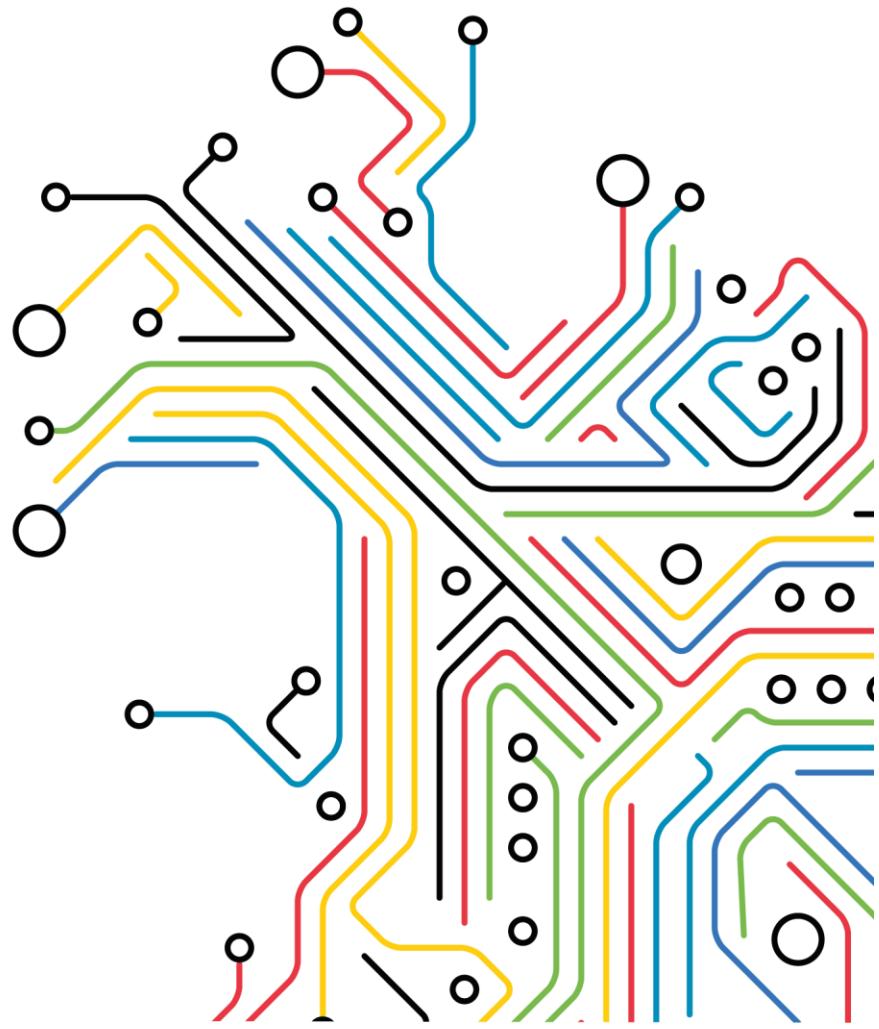


Estudo de integração de uma central solar fotovoltaica híbrida de 8 MW na ilha do Pico

Junho 2023







Controlo Documental

Identificação Documento

Nome Projeto	Estudo de integração de uma central solar fotovoltaica híbrida de 8 MW na ilha do Pico
Ordem Interna	PP2022-336
Título Documento	Estudo de integração de uma central solar fotovoltaica híbrida de 8 MW na ilha do Pico
Título Ficheiro	PV_Pico_FA_2023_VF.pdf

Controlo Versões

Edição	Revisão	Data	Descrição	Revisor
0.1	0	06/06/2023	Versão preliminar 1	Manuel Castro
0.2	1	06/06/2023	Versão preliminar 2	Carlos Moreira
0.3	2	07/06/2023	Versão preliminar 3	João Peças Lopes
1	3	07/06/2023	Versão final	Manuel Castro

Responsável pelo Documento

Nome	Contacto
Manuel Castro	manuel.v.castro@inesctec.pt
Carlos Moreira	carlos.moreira@inesctec.pt
João Peças Lopes	joao.p.lopes@inesctec.pt



Índice

1	Introdução	8
1.1	Contexto e Objetivos	8
1.2	Estrutura do Documento	8
2	Descrição da Central Solar Fotovoltaica Híbrida	9
2.1	Rede Interna	9
2.2	Breve Caracterização do Modelo de Simulação dos Conversores Solares e dos SAE	11
3	Análise em Regime Estacionário	14
3.1	Descrição	14
3.2	Resultados	16
4	Análise em Regime Dinâmico	22
4.1	Cenários de operação	22
4.2	Análise da Capacidade de Sobrevivência a Cavas de Tensão	25
4.3	Análise da Capacidade de Redução Automática de Potência Ativa Face ao Aumento de Frequência	48
5	Conclusões	63
6	Referências	64
7	Apêndice	65

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema da rede elétrica da CSFH, ligada à rede de distribuição e transporte da ilha do Pico no Pol	10
Figura 2. Diagrama de blocos geral do modelo dinâmico dos conversores [2]	12
Figura 3. Ilustração da curva de injeção de corrente reativa em função da tensão do modelo SMASC em modo FRT completo [2]	13
Figura 4. Curva de redução de potência ativa em função da frequência no modo de estatismo $P(f)$ [2] ..	14
Figura 5. Curva característica P/Q dos conversores a instalar na CSFH	15
Figura 6. Curva PQ referente à análise em regime estacionário – Cenário A.1 no Pol	17
Figura 7. Curva PQ referente à análise em regime estacionário – Cenário A.2 no Pol	19
Figura 8. Curva PQ referente à análise em regime estacionário – Cenário B.1 no Pol	20
Figura 9. Curva PQ referente à análise em regime estacionário – Cenário B.2 no Pol	22
Figura 10. Diagramas de cargas típicos fornecidos pela EDA e pontos do diagrama escolhidos para a definição dos cenários (considerando um ligeiro aumento de carga)	25
Figura 11. Resposta da corrente ativa da CSFH no Pol – Cenário 1	26
Figura 12. Resposta da corrente reativa da CSFH no Pol – Cenário 1	27
Figura 13. Resposta da potência ativa no Pol da CSFH – Cenário 1	28
Figura 14. Resposta da potência reativa no Pol da CSFH – Cenário 1	28
Figura 15. Velocidade do gerador síncrono (em cima – tempo total de simulação, em baixo – detalhe dos 0 a 3 s) – Cenário 1	29
Figura 16. Tensão no ponto de ligação da CSFH – Cenário 1	30
Figura 17. Resposta da corrente ativa da CSFH no Pol – Cenário 2	31
Figura 18. Resposta da corrente reativa da CSFH no Pol – Cenário 2	31
Figura 19. Resposta da potência ativa no Pol da CSFH – Cenário 2	32
Figura 20. Resposta da potência reativa no Pol da CSFH – Cenário 2	32
Figura 21. Velocidade do gerador síncrono (em cima – tempo total de simulação, em baixo – detalhe dos 0 a 3 s) – Cenário 2	33
Figura 22. Tensão no ponto de ligação da CSFH – Cenário 2	34
Figura 23. Resposta da corrente ativa da CSFH no Pol – Cenário 3	35
Figura 24. Resposta da corrente reativa da CSFH no Pol – Cenário 3	35
Figura 25. Resposta da potência ativa no Pol da CSFH – Cenário 3	36
Figura 26. Resposta da potência reativa no Pol da CSFH – Cenário 3	36
Figura 27. Velocidade do gerador síncrono (em cima – tempo total de simulação, em baixo – detalhe dos 0 a 3 s) – Cenário 3	37
Figura 28. Tensão no ponto de ligação da CSFH – Cenário 3	38
Figura 29. Resposta da corrente ativa da CSFH no Pol – Cenário 4	39
Figura 30. Resposta da corrente reativa da CSFH no Pol – Cenário 4	39
Figura 31. Resposta da potência ativa no Pol da CSFH – Cenário 4	40
Figura 32. Resposta da potência reativa no Pol da CSFH – Cenário 4	41
Figura 33. Velocidade do gerador síncrono (em cima – tempo total de simulação, em baixo – detalhe dos 0 a 3 s) – Cenário 4	42
Figura 34. Tensão no ponto de ligação da CSFH – Cenário 4	43
Figura 35. Resposta da corrente ativa da CSFH no Pol – Cenário 5	44
Figura 36. Resposta da corrente reativa da CSFH no Pol – Cenário 5	44
Figura 37. Resposta da potência ativa no Pol da CSFH – Cenário 5	45
Figura 38. Resposta da potência reativa no Pol da CSFH – Cenário 5	45

Figura 39. Velocidade do gerador síncrono (em cima – tempo total de simulação, em baixo – detalhe dos 0 a 3 s) – Cenário 5	46
Figura 40. Tensão no ponto de ligação da CSFH – Cenário 5	47
Figura 41. Velocidade do gerador síncrono para os diferentes casos – Cenário 1	49
Figura 42. Resposta da CSFH em termos de potência ativa no ponto de ligação – Cenário 1	50
Figura 43. Resposta de potência ativa do gerador síncrono e BESS (em primeiro - caso1, em segundo - caso2 e em terceiro - caso3) – Cenário 1	51
Figura 44. Velocidade do gerador síncrono para os diferentes casos – Cenário 2	52
Figura 45. Resposta da CSFH em termos de potência ativa no ponto de ligação – Cenário 2	52
Figura 46. Resposta de potência ativa do gerador síncrono e BESS (em primeiro - caso1, em segundo - caso2 e em terceiro - caso3) – Cenário 2	54
Figura 47. Velocidade do gerador síncrono para os diferentes casos – Cenário 3	54
Figura 48. Resposta da CSFH em termos de potência ativa no ponto de ligação – Cenário 3	55
Figura 49. Resposta de potência ativa do gerador síncrono e BESS (em primeiro - caso1, em segundo - caso2 e em terceiro - caso3) – Cenário 3	57
Figura 50. Velocidade do gerador síncrono para os diferentes casos – Cenário 4	57
Figura 51. Resposta da CSFH em termos de potência ativa no ponto de ligação – Cenário 4	58
Figura 52. Resposta de potência ativa do gerador síncrono e BESS (em primeiro - caso1, em segundo - caso2 e em terceiro - caso3) – Cenário 4	60
Figura 53. Velocidade do gerador síncrono para os diferentes casos – Cenário 5	61
Figura 54. Resposta da CSFH em termos de potência ativa no ponto de ligação – Cenário 5	61
Figura 55. Resposta de potência ativa do gerador síncrono e BESS (em primeiro - caso1, em segundo - caso2 e em terceiro - caso3) – Cenário 5	63
Figura 56. Esquema unifilar do sistema elétrico da ilha do Pico e localização do curto-círcuito considerado.....	65



Índice de Tabelas

Tabela 1. Parâmetros elétricos do conversor solar da SMA do tipo Sunny Central 4000 UP(-US) (SMASC SC 4000 UP(-US)).....	9
Tabela 2. Parâmetros elétricos dos SAE da SMA do tipo Sunny Central Storage 2660 UP(-US) (SMASC SC 2660 UP(-US)).....	9
Tabela 3. Tabela resumo dos condutores da rede da CSFH.....	10
Tabela 4. Características elétricas dos condutores considerados	11
Tabela 5. Características elétricas dos transformadores considerados	11
Tabela 6. Parametrização do modelo SMASC em modo FRT [2]	12
Tabela 7. Parametrização do modelo SMASC em modo de estatismo P(f) [2].....	13
Tabela 8. Resultados referentes à análise em regime estacionário – Cenário A.1.....	16
Tabela 9. Resultados referentes à análise em regime estacionário – Cenário A.2 no Pol A	18
Tabela 10. Resultados referentes à análise em regime estacionário – Cenário B.1 no Pol.....	20
Tabela 11. Resultados referentes à análise em regime estacionário – Cenário B.2 no Pol.....	21
Tabela 12. Definição dos cenários de operação.	25

1 Introdução

1.1 Contexto e Objetivos

O trabalho de consultoria técnica apresentado neste relatório tem como principais objetivos a avaliação do impacto resultante da integração de uma central solar fotovoltaica híbrida com potência instalada de 8 MW, no sistema eletroprodutor da ilha do Pico, bem como a avaliação da sua capacidade para disponibilizar serviços avançados de suporte à operação da rede.

O presente relatório documenta os estudos demonstrativos que foram executados tendo por base os requisitos definidos pelo operador de rede (Eletrociade dos Açores, S.A. – EDA), assim como as conclusões/recomendações mais relevantes que foram identificadas. Em termos gerais, os estudos efetuados consistiram na avaliação do comportamento em regime estacionário e dinâmico da referida central e do impacto que esta aporta ao sistema eletroprodutor da ilha do Pico nos seguintes termos:

- Análise em regime estacionário, onde se pretende avaliar a capacidade de controlo (injeção e consumo) de potência reativa nas interligações da central solar fotovoltaica híbrida (CSFH) com a rede de transporte/distribuição da ilha do Pico;
- Análise em regime dinâmico, tendo como objetivo avaliar o comportamento da CSFH relativamente à capacidade de sobrevivência a cavas de tensão e de injeção de corrente reativa, e à capacidade de redução automática de potência ativa perante aumentos da frequência da rede.

1.2 Estrutura do Documento

O documento está organizado em 5 secções, segundo a seguinte estrutura:

- Secção 2: descreve a constituição da CSFH em estudo, nomeadamente da sua rede interna e conversores considerados;
- Secção 3: apresenta os resultados da análise em regime estacionário;
- Secção 4: apresenta os resultados da análise do comportamento dinâmico;
- Secção 5: resume as principais conclusões resultantes do estudo realizado.

2 Descrição da Central Solar Fotovoltaica Híbrida

2.1 Rede Interna

O estudo foi realizado com base num projeto preliminar da instalação solar fotovoltaica híbrida disponibilizado pelo promotor. Esta instalação é constituída por 2 conversores solares da SMA do tipo Sunny Central 4000 UP(-US) com potência unitária de 4000 kW (SMASC SC 4000 UP(-US)), e 2 conversores associados aos sistemas de armazenamento elétrico (SAE) da SMA do tipo Sunny Central Storage 2660 UP(-US) com potência unitária de 2660 kW (SMASC SC 2660 UP(-US)).

Na Tabela 1 e na Tabela 2, são apresentados os parâmetros elétricos mais relevantes dos conversores considerados.

Tabela 1. Parâmetros elétricos do conversor solar da SMA do tipo Sunny Central 4000 UP(-US) (SMASC SC 4000 UP(-US))

Parâmetro	Valor
Tensão nominal (kV)	0.6
Sbase (MVA)	4
Pmax (MW)	4
Pmin (MW)	0
Qmax (Mvar)	2.4
Qmin (Mvar)	-2.4

Tabela 2. Parâmetros elétricos dos SAE da SMA do tipo Sunny Central Storage 2660 UP(-US) (SMASC SC 2660 UP(-US))

Parâmetro	Valor
Tensão nominal (kV)	0.6
Sbase (MVA)	2.66
Pmax (MW)	2.66
Pmin (MW)	-2.66
Qmax (Mvar)	1.596
Qmin (Mvar)	-1.596

Como se pode observar no esquema unifilar da Figura 1, do lado de baixa tensão (BT), com tensão nominal 0.6 kV, a rede da CSFH é composta por 2 conversores solares e 2 conversores associados aos SAE. Estes conversores são depois ligados à média tensão (MT) de 30 kV através de transformadores elevadores individuais de 0.6/30 kV. Os conversores convergem num barramento coletor que se liga ao Ponto de Interligação (Pol), através de um cabo subterrâneo de curta extensão (CBL-POI). O ponto designado para a ligação desta instalação constitui uma nova subestação/barramento novo a ser construído e que se liga à rede de transporte e distribuição na Subestação das Lajes do Pico (SELJ) através de um cabo subterrâneo de 1 km (CBL-UTL).

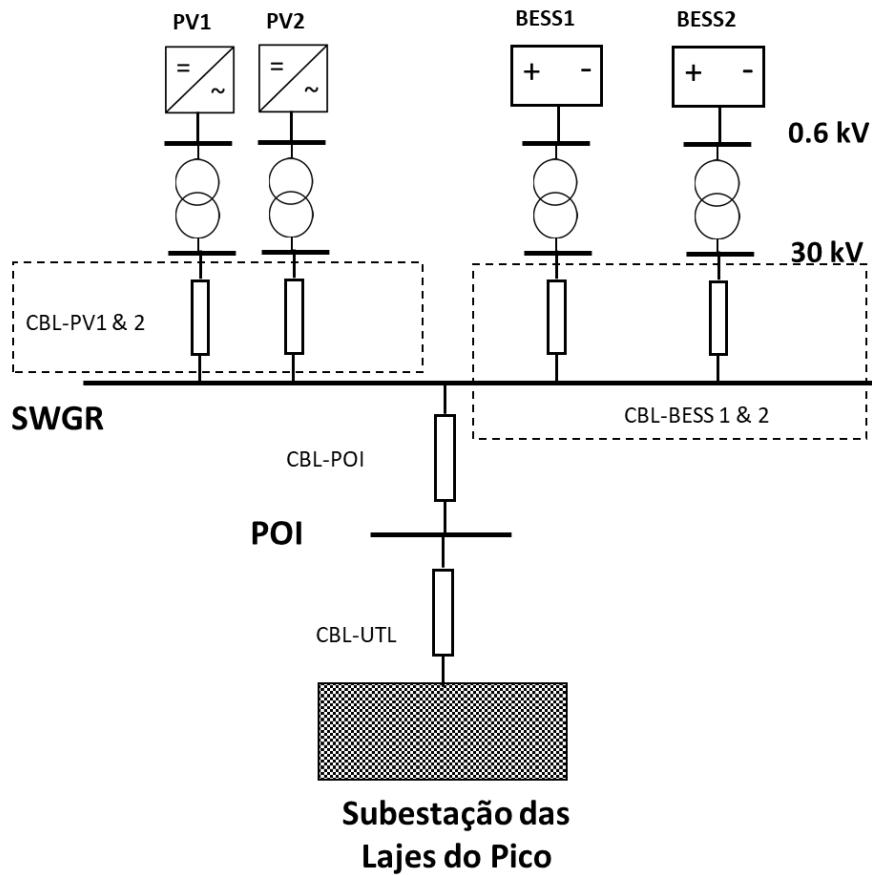


Figura 1. Esquema da rede elétrica da CSFH, ligada à rede de distribuição e transporte da ilha do Pico no Pol.

Com base na caracterização da CSFH disponibilizada pelo promotor, e para efeitos da realização dos estudos demonstrativos reportados neste documento, procedeu-se à representação da totalidade da rede elétrica de corrente alternada da CSFH desde os terminais dos módulos conversores até à ligação com a SELJ. As distâncias e tipos de cabos considerados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Tabela resumo dos condutores da rede da CSFH

Nome	Distância (m)	Tipo de condutor
CBL-PV1	375	
CBL-PV2	250	
CBL-BESS1	50	XHIOV 3x70 18/30kV ¹
CBL-BESS2	50	
CBL-POI	50	XHIOV 3x120 18/30kV ²
CBL-UTL	1000	

¹ Nexans – 19/33 (36) kV, Three core armoured copper conductors, 70 mm²

² Nexans – 19/33 (36) kV, Three core armoured copper conductors, 120 mm²

As características elétricas lineares de todos os condutores instalados na rede da CSFH são descritas na Tabela 4.

Tabela 4. Características elétricas dos condutores considerados

Condutor	R (Ω/km)	X (Ω/km)	B (S/km)
XHIOV 3x70 18/30kV	0.342	0.134	4.869×10^{-5}
XHIOV 3x120 18/30kV	0.196	0.122	5.749×10^{-5}

As características dos transformadores instalados na rede interna da CSFH são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Características elétricas dos transformadores considerados

Transformador	$U_1/U_2 (\text{kV})$	$S_n (\text{MVA})$	$X_f (\%)$
TF_PV1	30/0.6	4	8.5
TF_PV2	30/0.6	4	8.5
TF_BESS1	30/0.6	2.66	8.5
TF_BESS2	30/0.6	2.66	8.5

2.2 Breve Caracterização do Modelo de Simulação dos Conversores Solares e dos SAE

Para a realização dos estudos apresentados neste relatório foram utilizados modelos de simulação numérica para o software de simulação PSS/E® (Siemens PTI) [1] do comportamento dinâmico dos conversores solares e dos conversores associados aos SAE disponibilizados pela SMA, fabricante escolhido pelo promotor. Os modelos dinâmicos são da geração G, do tipo SMASC para simulação no PSS/E®. Para os conversores solares o modelo adotado é do tipo SC 4000 UP(-US) e para os conversores dos SAE o modelo adotado é do tipo SC 2660 UP(-US).

De seguida, é apresentada uma breve descrição do modelo dinâmico com referência ao seu manual de utilizador [2] também disponibilizado pela SMA, assim como das funcionalidades utilizadas para o presente estudo.

O modelo dinâmico dos conversores SMASC é do tipo “caixa negra” em que apenas se conhecem as entradas e saídas do mesmo, como se pode observar na Figura 2. Como entradas (ou *inputs*) o modelo recebe a tensão da rede, nas suas componentes real (RE (VOLT (IB))) e imaginária (IM (VOLT (IB))), e a frequência, medidas no barramento ao qual o conversor está conectado. Como saídas (ou *outputs*) o modelo devolve os valores da corrente representadas no referencial dq (id e iq), que são usados para calcular a corrente injetada na rede através do bloco T, representadas nas suas componentes real (RE(ISORCE(I))) e imaginária (IM(ISORCE(I))) aos terminais do gerador.

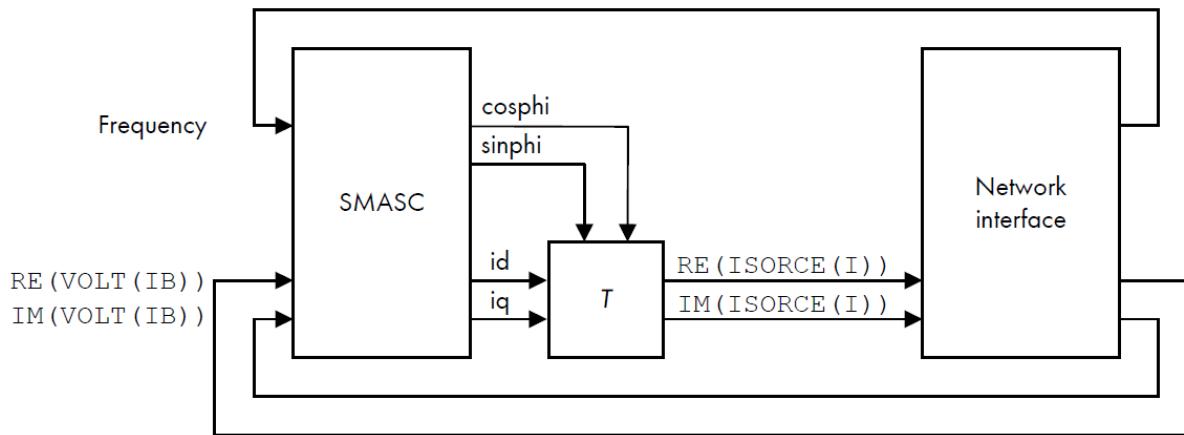


Figura 2. Diagrama de blocos geral do modelo dinâmico dos conversores [2].

O modelo SMASC apresenta diversas funcionalidades e parâmetros passíveis de ajuste em função das necessidades específicas de cada projeto. Neste relatório apenas se irão descrever as funcionalidades relevantes para os estudos em causa:

- **Capacidade de Sobrevivência a Cavas de Tensão (ou modo FRT)** – controlo de potência reativa, suporte dinâmico à rede durante cavas de tensão (no manual [2], *Dynamic grid support “full” (fault ride-through)*);
- **Capacidade de Redução Automática de Potência Ativa Face ao Aumento de Frequência (ou modo de estatismo P(f))** – controlo de potência ativa, modo potência ativa dependente da frequência P(f) (no manual [2], *Active power control, Frequency-dependent active power P(f)*).

Relativamente ao **modo FRT**, estando ativo “modo FRT completo” nos conversores (ver Tabela 6), este apresenta capacidade de injeção de corrente ativa ou corrente reativa na rede de acordo com o parâmetro *FRTArGraNom* (na Figura 3, *DGSArGraNom*). Se este parâmetro for 0, o conversor apenas injeta corrente ativa na rede. Se for maior que 0, o conversor injeta corrente reativa de acordo com a curva da Figura 3. Nos estudos apresentados na secção 4.2 (análise à capacidade de sobrevivência a cavas de tensão), a parametrização utilizada está de acordo com a Tabela 6, alterando-se apenas o valor do parâmetro *FRTArGraNom* de acordo com o caso de estudo.

Tabela 6. Parametrização do modelo SMASC em modo FRT [2]

Parâmetro	Descrição	Intervalo de valores	Valor utilizado
<i>FRTMod</i>	Modo FRT utilizado	0: modo FRT limitado 1: modo FRT completo	1

<i>FRTArGraNom</i>	Fator de injeção de corrente reativa $K = \Delta Iq / \Delta U$	0 a 10 (até 2 para redes mais frágeis)	Variável de acordo com o caso de estudo
<i>DBVolNomMin (p.u.)</i>	Banda morta de deteção de subtensão	0 a 1	0.2
<i>DBVolNomMin (p.u.)</i>	Banda morta de deteção de sobretensão	0 a 1	0.25

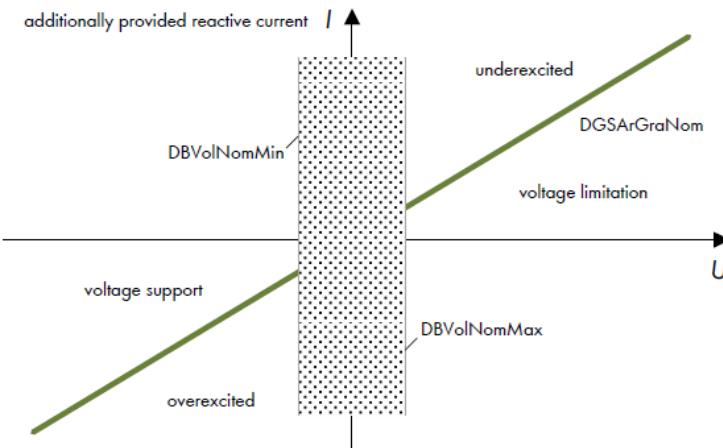


Figura 3. Ilustração da curva de injeção de corrente reativa em função da tensão do modelo SMASC em modo FRT completo [2].

Com o **modo de estatismo P(f)** ativado (ver Tabela 7), os conversores têm a capacidade de reduzir automaticamente a sua potência ativa em função do valor da frequência medido no barramento de ligação de acordo com a curva da Figura 4. Nos estudos apresentados na secção 4.3 (análise à capacidade de redução automática de potência ativa face ao aumento de frequência), a parametrização utilizada está de acordo com a Tabela 7 e em que se variou o valor do parâmetro *PWGra*.

Tabela 7. Parametrização do modelo SMASC em modo de estatismo P(f) [2]

Parâmetro	Descrição	Intervalo de valores	Valor utilizado
<i>WCtHzMod</i>	Modo de estatismo P(f)	0: desativado 1: ativado	1 (para a análise de redução de potência)
<i>PHzStr (Hz)</i>	Offset frequência da rede para início redução de potência (Hz)	0 a 5	0.5
<i>PHzStop (Hz)</i>	Offset frequência da rede para reinício potência (Hz)	-5 a 5	-1
<i>PWGra (%/Hz)</i>	Gradiente de redução de potência	0 a 100	Variável de acordo com o caso de estudo

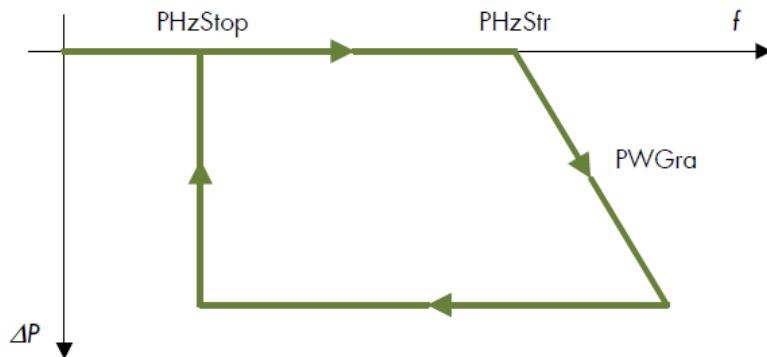


Figura 4. Curva de redução de potência ativa em função da frequência no modo de estatismo $P(f)$ [2].

3 Análise em Regime Estacionário

3.1 Descrição

A análise em regime estacionário teve como objetivo principal avaliar a gama de injeção e consumo de potência reativa na interligação da CSFH com a rede de distribuição e transporte da ilha do Pico, em diferentes cenários e condições de operação.

