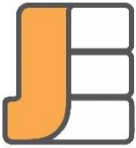


Desenvolvimento de modelos para análise de desempenho de sistemas planejados em Corrente Contínua em Alta Tensão

Produto 3

Equivalentes com modelagem dinâmica da rede elétrica em PSCAD™

02	19/07/2023	Atendendo aos comentários da EPE	MJAS/GMG	VRO
01	23/06/2023	Revisão 1	MJAS/GMG	VRO
00	14/12/2022	Emissão Inicial	GMG/MJAS	VRO
Rev.	Data	Descrição	Elaborado	Aprovado

Cliente: Empresa de Pesquisa Energética (EPE)	Projeto Desenvolvimento de modelos para análise de desempenho de sistemas planejados em Corrente Contínua em Alta Tensão Título do Documento: Produto 3 - Equivalentes com modelagem dinâmica da rede elétrica em PSCAD™
 JORDÃO SOLUÇÕES EM ENERGIA	Nº Projeto/Contrato Nº Documento RL-CL339-066-23 Revisão 02 Nº Folhas 75

SUMÁRIO

SUMÁRIO	2
1 Introdução	3
2 Equivalentes de rede dinâmicos - Produto 3.....	4
3 Conclusões.....	5
4 Modelagem dos Sistemas CCAT e dados considerados	6
4.1 Base de dados	6
5 Validação do ELO Graça Aranha – Silvânia	7
5.1 Degrau de potência de 5%.....	8
5.2 Bloqueio de polo	16
5.3 Curto-Circuito com tensão remanescente de 0.2 pu.....	26
5.4 Curto-Circuito com tensão remanescente de 0.7 pu.....	34
6 Validação da Rede Equivalente	42
6.1 Cenário 1 – Carga Leve	43
6.2 Cenário 1 – Carga média	51
6.3 Cenário 2 – Carga média	59
6.4 Cenário 3 – Carga média	67
7 Referências	75

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente expansão da oferta de energia renovável, principalmente no subsistema Nordeste, está prevista a expansão da capacidade da interligação Nordeste – Sudeste, para garantir aumento de margens de escoamento e possibilitar a exportação dos excedentes de geração prospectivos, dessa região para os grandes centros de carga localizados na região Sudeste/Centro-Oeste.

Devido às longas distâncias envolvidas e à elevada capacidade de expansão necessária para essa interligação, a solução técnica contempla a implantação de um novo elo em corrente contínua.

Parte dos estudos relacionados à solução técnica requer conhecimentos específicos na área de modelagem de elos em corrente contínua, para a elaboração de rede equivalente no PSCAD™, programa de análise de transitórios eletromagnéticos (EMT).

A modelagem de equipamentos e ajuste de parâmetros de controle para correta inicialização e devida acurácia dos resultados, neste programa, é uma tarefa dispendiosa no quesito tempo e complexa do ponto de vista técnico, porém indispensável para a avaliação de viabilidade técnica de implantação de um novo elo CCAT em um sistema elétrico de grande porte como o brasileiro [1].

O desenvolvimento desses equivalentes de rede foi dividido em 3 etapas, cujos produtos são descritos em três relatórios distintos. Este documento apresenta o resultado da terceira etapa, doravante denominado Produto 3, que consiste no desenvolvimento de equivalentes de rede com modelagem dinâmica para as máquinas síncronas, compensadores estáticos de reativos e elos de corrente contínua, em ambiente PSCAD™.

2 EQUIVALENTES DE REDE DINÂMICOS - PRODUTO 3

O Produto 3 consiste na progressão dos equivalentes de rede com modelagem dinâmica das máquinas síncronas e compensadores de reativos, entregues no Produto 2.

O escopo desse terceiro produto contempla a Inclusão dos modelos de sistemas em Corrente Contínua em Alta Tensão (CCAT) nos equivalentes de rede em PSCAD™, com modelagem detalhada de controles, proteções, compensação reativa e filtros harmônicos, bem como quaisquer elementos necessários para simulação de desempenho.

Neste relatório são apresentadas análises do elo conectado ao sistema barra infinita e conectado à rede, comparando-se os resultados obtidos nos programas ANATEM e PSCAD, a partir das variáveis listadas abaixo:

- Tensão CA na retificadora;
- Tensão CA na inversora;
- Tensão CC na retificadora;
- Tensão CC na inversora;
- Potência CC na retificadora;
- Potência CC na inversora;
- Potência reativa na retificadora;
- Potência reativa na inversora;
- Ângulo de disparo da retificadora;
- Ângulo de extinção da inversora;
- Corrente CC medida do lado retificador;
- Corrente CC medida do lado inversor;
- Ordem de corrente do VDCOL do retificador;
- Ordem de corrente do VDCOL do inversor;
- Ordem de corrente antes do VDCOL do retificador;
- Ordem de corrente antes do VDCOL do inversor.

Para o caso apresentado no item 5.2 serão acrescentadas as seguintes variáveis:

- Potência ativa CC do retificador do polo 1;
- Potência ativa CC do retificador do polo 2;
- Potência ativa CC do inversor do polo 1;
- Potência ativa CC do inversor do polo 2.

3 CONCLUSÕES

Os resultados da comparação do elo Graça Aranha – Silvânia conectado em suas estações inversora e retificadora por fontes de tensão ideais, barra infinita, são mostrados no item 5. Pode-se constatar que a resposta do PSCAD está muito próxima à encontrada no ANATEM, com tendência de comportamento similar para os eventos aplicados.

Para o sistema completo, aplicou-se um curto-circuito na subestação Silvânia para os quatro cenários, sendo os resultados apresentados na seção 6. Observa-se que ambos os programas, ANATEM e PSCAD, apresentam comportamento similares, destoando apenas em algumas grandezas. Isso se deve ao fato do modelo adotado para os componentes CC, principalmente das estações conversoras, serem diferentes em ambos os programas computacionais. Nesse sentido, cabe destacar que, para os elos CCAT do Madeira e de Itaipu, foi adotada modelagem simplificada dos sistemas de controle, enquanto para os elos CCAT de Xingu e de Graça Aranha foi adotada a modelagem genérica desenvolvida na etapa de estudos de detalhamento dos elos CCAT Xingu – Estreito e Xingu – Terminal Rio [2]. No ANATEM, foi utilizada a modelagem oficial fornecida pelos fabricantes para os elos existentes e uma modelagem genérica simplificada para o elo planejado, constantes na base de dados de estabilidade eletromecânica da EPE [3].

Sendo assim, considera-se que o modelo está devidamente validado e pode ser utilizado para análises de *Multi-infeed*.

4 MODELAGEM DOS SISTEMAS CCAT E DADOS CONSIDERADOS

4.1 BASE DE DADOS

Quatro casos de fluxo de potência e de curto-circuito, disponibilizados pela EPE no formato do programa ANAREDE e ANAFAS, foram utilizados para a modelagem dos equivalentes de rede estáticos no programa PSCADTM e são apresentados a seguir:

- A. Caso A - CEN1 (2030) * carga leve * Bip G. Aranha + Obras NE;
- B. Caso B - CEN1 (2030) * carga média * Bip G. Aranha + Obras NE;
- C. Caso C - CEN2 (2030) * carga média * Bip G. Aranha + Obras NE; e
- D. Caso D - CEN3 (2030) * carga média * Bip G. Aranha + Obras NE.

