

Conversão de centrais termoelétricas em compensadores síncronos como medida de estabilidade da frequência dos SEE

António Mendes

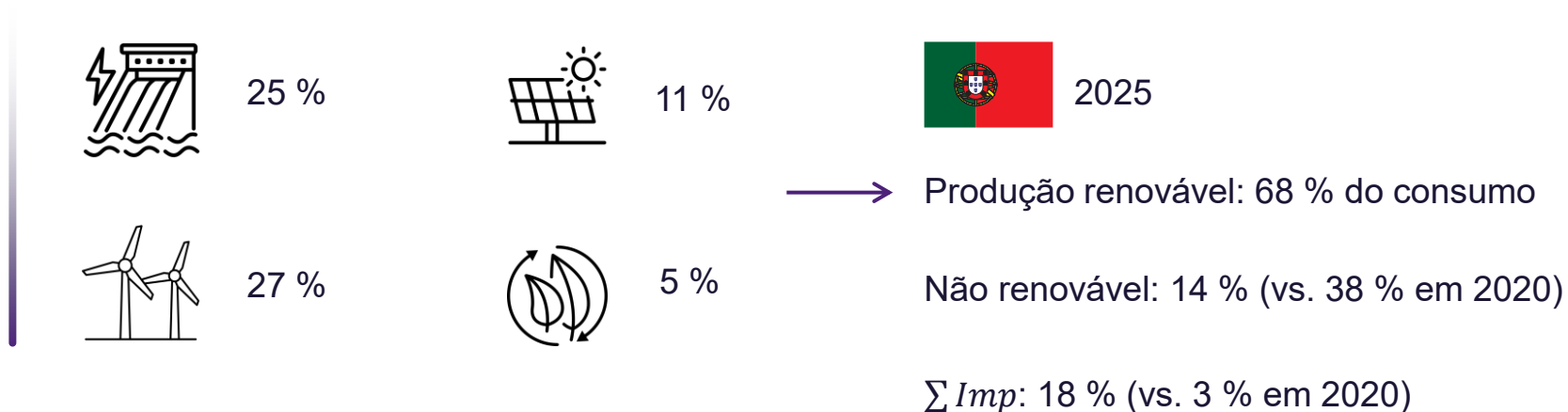
Orientador: Professor Doutor José António Beleza Carvalho



Contexto

Transição energética

- Mudança estrutural do sistema energético → Economia sustentável e descarbonizada
- Objetivo comum da EU: -55 % emissões de GEE* até 2030, neutralidade carbónica em 2050
- Setor da energia apresenta a maior quota de emissões, cabe-lhe o maior contributo:



*GEE – Gases com efeito de estufa

Contexto

- **Compromissos ambientais do Pacto ecológico:**

- ▣ Desativação gradual da geração térmica (síncrona)
- ▣ Integração crescente de Fontes de Energia Renovável

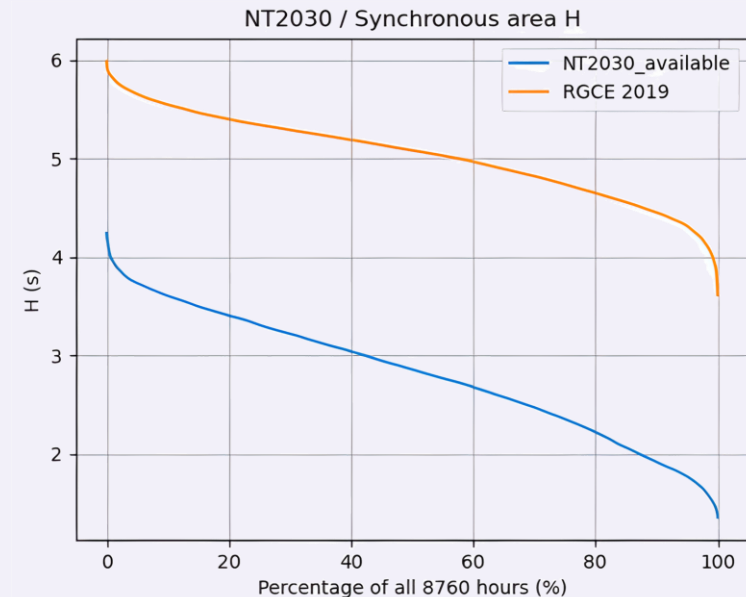
- **Novos desafios para a estabilidade dos SEE*:**

- ❖ Redução significativa da inércia
- ❖ Estabilidade da frequência → risco de *splits*

SEE* – Sistemas Eléctricos de Energia

A importância da inércia

- ❖ Essencial para a estabilidade e segurança dos SEE
- ❖ Capacidade do sistema em se opor a variações súbitas da frequência em situações de desequilíbrio
- ❖ Crescimento das FER → redução sucessiva da inércia