Os estudos levados a cabo tiveram em consideração a curva PQ dos conversores solares da SMA do tipo SMA Sunny Central UP(-US) 4000 (SMASC 4000 UP(-US)) e conversores acoplados aos SAE da SMA do tipo Sunny Central Storage UP(-US) 2660 (SMASC 2660 UP(-US)) para o nível de tensão nominal (1 p.u.) aos seus terminais, e que é apresentada na Figura 5. A curva, apresentada em valores “por unidade” em relação à potência ativa nominal do conversor, descreve a gama de operação de potência ativa vs. potência reativa dos conversores solares e dos conversores de acoplamento dos SAE à rede da CSFH.

Assim, a respetiva análise consistiu em realizar diversos estudos de trânsito de potências, considerando os pontos de operação definidos na Figura 5 e admitindo a tensão na interface entre a CSFH e a rede no valor nominal (1 p.u.). Para efeitos da análise que seguidamente se descreve, foi considerado que a CSFH se liga à rede pública numa nova subestação/barramento coletor, localizado a cerca de 1 km da SELJ e que se designou como o Pol. Tal como anteriormente esquematizado na Figura 1, a CSFH engloba um conjunto de 2 conversores solares e 2 conversores associados aos SAE.

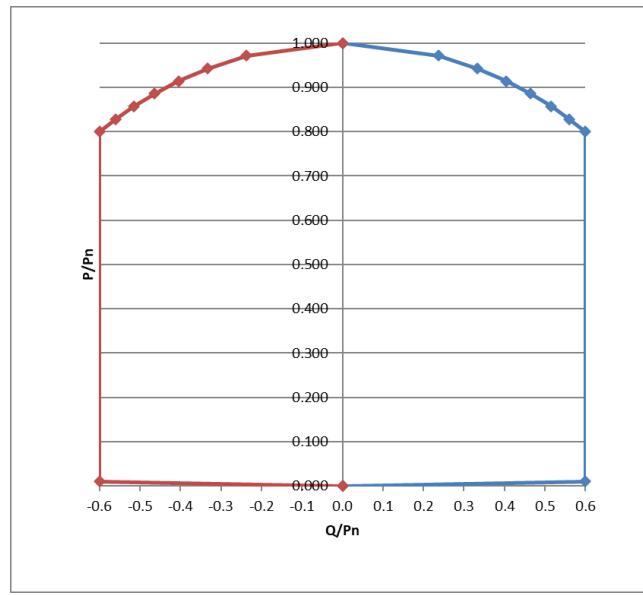


Figura 5. Curva característica P/Q dos conversores a instalar na CSFH.

Dada a natureza híbrida do sistema em estudo, a análise em regime estacionário considerou quatro cenários distintos de operação dos conversores da CSFH, como seguidamente se descreve:

- **Cenário A.1** – Conversores solares em operação e conversores dos SAE desligados;
- **Cenário A.2** – Conversores solares desligados e conversores dos SAE em operação;
- **Cenário B.1** – Conversores solares em operação à potência ativa máxima conjugada com a máxima importação de potência reativa, podendo os conversores dos SAE operar em toda a extensão de potência ativa;
- **Cenário B.2** – Conversores solares em operação à potência ativa máxima conjugada com a máxima exportação de potência reativa, podendo os conversores dos SAE operar em toda a extensão de potência ativa.

Os cenários descritos acima permitem endereçar diversos regimes de operação no que refere à limitação da gama de potência reativa a disponibilizar na interface entre a CSFH e a rede. O cenário A.1 define a operação da CSFH considerando a indisponibilidade dos conversores dos SAE em regime diurno e perante a situação limite de possibilidade de integração da totalidade da produção solar na rede. Por outro lado, no cenário A.2 considera-se a indisponibilidade dos conversores solares, por exemplo em regime noturno, estando os SAE carregados e disponíveis para injetar potência na rede. Por seu turno, os cenários B.1 e B.2 representam a operação dos conversores solares em situações limite de máxima potência ativa e máxima exportação/importação de potência reativa, conjugada com toda a gama de operação dos conversores dos SAE. Desta forma, pretende-se representar situações limite de conjugação de

operação dos conversores solares e dos conversores dos SAE em situações onde não é possível injetar na rede toda a produção solar.

A análise efetuada considerou ainda a monitorização das tensões na rede interna da CSFH, nomeadamente aos terminais dos conversores solares e dos conversores associados aos SAE, pretendendo-se garantir que as mesmas se encontram no intervalo [0.9; 1.1 pu].

3.2 Resultados

Nesta secção são apresentados os resultados da análise em regime estacionário para os cenários descritos na secção anterior.

Os resultados das respetivas análises são apresentados sobre a forma de tabela, onde P_0 e Q_0 representam os pontos de operação definidos na Figura 5, enquanto que P_{PL} e Q_{PL} representam o trânsito de potência ativa e reativa no ponto de ligação da rede da CSFH à rede elétrica da ilha do Pico, considerando um valor de tensão no ponto de ligação à rede de 1 p.u.. Os resultados são esquematizados nas curvas PQ apresentadas nesta secção, onde a curva a verde representa o trânsito de potência ativa e reativa no ponto de ligação (P_{PL} e Q_{PL}), e a curva a azul representa os pontos de operação definidos tendo por base a Figura 5 (P_0 e Q_0). Os valores são apresentados em p.u. na base de 8 MW.

3.2.1 Cenário A.1

A Tabela 8 apresenta os resultados da análise em regime estacionário considerando o cenário de operação A.1. A Figura 6 apresenta as curvas PQ do conjunto dos conversores e no ponto de ligação à rede.

Os valores apresentados para a gama de operação de potência ativa vs. potência reativa dos conversores solares (P_0 e Q_0) correspondem ao conjunto de conversores solares em operação no cenário A.1 e consideram como base a potência ativa nominal máxima licenciada para a CSFH, 8 MW. De igual forma, os valores do trânsito de potência ativa e reativa no ponto de ligação da rede da CSFH (P_{PL} e Q_{PL}), são apresentados em p.u. com a mesma base.

Tabela 8. Resultados referentes à análise em regime estacionário – Cenário A.1

P_0	Q_0	P_{PL}	Q_{PL}
0.000	0.000	0.000	0.004
0.010	0.600	0.010	0.576
0.800	0.600	0.799	0.527
0.829	0.560	0.828	0.486
0.857	0.515	0.856	0.441
0.886	0.464	0.885	0.389
0.914	0.405	0.914	0.330
0.943	0.333	0.943	0.256
0.971	0.237	0.971	0.160

1.000	0.000	0.999	-0.081
1.000	0.000	0.999	-0.081
0.971	-0.237	0.971	-0.323
0.943	-0.333	0.943	-0.420
0.914	-0.405	0.914	-0.494
0.886	-0.464	0.885	-0.553
0.857	-0.515	0.856	-0.605
0.829	-0.560	0.828	-0.651
0.800	-0.600	0.799	-0.691
0.010	-0.600	0.010	-0.630
0.000	0.000	0.000	0.004

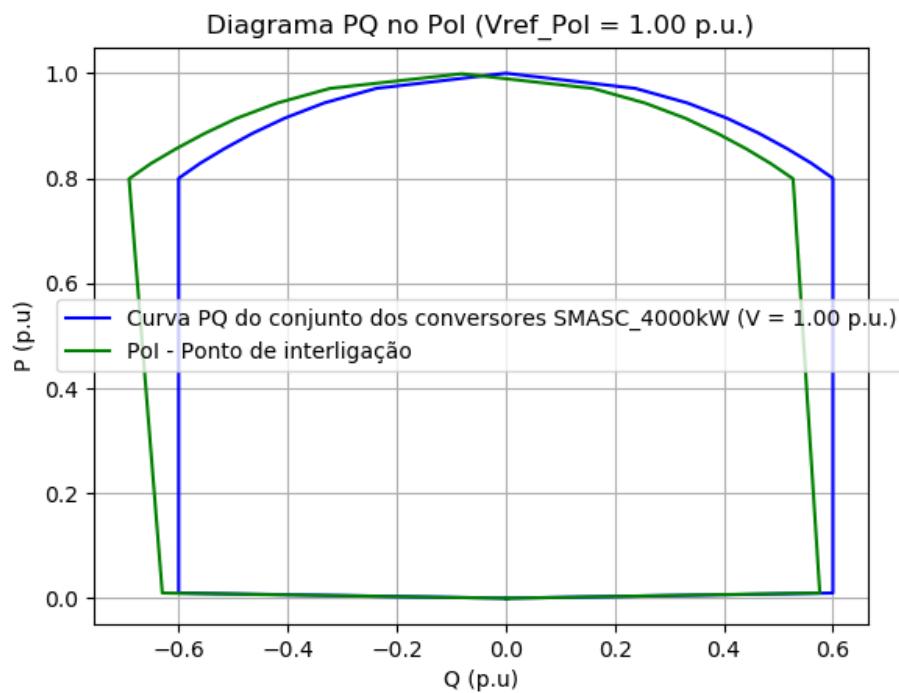


Figura 6. Curva PQ referente à análise em regime estacionário – Cenário A.1 no Pol

Os resultados obtidos permitem concluir que a amplitude da área de operação do mapa PQ no ponto de ligação é considerável, sem conduzir à necessidade de ajuste da curva PQ dos conversores de acoplamento dos SAE (tensões em todos os barramentos dentro do intervalo [0.9;1.1] p.u.).

3.2.2 Cenário A.2

A Tabela 9 apresenta os resultados da análise em regime estacionário considerando o cenário de operação A.2. A Figura 7 apresenta as curvas PQ do conjunto dos conversores em e no ponto de ligação à rede.

Os valores apresentados para a gama de operação de potência ativa vs. potência reativa dos conversores (P_0 e Q_0) correspondem ao conjunto de conversores de acoplamento dos SAE em operação no cenário A.2 e consideram como base a potência ativa nominal máxima licenciada para a CSFH, 8 MW. De igual forma, os valores do trânsito de potência ativa e reativa no ponto de ligação da rede da CSFH (P_{PL} e Q_{PL}), são apresentados em p.u. com a mesma base.

Tabela 9. Resultados referentes à análise em regime estacionário – Cenário A.2 no Pol A

P_0	Q_0	P_{PL}	Q_{PL}
0.000	0.000	0.000	0.004
0.007	0.399	0.007	0.385
0.532	0.399	0.532	0.352
0.551	0.372	0.551	0.325
0.570	0.343	0.570	0.295
0.589	0.309	0.589	0.260
0.608	0.269	0.608	0.221
0.627	0.222	0.627	0.172
0.646	0.158	0.646	0.108
0.665	0.000	0.665	-0.053
0.665	0.000	0.665	-0.053
0.646	-0.158	0.646	-0.213
0.627	-0.222	0.627	-0.278
0.608	-0.269	0.608	-0.327
0.589	-0.309	0.589	-0.366
0.570	-0.343	0.570	-0.401
0.551	-0.372	0.551	-0.431
0.532	-0.399	0.532	-0.458
0.007	-0.399	0.007	-0.417
0.000	0.000	0.000	0.004

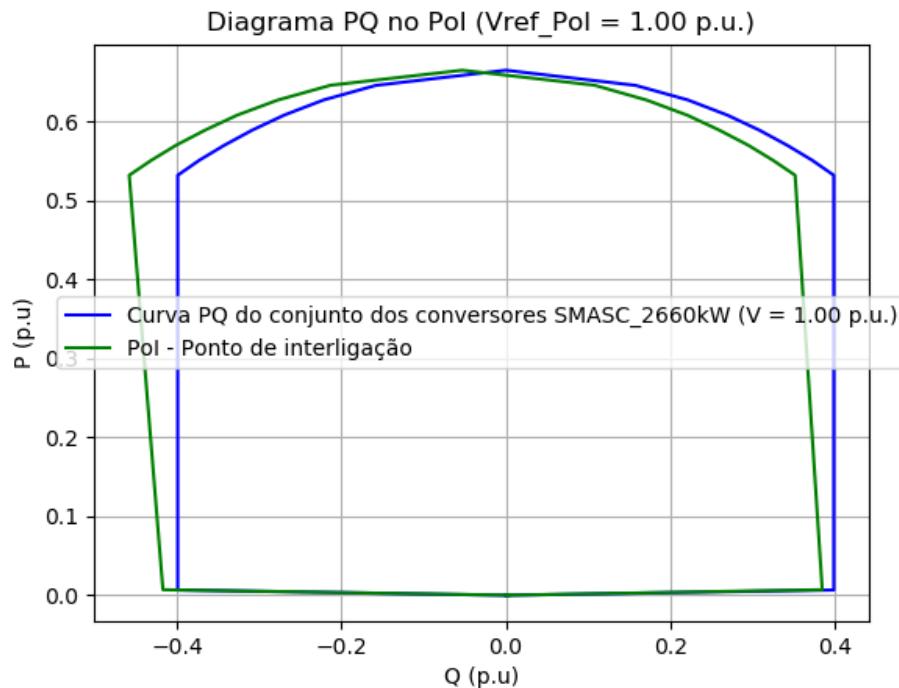


Figura 7. Curva PQ referente à análise em regime estacionário – Cenário A.2 no Pol

À semelhança do caso anterior, os resultados obtidos para esta configuração permitem concluir que a amplitude da área de operação do mapa PQ no ponto de ligação é considerável, sem conduzir à necessidade de ajuste da curva PQ dos conversores de acoplamento dos SAE (tensões em todos os barramentos dentro do intervalo [0.9;1.1] p.u.).

3.2.3 Cenário B.1

No cenário B.1, o ponto de operação dos conversores solares foi fixado considerando a operação da CSFH à potência ativa máxima (8 MW) equivalendo à injeção de 4 MW de potência ativa por parte de cada conversor solar. Os conversores solares são considerados a operar na máxima importação de potência reativa (ver Figura 5).

Neste cenário, a amplitude da área de operação do mapa PQ no ponto de ligação é particularmente relevante de ser estudada considerando o carregamento dos SAE em toda a gama de potência ativa dos conversores e explorando o impacto da importação de potência reativa por parte dos mesmos. Desta forma, os resultados apresentados para o cenário B.1 contemplam apenas os pontos de operação referentes à importação de reativa por parte dos conversores de acoplamento dos SAE.

A Tabela 10 apresenta os resultados da análise em regime estacionário considerando o cenário de operação B.1. A Figura 8 apresenta as curvas PQ do conjunto dos conversores e no ponto de ligação à rede.

Os valores apresentados para a gama de operação de potência ativa vs. potência reativa dos conversores (P_0 e Q_0) correspondem ao conjunto de conversores de acoplamento dos SAE em operação no cenário B.1 e consideram como base a potência ativa nominal máxima licenciada para a CSFH, 8 MW. De igual forma, os valores do trânsito de potência ativa e reativa no ponto de ligação da rede da CSFH (P_{PL} e Q_{PL}), são apresentados em p.u. com a mesma base.

Tabela 10. Resultados referentes à análise em regime estacionário – Cenário B.1 no Pol

P_0	Q_0	P_{PL}	Q_{PL}
-0.665	0.000	0.249	-0.551
-0.646	-0.158	0.268	-0.711
-0.627	-0.222	0.287	-0.776
-0.608	-0.269	0.306	-0.825
-0.589	-0.309	0.325	-0.864
-0.570	-0.343	0.344	-0.899
-0.551	-0.372	0.363	-0.929
-0.532	-0.399	0.382	-0.956
-0.007	-0.399	0.907	-0.915
0.000	0.000	0.914	-0.494

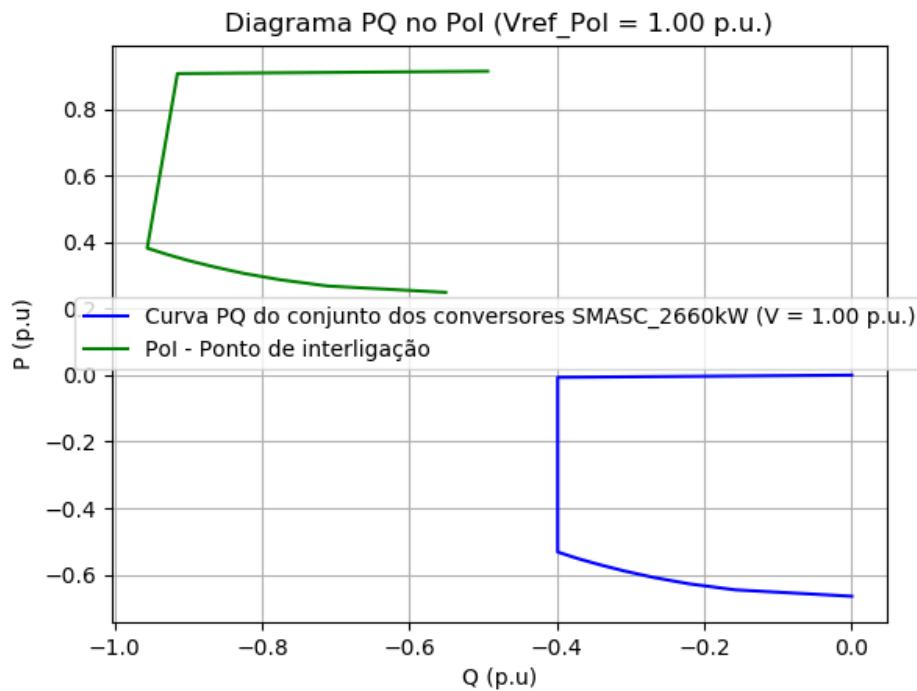


Figura 8. Curva PQ referente à análise em regime estacionário – Cenário B.1 no Pol

Os resultados permitem concluir que no cenário em que os conversores solares operam em situações limite de máxima potência ativa e máxima importação de potência reativa, os conversores dos SAE são capazes de conferir no Pol uma gama alargada de importação de

potência reativa, sem conduzir à necessidade de ajuste da curva PQ dos conversores de acoplamento dos SAE (tensões em todos os barramentos dentro do intervalo [0.9;1.1] p.u.).

3.2.4 Cenário B.2

No cenário B.2, o ponto de operação dos conversores solares foi fixado considerando a operação da CSFH à potência ativa máxima (8 MW) equivalendo à injeção de 4 MW de potência ativa por parte de cada conversor solar. Os conversores solares são considerados a operar na máxima exportação de potência reativa (ver Figura 5).

Neste cenário, a amplitude da área de operação do mapa PQ no ponto de ligação é particularmente relevante de ser estudada considerando o carregamento dos SAE em toda a gama de potência ativa dos conversores e explorando o impacto da exportação de potência reativa por parte dos mesmos. Desta forma, os resultados apresentados para o cenário B.2 contemplam apenas os pontos de operação referentes à exportação de reativa por parte dos conversores de acoplamento dos SAE.

A Tabela 11 apresenta os resultados da análise em regime estacionário considerando o cenário de operação B.2. A Figura 9 apresenta as curvas PQ do conjunto dos conversores e no ponto de ligação à rede.

Os valores apresentados para a gama de operação de potência ativa vs. potência reativa dos conversores (P_0 e Q_0) correspondem ao conjunto de conversores de acoplamento dos SAE em operação no cenário B.2 e consideram como base a potência ativa nominal máxima licenciada para a CSFH, 8 MW. De igual forma, os valores do trânsito de potência ativa e reativa no ponto de ligação da rede da CSFH (P_{PL} e Q_{PL}), são apresentados em p.u. na mesma base.

Tabela 11. Resultados referentes à análise em regime estacionário – Cenário B.2 no P0l

P_0	Q_0	P_{PL}	Q_{PL}
-0.665	0.000	0.914	0.330
-0.646	-0.158	0.907	0.710
-0.627	-0.222	0.382	0.677
-0.608	-0.269	0.363	0.650
-0.589	-0.309	0.344	0.620
-0.570	-0.343	0.325	0.586
-0.551	-0.372	0.306	0.546
-0.532	-0.399	0.287	0.497
-0.007	-0.399	0.268	0.433
0.000	0.000	0.249	0.273

Diagrama PQ no Pol (Vref_Pol = 1.00 p.u.)

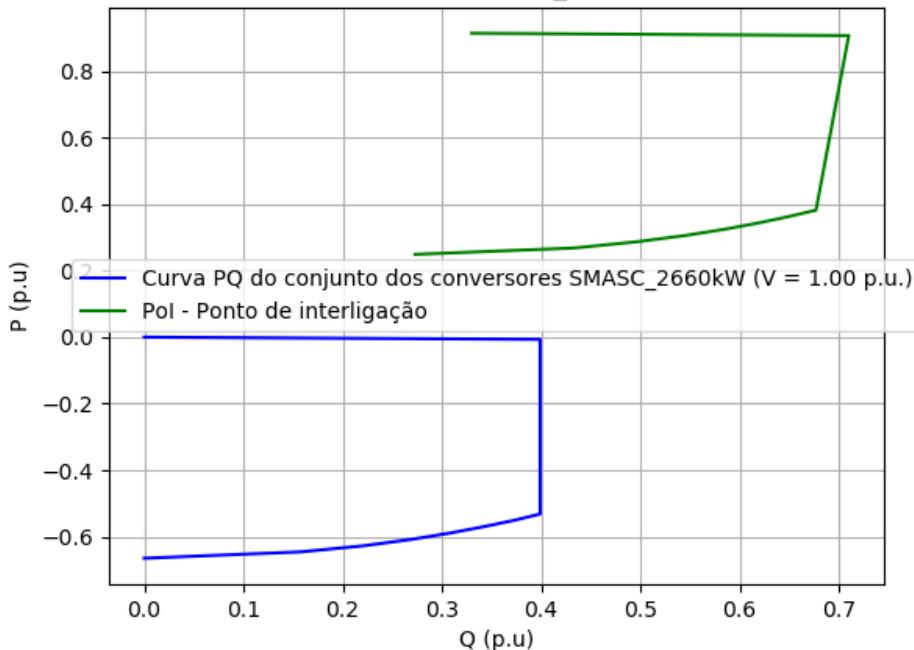


Figura 9. Curva PQ referente à análise em regime estacionário – Cenário B.2 no Pol

Os resultados permitem concluir que no cenário em que os conversores solares operam em situações limite de máxima potência ativa e máxima exportação de potência reativa, os conversores dos SAE são capazes de conferir no Pol uma gama alargada de exportação de potência reativa, sem conduzir à necessidade de ajuste da curva PQ dos conversores de acoplamento dos SAE (tensões em todos os barramentos dentro do intervalo [0.9;1.1] p.u.).

4 Análise em Regime Dinâmico

Na presente secção são apresentados os resultados da análise do comportamento dinâmico do sistema eletroprodutor da ilha do Pico e da capacidade de resposta da CSFH a ser ligada a este sistema, aferindo-se a sua capacidade de resposta perante curto-circuitos trifásicos simétricos e a sua capacidade de redução automática de potência ativa face a eventos de sobre-frequência, para diferentes cenários de produção e consumo. Nesta análise foram monitorizadas diversas grandezas relevantes, nomeadamente o comportamento da velocidade e potência dos geradores síncronos, bem como a potência e corrente ativas e reativas injetadas pela central no ponto de ligação à rede (Pol).

4.1 Cenários de operação

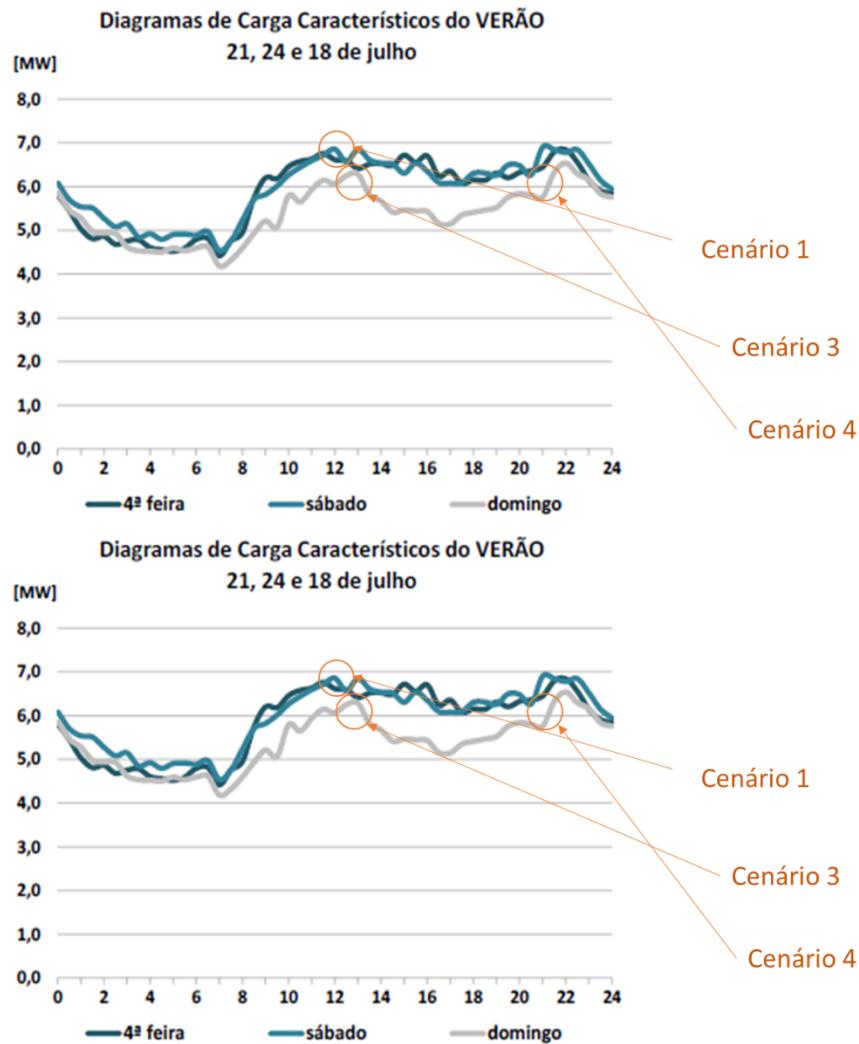
Para a realização dos estudos em regime dinâmico, em que se pretendeu avaliar o impacto da integração da CSFH, no sistema eletroprodutor da ilha do Pico, foram identificados, em

coordenação com o operador local, cinco cenários distintos de operação representativos de condições de operação adversas no que diz respeito à garantia de estabilidade do sistema. Para a definição dos cenários de operação, foram considerados os diagramas de carga típicos fornecidos pela Eletricidade dos Açores, S. A. (EDA) e um ligeiro aumento de carga. Assim, foram definidos os seguintes cenários:

- Cenário 1 – Considera-se uma carga de 8.7 MW, num horário de produção solar máxima, no período de Verão e num dia típico de semana. A CSFH encontra-se a injetar 7 MW, em resultado dos conversores solares injetarem a sua potência máxima (8 MW) e os SAE absorverem 1 MW. Para além disso, considera-se que produção eólica é nula.
- Cenário 2 – Considera-se uma carga de 8.7 MW e produção solar nula, no período de Inverno, num dia típico de semana, estando a CSFH a injetar 1 MW, provenientes apenas dos SAE. Para além disso, considera-se que produção eólica total é de 6 MW.
- Cenário 3 – Considera-se uma carga de 6.7 MW, num horário de produção solar máxima, no período de Verão, ao domingo. A CSFH encontra-se a injetar 5 MW, em resultado dos conversores solares injetarem a sua potência máxima (8 MW) e os SAE absorverem 3 MW. Para além disso, considera-se ainda que a produção eólica é nula.
- Cenário 4 – Considera-se uma carga de 6.7 MW e produção solar nula, no período de Verão, ao domingo, estando a CSFH a injetar 5 MW, provenientes dos SAE. Para além disso, considera-se que a produção eólica é nula.
- Cenário 5 – Considera-se uma carga de 7.5 MW, num horário de produção solar máxima, na Primavera, num dia típico de semana. A CSFH encontra-se a injetar 4 MW, sendo que esta potência injetada é o resultado da componente solar injetar 7 MW e os SAE absorverem 3 MW. Para além disso, considera-se que produção eólica total é de 1.8 MW.

Os cenários definidos para este estudo contemplam a integração da CSFH de 8 MW, o possível reforço de potência no Parque Eólico Terras do Canto (PETC) e a instalação de um novo parque eólico a ser levado a cabo por um promotor privado (Companhia Açoreana De Energias Renováveis – CAEN), com uma potência total instalada de 2.35 MW (1 aerogerador) ou 4.7 MW (2 aerogeradores). Dada a proximidade geográfica dos dois parques eólicos, a produção eólica total é igualmente distribuída entre ambos. Considera-se ainda que o sistema de reserva rápida (central de baterias) para regulação de potência ativa/frequência está operacional (modo *grid-following*, pior cenário), tem capacidade de sobrevivência a cavas de tensão. A operação em modo *grid-following* é a que apresenta desempenhos mais restritos do ponto de vista da resposta dinâmica do sistema, comparativamente com a possibilidade de operação em modo *grid-forming*. No entanto, e do ponto de vista de validação do estudo, esta opção constitui um cenário crítico limite, cuja validade se demonstra. A utilização do sistema de reserva rápida permite viabilizar igualmente a operação com um único grupo térmico na Central Termoelétrica do Pico (CTPI) e com regime de carga próximo do mínimo técnico.

Os diagramas de carga típicos, fornecidos pela EDA, assim como os pontos do diagrama selecionados (considerando um ligeiro aumento de carga) para a definição dos cenários são apresentados na Figura 10.