5 VALIDAÇÃO DO ELO GRAÇA ARANHA – SILVÂNIA

Para a validação do desempenho dinâmico do elo Graça Aranha – Silvânia, foram aplicados quatro eventos ao sistema composto por este elo conectado ao sistema CA por barra infinita. Os eventos aplicados são:

- Degrau na referência de potência de 5%;
- Bloqueio do polo 2;
- Curto-circuito na inversora com tensão remanescente de 0,2 pu:
 - Para isso, um curto-circuito trifásico com impedância de 0,05 mH foi aplicado.
- Curto-circuito na inversora com tensão remanescente de 0,7 pu:
 - Para isso, um curto-circuito trifásico com impedância de 0,25 mH foi aplicado.

5.1 DEGRAU DE POTÊNCIA DE 5%

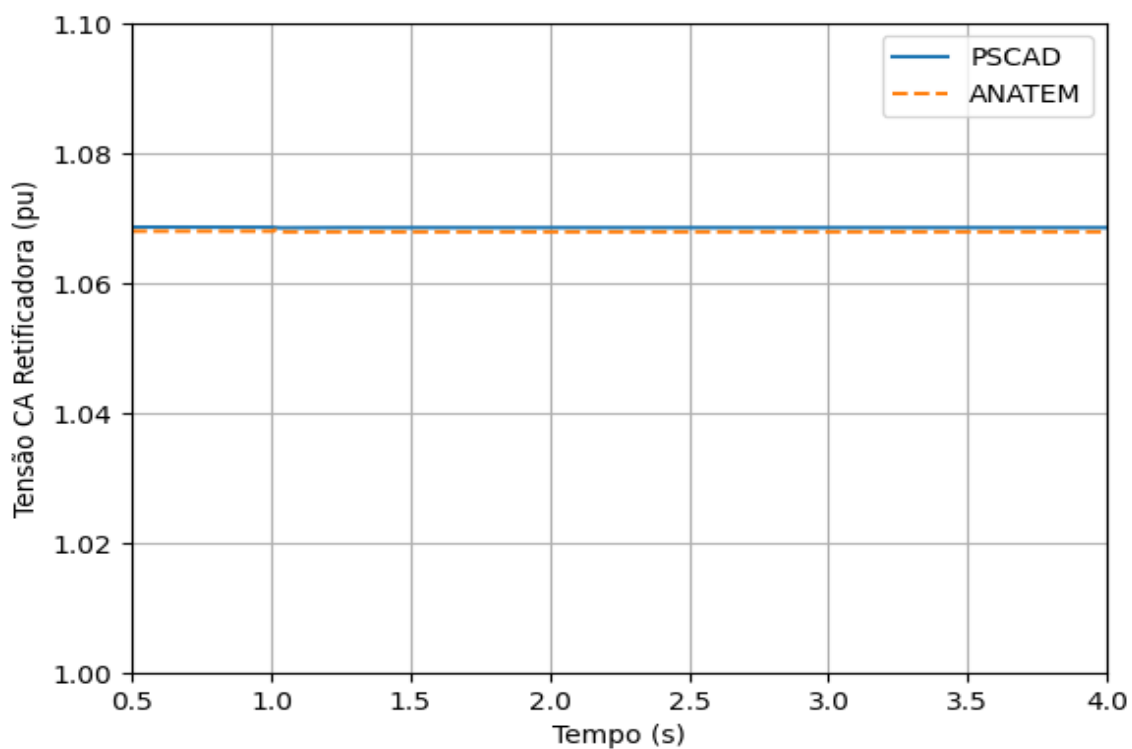


Figura 5-1 Tensão CA na retificadora

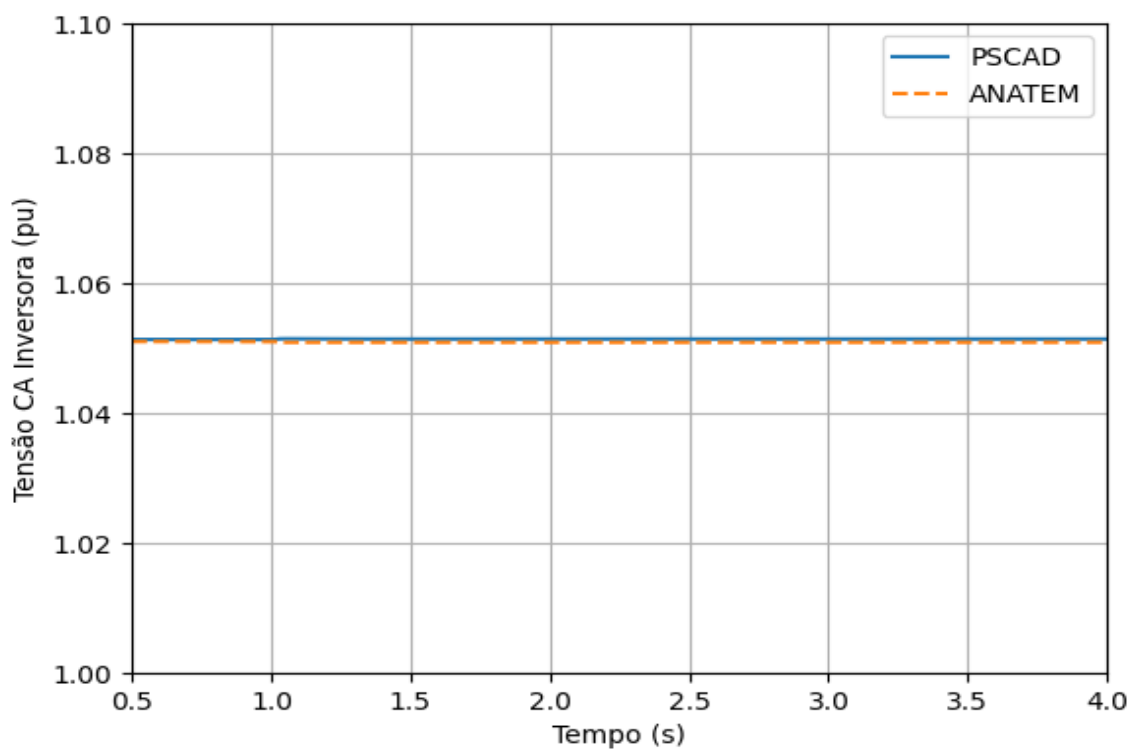


Figura 5-2 Tensão CA na inversora

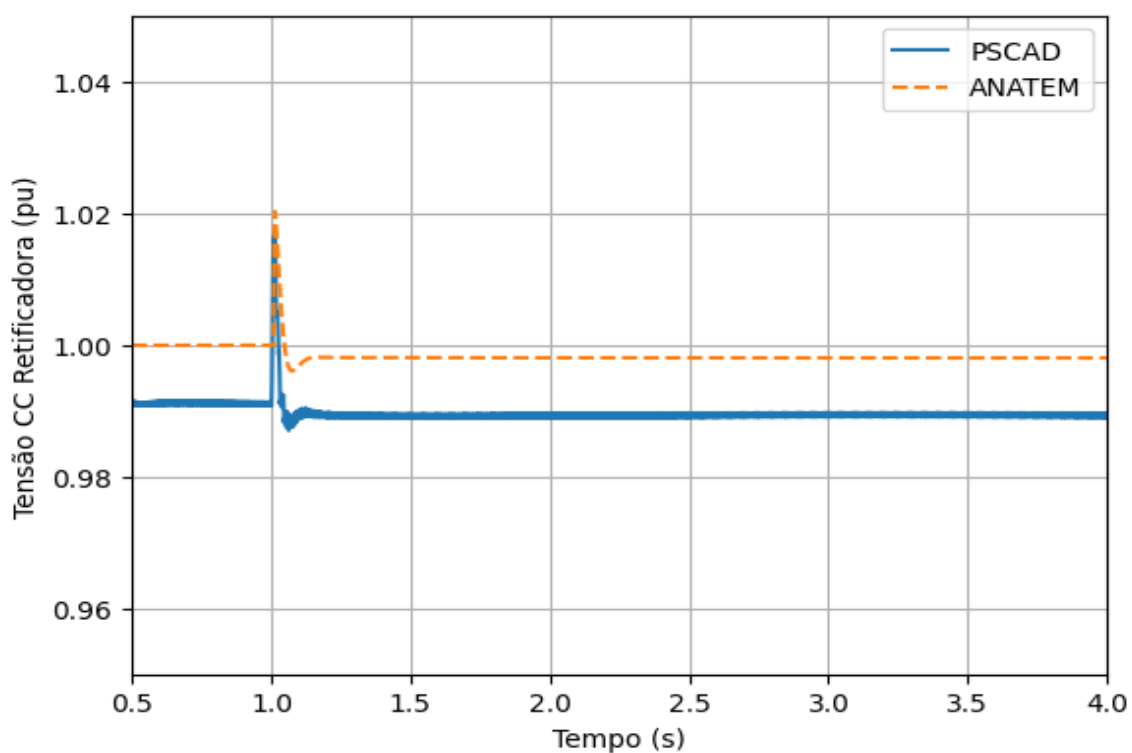


Figura 5-3 Tensão CC na retificadora

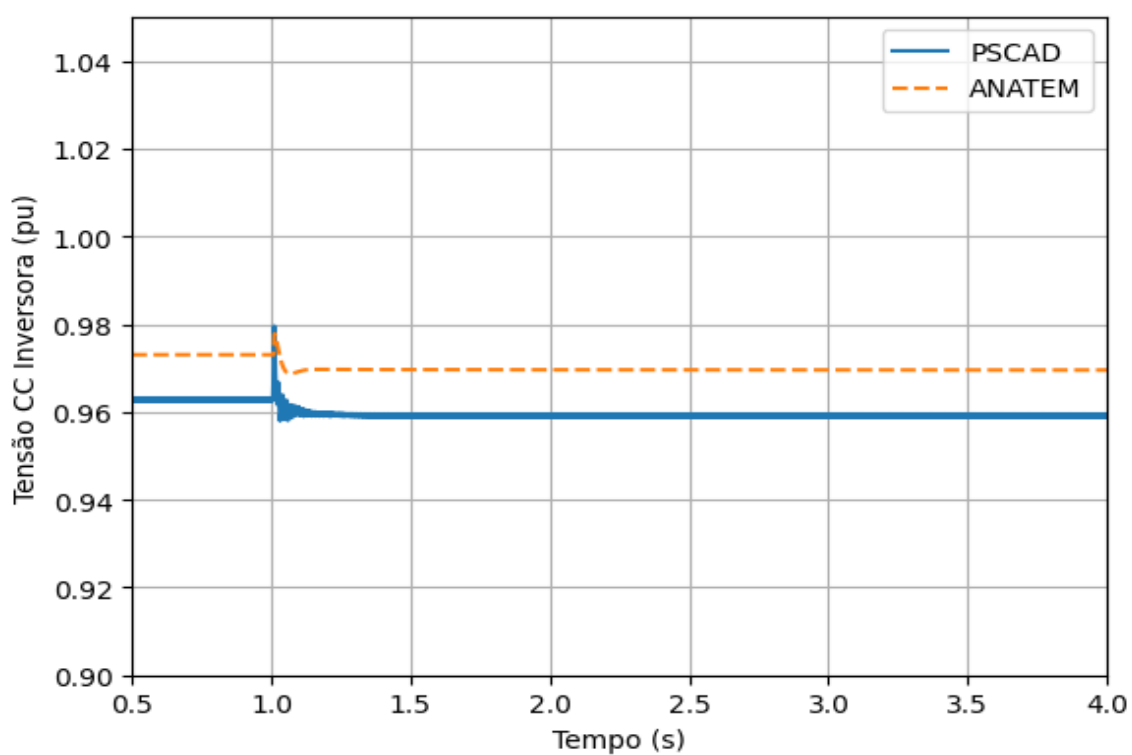