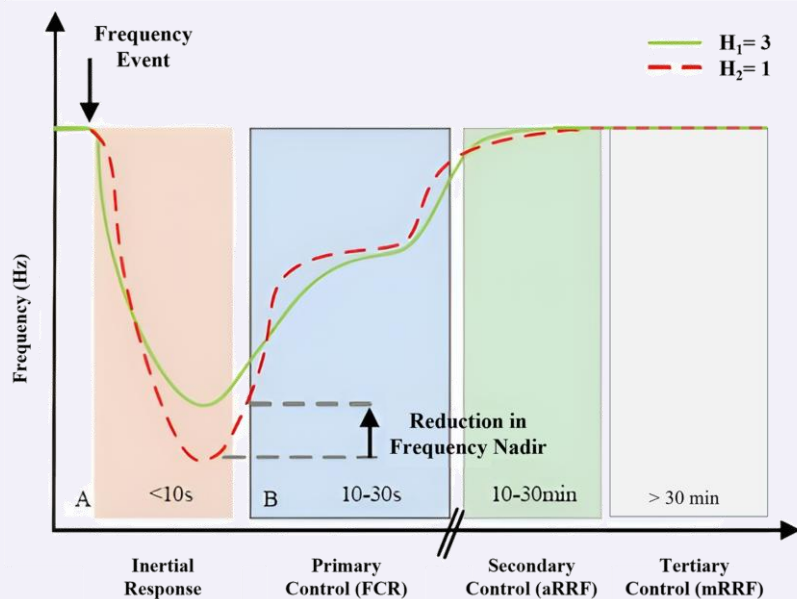
Contexto

Constantes típicas de inércia por tipo de produção na Europa continental

$$H_i = \frac{E_C}{S_n}$$

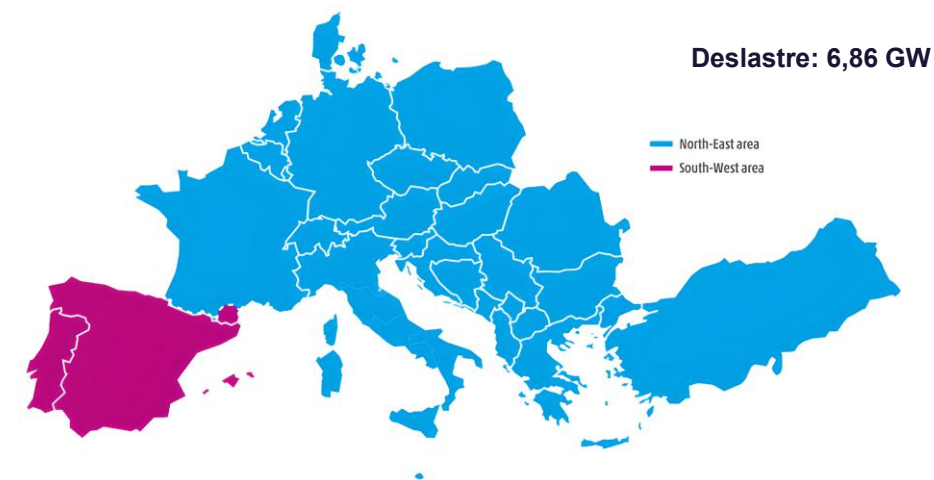
Tipo de produção	H (s)	Fator de carga
Nuclear	5,9	0,96
Térmica – gás, carvão	4,2	0,54 – 0,60
Hídrica – convencional	2,7 – 3,7	0,46 – 0,61
Eólica (GFL)	0	0
Solar (GFL)	0	0
Outros	3,3 – 3,8	0,50 – 0,83

Evolução f (Hz) após desequilíbrio entre sistemas de baixa e elevada inércia



Relação entre a inércia e a RoCoF

- $RoCoF \rightarrow$ taxa de variação da frequência $\rightarrow \frac{df}{dt}$
- $RoCoF = \frac{\Delta P}{H} \cdot \dots$ (inversamente proporcional)
- $RoCoF > 1 \text{ Hz/s} \rightarrow$ risco elevado de *splits* e *blackout*



Separação dos SEE da Península Ibérica da área síncrona da Europa Continental em 2021

Contexto

Medidas de resposta

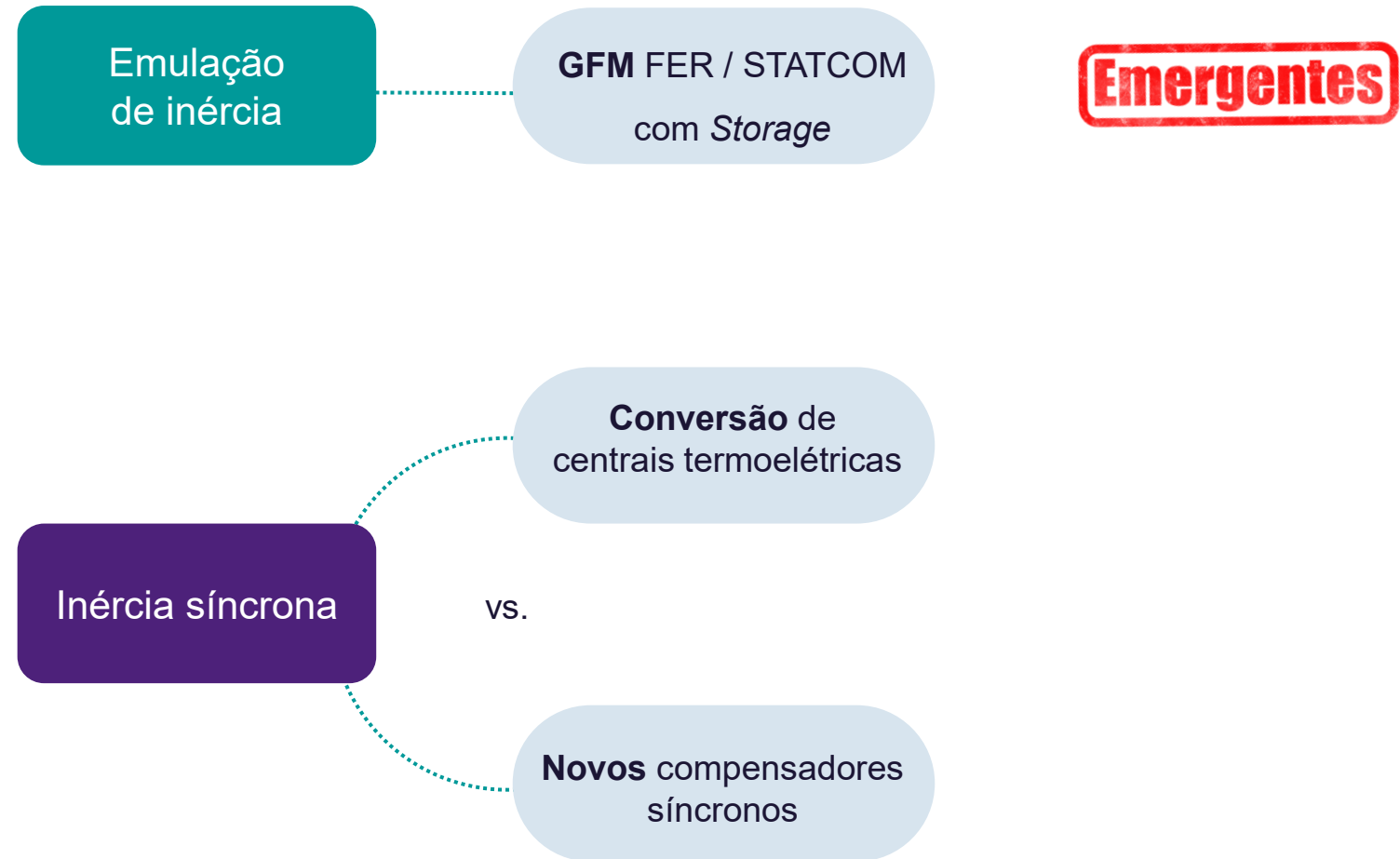
- ENTSO-E – Project Inertia Phase II: «**no-regret approach**»
 - ❖ Adoção imediata de medidas para elevar os níveis de inércia em toda a zona síncrona da Europa Continental
 - ❖ Reforço: 73 GWs no curto prazo, 267 GWs no médio e longo prazo → equivalente a cerca de 42 e 153 compensadores síncronos¹
 - ❖ Tecnologias: instalação de compensadores síncronos e compensadores estáticos equipados com *storage*