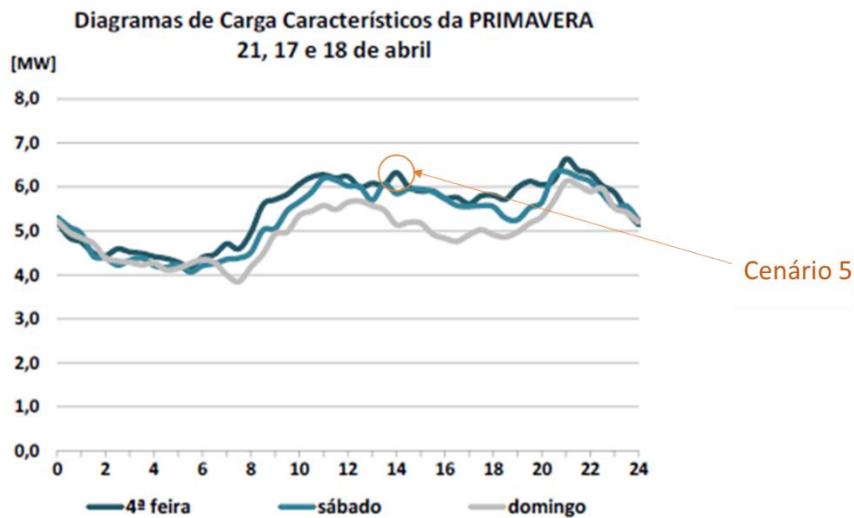


Figura 10. Diagramas de cargas típicos fornecidos pela EDA e pontos do diagrama escolhidos para a definição dos cenários (considerando um ligeiro aumento de carga).

O despacho da geração pelas diversas tecnologias de produção de energia e geradores disponíveis na rede elétrica da ilha do Pico, para os cenários de estudo considerados, é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12. Definição dos cenários de operação.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Central Termoelétrica do Pico (CTPI)	1.7 MW	1.7 MW	1.7 MW	1.7 MW	1.7 MW
Parque Eólico Terras do Canto (PETC)	0 MW	3 MW (reforço de P)	0 MW	0 MW	0.9 MW
Parque Eólico CAEN	0 MW	3 MW (2 AG)	0 MW	0 MW	0.9 MW (1 AG)
CSFH (PV/SAE)	7 (8/-1) MW	1 (0/1) MW	5 (8/-3) MW	5 (0/5) MW	4 (7/-3) MW
Sistema de Reserva Rápida (BESS)	0 MW	0 MW	0 MW	0 MW	0 MW
Carga Total	8.7 MW	8.7 MW	6.7 MW	6.7 MW	7.5 MW

4.2 Análise da Capacidade de Sobrevivência a Cavas de Tensão

De forma a avaliar a capacidade de sobrevivência a cavas de tensão da CSFH, foi simulado um curto-círcuito trifásico simétrico localizado na rede de 30 kV, mais especificamente na linha aérea que interliga as subestações de São Roque (SESR) e da Madalena (SEMD) (ver Figura 56 do Apêndice) e subsequente isolamento do defeito por saída de serviço da referida linha 100ms após o início do defeito. Para evitar sobreposições na resposta da central à cava de tensão resultante, a capacidade de resposta à frequência (modo de estatismo P(f)) foi desativada no âmbito da realização deste estudo (parâmetro *WCtHzMod* = 0).

Relativamente à capacidade de injeção de corrente reativa durante cavas de tensão por parte dos conversores da CSFH, foi avaliada a possibilidade de variar o parâmetro $FRTArGraNom$ da Tabela 6 para valores numa gama entre 0.2 e 1. Foram assim considerados três casos de estudo distintos perante cada um dos cenários apresentados na Secção 4.1:

- **Caso 1:** $FRTArGraNom = 0.2$;
- **Caso 2:** $FRTArGraNom = 0.5$;
- **Caso 3:** $FRTArGraNom = 1$.

Os resultados das simulações são apresentados nas figuras seguintes, onde o início do defeito ocorre ao segundo 0 do tempo de simulação.

4.2.1 Resultados - Cenário 1

A Figura 11 e a Figura 12 representam o comportamento da corrente ativa e reativa injetada no ponto de ligação à rede (Pol), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $FRTArGraNom$, no cenário 1.

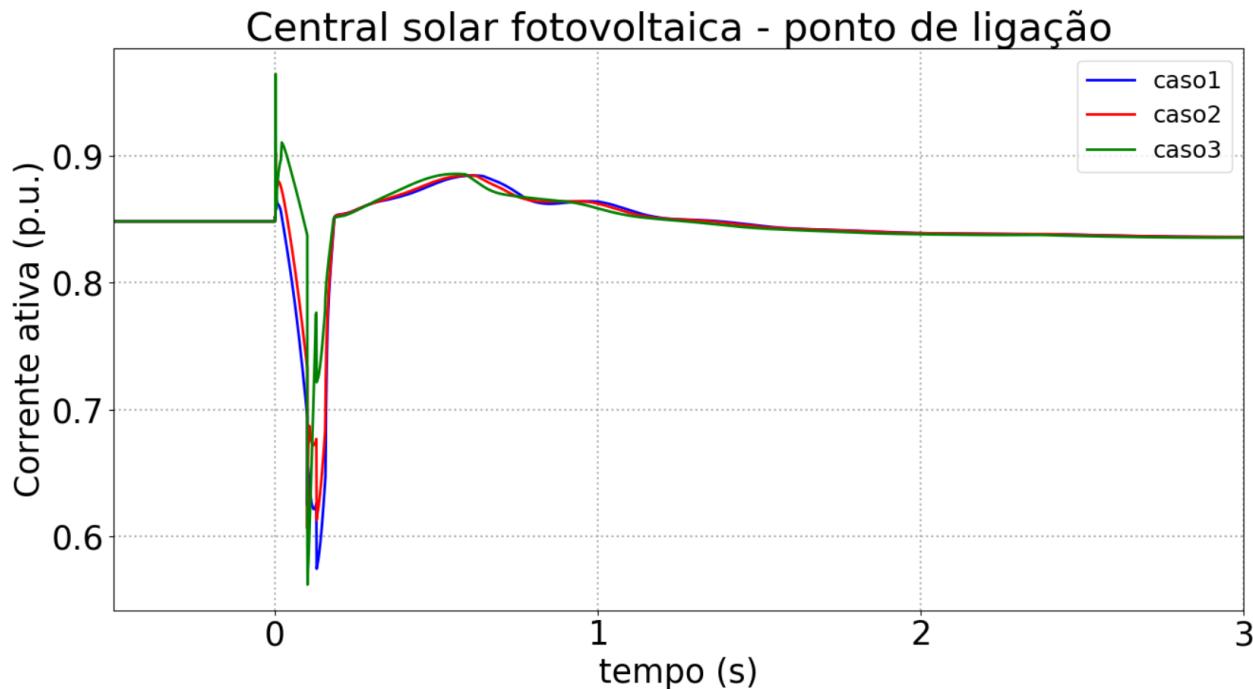


Figura 11. Resposta da corrente ativa da CSFH no Pol – Cenário 1.

Central solar fotovoltaica - ponto de ligação

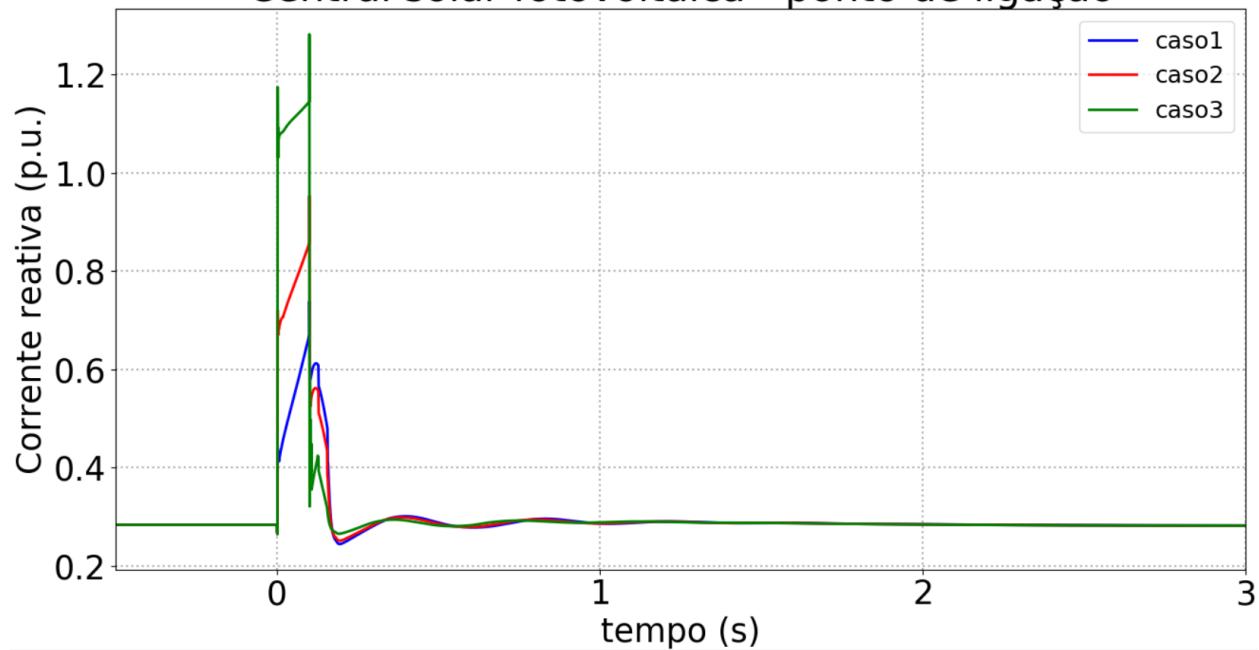


Figura 12. Resposta da corrente reativa da CSFH no Pol – Cenário 1.

A Figura 13 e a Figura 14 representam o comportamento da potência ativa e reativa no ponto de ligação à rede, respetivamente, no Pol para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, no cenário 1.

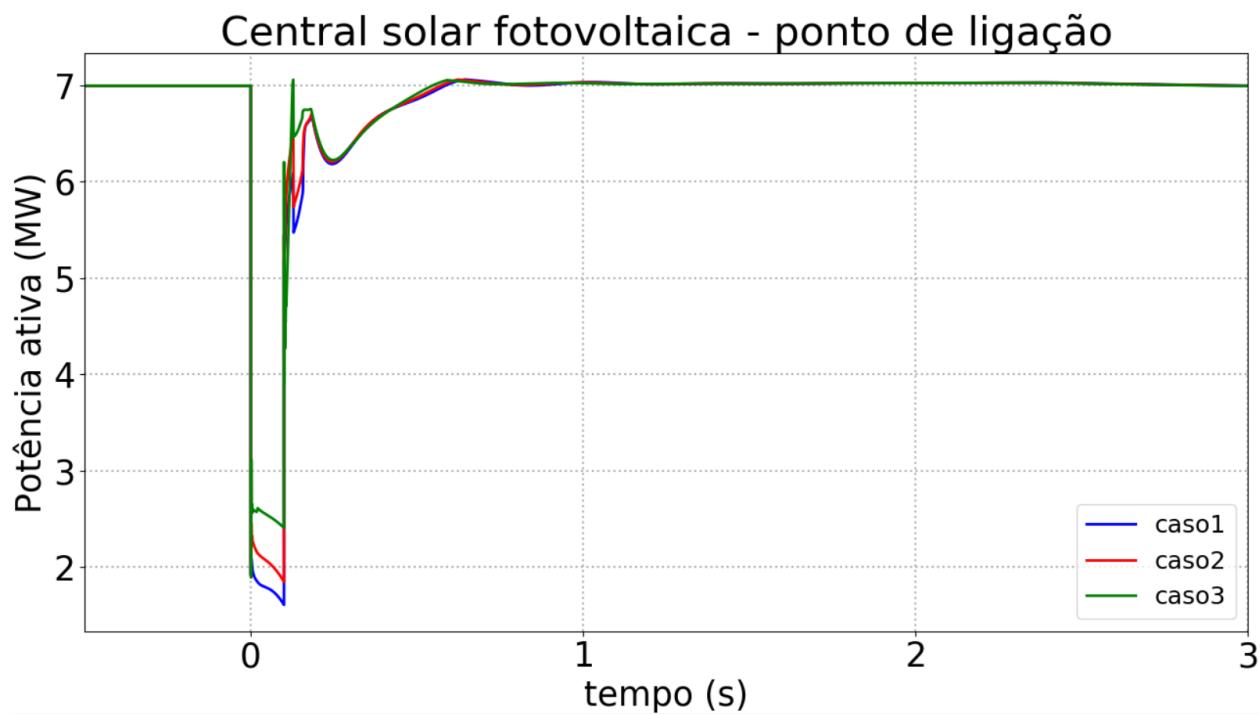


Figura 13. Resposta da potência ativa no Pol da CSFH – Cenário 1.

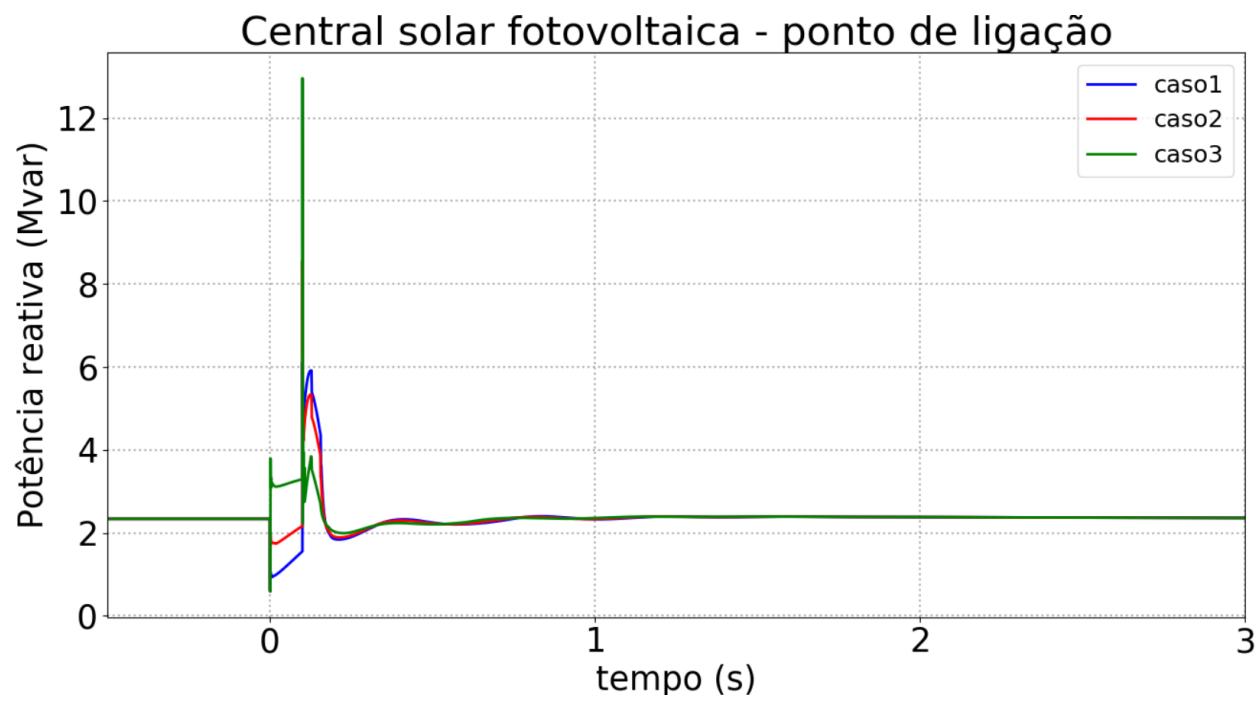


Figura 14. Resposta da potência reativa no Pol da CSFH – Cenário 1

Na Figura 15 são apresentados os resultados referentes à velocidade do gerador síncrono (G6) em serviço (em Hz), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $FRTArGraNom$, relativamente ao cenário 1. Nesta figura, são também ilustradas ampliações na escala do tempo (referente ao intervalo de 0 a 3 segundos), para melhor se observar o comportamento da velocidade do gerador durante os instantes subsequentes e próximos da perturbação.

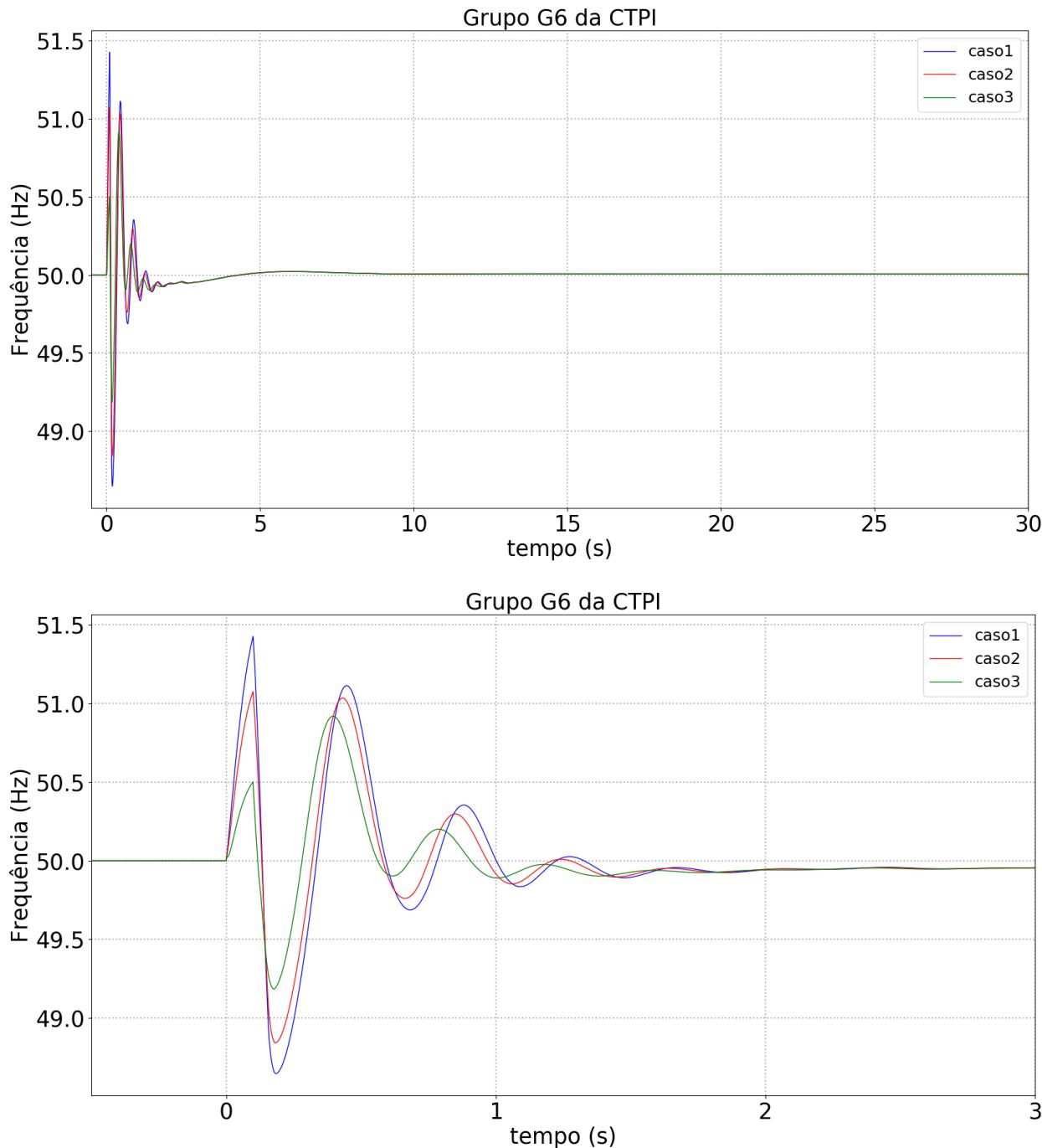


Figura 15. Velocidade do gerador síncrono (em cima – tempo total de simulação, em baixo – detalhe dos 0 a 3 s) – Cenário 1.

Na Figura 16 são apresentados os resultados referentes à tensão no ponto de ligação da CSFH com a rede, para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, relativamente ao cenário 1.

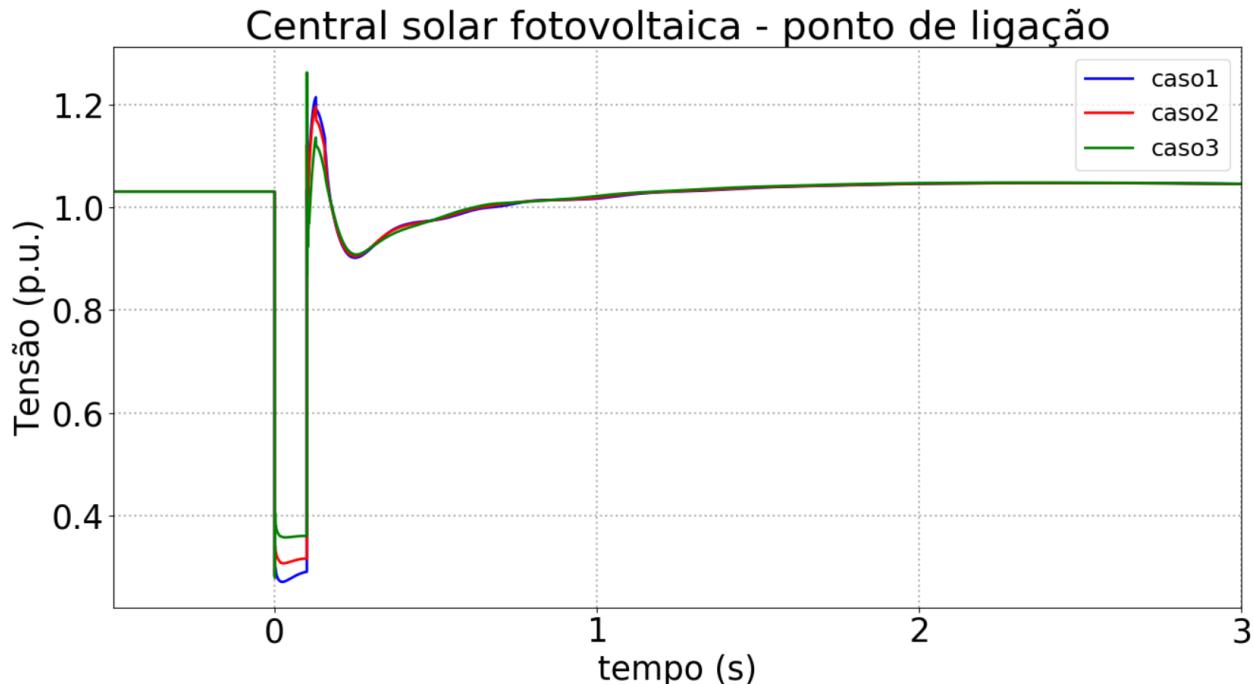


Figura 16. Tensão no ponto de ligação da CSFH – Cenário 1.

4.2.2 Resultados - Cenário 2

A Figura 17 e a Figura 18 representam o comportamento da corrente ativa e reativa injetada no ponto de ligação à rede, respetivamente, para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, no cenário 2.

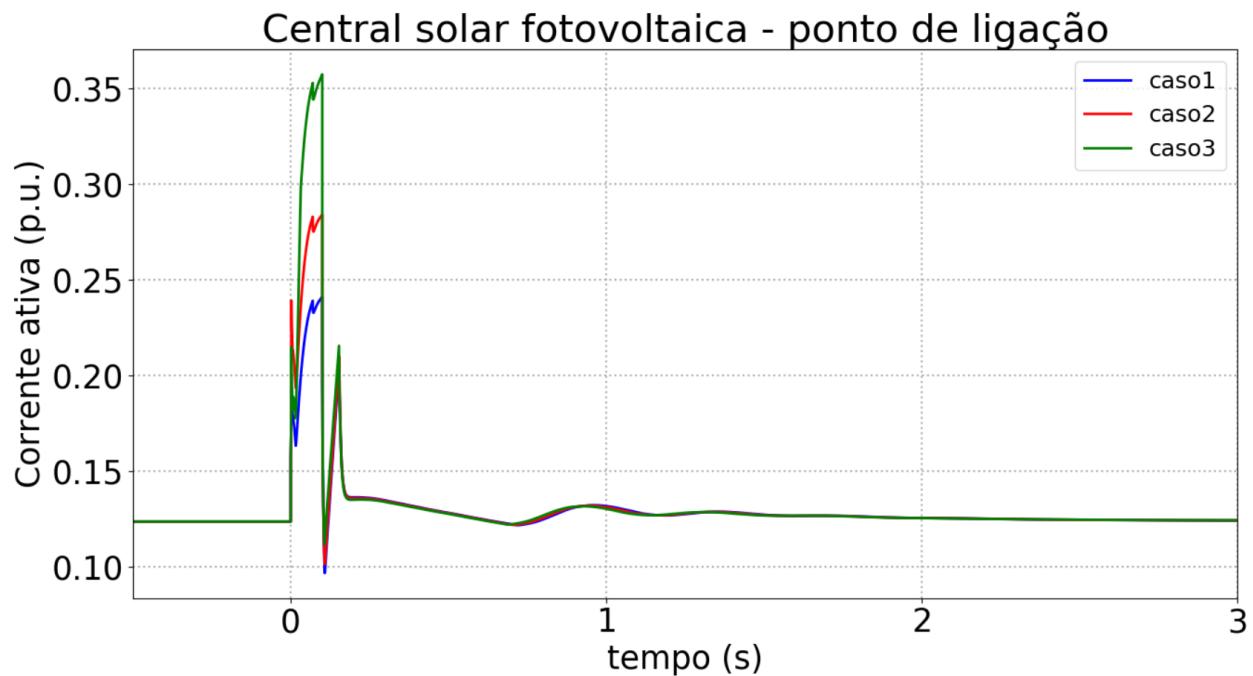


Figura 17. Resposta da corrente ativa da CSFH no Pol – Cenário 2.

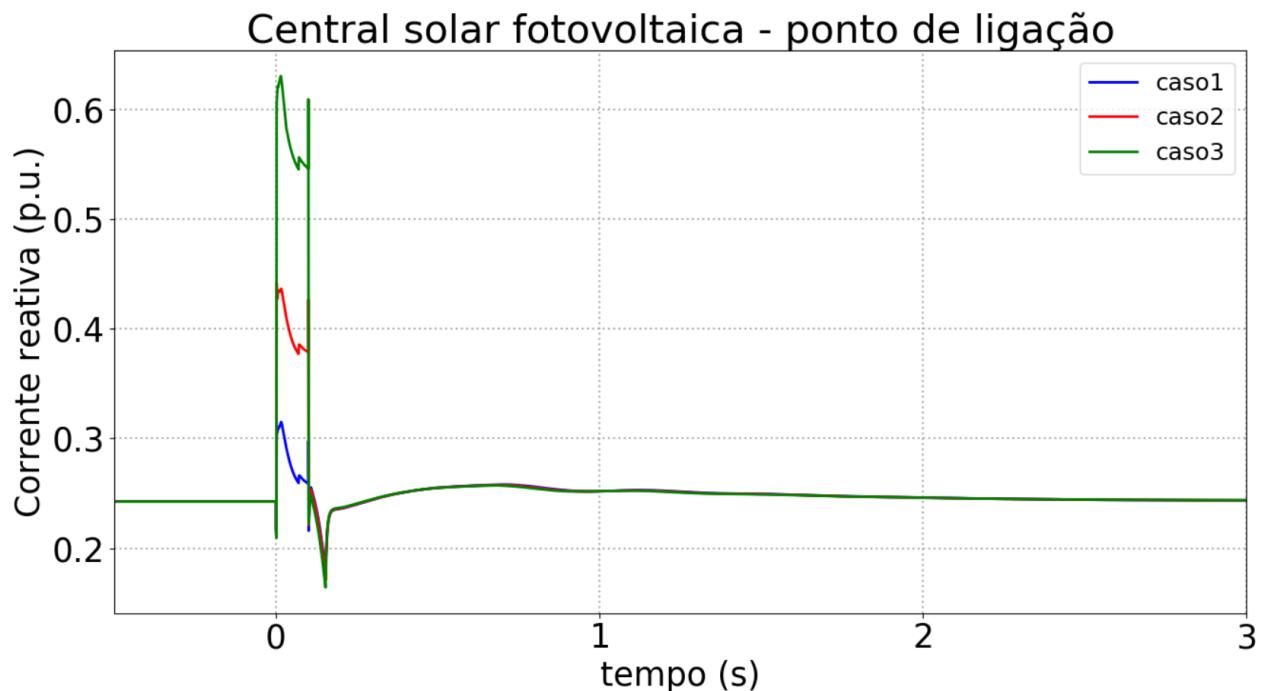


Figura 18. Resposta da corrente reativa da CSFH no Pol – Cenário 2.

A Figura 19 e a Figura 20 representam o comportamento da potência ativa e reativa no ponto de ligação à rede, respetivamente, para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, no cenário 2.

