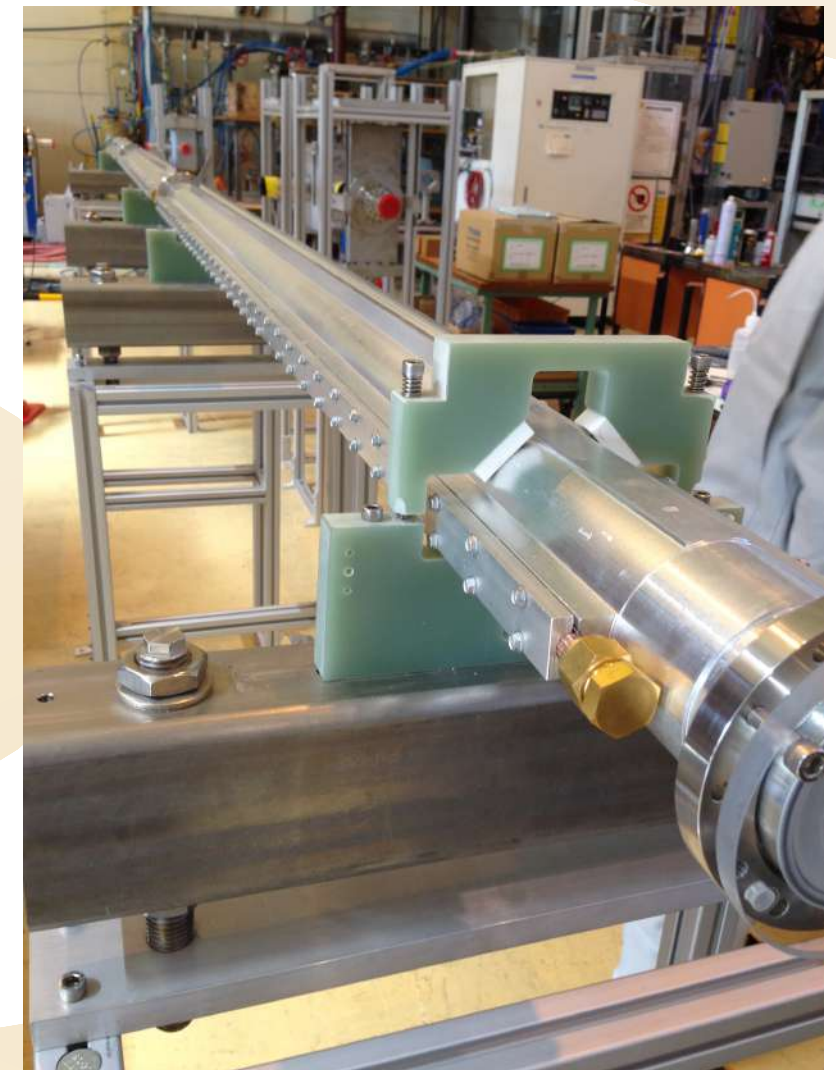