Procurement de Inércia

País / Região	Mercado ou <i>procurement</i>	Soluções de conversão	Novos compensadores	Investimentos	Notas
Portugal	–	Estudo	Sim	72 M€	A inércia ainda é assegurada pela produção convencional, hídrica e térmica. Previstas medidas alinhadas com os resultados do Projeto Inércia da ENTSO-E
Reino Unido	✓	Sim	Sim	> 1.300 M€	Stability Pathfinder → 56 SynCon ¹ + 5 GFM BESS, dos quais 29 recentemente Vários com origem em CCPP: Killingholme, Deeside, ...
Austrália	✓	Sim	Sim	> 670 M\$	System strength RIT-T → 42 SynCon + 10 GW GFM BESS
Irlanda	✓	–	Sim	> 400 M€	Moneypoint: 4.000 MWs SynCon, maior volante de inércia do mundo Shannonbridge B: 4.000 MWs SynCon + 65 MW / 160 MWh BESS
Alemanha	Q1 2026	Sim	Sim	n/a	Iniciado o mercado de inércia no Q1 2026.

¹ Tomando como referência um compensador síncrono, com potência nominal de 250 MVA e $H = 7$ s (elevada inércia)

Estado da arte



Emulação de Inércia

Conversão de GFL para GFM nas FER

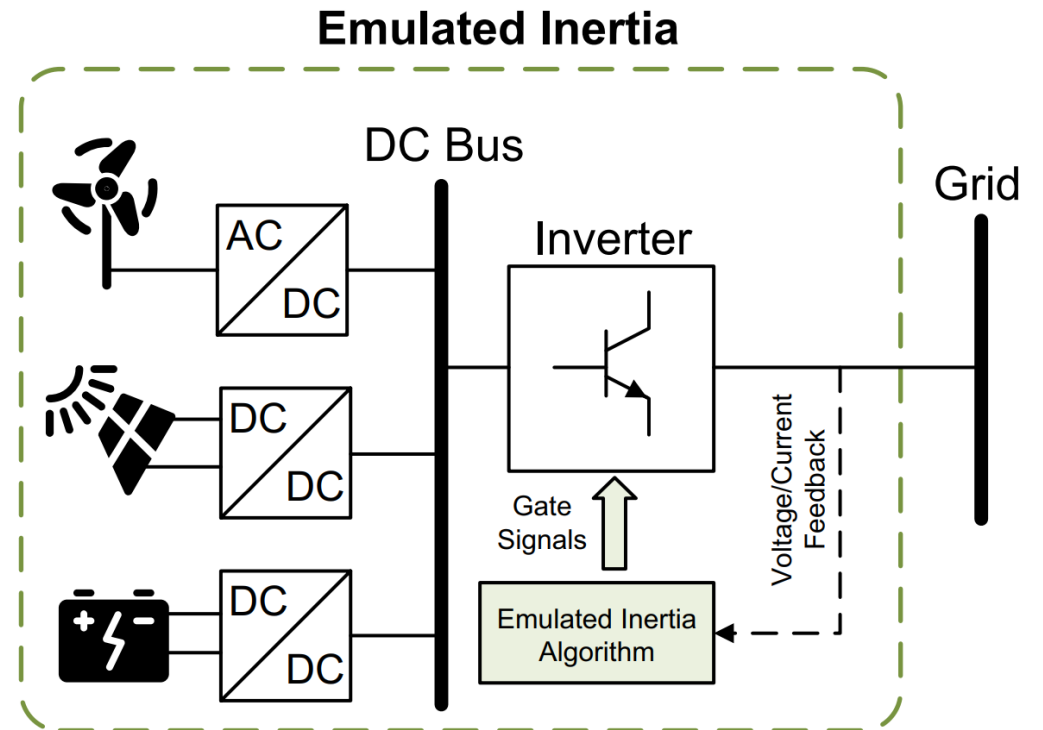
- Solar → Capacidade negligenciável (ausência de massas rotativas)
- Eólica → Inércia proveniente da energia cinética das pás

Battery Energy Storage Systems (BESS) + GFM

- Com recurso a baterias são capazes de emular uma resposta inercial e serviços de FFR (80-100 ms)
- Prova de conceito na Alemanha, U.K. e sul da Austrália

E-STATCOM + GFM

- Utilização de super-condensadores para emulação de inércia, energia armazenada limitada a poucos segundos para amortecer RoCoF
- Degradação durante a exploração muito inferior à das baterias
- Oferece inércia sem colocar em causa a arbitragem de energia



Conceito de emulação de inércia [M. Rezkalla, M. Pertl, e M. Marinelli].


Emulação de Inércia

Limitações

❖ Todas as funções partilham a mesma corrente total

- Saturação térmica dos semicondutores (~1,2 p.u.) limita as correntes de defeito e a sua resposta inerente durante a operação.

❖ Em distúrbios combinados de tensão e frequência

- Prioridade à reativa imposta pelo código de rede  Contributo para inércia é anulado (injeção de pot. ativa)
- A exigência acumulada de inércia e corrente de curto-circuito (SCL) inviabiliza soluções puramente eletrónicas.

❖ Custo do headroom (Opex)

- Obrigam ao curtailment da produção → perdas económicas
- Restrições no *procurement* de inércia em função do *headroom* (e na arbitragem)

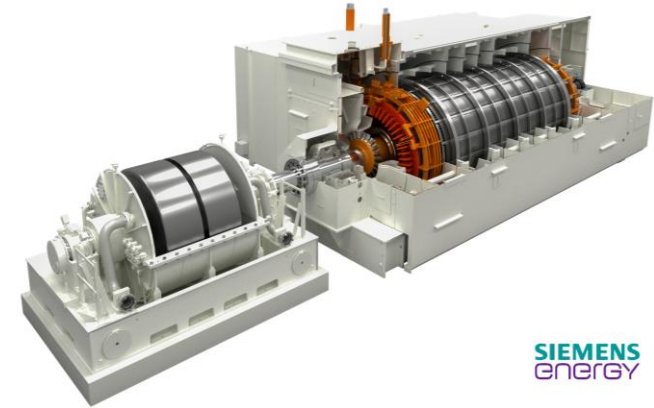
❖ Fiabilidade em larga escala

- Risco dos sistemas de proteção tradicionais em detetar falhas devido à natureza não-linear (e controlada por software proprietário) das corrente de defeito. Falta de quadro regulamentar para os GFM.