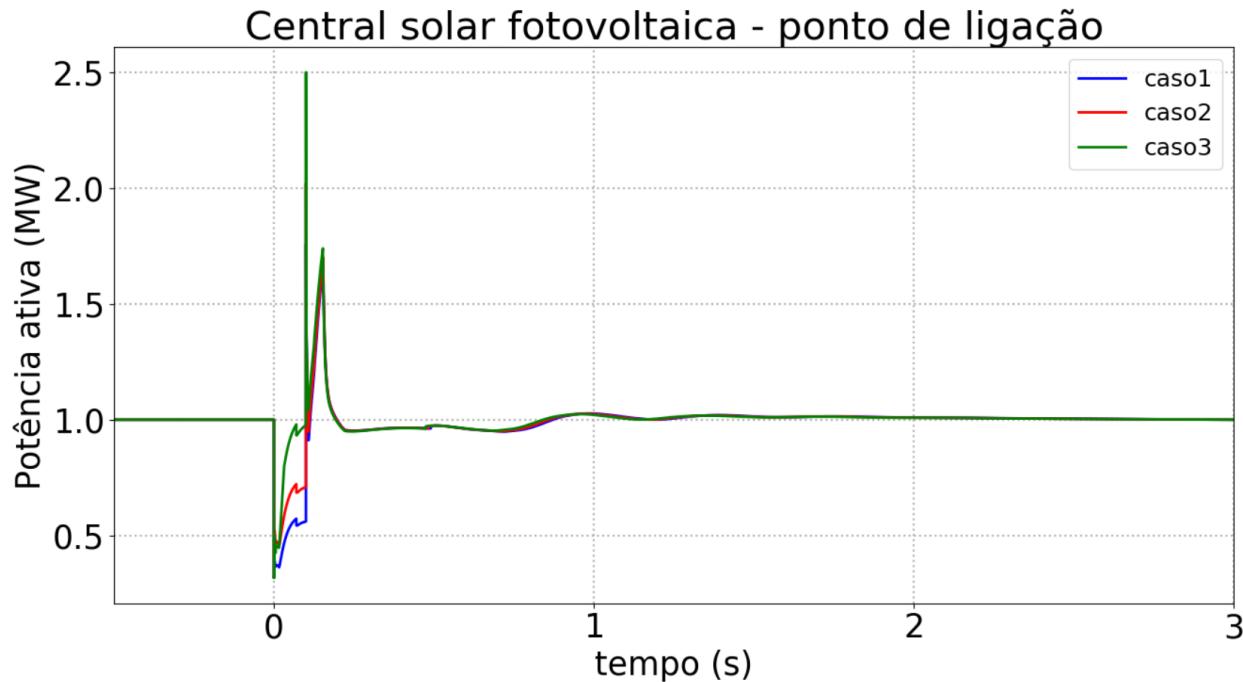


Figura 19. Resposta da potência ativa no Pol da CSFH – Cenário 2.

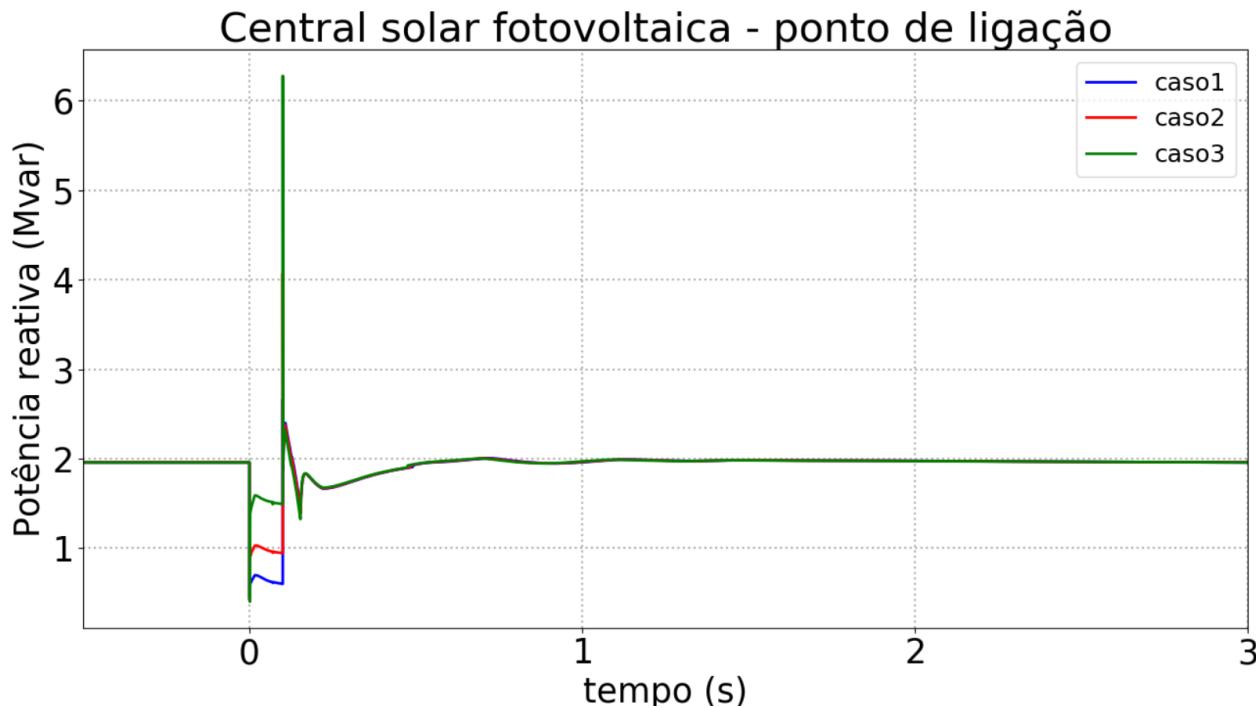


Figura 20. Resposta da potência reativa no Pol da CSFH – Cenário 2.

Na Figura 21 são apresentados os resultados referentes à velocidade do gerador síncrono em serviço (em Hz), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $FRTArGraNom$, relativamente ao cenário 2. Nestas figuras, são também ilustradas ampliações na escala do tempo (referente ao intervalo de 0 a 3 segundos), para melhor se observar o comportamento da velocidade do gerador durante os instantes subsequentes e próximos da perturbação.

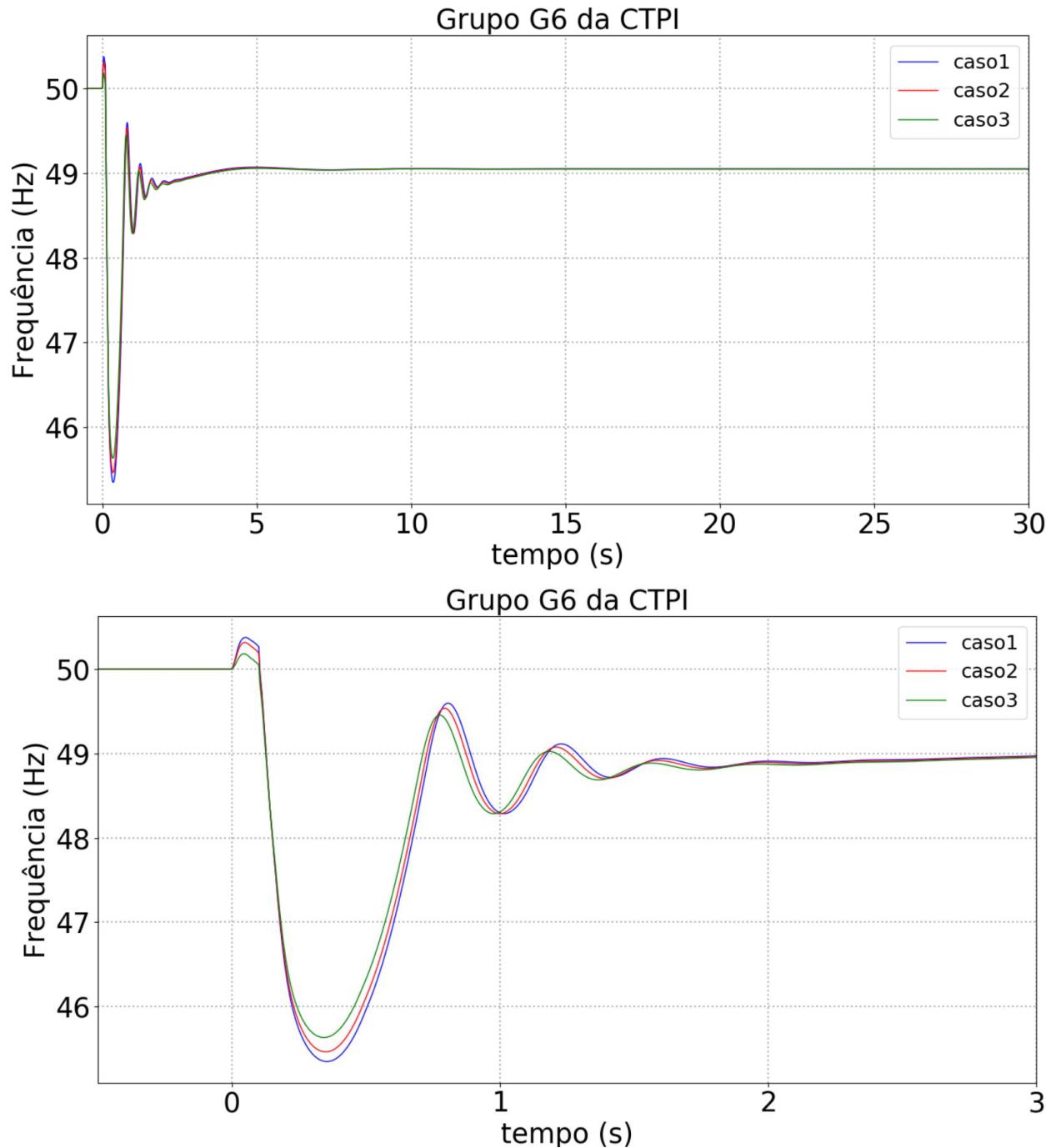


Figura 21. Velocidade do gerador síncrono (em cima – tempo total de simulação, em baixo – detalhe dos 0 a 3 s) – Cenário 2.

Na Figura 22 são apresentados os resultados referentes à tensão no ponto de ligação da CSFH com a rede, para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, relativamente ao cenário 2.

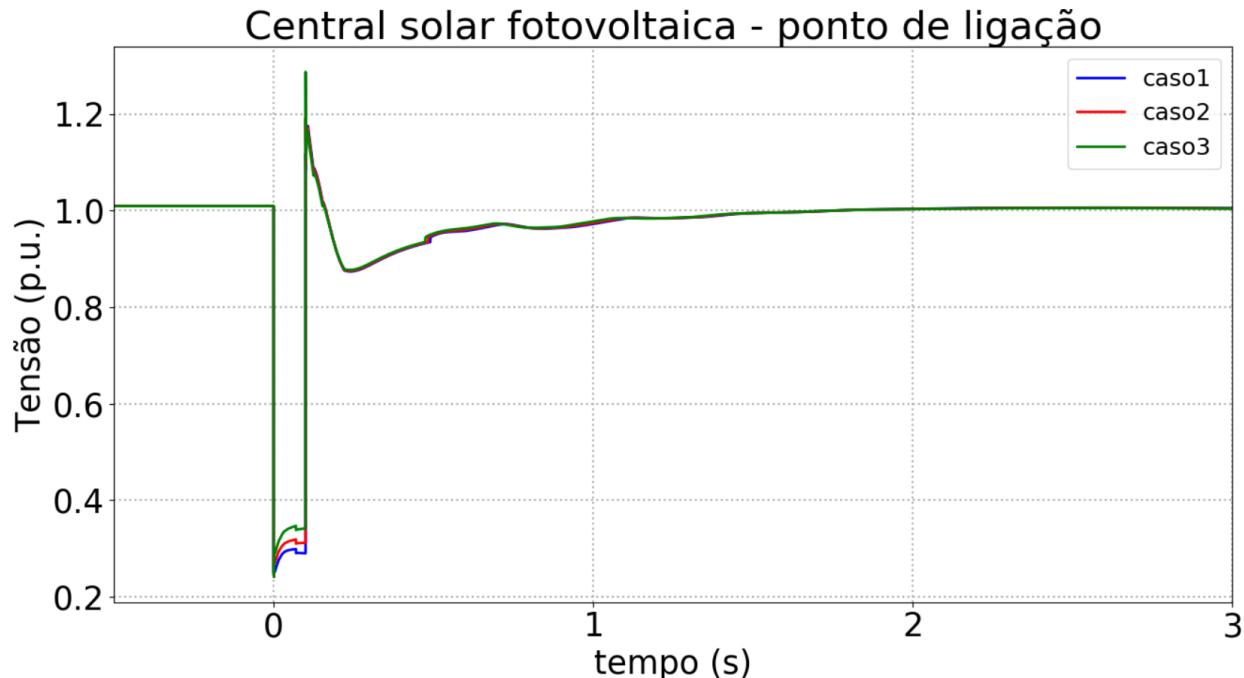


Figura 22. Tensão no ponto de ligação da CSFH – Cenário 2.

4.2.3 Resultados - Cenário 3

A Figura 23 e a Figura 24 representam o comportamento da corrente ativa e reativa injetada no ponto de ligação à rede, respetivamente, para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, no cenário 3.

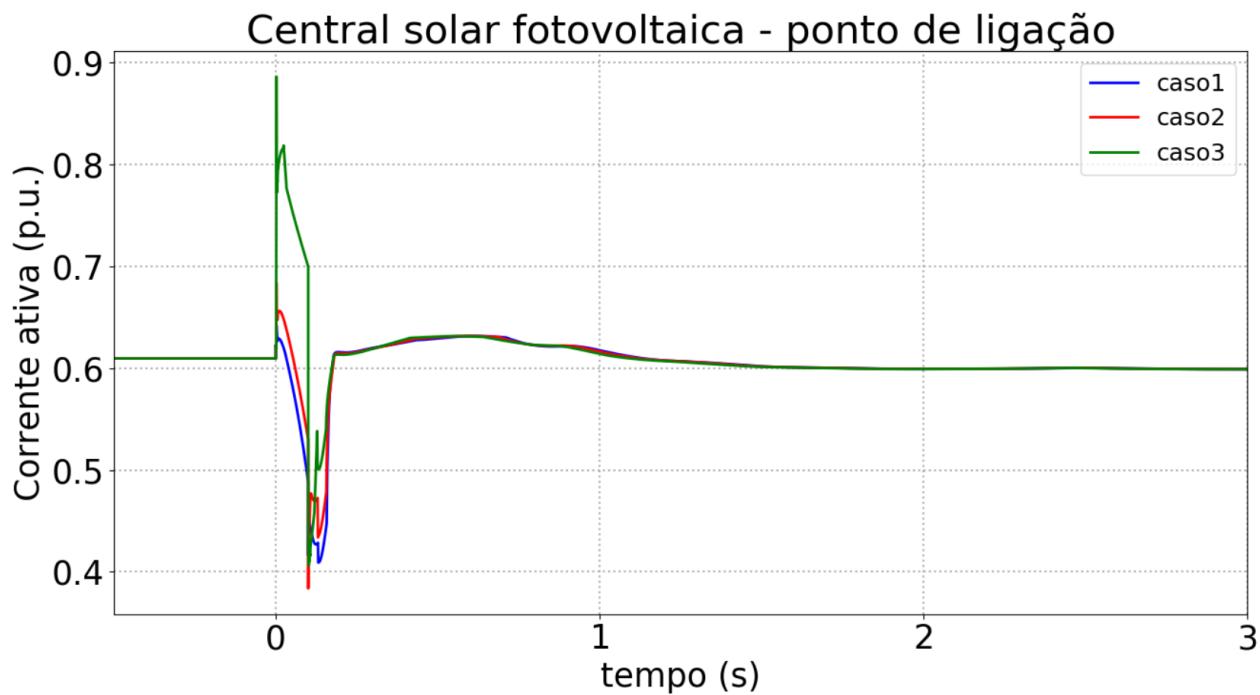


Figura 23. Resposta da corrente ativa da CSFH no Pol – Cenário 3.

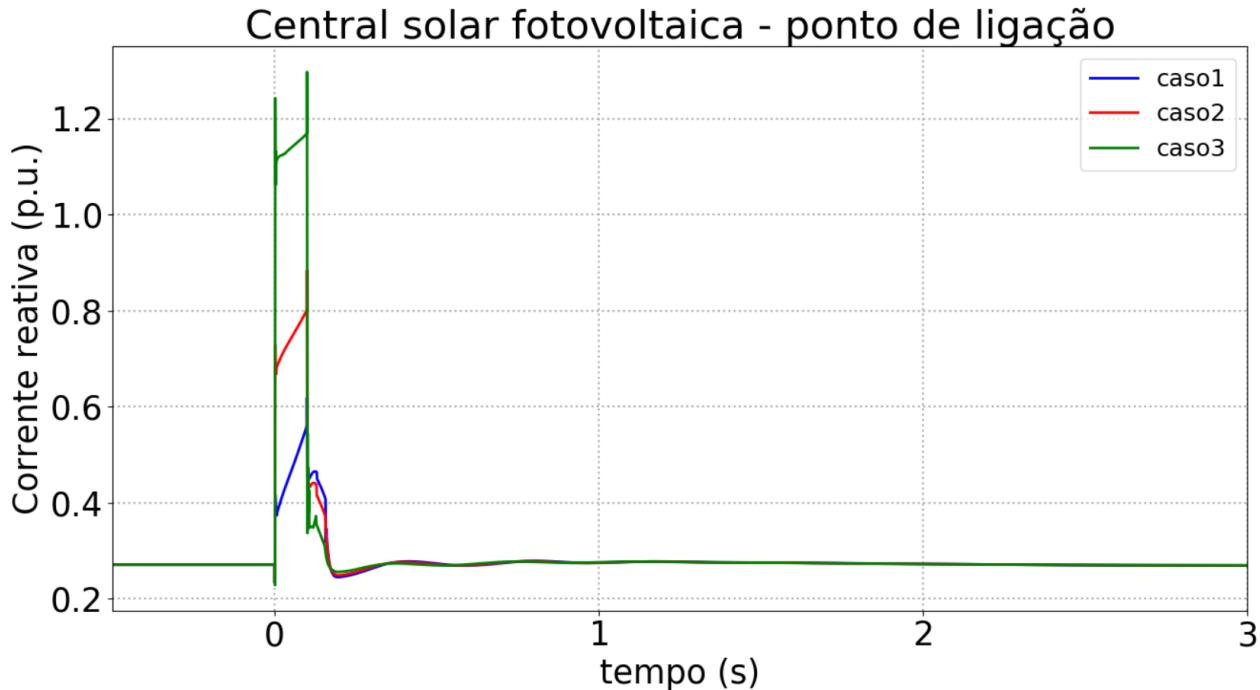


Figura 24. Resposta da corrente reativa da CSFH no Pol – Cenário 3.

A Figura 25 e a Figura 26 representam o comportamento da potência ativa e reativa no ponto de ligação à rede, para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, no cenário 3.

Central solar fotovoltaica - ponto de ligação

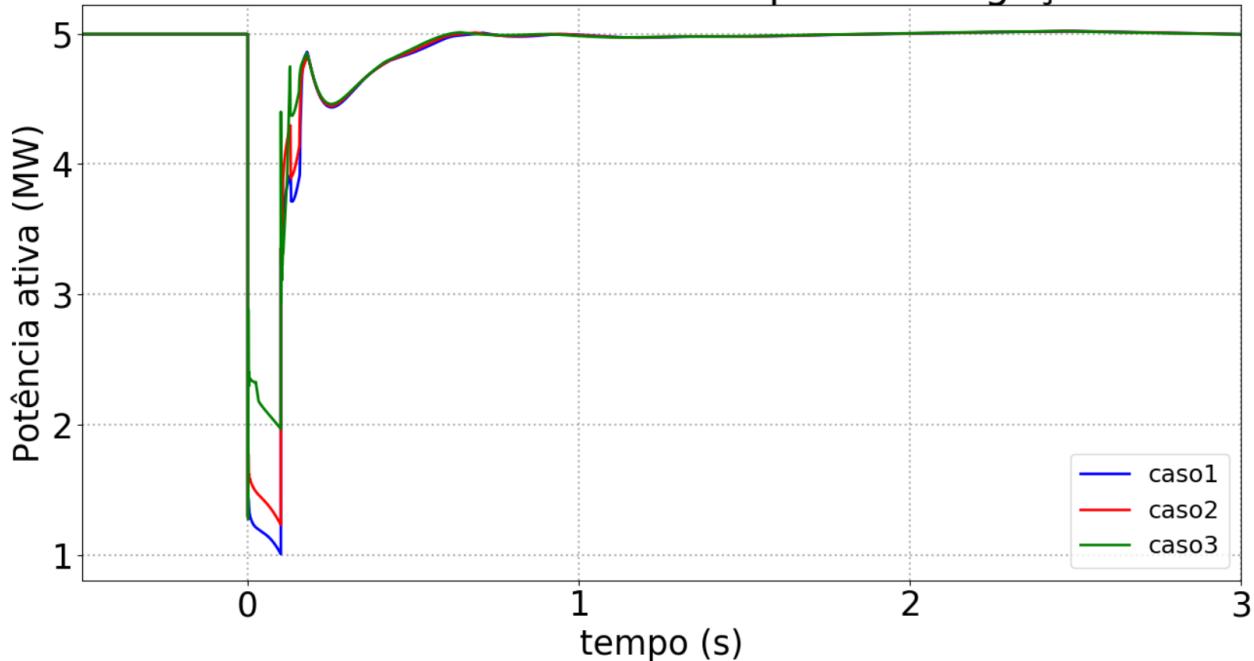


Figura 25. Resposta da potência ativa no Pol da CSFH – Cenário 3.

Central solar fotovoltaica - ponto de ligação

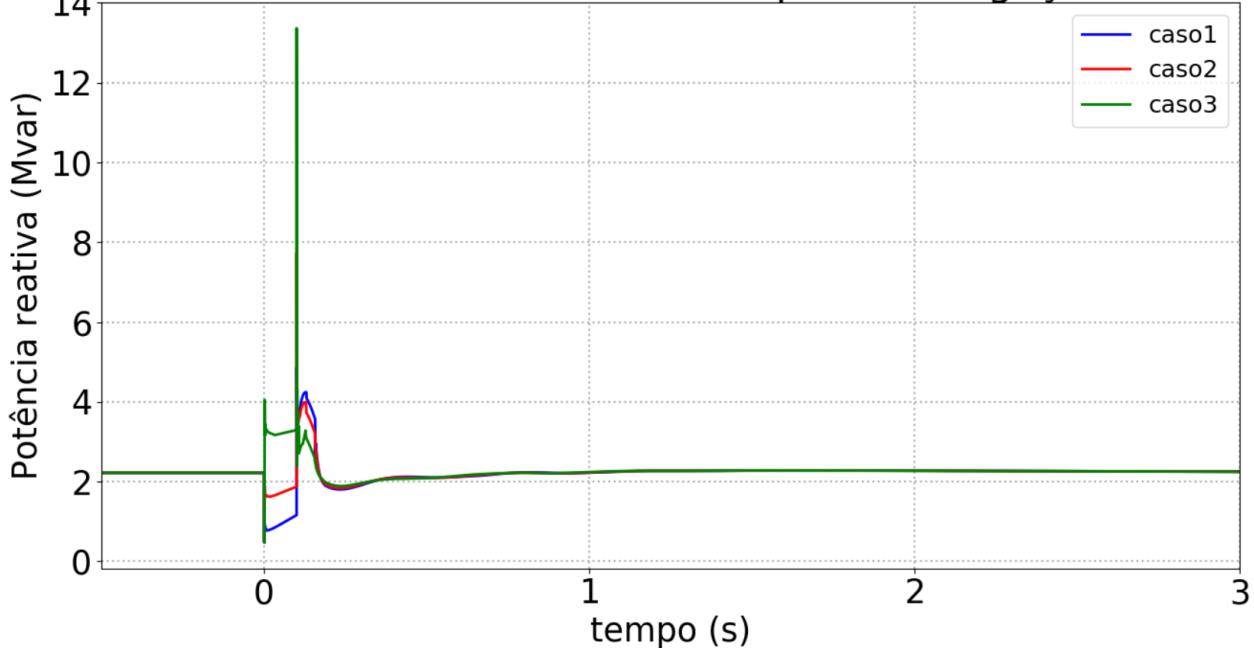


Figura 26. Resposta da potência reativa no Pol da CSFH – Cenário 3.

Na Figura 27 são apresentados os resultados referentes à velocidade do gerador síncrono em serviço (em Hz), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $FRTArGraNom$, relativamente ao cenário 3. Nestas figuras, são também ilustradas ampliações na escala do

tempo (referente ao intervalo de 0 a 3 segundos), para melhor se observar o comportamento da velocidade do gerador durante os instantes subsequentes e próximos da perturbação.

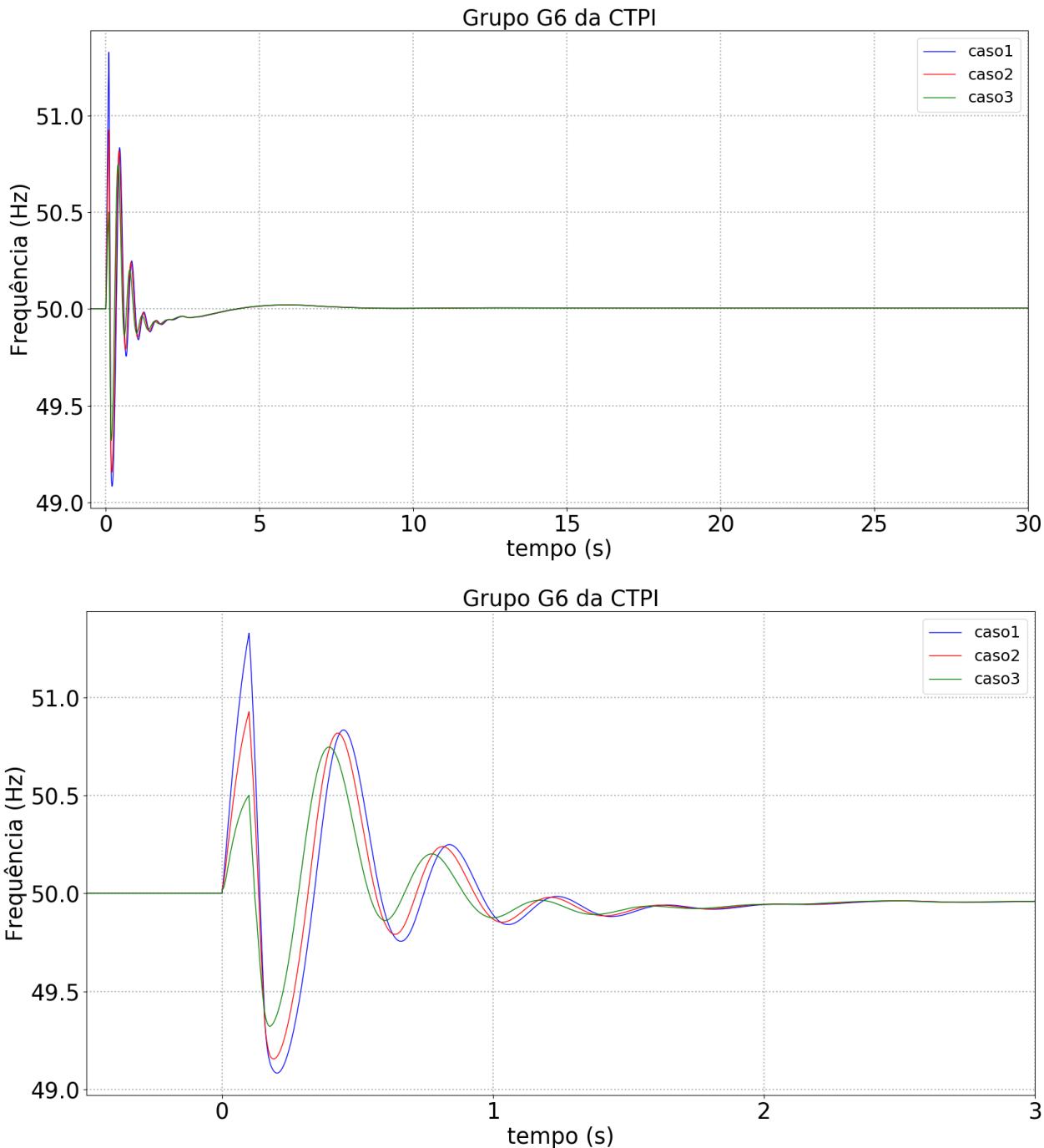


Figura 27. Velocidade do gerador síncrono (em cima – tempo total de simulação, em baixo – detalhe dos 0 a 3 s) – Cenário 3.

Na Figura 28 são apresentados os resultados referentes à tensão no ponto de ligação da CSFH com a rede, para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, relativamente ao cenário 3.