Figura 5-4 Tensão CC na inversora

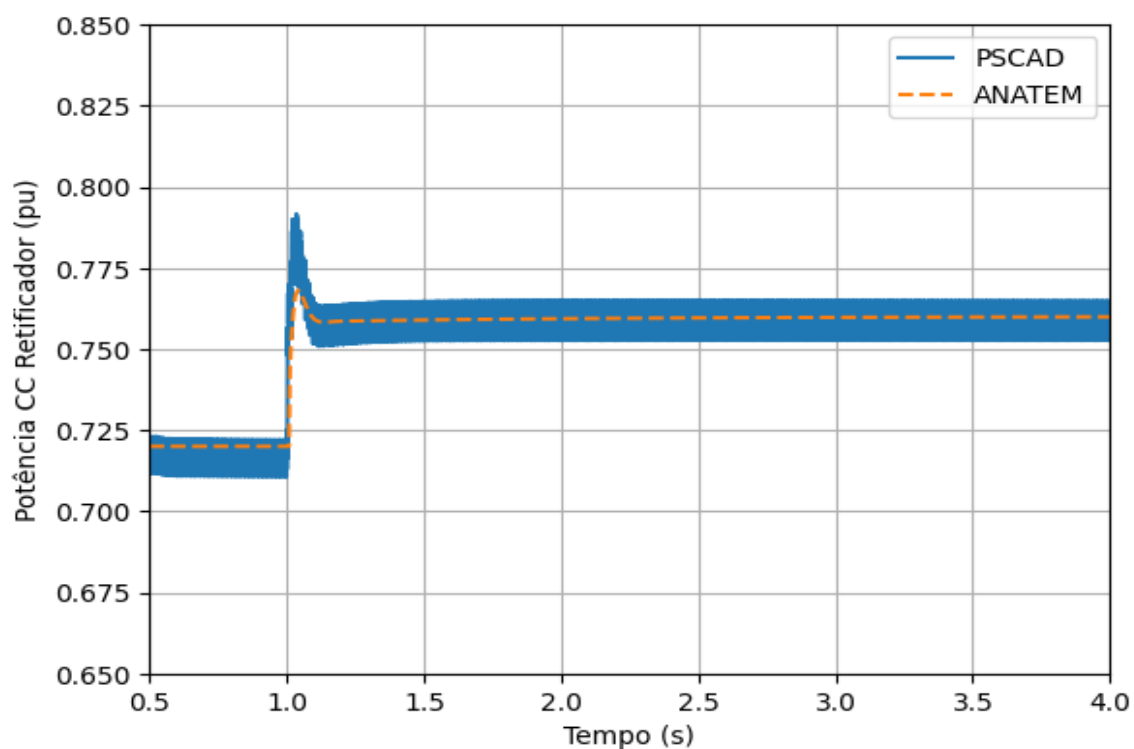


Figura 5-5 Potência CC na retificadora

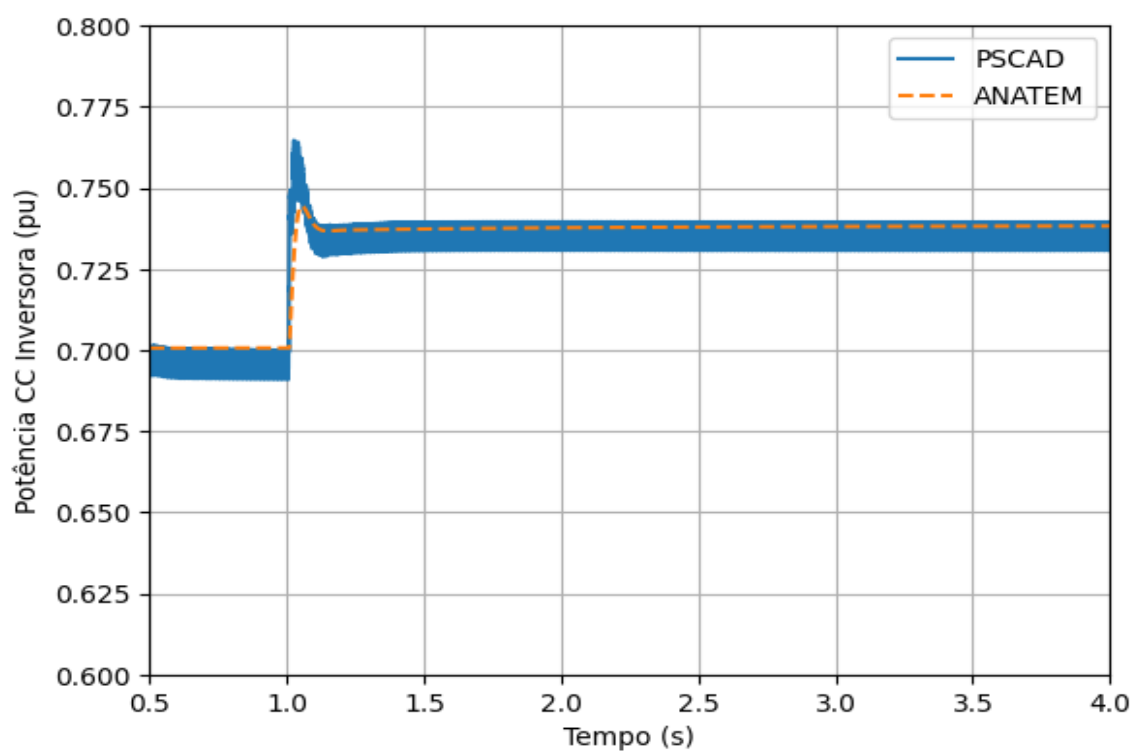


Figura 5-6 Potência CC na inversora

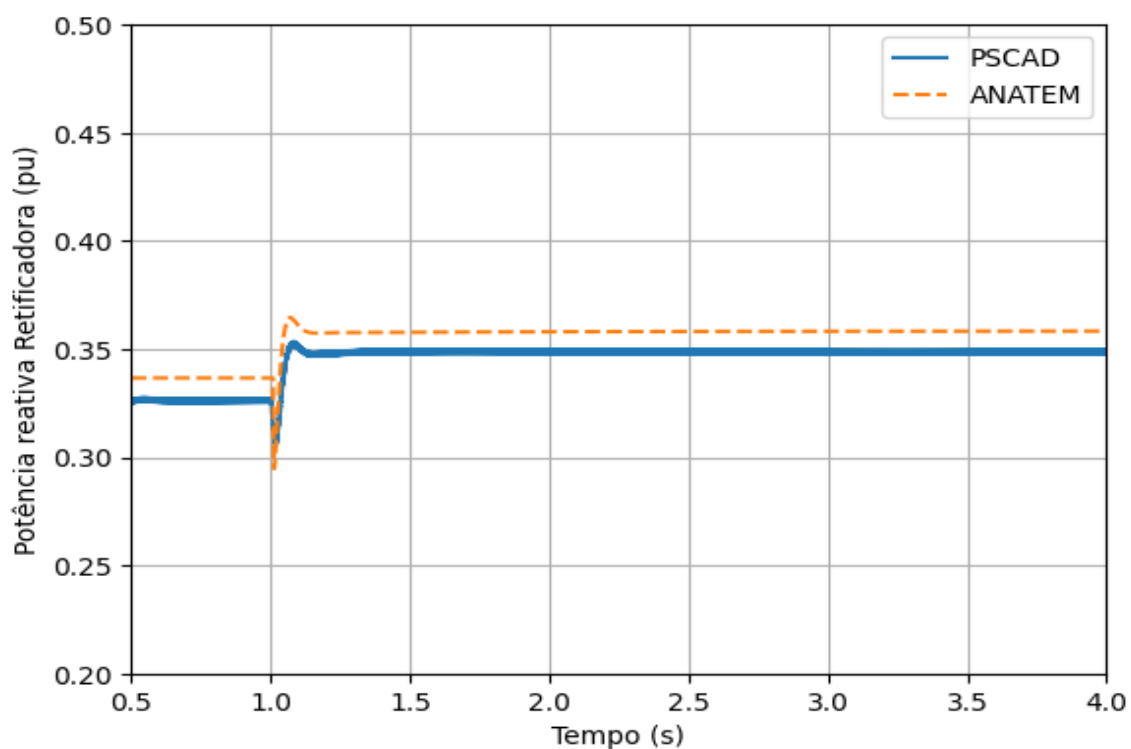


Figura 5-7 Potência reativa na retificadora

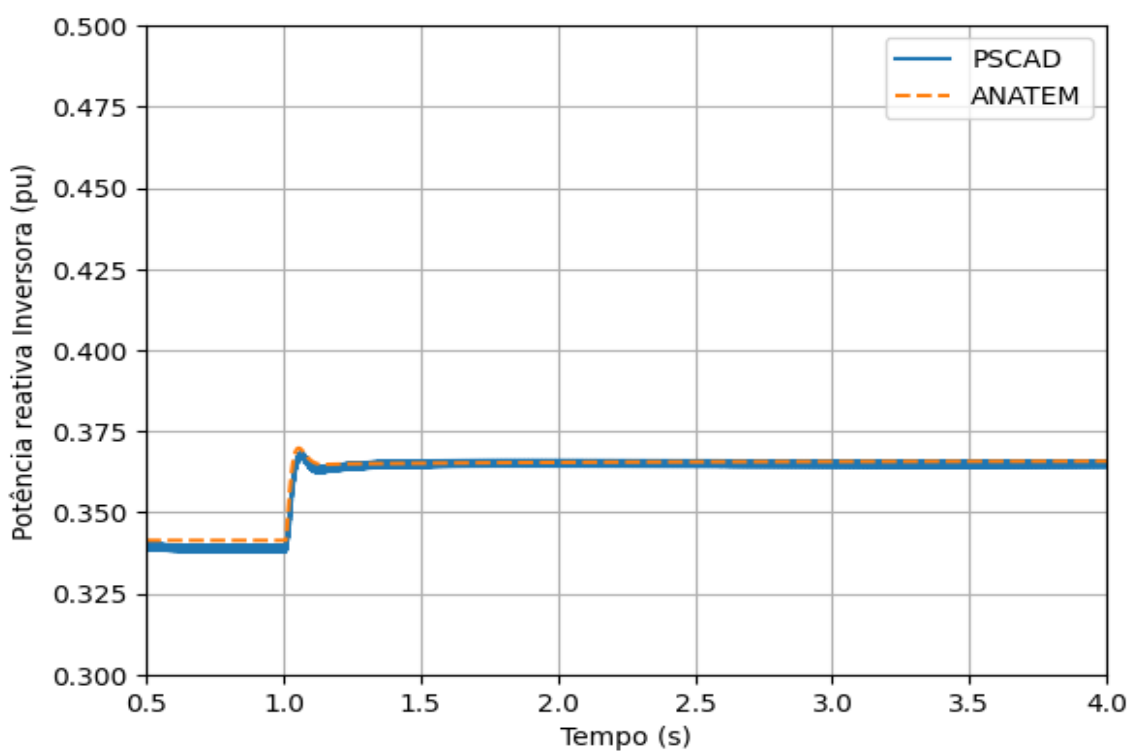