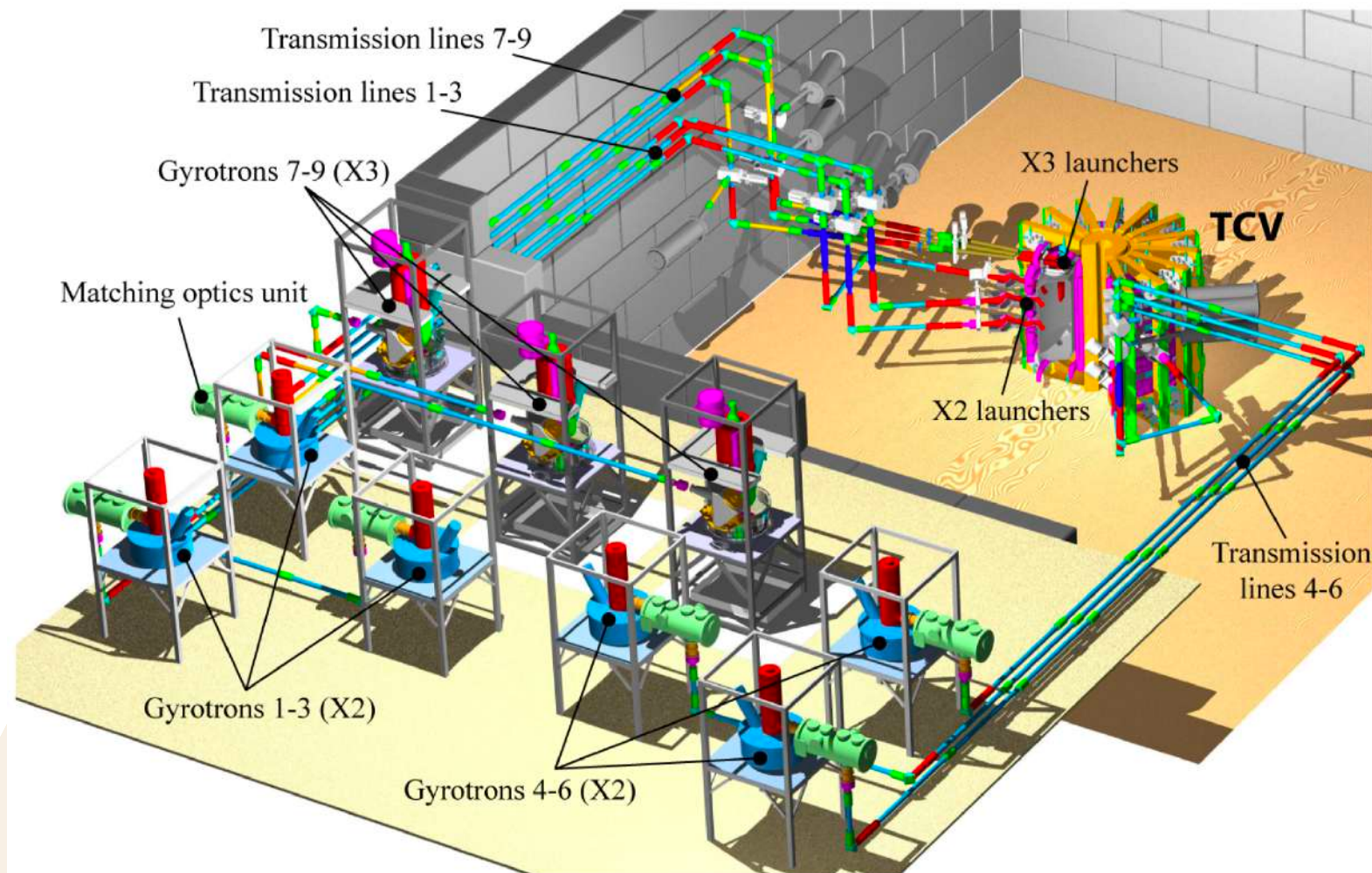