Compensadores síncronos

Aspetos gerais

- Máquina síncrona → principal fonte de corrente alternada nos SEE
- Compensadores síncronos presentes nos SEE há várias décadas



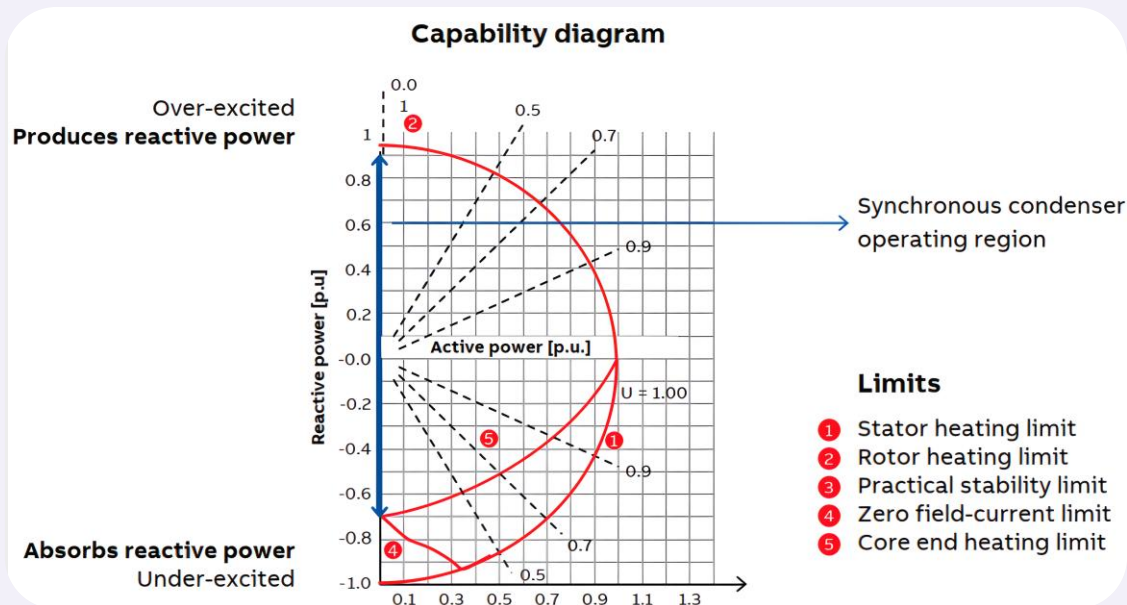
Exemplo de um compensador síncrono equipado com volante de inércia.

- **Consenso científico:** reconhecida como uma das soluções mais promissoras para assegurar a estabilidade dos SEE
- **Operam desacoplados** de qualquer acionamento primário:
 - ❖ Consomem potência ativa para manter a rotação síncrona com a rede e fornecer os contributos de estabilidade aos SEE. O seu comportamento assemelha-se ao de um motor síncrono, mas capaz de fornecer ou absorver potência reativa da rede.
 - ❖ Quando o rotor é sobre-excitado → a máquina fornece potência reativa à rede, comportando-se como um compensador
 - ❖ Quando o rotor é sub-excitado → a máquina consome potência reativa da rede, tal como uma carga indutiva

3. Compensadores síncronos

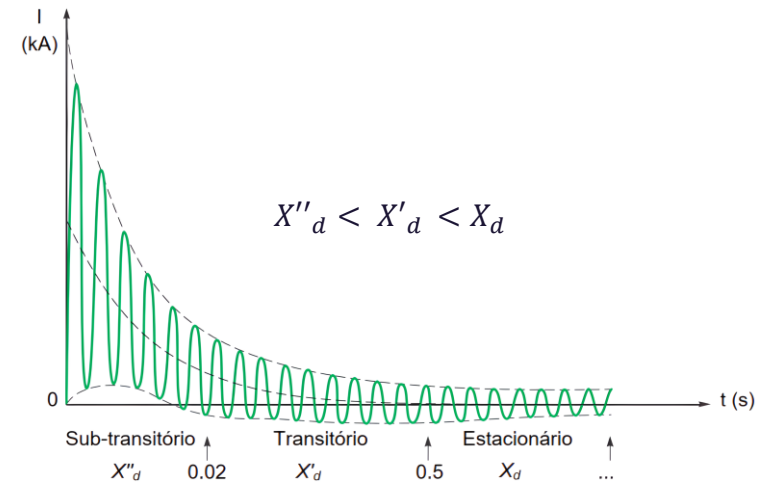
Contributos para a estabilidade

- Controlo de tensão → compensação energia reativa



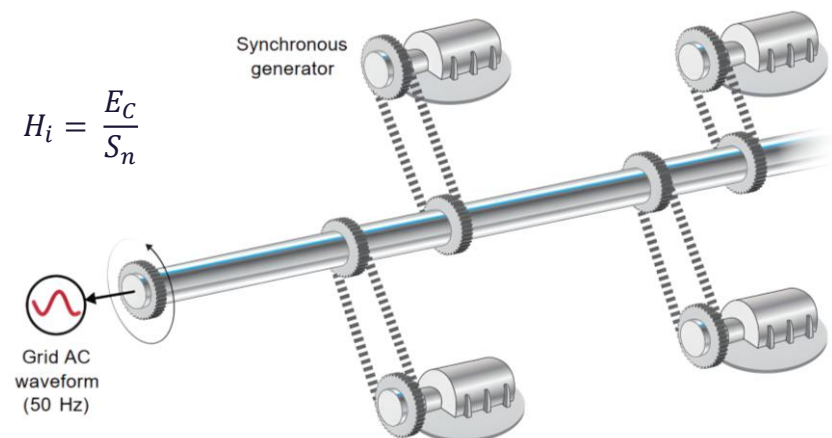
$$V_2 = V_1 - \frac{X}{V_1} \cdot Q - j \frac{X}{V_1} \cdot P$$

Reforço da potência de curto-circuito



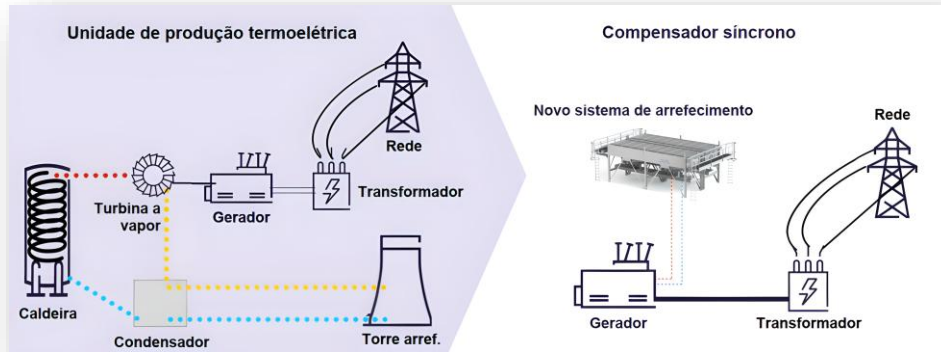
Evolução típica da corrente de curto-circuito de uma máquina síncrona após um defeito