Figura 5-8 Potência reativa na inversora

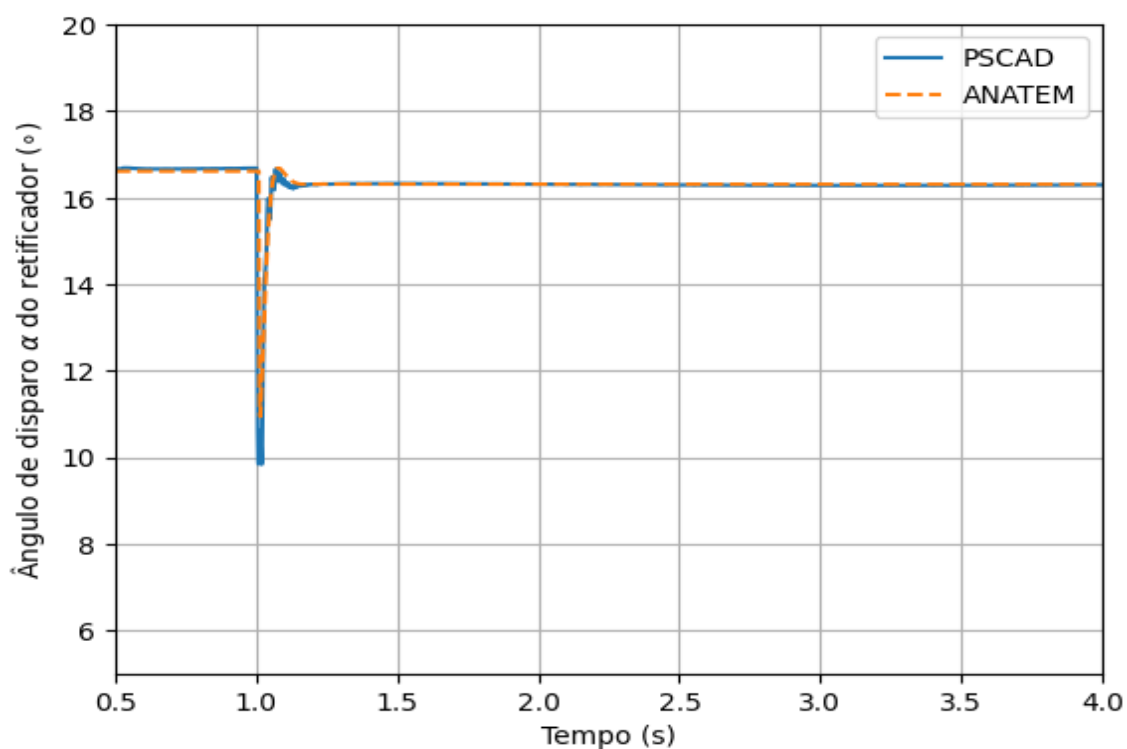


Figura 5-9 Ângulo de disparo da retificadora

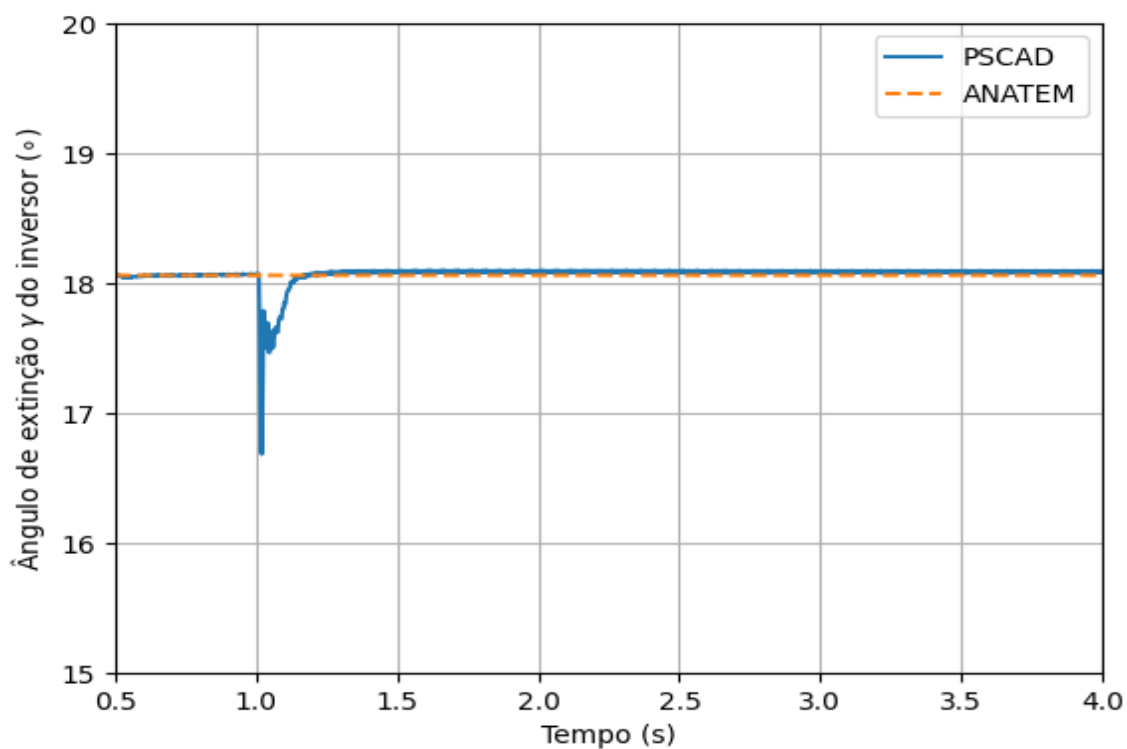


Figura 5-10 Ângulo de extinção da inversora

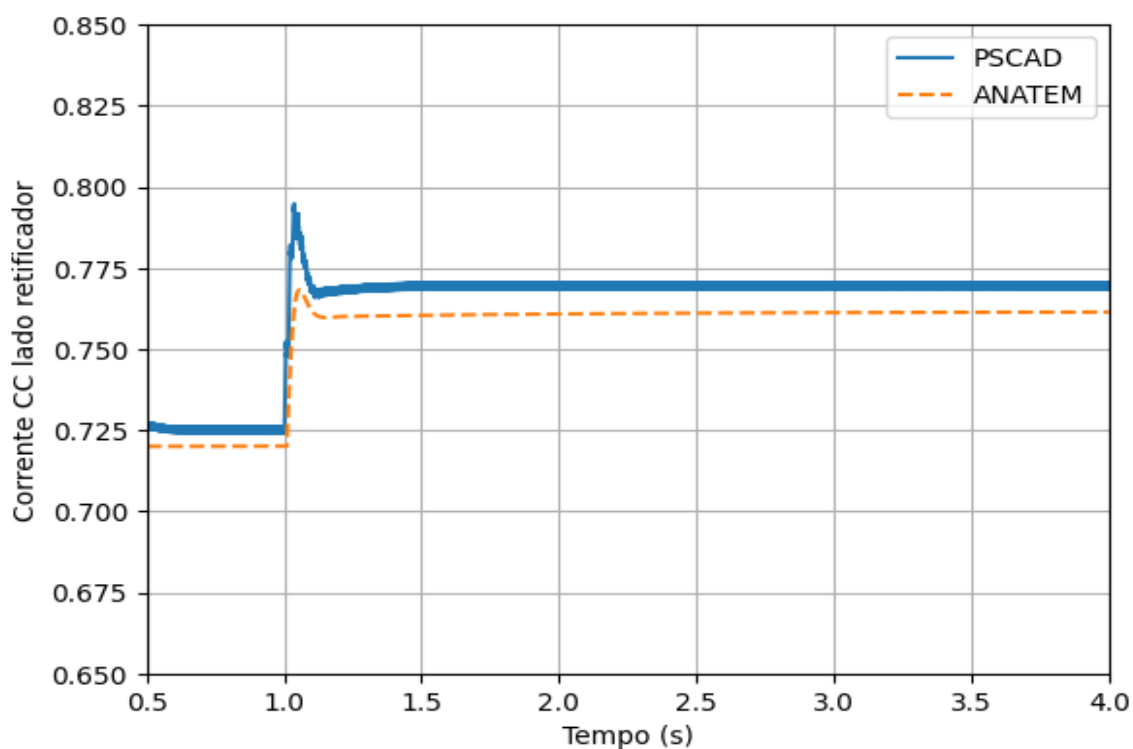


Figura 5-11 Corrente CC medida do lado retificador