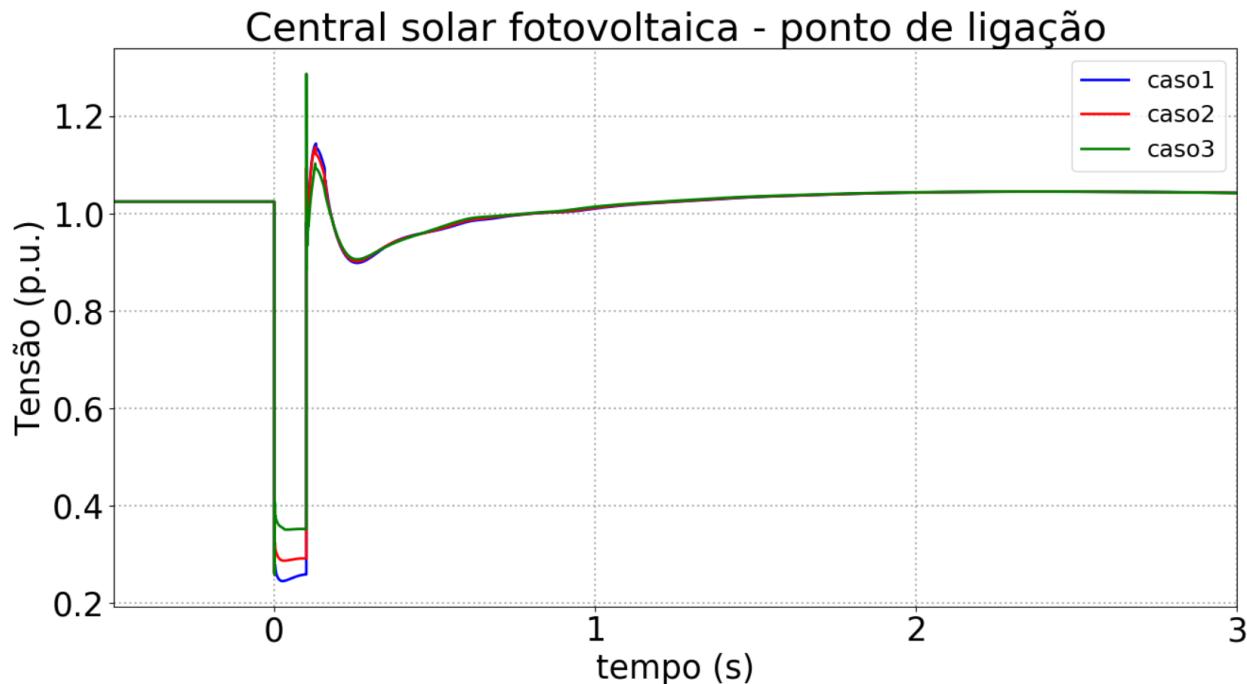


Figura 28. Tensão no ponto de ligação da CSFH – Cenário 3.

4.2.4 Resultados - Cenário 4

A Figura 29 e a Figura 30 representam o comportamento da corrente ativa e reativa injetada no ponto de ligação à rede, para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, no cenário 4.

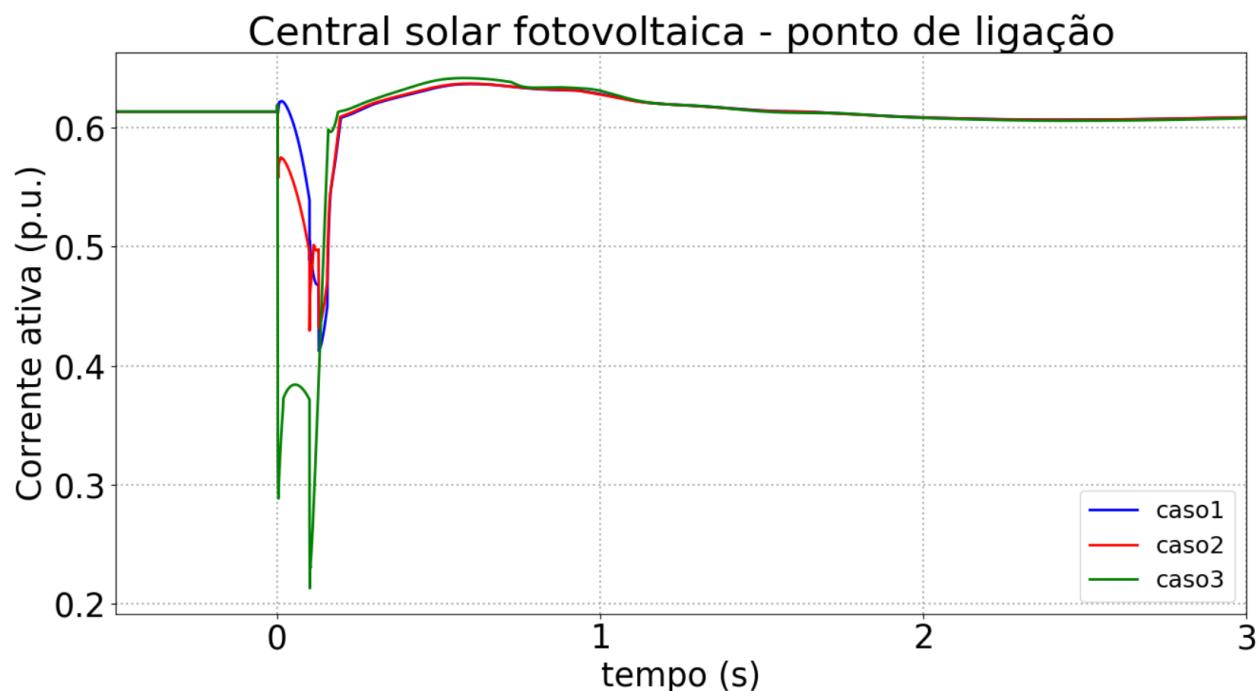


Figura 29. Resposta da corrente ativa da CSFH no Pol – Cenário 4.

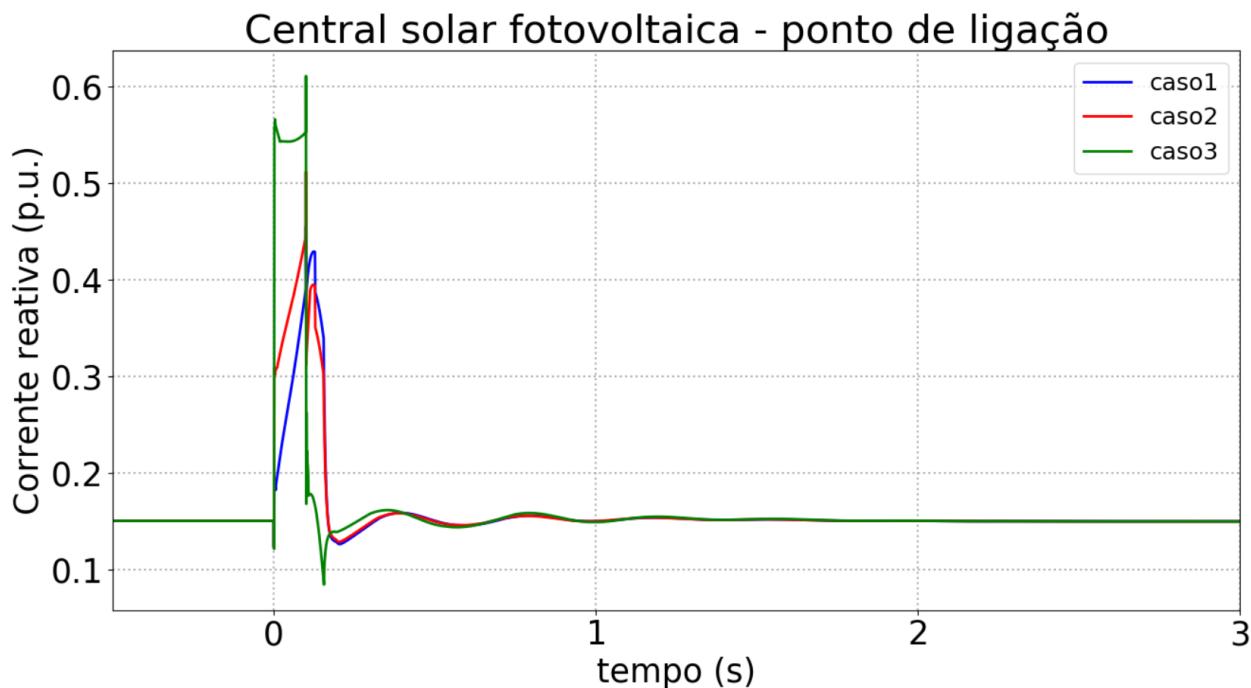


Figura 30. Resposta da corrente reativa da CSFH no Pol – Cenário 4.

A Figura 31 e a Figura 32 representam o comportamento da potência ativa e reativa no ponto de ligação à rede, respetivamente, para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, no cenário 4.

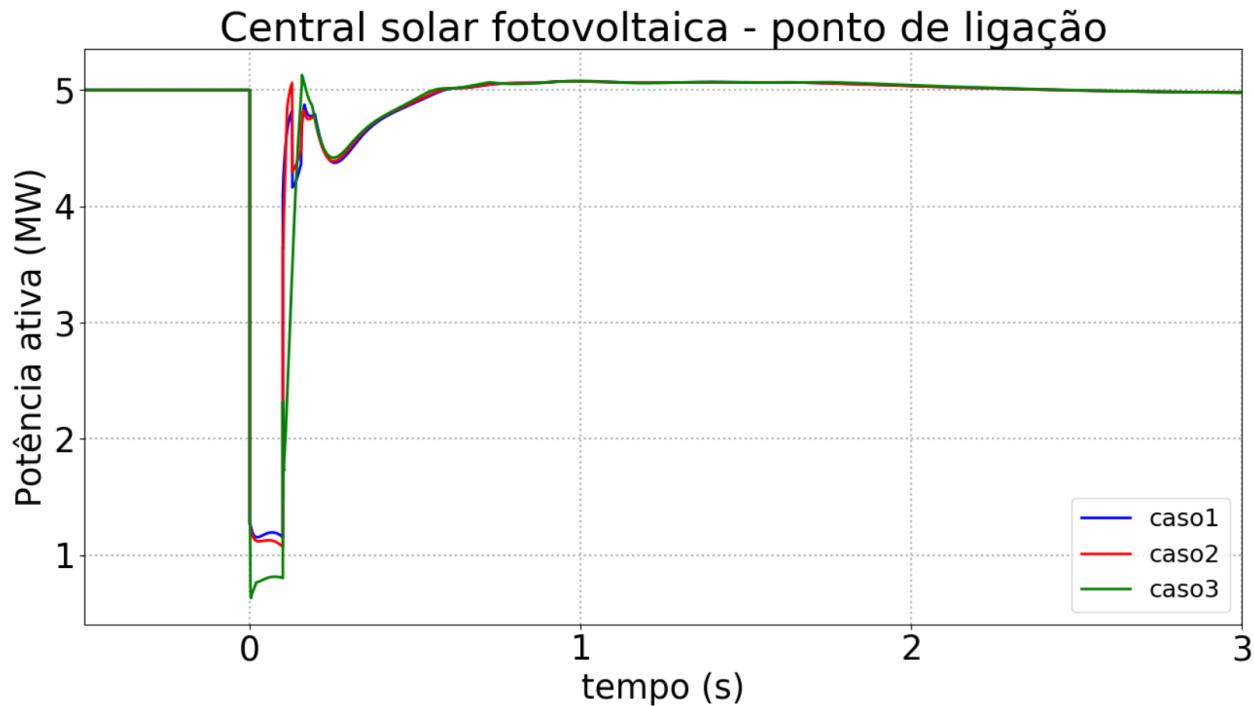


Figura 31. Resposta da potência ativa no Pol da CSFH – Cenário 4.

Central solar fotovoltaica - ponto de ligação

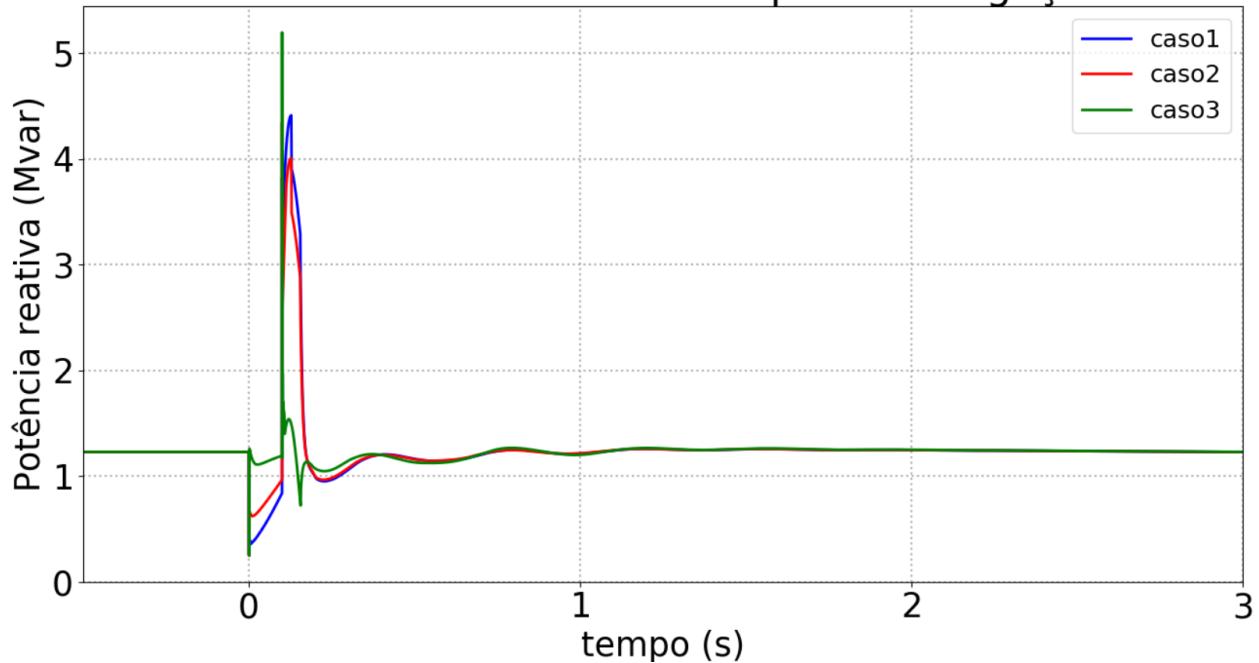


Figura 32. Resposta da potência reativa no Pol da CSFH – Cenário 4.

Na Figura 33 são apresentados os resultados referentes à velocidade do gerador síncrono em serviço (em Hz), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $FRTArGraNom$, relativamente ao cenário 4. Nestas figuras, são também ilustradas ampliações na escala do tempo (referente ao intervalo de 0 a 3 segundos), para melhor se observar o comportamento da velocidade do gerador durante os instantes subsequentes e próximos da perturbação.

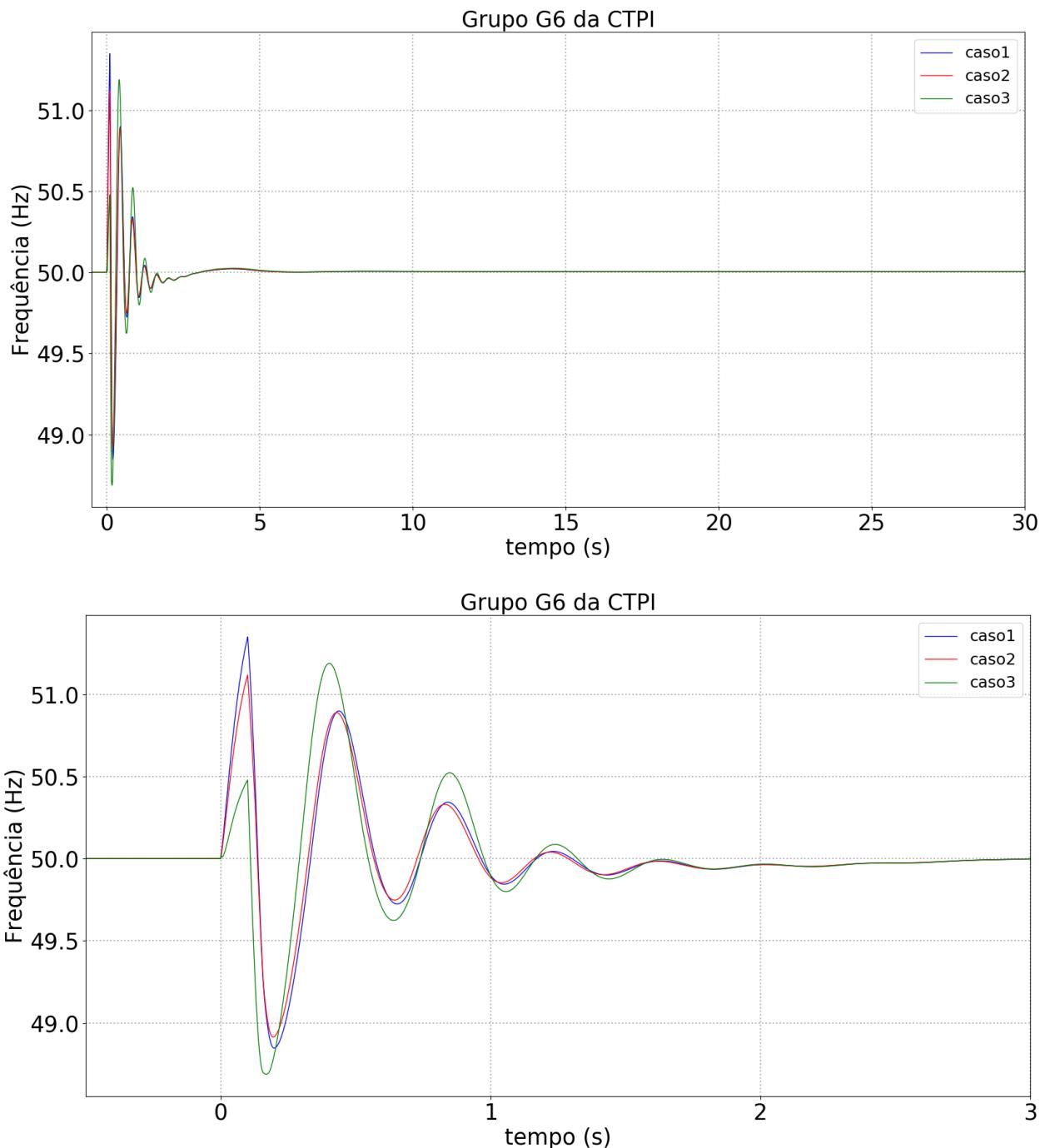


Figura 33. Velocidade do gerador síncrono (em cima – tempo total de simulação, em baixo – detalhe dos 0 a 3 s) – Cenário 4.

Na Figura 34 são apresentados os resultados referentes à tensão no ponto de ligação da CSFH com a rede, para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, relativamente ao cenário 4.

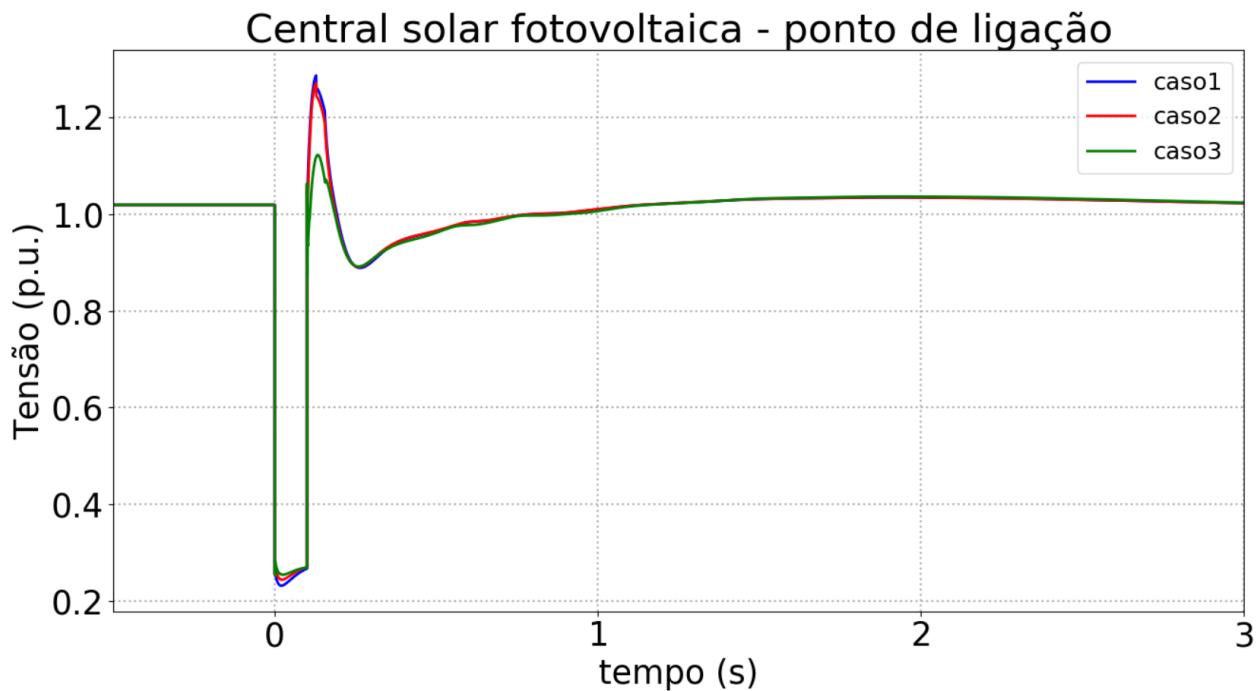


Figura 34. Tensão no ponto de ligação da CSFH – Cenário 4.

4.2.5 Resultados - Cenário 5

A Figura 35 e a Figura 36 representam o comportamento da corrente ativa e reativa injetada no ponto de ligação à rede, respetivamente, para os diferentes valores adotados para o parâmetro $FRTArGraNom$, no cenário 5.

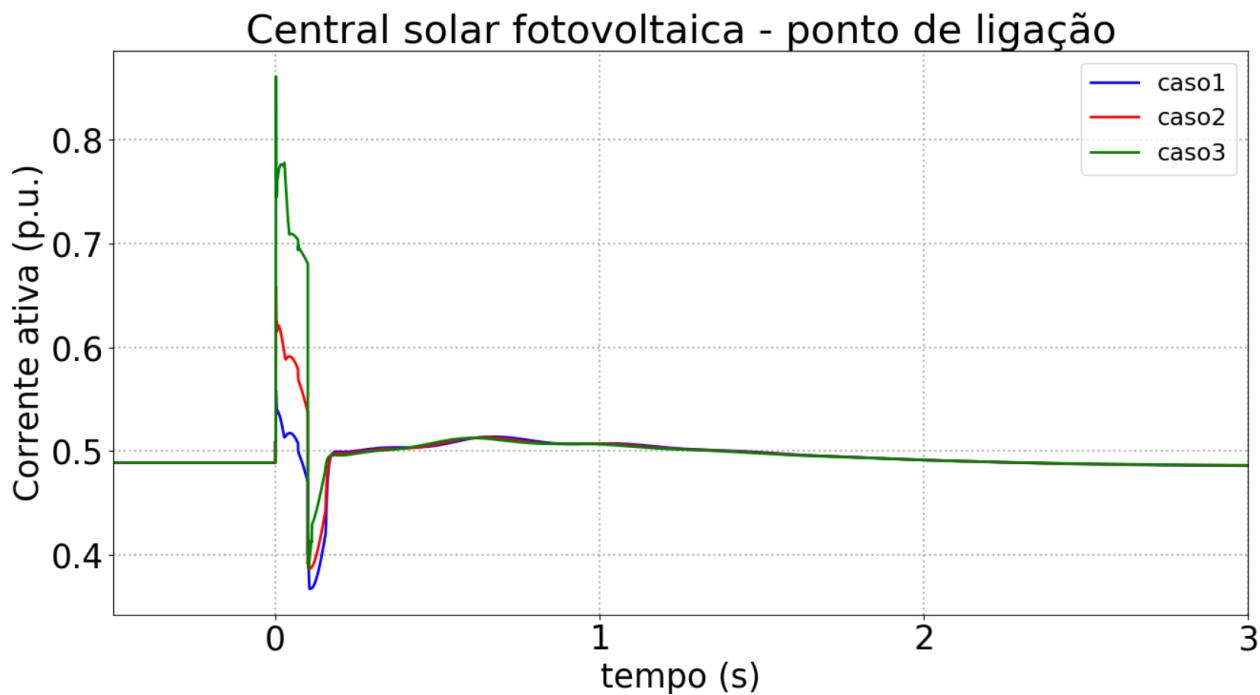


Figura 35. Resposta da corrente ativa da CSFH no Pol – Cenário 5.

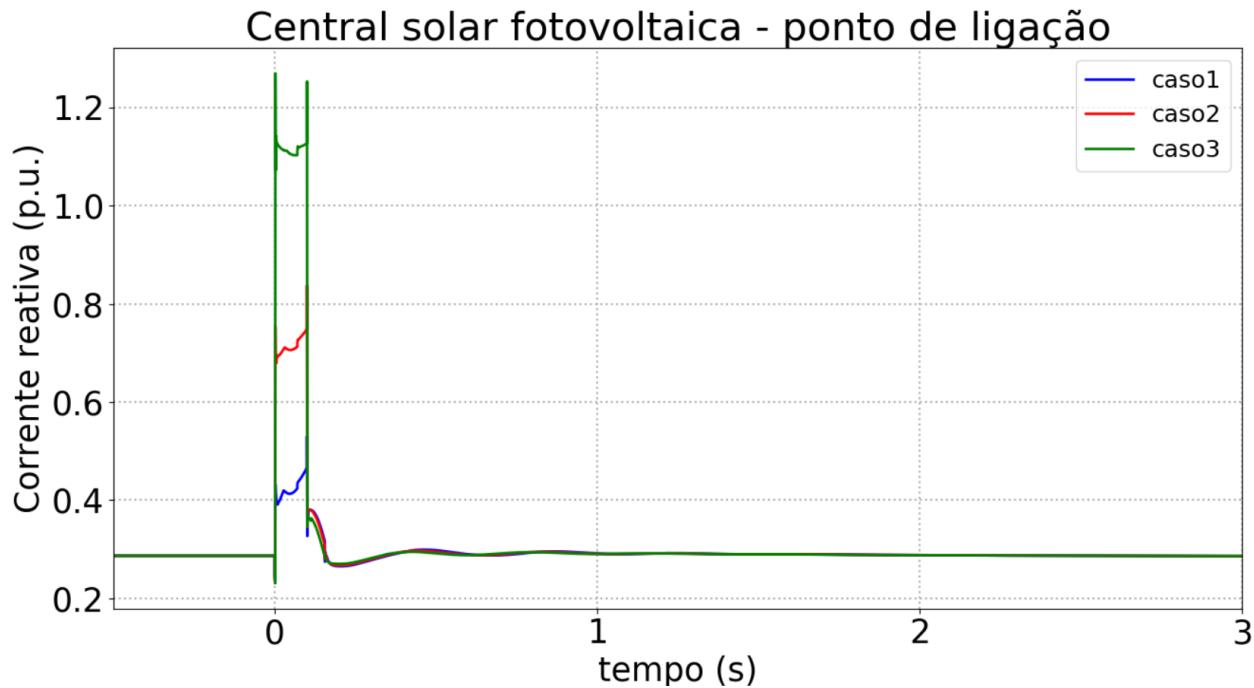


Figura 36. Resposta da corrente reativa da CSFH no Pol – Cenário 5.

A Figura 37 e a Figura 38 representam o comportamento da potência ativa e reativa no ponto de ligação à rede, respetivamente, para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, no cenário 5.

Central solar fotovoltaica - ponto de ligação

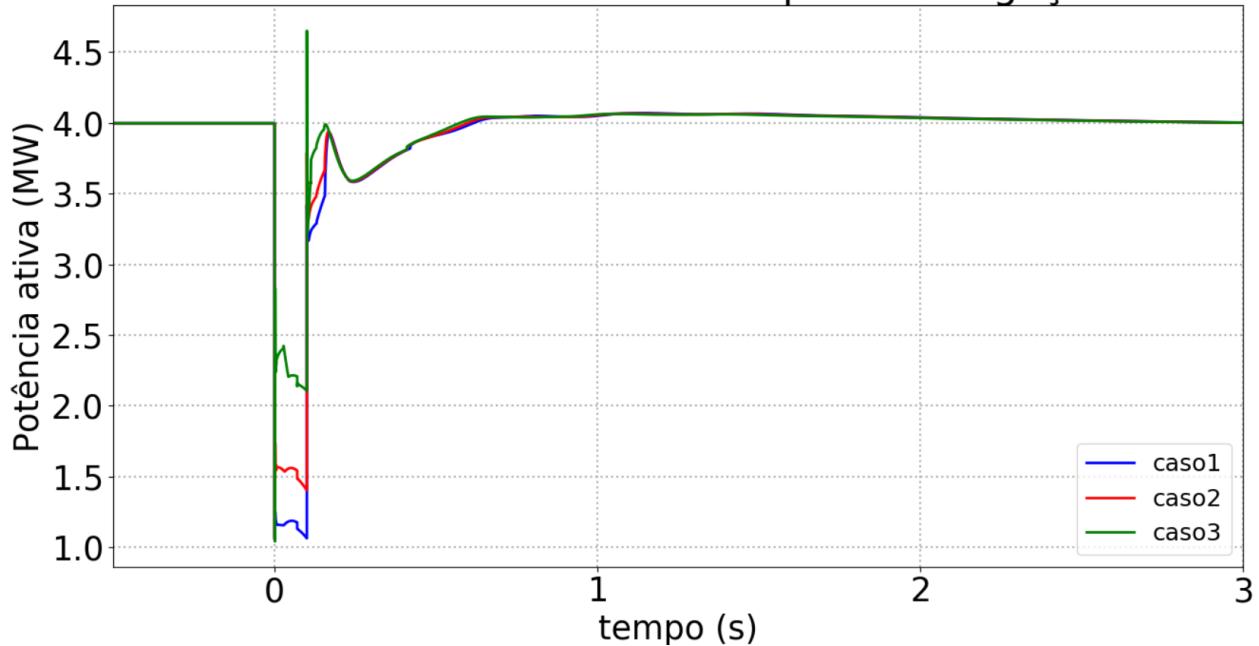


Figura 37. Resposta da potência ativa no Pol da CSFH – Cenário 5.