Estabilidade da frequência – inércia rotacional

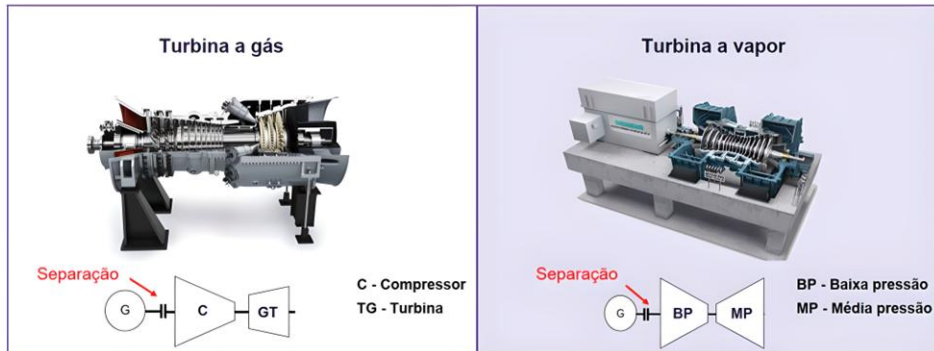


Conversão de centrais termoelétricas em compensadores síncronos

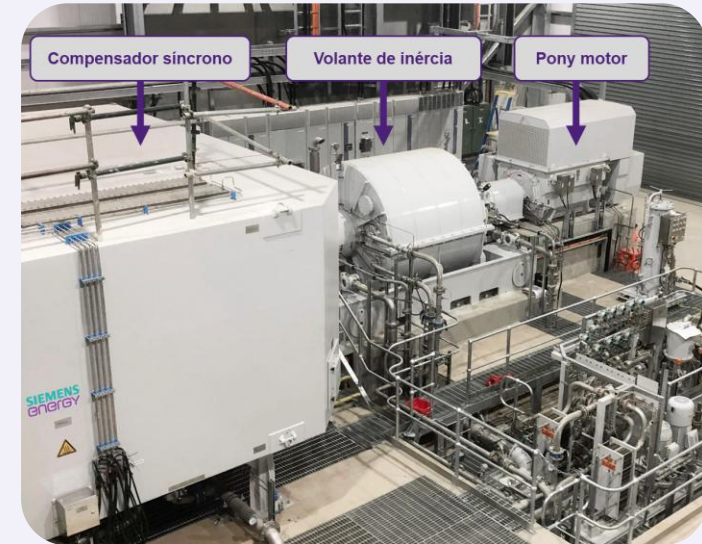
Conversão simples de uma central termoelétrica (a vapor)



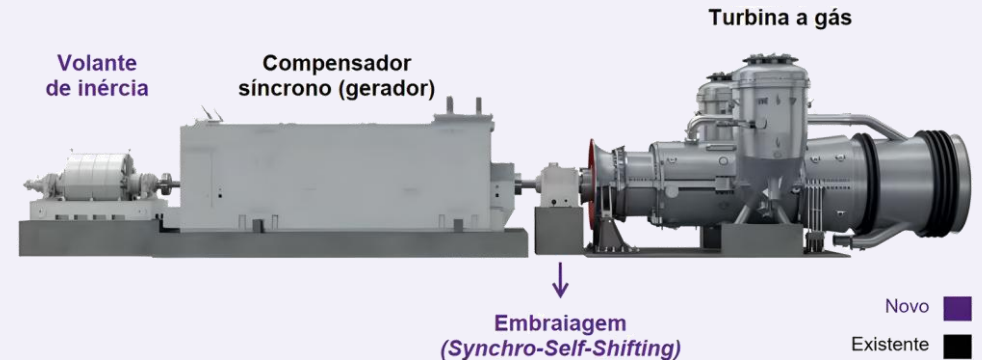
Ponto de desacoplamento entre a turbina (a gás ou a vapor) e a máquina síncrona



Conversão simples de uma central termoelétrica com adição de volante de inércia



Conversão de central termoelétrica em compensador síncrono de dupla operação



Compensadores síncronos

Construção de novos compensadores síncronos

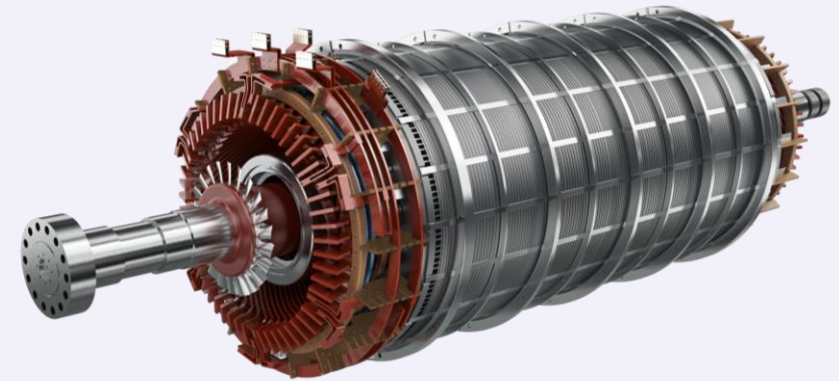
- Usualmente implica custos iniciais mais elevados
- Beneficia dos avanços tecnológicos → máquinas mais eficientes → custos de exploração inferiores

Centrais hidroelétricas

- Grupos hidroelétricos reversíveis habitualmente explorados para a regulação de tensão → acordos bilaterais com o ORT
- Pode comprometer a disponibilidade da central para a produção de energia e para o modo de bombagem

Soluções híbridas (emergentes)

- Associação de compensadores síncronos com *Storage* (ESS) ou compensadores estáticos (STATCOM)



Vista do rotor e do estator de uma máquina síncrona de 2 polos.