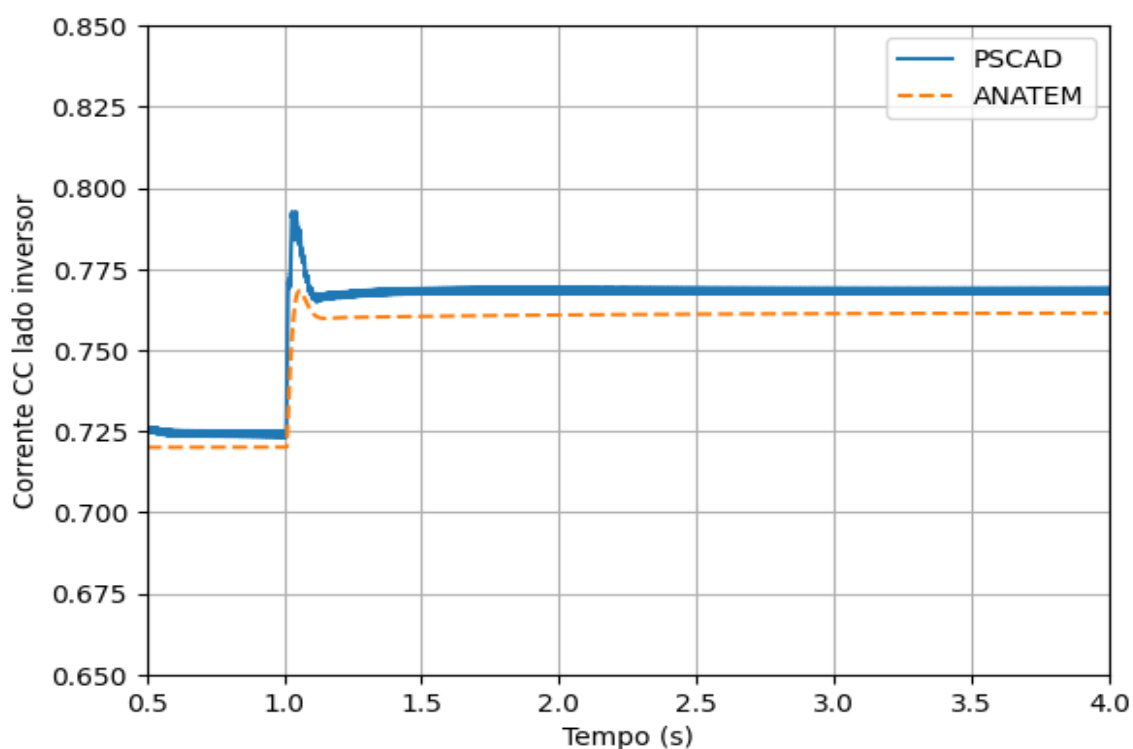


Figura 5-12 Corrente CC medida do lado inversor

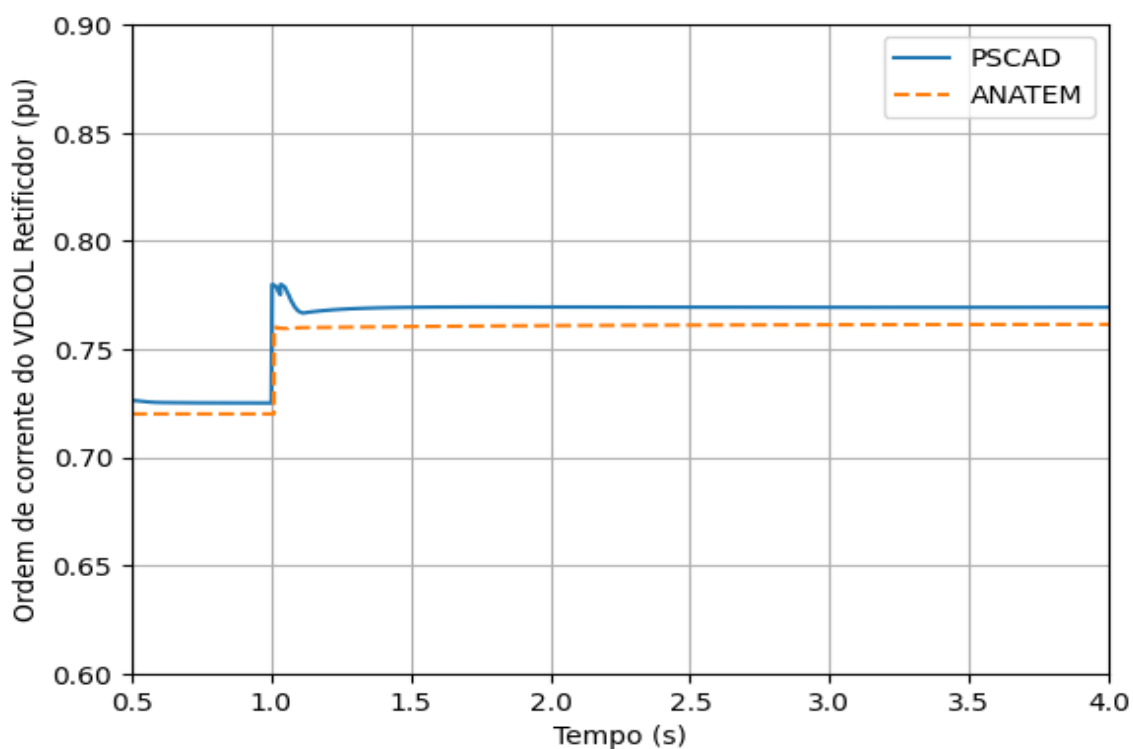


Figura 5-13 Ordem de corrente do VDCOL do retificador

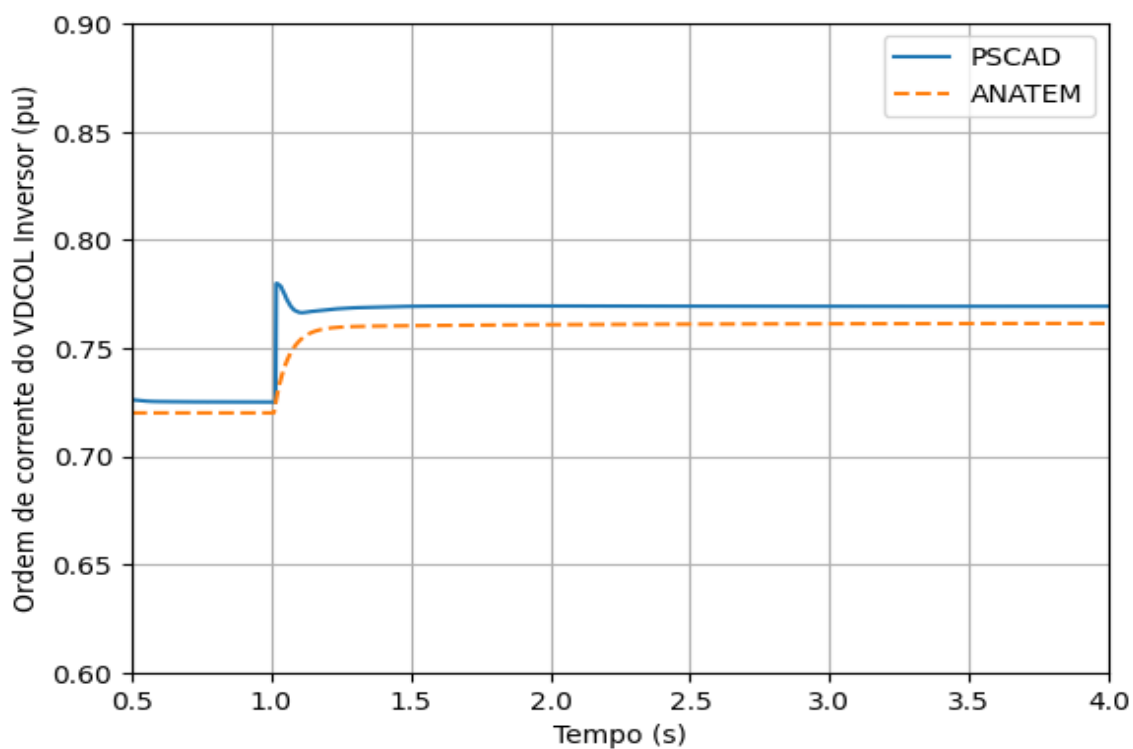


Figura 5-14 Ordem de corrente do VDCOL do inversor