Girotrons para excitação de ondas eletrociclôtrônicas (EC) operam em frequências de dezenas até centenas de GHz

Sistema de injeção de ondas EC do tokamak TCV

Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente são necessários para operar em condições próximas à $Q = 1$

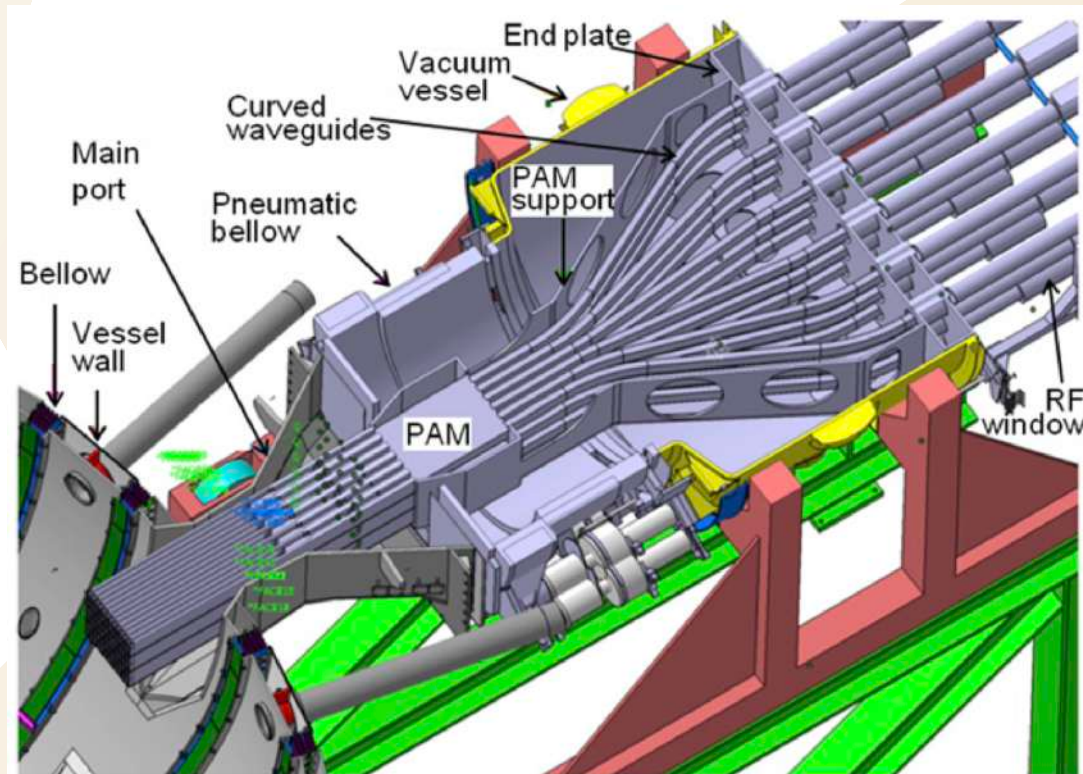
- Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente
 - Ressonância eletrociclôtrônica (ECRH & ECCD)