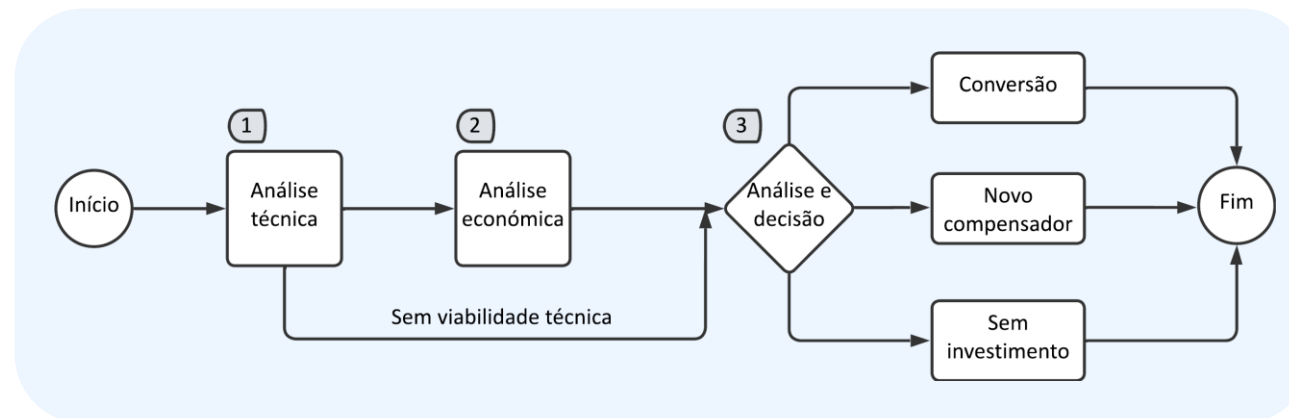
Comparação entre tecnologias

Tecnologia	Inércia	Controlo de tensão	Potência curto-circuito	TRL*	Vida útil (anos)
Compensador síncrono	Imediata	+	3 e 5 p.u.	9	40
Compensador estático (STATCOM)	–	++	1,2 p.u.	8	25
Inércia sintética (GFM FER)	~20 ms	++	1,2 p.u.	PV: 5 Wind: 7	15
Storage systems (GFM BESS)	~20 ms	++	1,2 p.u.	8	8-12

Metodologia proposta

Fundamentos e objetivos

- Metodologia de análise para a conversão de centrais termoelétricas em compensadores síncronos
 - ❖ Aproveitamento eficaz de ativos que de outro modo seriam descomissionados
 - ❖ Estabelecer critérios de viabilidade técnica e económica
 - ❖ Identificar os casos em que a conversão é mais vantajosa do que a construção de um novo compensador (ou vice-versa)

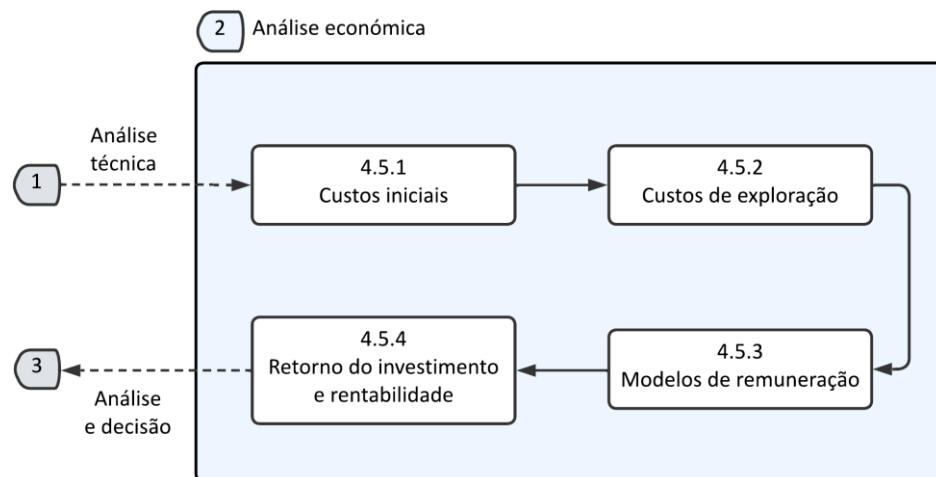


Fluxograma geral da metodologia de análise para a conversão de centrais termoelétricas em compensadores síncronos.

Metodologia proposta

II. Análise económica

- Objetivo: avaliar a viabilidade económica da conversão de uma central termoelétrica em compensador síncrono
 - ❖ Avaliação dos custos associados à conversão comparando-os com a construção de novos compensadores síncronos
 - ❖ Principais aspetos económicos a considerar ao longo das diferentes etapas e rubricas do ciclo de vida do projeto
 - ❖ Perspetiva do investimento segundo a entidade que financia e explora o projeto → remuneração e retorno do investimento



Fluxograma do processo de análise económica associado à conversão de centrais termoelétricas em compensadores síncronos

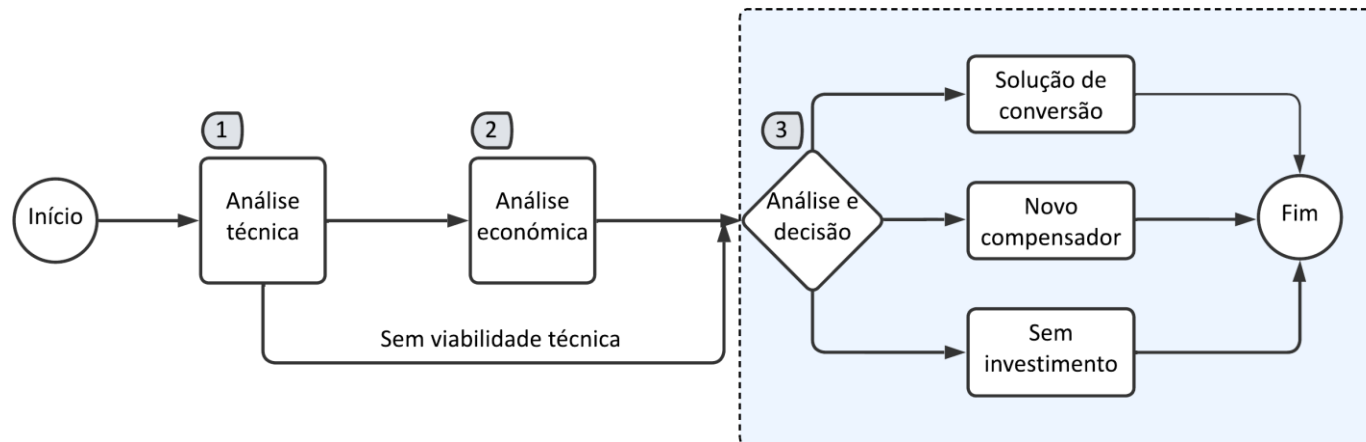
Rentabilidade

- Diversos estudos e casos práticos mostram que, em regra, um **período de exploração entre 10 e 15 anos** após a conversão permite recuperar o investimento inicial e alcançar uma **rentabilidade considerada atrativa**.
- Este período foi adotado como referência na análise técnica da conversão, representando o **tempo mínimo de vida útil dos equipamentos**.