Central solar fotovoltaica - ponto de ligação

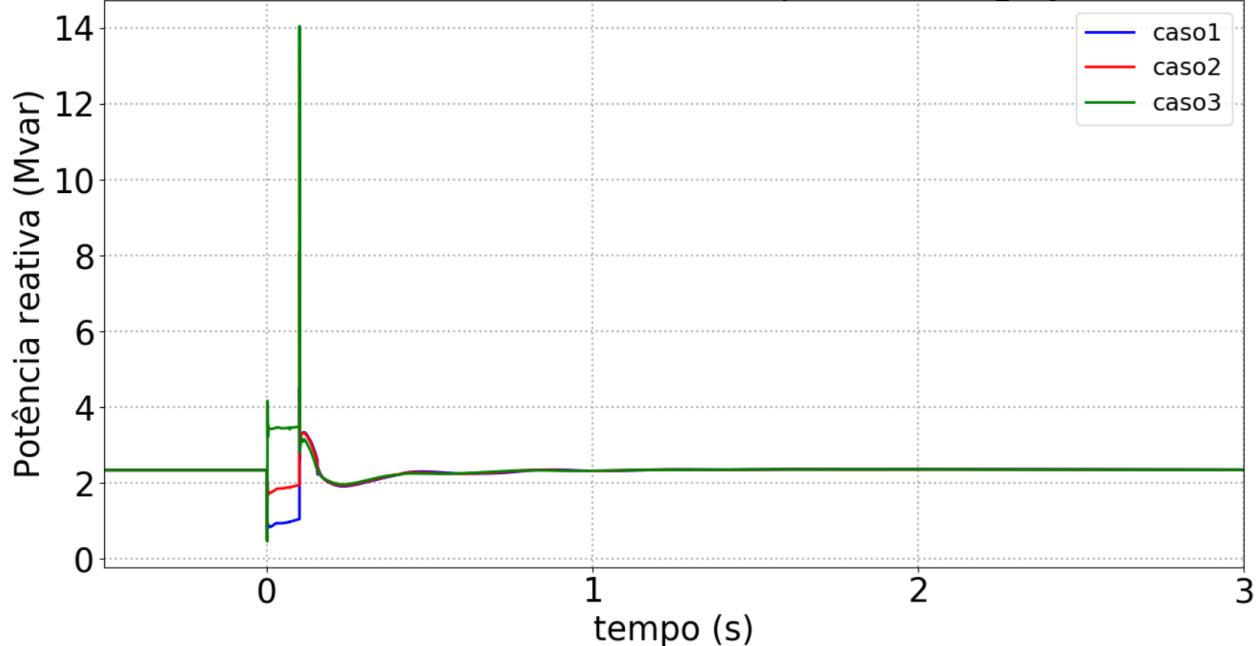


Figura 38. Resposta da potência reativa no Pol da CSFH – Cenário 5.

Na Figura 39 são apresentados os resultados referentes à velocidade do gerador síncrono em serviço (em Hz), para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, relativamente ao cenário 5. Nestas figuras, são também ilustradas ampliações na escala do

tempo (referente ao intervalo de 0 a 3 segundos), para melhor se observar o comportamento da velocidade do gerador durante os instantes subsequentes e próximos da perturbação.

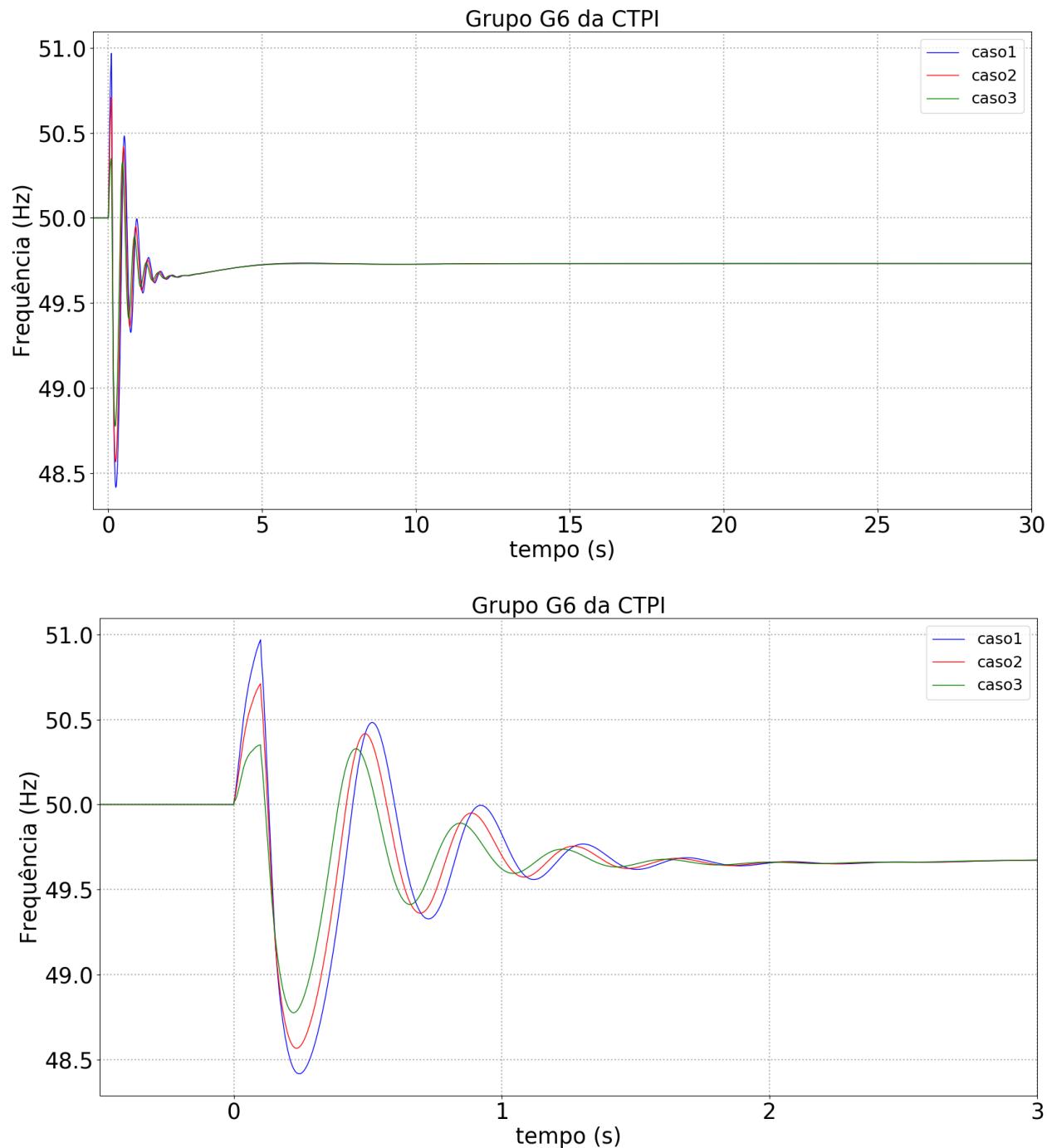


Figura 39. Velocidade do gerador síncrono (em cima – tempo total de simulação, em baixo – detalhe dos 0 a 3 s) – Cenário 5.

Na Figura 40 são apresentados os resultados referentes à tensão no ponto de ligação da CSFH com a rede, para os diferentes valores adotados para o parâmetro *FRTArGraNom*, relativamente ao cenário 5.

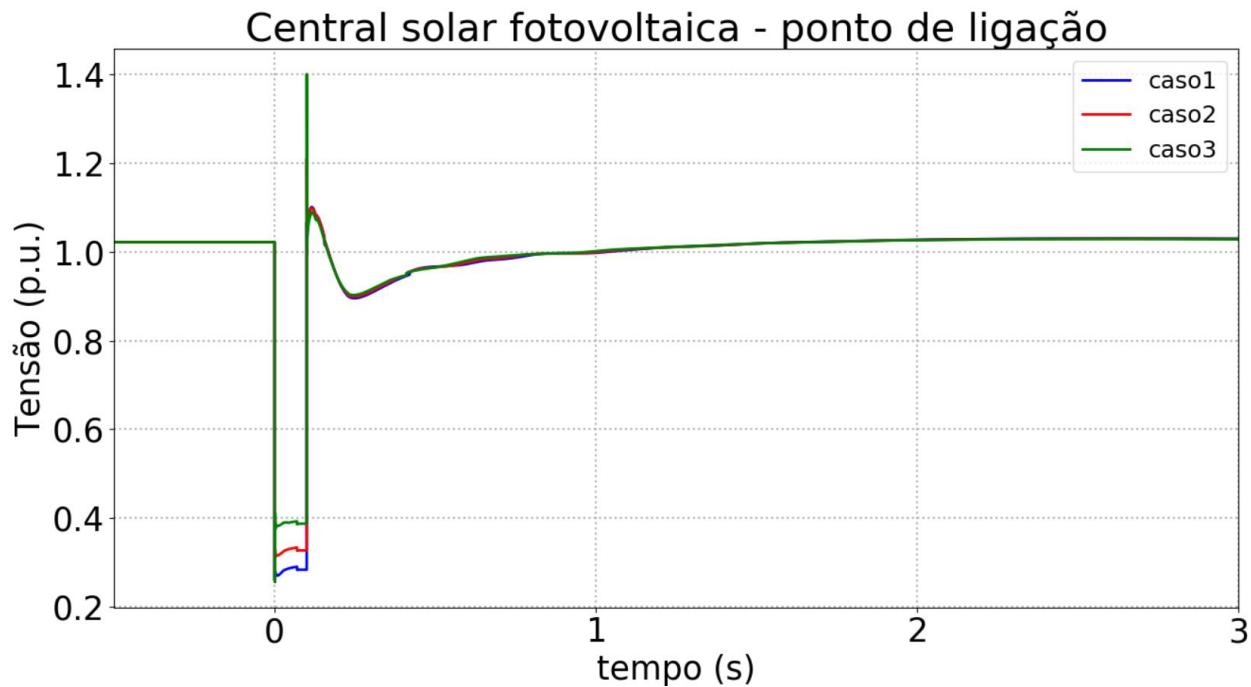


Figura 40. Tensão no ponto de ligação da CSFH – Cenário 5.

4.2.6 Análise aos resultados do modo FRT

Os resultados anteriormente apresentados permitem concluir que perante uma situação de cava de tensão a CSFH é capaz de injetar uma ampla gama de corrente reativa modulada pelo parâmetro *FRTArGraNom*.

A utilização de valores mais elevados para o parâmetro *FRTArGraNom* conduz a uma maior capacidade de injeção de corrente reativa durante o defeito. Com a exceção do cenário 4, a maior injeção de corrente reativa conduz a melhorias no comportamento temporal da frequência após o defeito. De facto, a utilização de valores mais elevados no parâmetro *FRTArGraNom* revelou-se preferível aos valores mais pequenos, em termos do impacto geral causado no sistema.

Verifica-se igualmente que a injeção de valores elevados de corrente reativa durante cavas não acarreta impacto nas sobretensões rápidas que se verificam no ponto de ligação nos momentos subsequentes à eliminação do defeito.

Observa-se também que a variação da tensão é praticamente instantânea, sendo que quanto menor for o parâmetro *FRTArGraNom*, menor será o valor mínimo de tensão registada (menos contribuição de corrente reativa pela CSFH).

Como se observa através dos resultados patentes da subsecção 4.2.1 à 4.2.5, a ocorrência do defeito origina excursões de frequência pouco significativas para todos os cenários, com a exceção do cenário 2. Neste cenário verifica-se uma excursão muito rápida e acentuada na frequência, chegando mesmo a atingir valores de NADIR abaixo dos 46 Hz. No entanto, observa-se que apesar da excursão de frequência ser relevante, esta não apresenta risco de ativação das proteções de deslastre de frequência, uma vez que o primeiro nível de ativação implica um desvio de frequência de 48.5 Hz durante pelo menos 1.4 segundos e um gradiente de frequência de 1.5 Hz/s para uma janela de 120 ms.

Importa ainda referir que, o PETC é um parque eólico antigo e, por isso, não tem mecanismo de sobrevivência a cavas de tensão. Por consequência, nos cenários 2 e 5, em que o PETC está a injetar potência na rede, a simulação do defeito origina uma queda abrupta de tensão para valores inferiores a 0.8 p.u., tendo como consequência a ativação da proteção de mínimo de tensão do PETC e a sua saída de serviço; por conseguinte, e dado que os mecanismos e regulação secundária de frequência não estão representados no presente estudo, esta não retorna aos 50 Hz.

4.3 Análise da Capacidade de Redução Automática de Potência Ativa Face ao Aumento de Frequência

De forma a avaliar a capacidade de redução automática de potência ativa da CSFH face ao aumento de frequência, foi simulado um deslastre intempestivo de carga o qual ocorre aos 0 s de simulação. Para os cenários 1 e 2 a perda de carga considerada é de 1.01 MW e 0.49 Mvar, para o cenário 3 e 4 a perda de carga considerada é de 0.78 MW e 0.38 Mvar e para o cenário 5 a perda de carga considerada é de 0.87 MW e 0.42 Mvar.

Relativamente à capacidade de redução automática de potência ativa por parte da CSFH, foi considerada a possibilidade de variar o valor do parâmetro *PWGra* da Tabela 7 numa gama entre 10% e 45%. Foram assim considerados três casos de estudo, distintos perante cada um dos cenários apresentados na Secção 4.1:

- **Caso 1:** *PWGra* = 10%;
- **Caso 2:** *PWGra* = 20%;
- **Caso 3:** *PWGra* = 45%.

Para os estudos de análise da capacidade de redução automática de potência ativa face ao aumento da frequência, foi considerada uma banda-morta de leitura de frequência de 50.5 Hz no modelo dos conversores (parâmetro *PHzStr* da Tabela 7 igual a 0.5 Hz).

4.3.1 Resultados - Cenário 1

Na Figura 41 são apresentados os resultados referentes à velocidade do gerador síncrono em serviço (em Hz), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PWGra$, relativamente ao cenário 1.

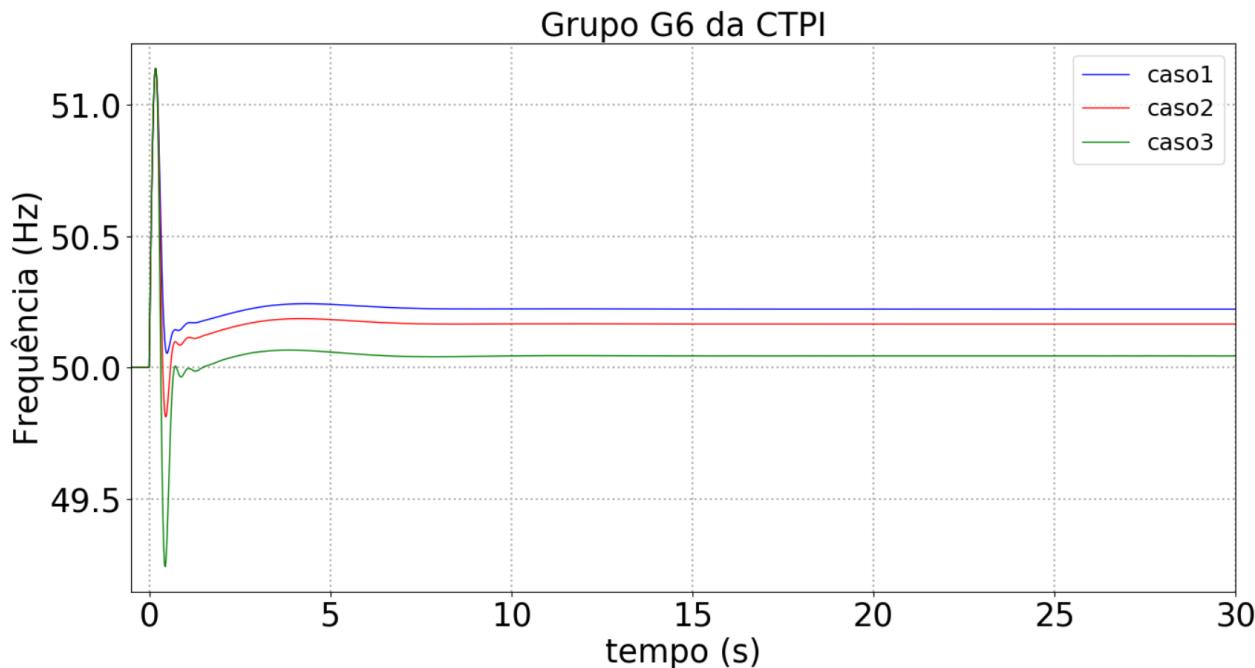


Figura 41. Velocidade do gerador síncrono para os diferentes casos – Cenário 1.

Na Figura 42 são apresentados os resultados referentes à resposta em potência ativa da CSFH, para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PWGra$, relativamente ao cenário 1.

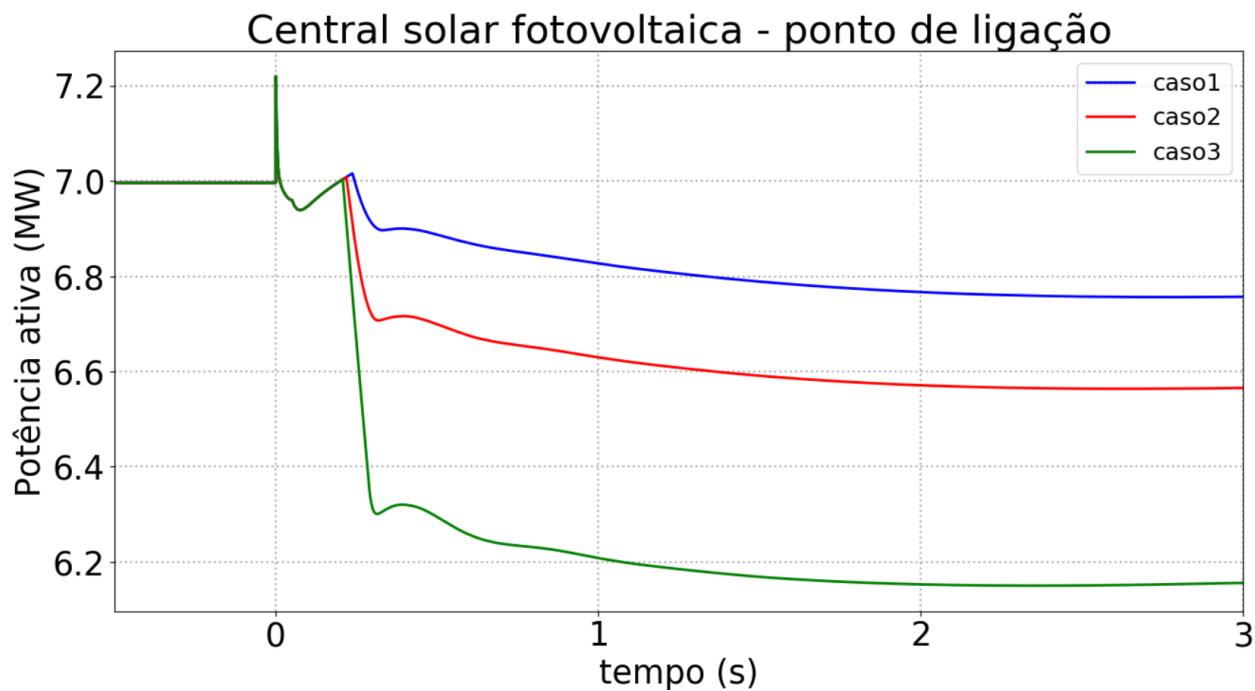
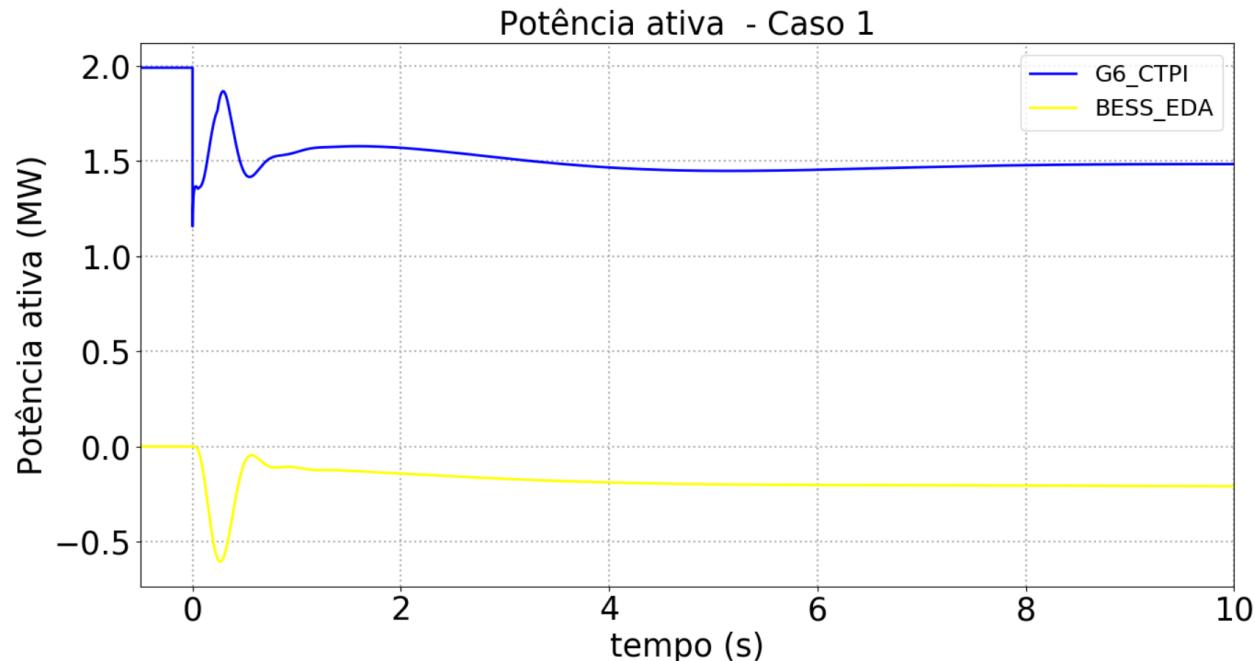


Figura 42. Resposta da CSFH em termos de potência ativa no ponto de ligação – Cenário 1.

Na Figura 43 são apresentados os resultados referentes à resposta em potência ativa do gerador síncrono em serviço e do sistema de reserva rápido (BESS), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PWGra$, relativamente ao cenário 1.



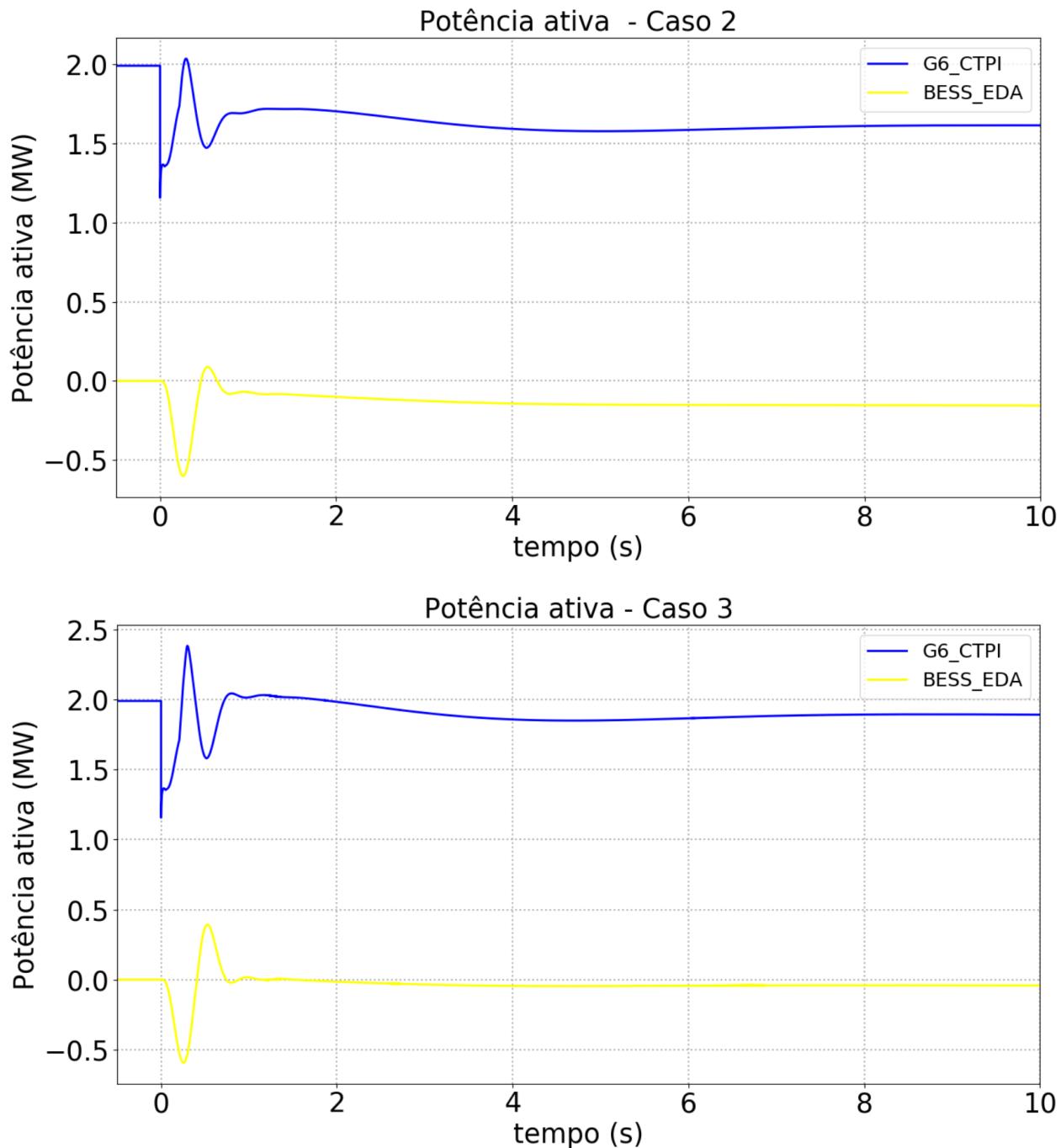


Figura 43. Resposta de potência ativa do gerador síncrono e BESS (em primeiro - caso1, em segundo - caso2 e em terceiro - caso3) – Cenário 1.

4.3.2 Resultados - Cenário 2

Na Figura 44 são apresentados os resultados referentes à velocidade do gerador síncrono em serviço (em Hz), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PWGra$, relativamente ao cenário 2.