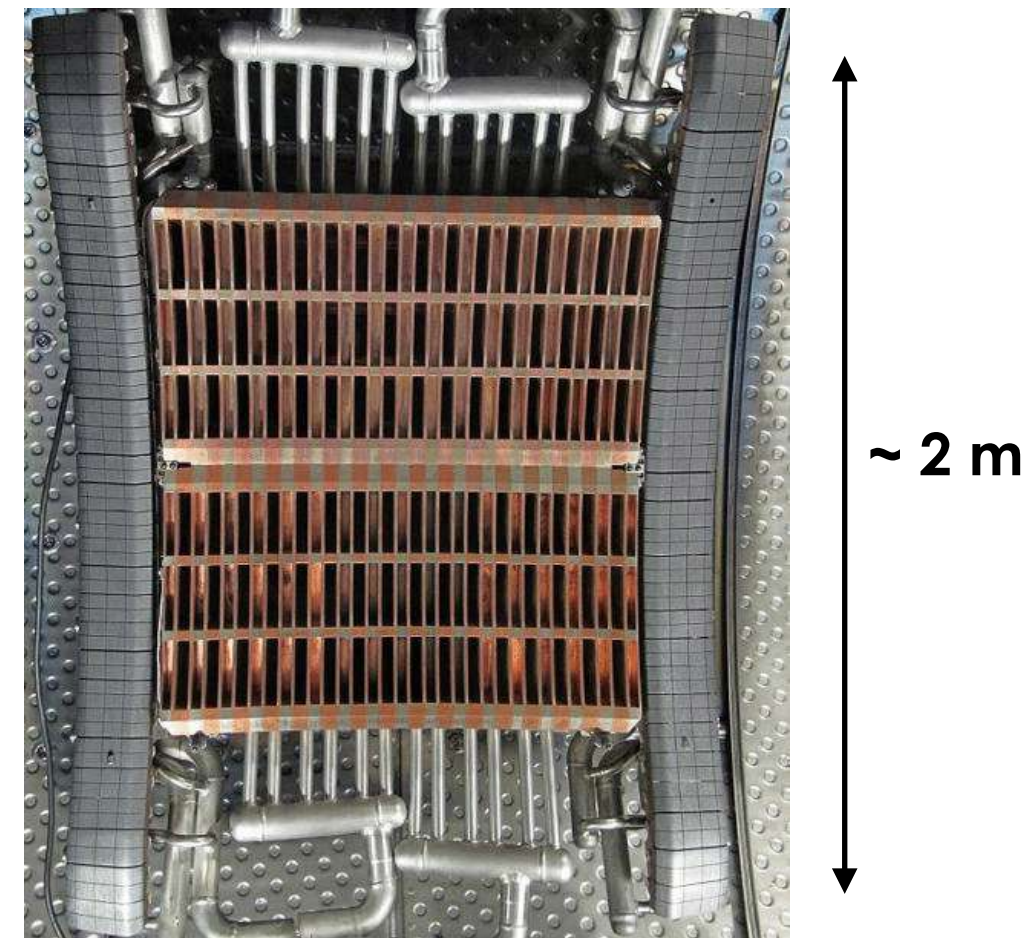
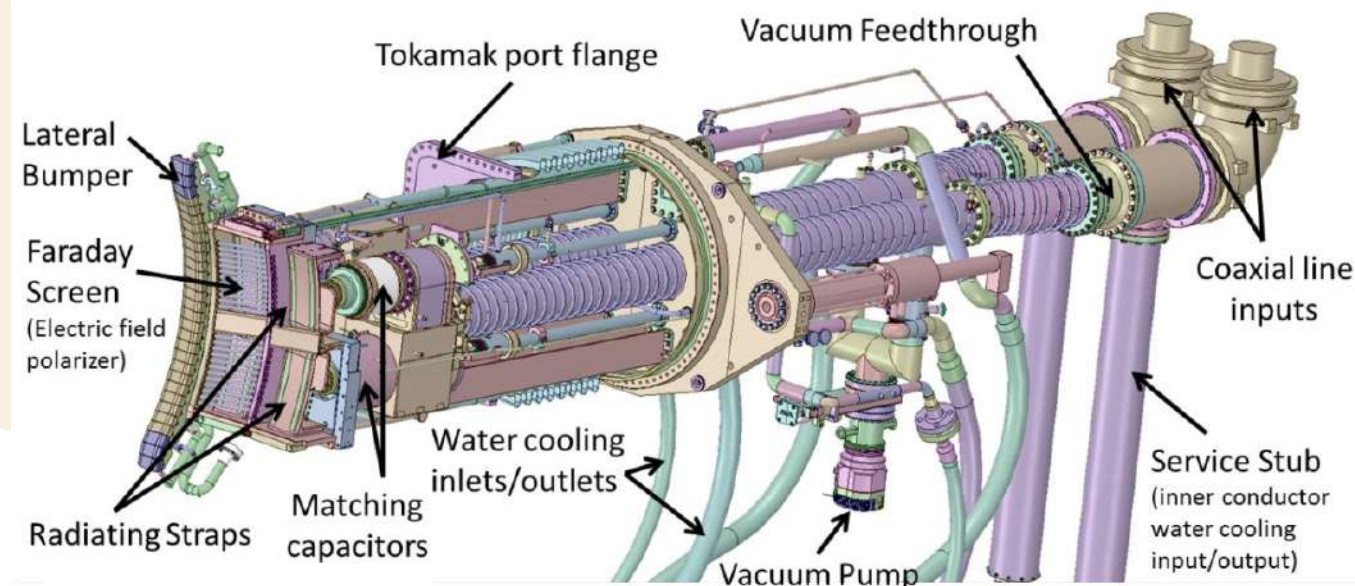
Guias-de-ondas evacuadas são essenciais para transportar as ondas EC até o tokamak

Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente são necessários para operar em condições próximas à $Q = 1$

- Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente
 - Excitação de ondas híbridas inferiores (LH)



Antenas para excitação de ondas híbrida inferior operam em frequências de poucos GHz