Metodologia proposta

III. Análise e tomada de decisão

- Objetivo: sistematizar e suportar o processo de tomada de decisão relativo à implementação da conversão
 - ❖ Os resultados obtidos na análise técnica e económica servem de base ao processo de tomada de decisão
 - ❖ Definidos critérios para suportar a tomada de decisão
 - ❖ Tendo em conta os resultados obtidos em cada componente de análise será possível tomar uma de três decisões:

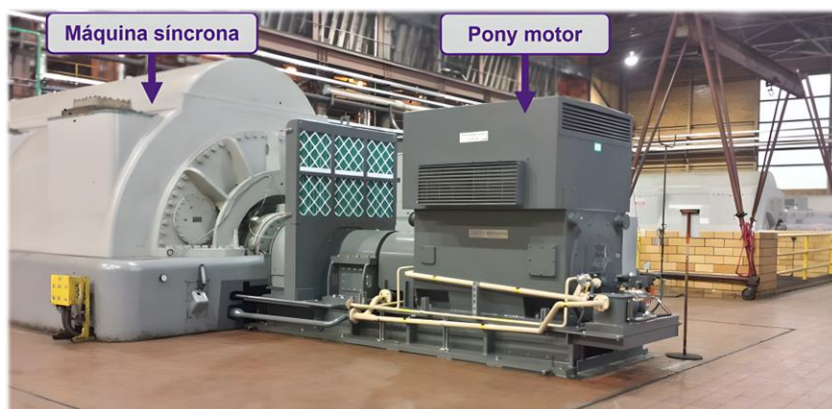


Fluxograma da metodologia com destaque para o processo de análise e tomada de decisão associado à conversão de centrais termoelétricas em compensadores síncronos.

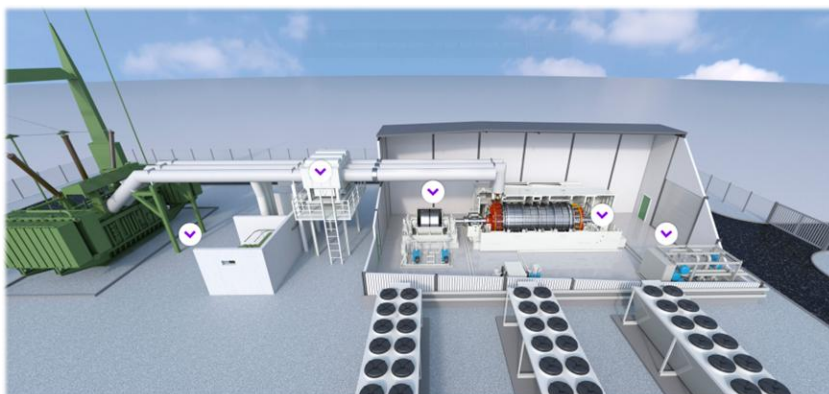
- ❖ **Solução de conversão:** quando se verifica, cumulativamente, a viabilidade técnica e económica.
- ❖ **Novo compensador:** no caso de não existir viabilidade técnica ou económica na conversão.
- ❖ **Sem investimento:** decisão de não implementar o projeto, caso nenhuma das soluções ofereça rentabilidade ou por motivos de natureza legal, regulatória ou de outro foro.

Conclusões da metodologia

Comparação global entre a solução de conversão e a construção de novos compensadores síncronos



Exemplo de um compensador síncrono obtido por conversão de uma central.



Exemplo de projeto de concepção de um novo compensador síncrono.

Resumo das principais vantagens e desvantagens da solução de conversão e da construção de novos compensadores síncrono

Critério	Solução de conversão	Novo compensador
Localização	Condicionada à localização da central existente	Estratégica, consoante as necessidades da rede
Ligação à rede	Existente, acelera o acesso à prestação de serviços	Nova ligação a criar, instalar e licenciar
Características técnicas	Limitadas aos equipamentos existentes	Dimensionadas à medida das necessidades
Manutenção	Mais frequente e de maior complexidade	Menos frequente e mais simples
Operação	Local, com pessoal técnico permanente	Remota, sem pessoal técnico permanente
Aproveitamento de ativos	Sim, reutilização dos equipamentos existentes	Não, todos os equipamentos são novos
Prazo de execução	6 a 18 meses	Superior a 30 meses
Perdas totais	Entre 1 e 2 %	Cerca de 1 %
Custos iniciais	Até 50 % inferiores, graças aos ativos existentes	Superiores, construção integral de uma nova solução
Custos de exploração	Superiores, devido às perdas e à operação local	Inferiores, graças à operação mais eficiente e automatizada
Vida útil	15 a 25 anos ^a	Até 40 anos

^a Assumindo que a conversão ocorre entre 15 e 25 anos após a colocação em serviço da central termoelétrica

Conclusões da metodologia

Potencial de conversão identificado

Melhores candidatas a uma conversão tecnicamente viável e economicamente atrativa...

➤ Centrais termoelétricas a gás natural

- Vida útil remanescente \geq 10 a 15 anos
- Comissionadas a partir de 2009
- Equipadas com GCB e comutador em carga OLTC



Pelo menos 100 grupos S > 160 MVA na janela de oportunidade



Lares e Pego → elevado potencial de conversão, comissionadas em 2009 e 2011



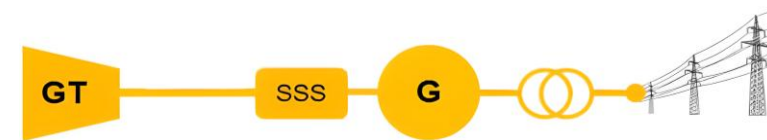
Tapada do Outeiro → conversão de sucesso na Austrália, solução tida como mais competitiva.

Estudo de caso

Seleção e caracterização da central

- Aplicação a um caso concreto, analisando passo a passo as etapas de análise técnica, económica e tomada de decisão
- Central termoelétrica localizada na zona síncrona de Victoria (Austrália), comissionada em 2012
- A central está equipada com dois grupos de produção, cada um constituído por uma turbina a gás e por uma máquina síncrona de fabrico Siemens, com as seguintes características principais:

- ❖ Potência aparente nominal: 333 MVA
- ❖ Potência ativa nominal: 283 MW, $\cos \varphi = 0,85$
- ❖ Tensão nominal: 20 kV $\pm 5\%$
- ❖ Frequência e velocidade nominais: 50 Hz, 3000 rpm
- ❖ Transformador elevador: 333 MVA, 20/510 kV



Power Generation Mode



Grid Stabilization Mode

Estudo de caso

Análise dos resultados

• Análise técnica

- ❖ Os resultados obtidos confirmam que a central em estudo dispõe de **capacidade técnica** adequada para fornecer os contributos de estabilidade aos SEE, nomeadamente ao nível da inércia, do controlo de tensão e do reforço da S_{CC}
- ❖ Concluiu-se pela **viabilidade técnica**, não se antecipando limitações à implementação das modificações necessárias relativamente aos trabalhos e sistemas considerados críticos para a conversão.