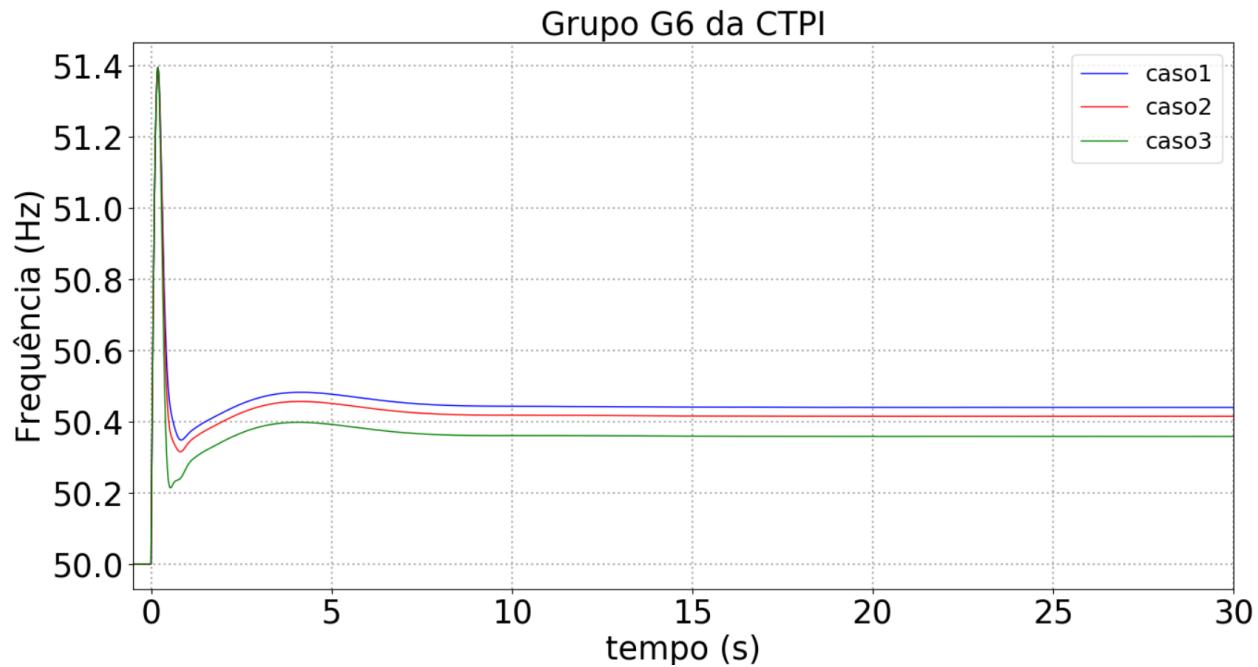


Figura 44. Velocidade do gerador síncrono para os diferentes casos – Cenário 2.

Na Figura 45 são apresentados os resultados referentes à resposta em potência ativa da CSFH, para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PWGra$, relativamente ao cenário 2.

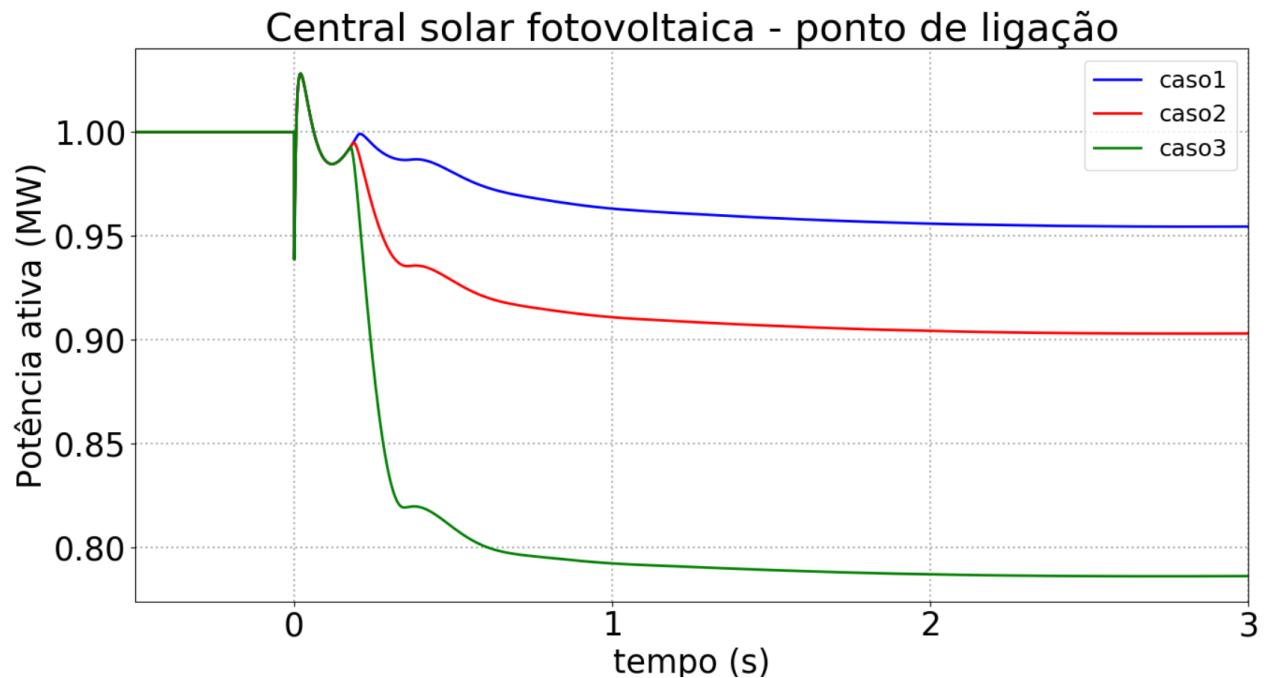
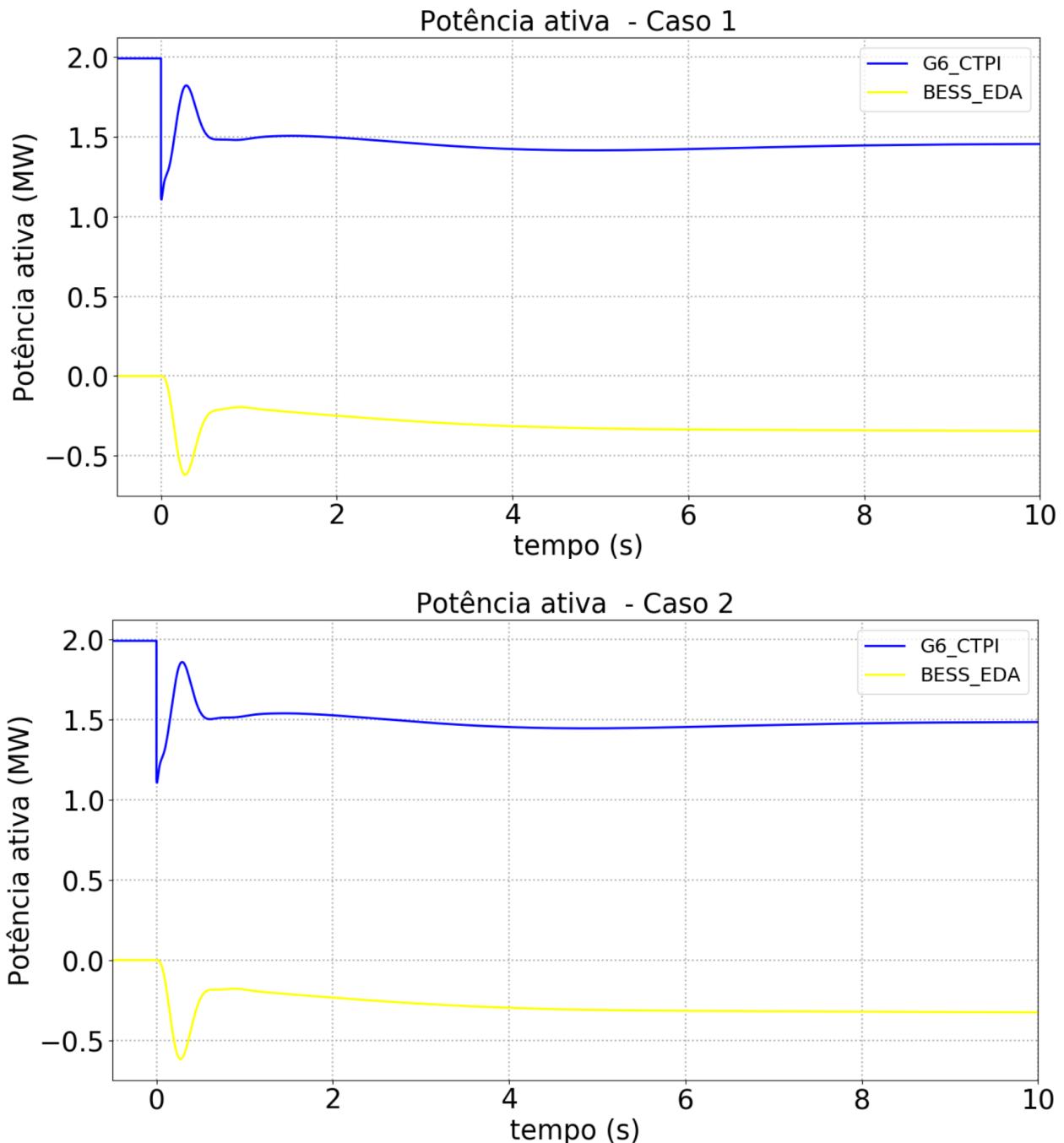


Figura 45. Resposta da CSFH em termos de potência ativa no ponto de ligação – Cenário 2.

Na Figura 46 são apresentados os resultados referentes à resposta em potência ativa do gerador síncrono em serviço e do sistema de reserva rápida (BESS), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PW Gra$, relativamente ao cenário 2.



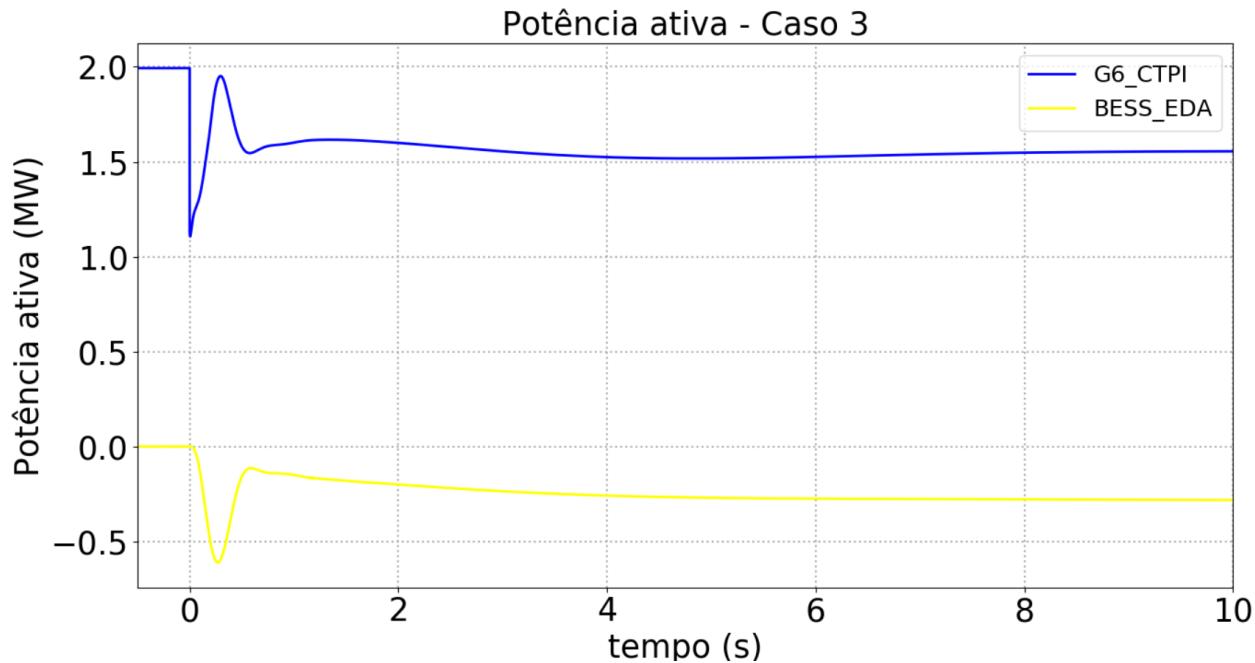


Figura 46. Resposta de potência ativa do gerador síncrono e BESS (em primeiro - caso1, em segundo - caso2 e em terceiro - caso3) – Cenário 2.

4.3.3 Resultados - Cenário 3

Na Figura 47 são apresentados os resultados referentes à velocidade do gerador síncrono em serviço (em Hz), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PWGra$, relativamente ao cenário 3.

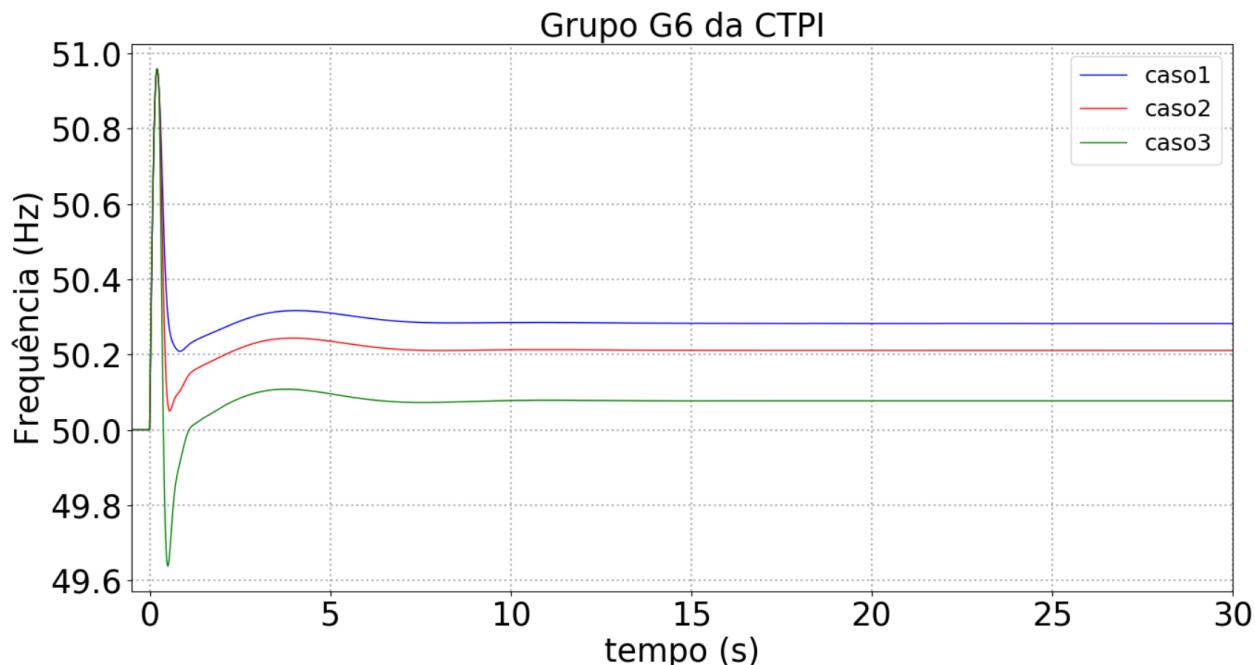


Figura 47. Velocidade do gerador síncrono para os diferentes casos – Cenário 3.

Na Figura 48 são apresentados os resultados referentes à resposta em potência ativa da CSFH, para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PWGra$, relativamente ao cenário 3.

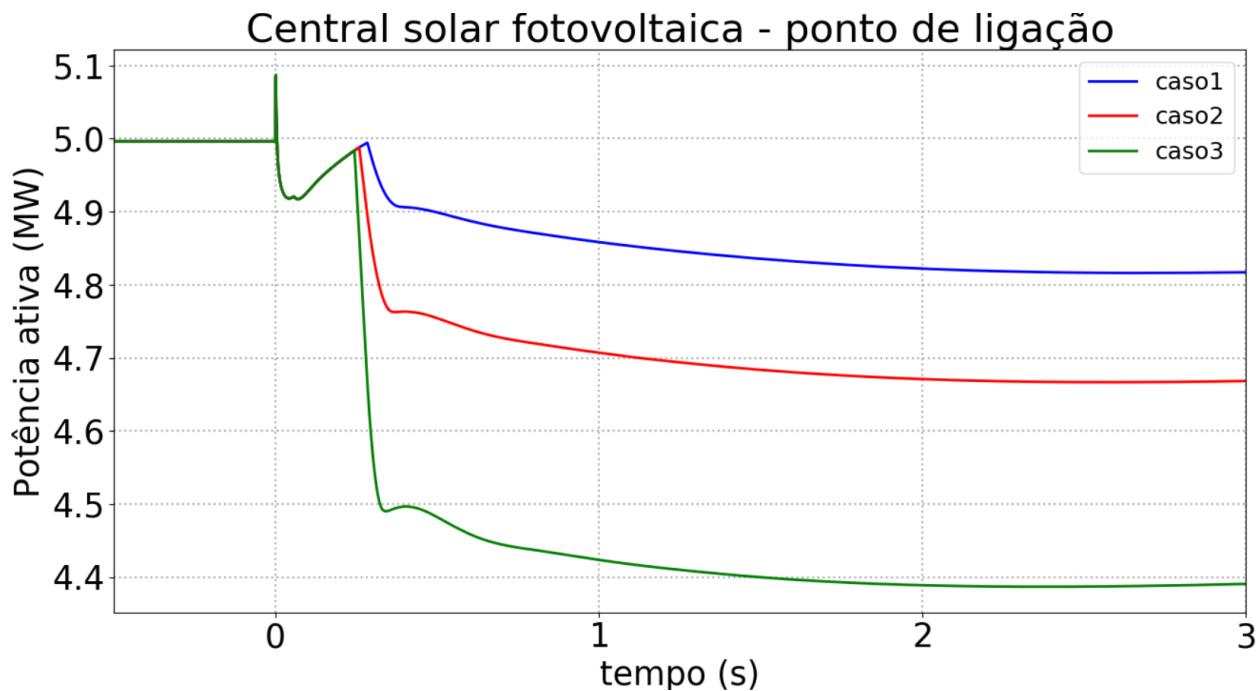
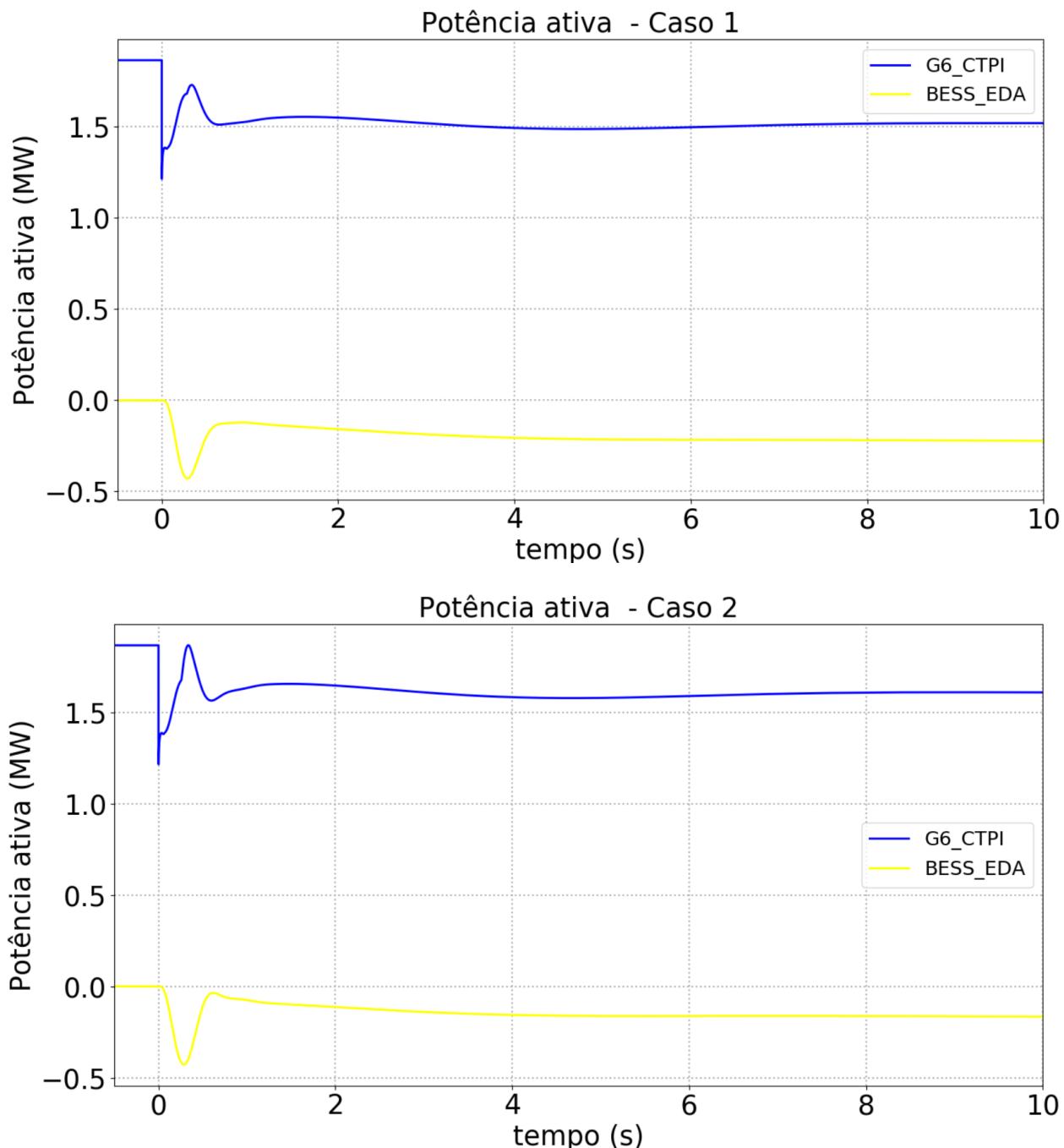


Figura 48. Resposta da CSFH em termos de potência ativa no ponto de ligação – Cenário 3.

Na Figura 49 são apresentados os resultados referentes à resposta em potência ativa do gerador síncrono em serviço e do sistema de reserva rápido (BESS), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PWGra$, relativamente ao cenário 3.



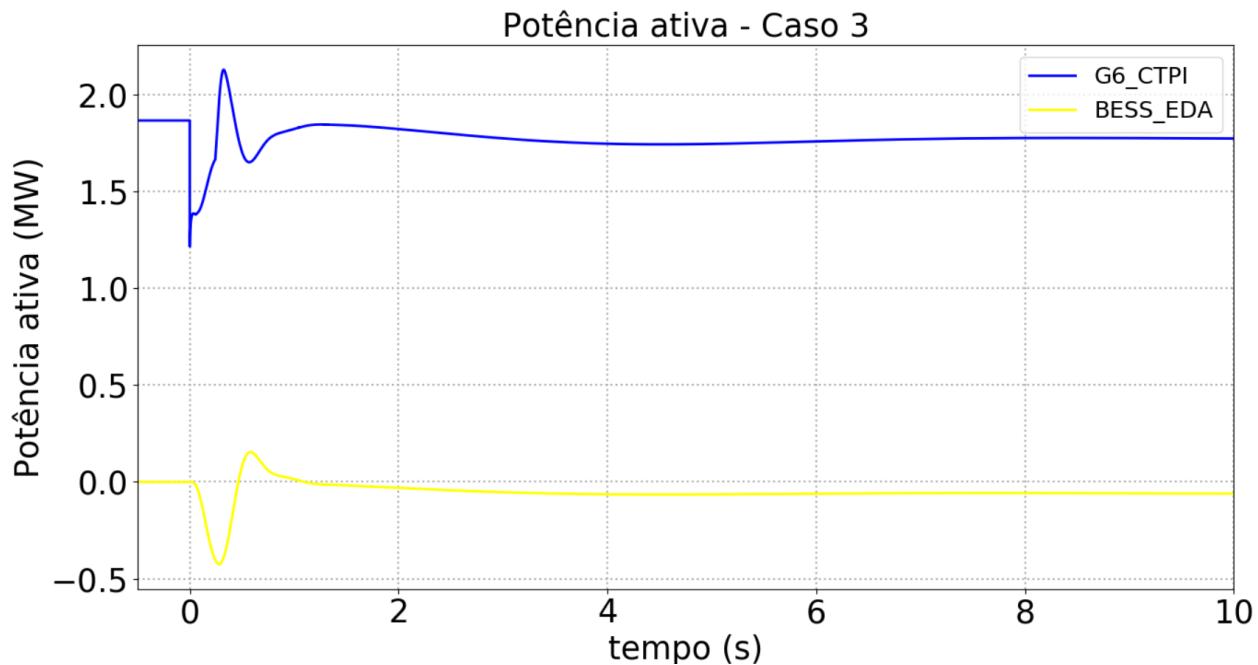


Figura 49. Resposta de potência ativa do gerador síncrono e BESS (em primeiro - caso1, em segundo - caso2 e em terceiro - caso3) – Cenário 3.

4.3.4 Resultados - Cenário 4

Na Figura 50 são apresentados os resultados referentes à velocidade do gerador síncrono em serviço (em Hz), para os diferentes valores adotados para o parâmetro *PWGra*, relativamente ao cenário 4.

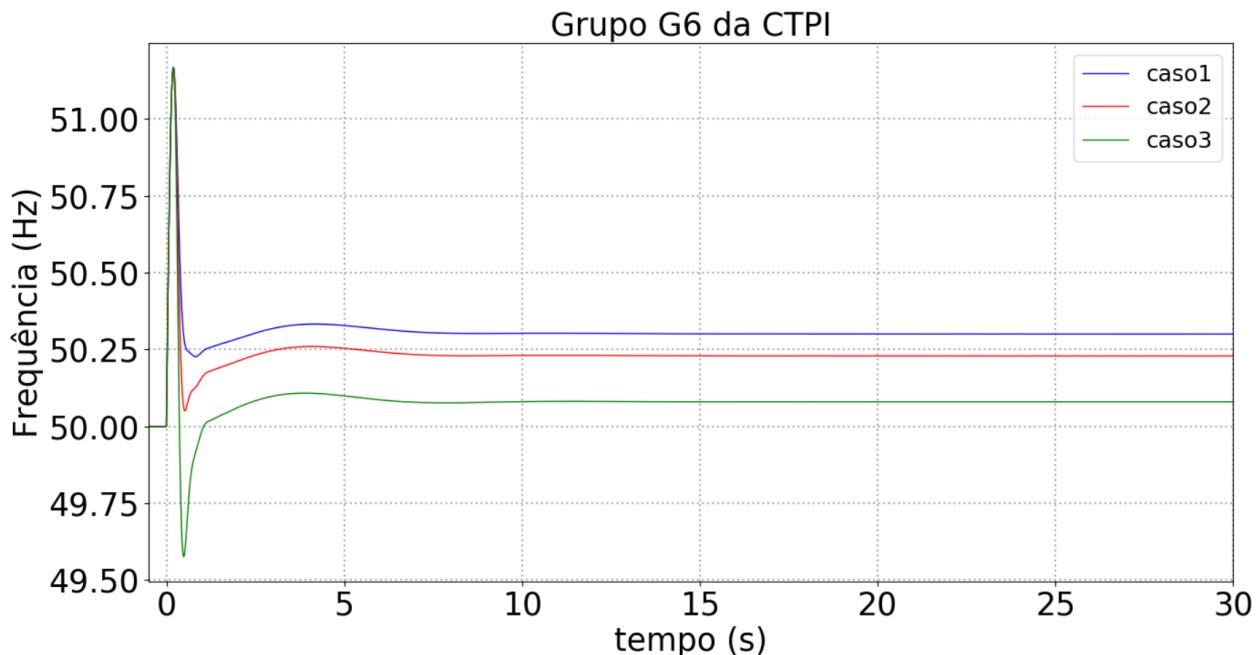


Figura 50. Velocidade do gerador síncrono para os diferentes casos – Cenário 4.

Na Figura 51 são apresentados os resultados referentes à resposta em potência ativa da CSFH, para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PWGra$, relativamente ao cenário 4.