Estudos conceituais para a máquina intermediária

- Estudos conceituais da máquina intermediária
- Bobinas supercondutoras
- Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente
- **Materiais resistentes à altas temperaturas, altos fluxos de calor e radiação**
- Diagnósticos de plasma
- Volantes de inércia de alta potência
- Fontes de potência de alto desempenho e sistema de controle de plasma

O desenvolvimento de materiais resistentes à altas temperaturas, altos fluxos de calor e radiação é também de grande interesse

- O desenvolvimento de novos materiais tem aplicações em diversas áreas
 - Desviadores em tokamaks
 - Alto-fornos em usinas siderúrgicas
 - Revestimento de veículos espaciais



Estudos conceituais para a máquina intermediária

- Estudos conceituais da máquina intermediária
- Bobinas supercondutoras
- Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente
- Materiais resistentes à altas temperaturas, altos fluxos de calor e radiação
- **Diagnósticos de plasma**
- Volantes de inércia de alta potência
- Fontes de potência de alto desempenho e sistema de controle de plasma

Diagnósticos de plasma são essenciais para o desenvolvimento da fusão nuclear

- **Em tokamaks, diversos tipos de diagnósticos fornecem informações sobre o comportamento do plasma**
 - *Diagnósticos magnéticos (bobinas Rogowski, bobinas de enlace, sondas magnéticas, bobinas em sela, bobinas diamagnéticas)*
 - *Espalhamento Thomson*
 - *Reflectometria*
 - *Interferometria*
 - *Polarimetria*
 - *Electron cyclotron emission (ECE)*
 - *Sondas de Langmuir*
 - *Sondas Ball Pen*
 - *Espectroscopia óptica*
 - *Diagnósticos de imagem (visível e infravermelho)*
 - *Bolometria*
 - *Tomografia de raio-X de baixa (mole) e alta (duro) energia*
 - *Detectores de D_α*

Estudos conceituais para a máquina intermediária

- Estudos conceituais da máquina intermediária
- Bobinas supercondutoras
- Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente
- Materiais resistentes à altas temperaturas, altos fluxos de calor e radiação
- Diagnósticos de plasma
- **Volantes de inércia de alta potência**
- Fontes de potência de alto desempenho e sistema de controle de plasma

Volantes de inércia de alta capacidade são fundamentais para o desenvolvimento da fusão

- Volantes de inércia são responsáveis por suprir a altíssima potência instantânea necessária para manter plasmas em tokamaks



Foto tirada durante visita técnica ao tokamak TCV, Suíça

Volante de inércia de 220 MVA

Estudos conceituais para a máquina intermediária

- Estudos conceituais da máquina intermediária
- Bobinas supercondutoras
- Sistemas de aquecimento auxiliar e de geração não-indutiva de corrente
- Materiais resistentes à altas temperaturas, altos fluxos de calor e radiação
- Diagnósticos de plasma
- Volantes de inércia de alta potência
- Fontes de potência de alto desempenho e sistema de controle de plasma

Fontes de potência de alto desempenho são importantes para o controle de plasmas mas também para o outras aplicações

- O controle de plasma é realizado por fontes de potência rápidas, de 4 quadrantes e de alto desempenho
 - *Fotos tiradas durante visita técnica ao tokamak TCV, Suíça*



Fontes de potência de alto desempenho são importantes para o controle de plasmas mas também para o outras aplicações

- O controle de plasma é realizado por fontes de potência rápidas, de 4 quadrantes e de alto desempenho
 - *Fotos tiradas durante visita técnica ao tokamak KSTAR, Coreia do Sul*



Fontes de potência de alto desempenho são importantes para o controle de plasmas mas também para o outras aplicações

- Fontes de alta potência e alto desempenho são importantes em outras áreas
 - Locomotivas de trem/metrô
 - Excitatrizes de geradores elétricos



Trem elétrico

Gerador elétrico de uma hidroelétrica



O desenvolvimento da fusão nuclear está associado à avanços tecnológicos em várias áreas também de interesse nacional

É fundamental haver um envolvimento progressivo do setor privado nacional de modo que este absorva e domine as tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão nuclear