• Análise económica

- ❖ Os custos iniciais para a conversão da central estão estimados **em – 50 a 60 %** face à construção de raiz de um novo Syncon
- ❖ As perdas em funcionamento, que representam a maior fatia dos custos de exploração, são estimadas em cerca de 1,4 % da potência nominal, valor consistente com os dados de referência para este tipo de solução (entre 1,0 % e 2,0 %)

Estudo de caso

Análise dos resultados

- **Análise económica (cont.)**

- ❖ Os estudos realizados pela AEMO concluem que a rentabilidade nesta condições é atingida após cerca de 10 anos de exploração.
- ❖ Conclui-se pela **viabilidade económica** da conversão, assumindo válidos os pressupostos considerados nos modelos financeiros da AEMO e dos ORT, e que estes sejam igualmente atrativos para o *asset owner*.

- **Análise e tomada de decisão**

- ❖ Conclui-se que estão reunidas, cumulativamente, as condições técnicas e económicas necessárias para **suportar favoravelmente a decisão pela conversão da central termoelétrica em compensador síncrono.**

Estudo de caso

Análise dos resultados

- Metodologia

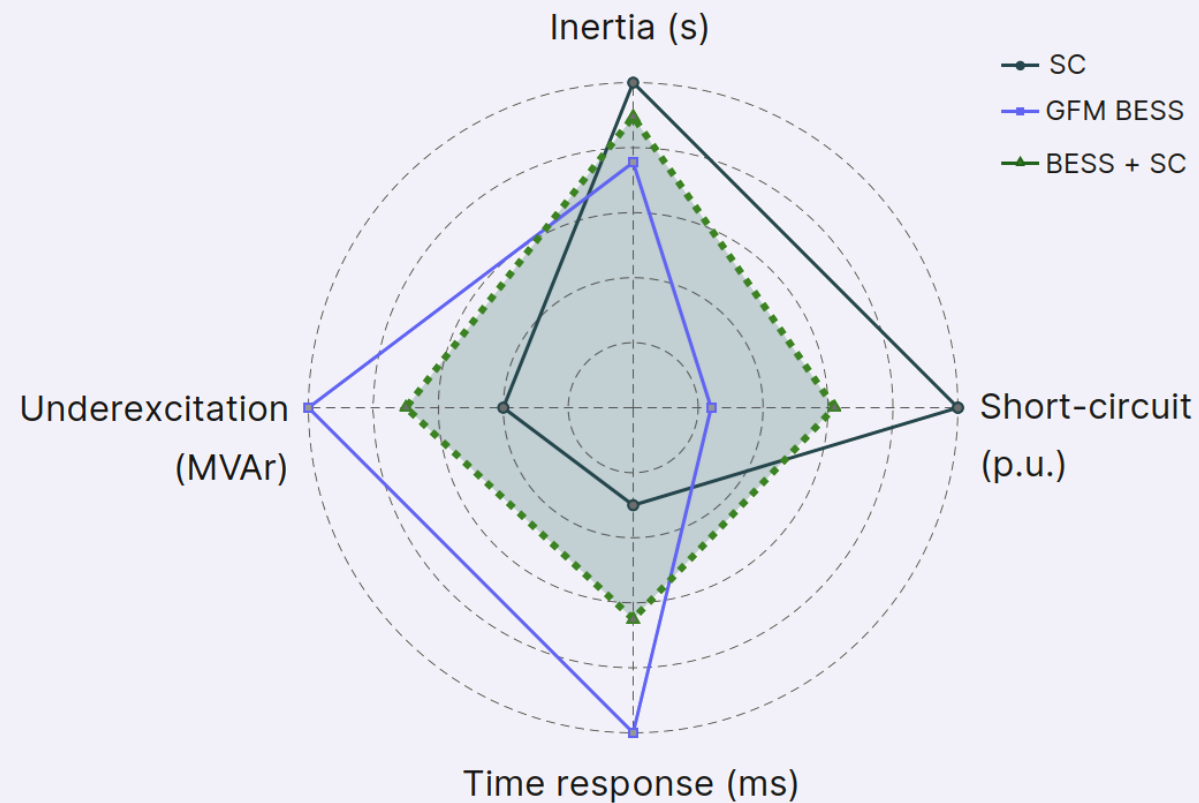
- ❖ **Modelo prático e replicável a diferentes contextos de conversão e a várias tipologias** de centrais termoelétricas.
- ❖ A análise dos resultados confirma não só a **viabilidade de conversão do caso de estudo, como demonstra também a eficácia da metodologia proposta**, sublinhando a sua utilidade em futuros processos de conversão.
- ❖ Constitui, adicionalmente, **um guia técnico para a conversão**, ao identificar e tratar os aspetos mais relevantes, o seu peso na viabilidade do projeto, as diferentes alternativas técnicas possíveis, as respetivas vantagens e desvantagens, formulando critérios para apoiar a análise e a tomada de decisão.

Conclusões

- ❖ **A solução de conversão** representa uma oportunidade promissora para rentabilizar ativos que de outro modo seriam imobilizados e, em vários casos, ainda dispõem de períodos de vida útil significativos.
- ❖ Além disso, **apresenta um potencial elevado na redução de custos** com a estabilidade dos SEE, **sendo até 50 % inferiores aos da construção de novos compensadores**, e com **prazos de implementação mais reduzidos**.
- ❖ **As centrais termoelétricas** podem desempenhar um (novo) papel essencial na transição energética, **convertendo-se em facilitadoras das redes elétricas do futuro através da sua conversão em compensadores síncronos**, criando as condições para que a integração das FER decorra com normalidade e sem comprometer os níveis de fiabilidade.

Trabalho futuro

- Fatores que, ao serem acrescentados na análise, poderão enriquecê-la ainda mais:
 - ❖ Integrar uma análise dos impactos ambientais e do uso sustentável de matérias-primas críticas
 - ❖ Alargar a metodologia à implementação de sistemas híbridos.
 - Explorar cenários onde seja benéfica a associação de compensadores síncronos a BESS ou STATCOM.



SC, BESS and Hybrid SC solutions Comparison [GE Vernova].

Obrigado.