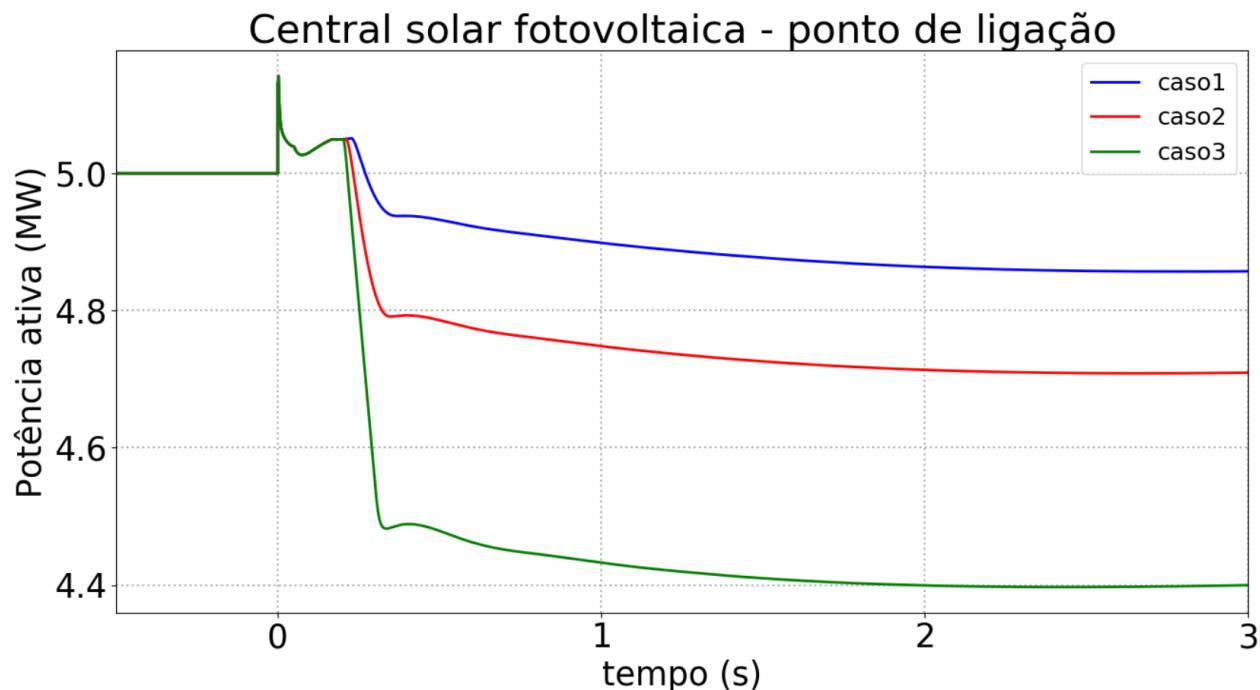
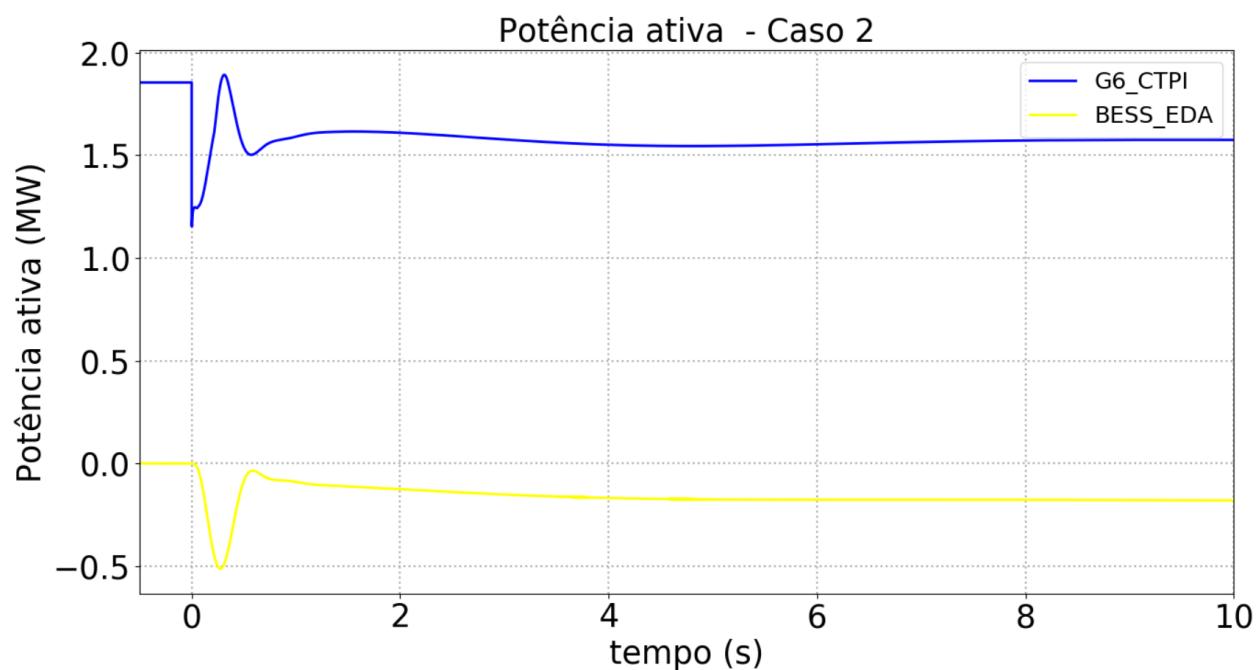
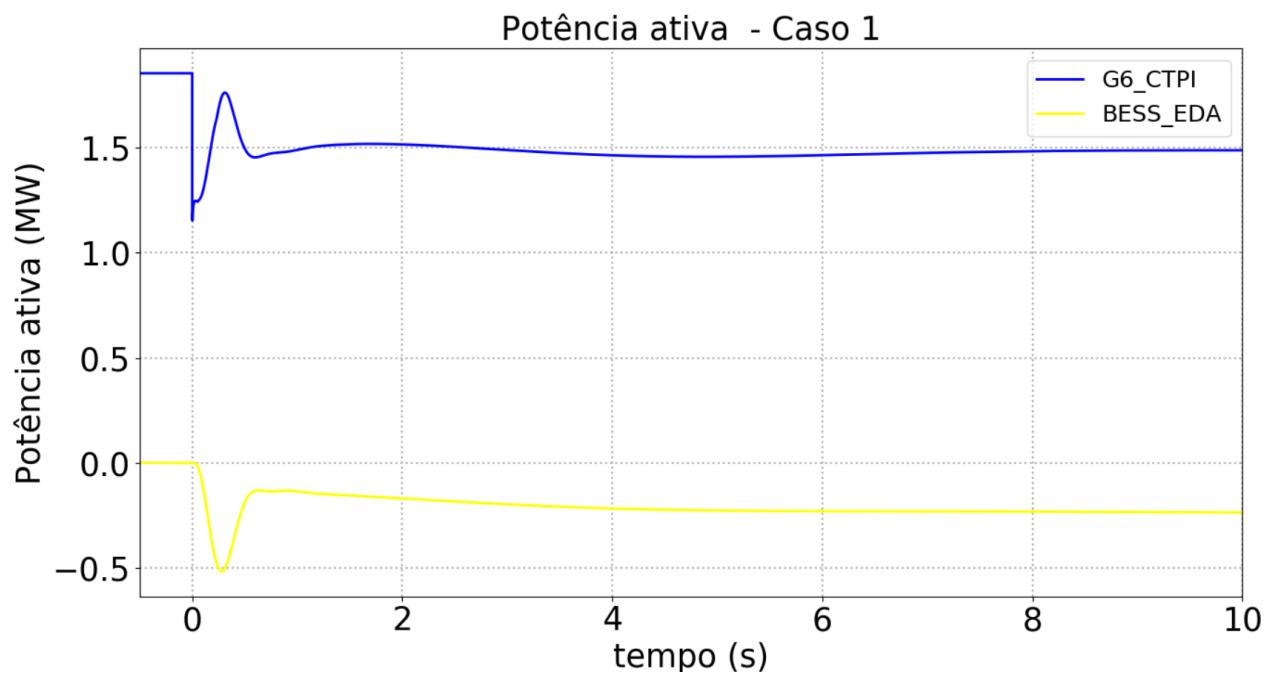


Figura 51. Resposta da CSFH em termos de potência ativa no ponto de ligação – Cenário 4.

Na Figura 52 são apresentados os resultados referentes à resposta em potência ativa do gerador síncrono em serviço e do sistema de reserva rápido (BESS), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PWGra$, relativamente ao cenário 4.



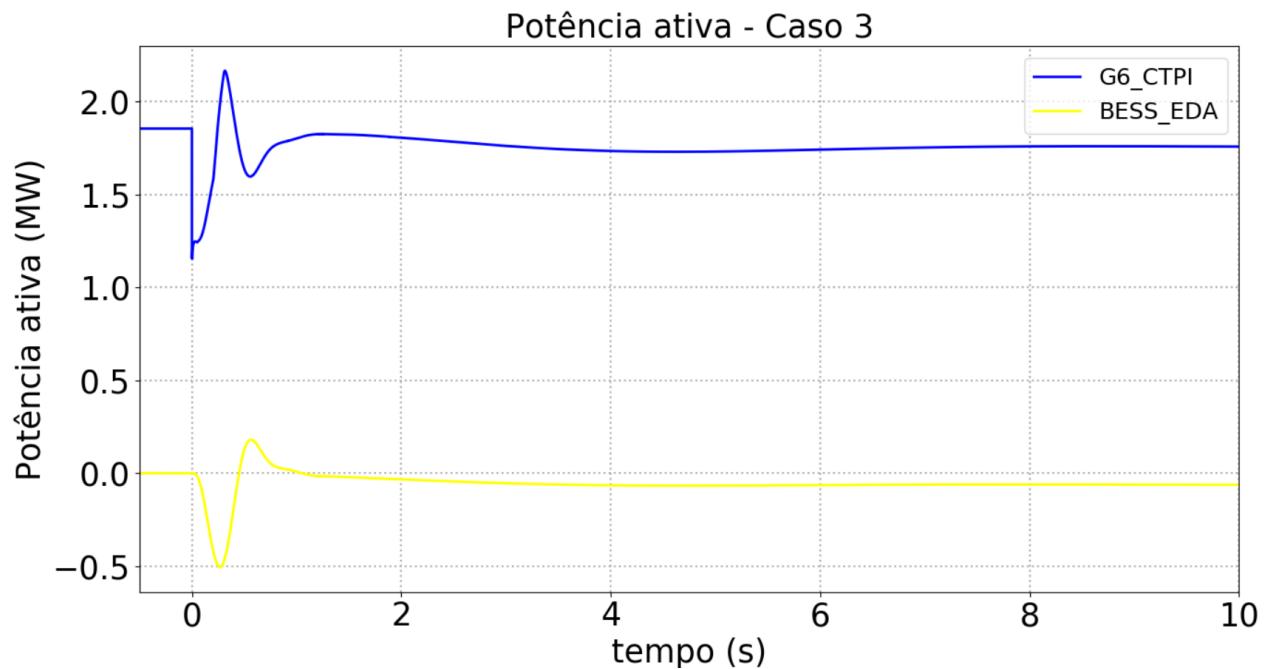


Figura 52. Resposta de potência ativa do gerador síncrono e BESS (em primeiro - caso1, em segundo - caso2 e em terceiro - caso3) – Cenário 4.

4.3.5 Resultados - Cenário 5

Na Figura 53 são apresentados os resultados referentes à velocidade do gerador síncrono em serviço (em Hz), para os diferentes valores adotados para o parâmetro *PWGra*, relativamente ao cenário 5.

Grupo G6 da CTPI

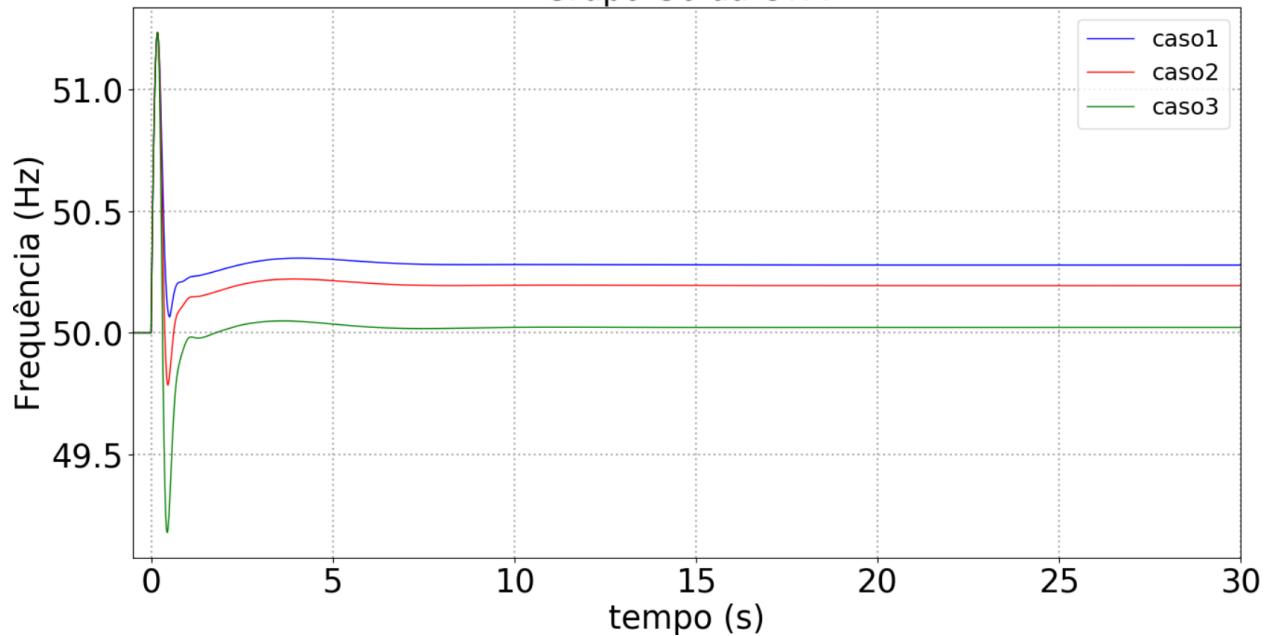


Figura 53. Velocidade do gerador síncrono para os diferentes casos – Cenário 5.

Na Figura 54 são apresentados os resultados referentes à resposta em potência ativa da CSFH, para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PWGra$, relativamente ao cenário 5.

Central solar fotovoltaica - ponto de ligação

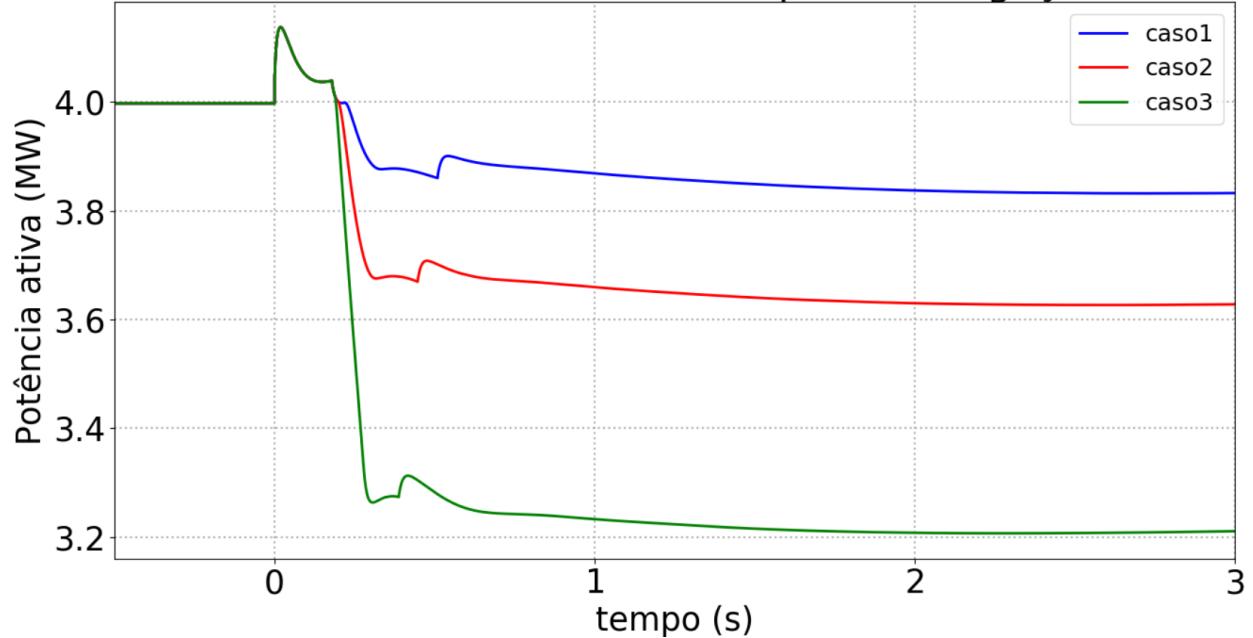
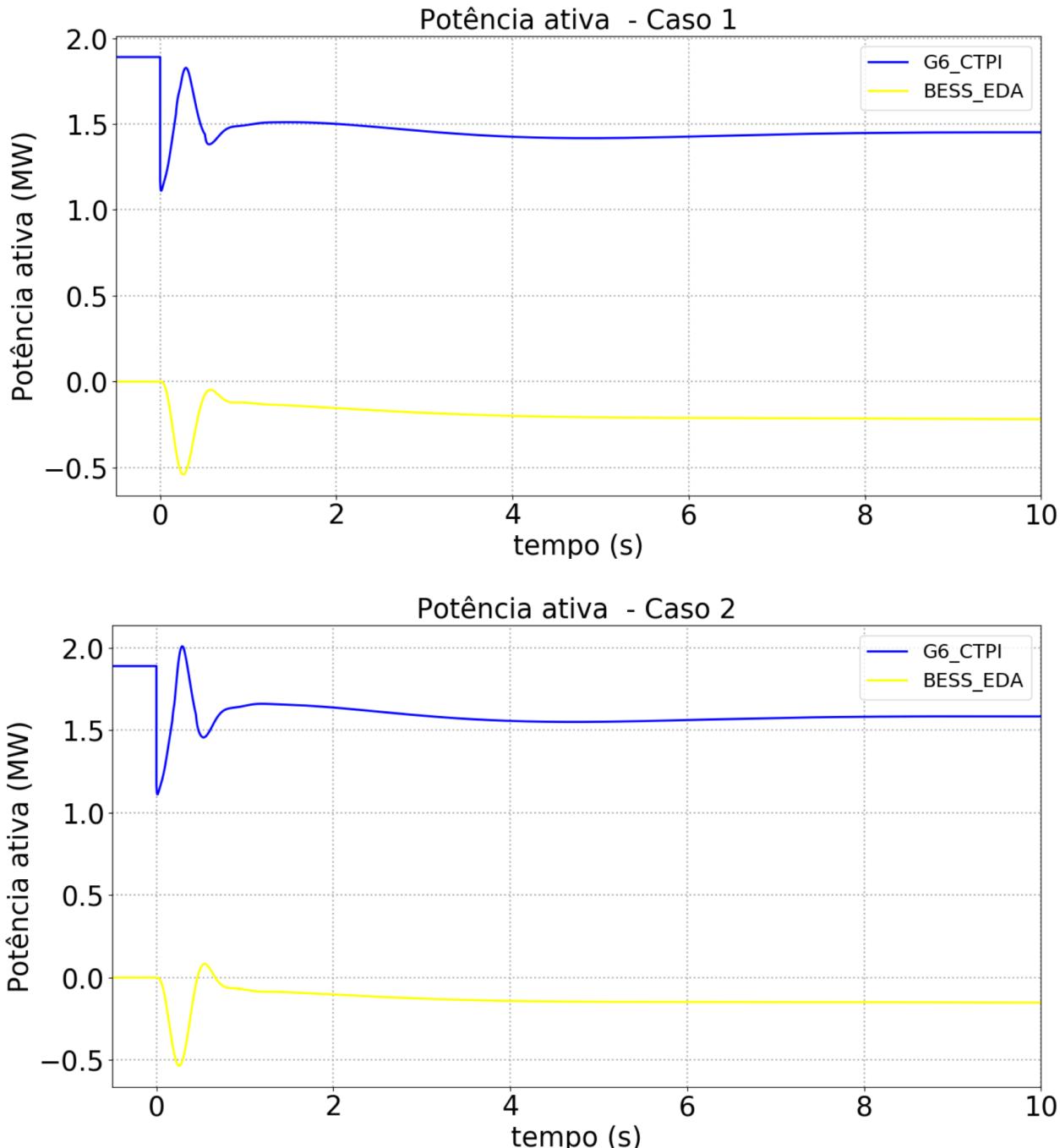


Figura 54. Resposta da CSFH em termos de potência ativa no ponto de ligação – Cenário 5.

Na Figura 55 são apresentados os resultados referentes à resposta em potência ativa do gerador síncrono em serviço e do sistema de reserva rápido (BESS), para os diferentes valores adotados para o parâmetro $PWGra$, relativamente ao cenário 5.



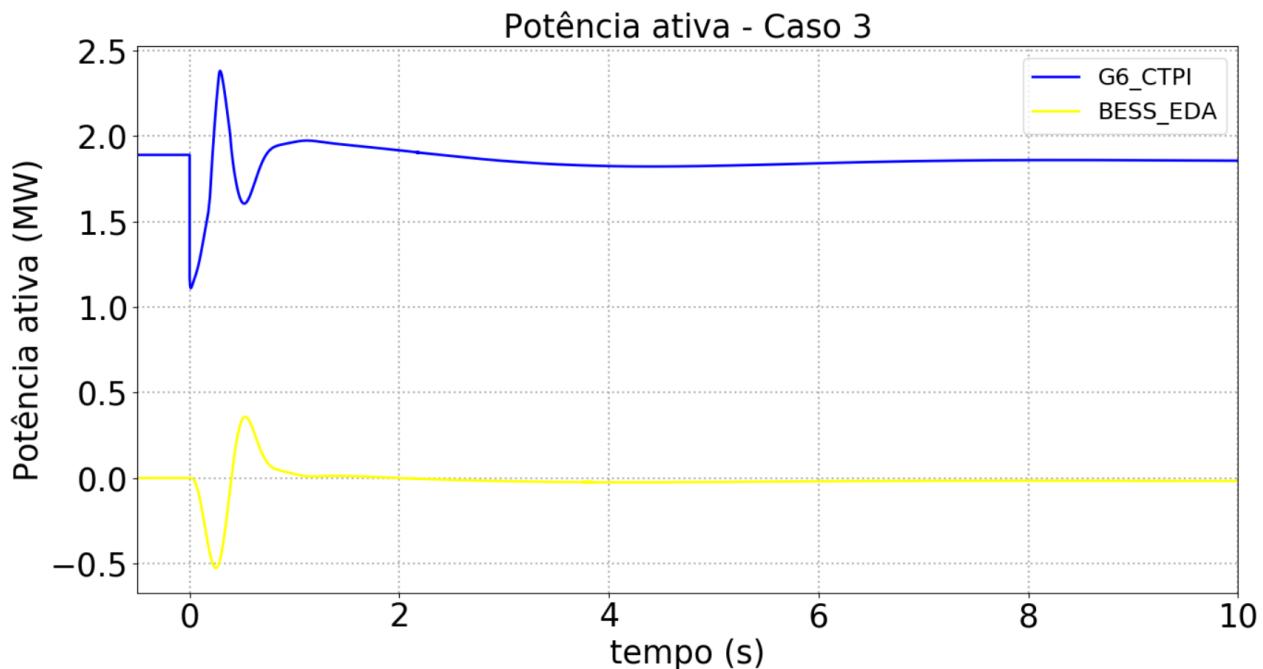


Figura 55. Resposta de potência ativa do gerador síncrono e BESS (em primeiro - caso1, em segundo - caso2 e em terceiro - caso3) – Cenário 5.

4.3.1 Análise aos resultados do modo de estatismo P(f)

Os resultados patentes da subsecção 4.3.1 à 4.3.5 permitem verificar que a CSFH é capaz de modular (diminuindo) a injeção de potência ativa após um evento de sobre-frequência na rede. Da análise de sensibilidade efetuada nos diversos cenários, verifica-se que o caso 3, que apresenta o valor mais elevado para o parâmetro $PWGra$, a capacidade de redução da potência injetada pela CSFH é maior. Esta maior capacidade de redução da potência ativa injetada permite reduzir o esforço de regulação que é exigido quer ao gerador síncrono da CTPI quer ao sistema de reserva rápida (BESS), permitindo assim uma pequena redução no Zénite do desvio da velocidade do gerador síncrono, após o deslastre de carga. Desta forma sugere-se a utilização de um valor próximo dos 40% no parâmetro $PWGra$ a utilizar nos conversores da CSFH.

5 Conclusões

O trabalho de consultoria técnica documentado no presente relatório teve como objetivo avaliar o impacto da integração de uma central solar fotovoltaica híbrida, com potência instalada de 8 MW, no sistema eletroprodutor da ilha do Pico. Foram realizados dois estudos distintos:

- Análise em regime estacionário: avaliação da capacidade de injeção/consumo de potência reativa nos dois pontos de interligação da CSFH à rede de distribuição e transporte da ilha do Pico, perante quatro cenários distintos;
- Análise em comportamento dinâmico, tendo como objetivo avaliar o comportamento da CSFH relativamente à sua capacidade de sobrevivência a cavas de tensão e de injeção de

corrente reativa, bem como da redução automática de potência ativa face a aumentos de frequência. Para tal foram consideradas as condições de funcionamento da referida central, bem como as características do restante sistema eletroprodutor da ilha e regras de despacho de forma a definir situações críticas do ponto de vista das condições de estabilidade da rede, as quais foram previamente validadas pela EDA, S.A.. Assim sendo, foram definidos cinco cenários operacionais para os quais foi realizada uma análise comparativa das respetivas condições de estabilidade.

Os resultados das simulações permitem concluir que:

- Amplitude da capacidade de injeção/consumo de potência reativa no ponto de ligação da rede, está diretamente relacionado com as características da curva PQ de cada conversor que foi considerada e do cenário em causa, verificando-se que a infraestrutura elétrica de corrente alternada que constituiu a rede da CSFH não tem um impacto preponderante na modificação dessa curva no ponto de ligação em face da curva considerada aos terminais de cada módulo conversor. Assim, é possível concluir que a utilização da curva PQ relativa aos módulos conversores a instalar permite que a instalação disponibilize uma gama de ampla de modulação de potência reativa no seu ponto de interligação;
- A central deve dispor de capacidade de redução automática da potência ativa injetada perante situações de sobre-frequência, recomendando-se a utilização de um valor do parâmetro *PWGra* na ordem dos 40% neste modo de operação para permitir não só reduzir o valor do Zénite de frequência, como reduzir o esforço de regulação sobre os geradores síncronos e sistema de reserva rápida;
- A central deve dispor de capacidade de sobrevivência a cavas de tensão e de injeção de corrente reativa durante o defeito. Os resultados apontam demonstram benefícios técnicos resultantes da maximização da injeção de corrente reativa durante o defeito, com a exceção de um dos cenários, o 4. Por isso, recomenda-se a utilização de um valor intermédio alto de 0.8 para o parâmetro *FRTArGraNom*.

Finalmente importa referir que os estudos apresentados neste documento evidenciam a ocorrência de excursões de frequência relevantes perante a cava de tensão considerada, particularmente no cenário de operação 2. No entanto, estas excursões de frequência medidas ao nível do desvio de velocidade do gerador síncrono G6 não apresentam risco de ativação das proteções de deslastre de frequência, uma vez que o primeiro nível de ativação implica um desvio de frequência de 48.5 Hz durante pelo menos 1.4 segundos e um gradiente de frequência de 1.5 Hz/s para uma janela de 120 ms.

6 Referências

- [1] P. 3. Model Library, "Power System Simulator for Engineering (PSS®E). Siemens Power Technologies International (PTI)," September 2020.
- [2] SMA, "Description of the model of the SMA Sunny Central solar (and storage) inverters for power flow and stability studies in PSS®E," 2022.

7 Apêndice

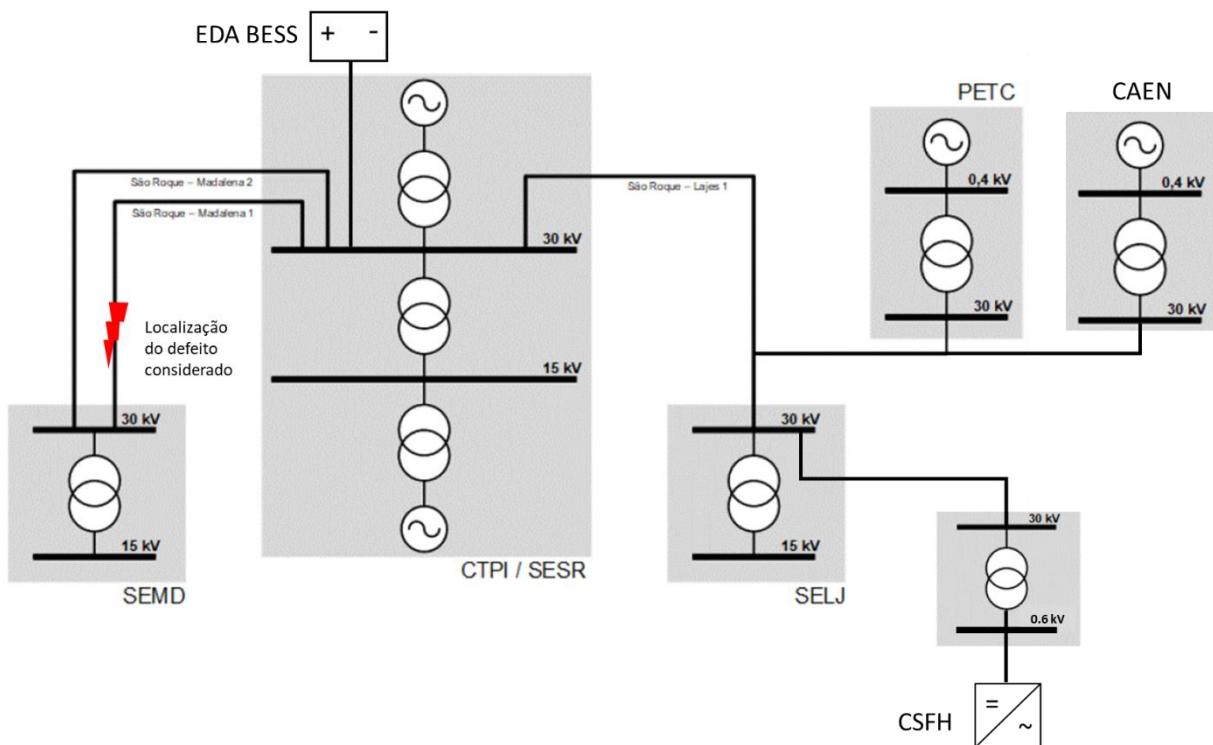


Figura 56. Esquema unifilar do sistema elétrico da ilha do Pico e localização do curto-circuito considerado.