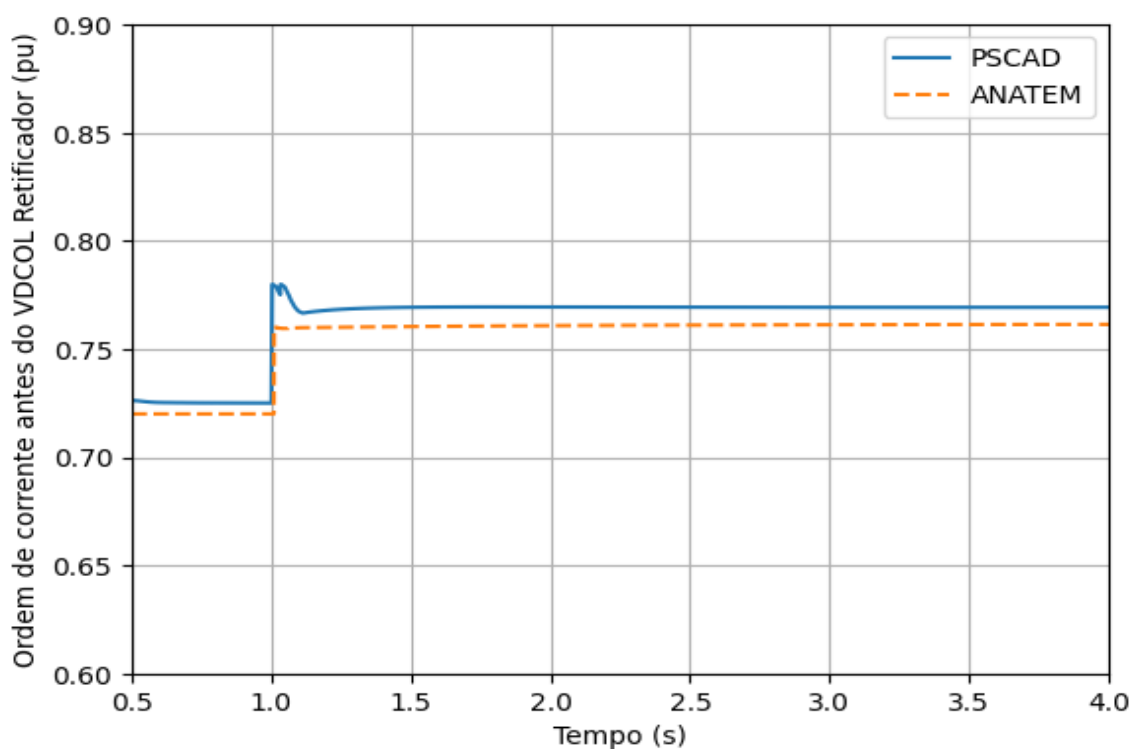


Figura 5-15 Ordem de corrente antes do VDCOL do retificador

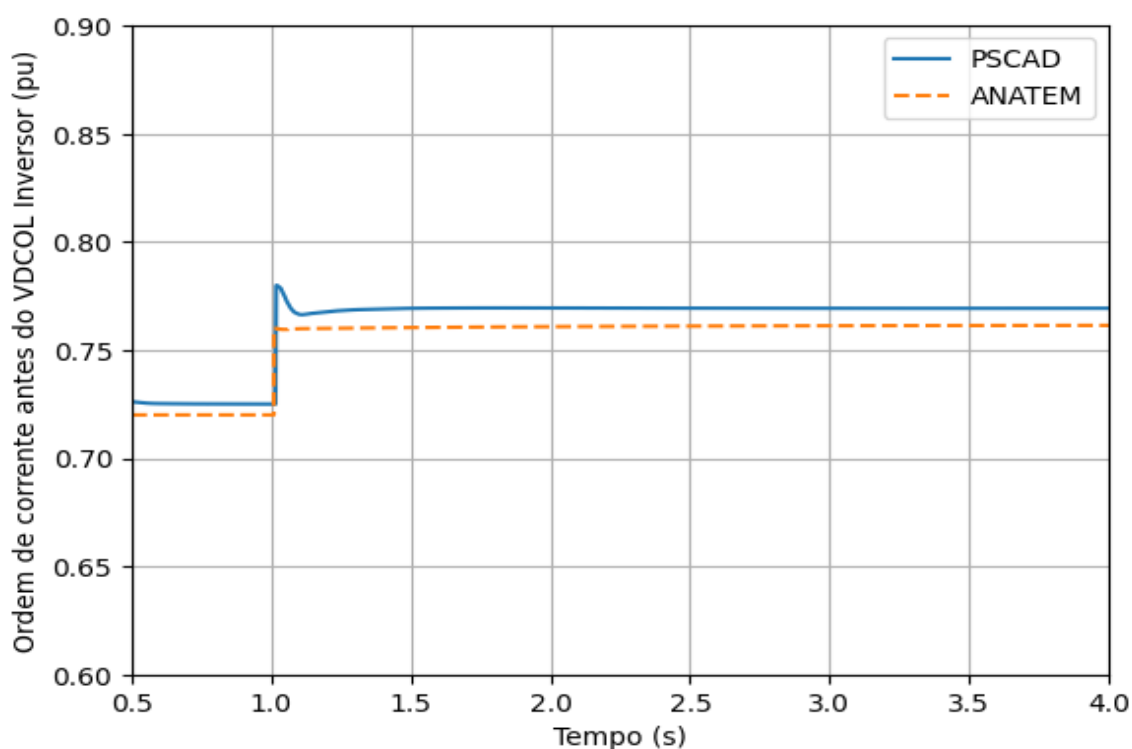


Figura 5-16 Ordem de corrente antes do VDCOL do inversor

5.2 BLOQUEIO DE POLO

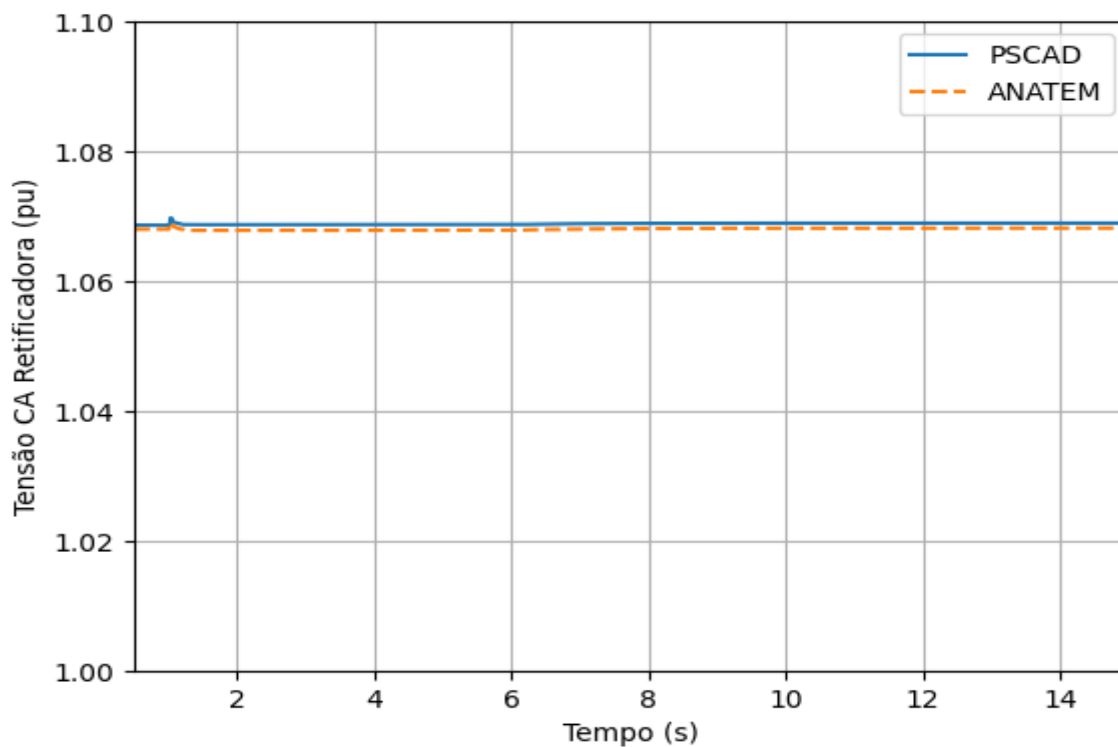


Figura 5-17 Tensão CA na retificadora

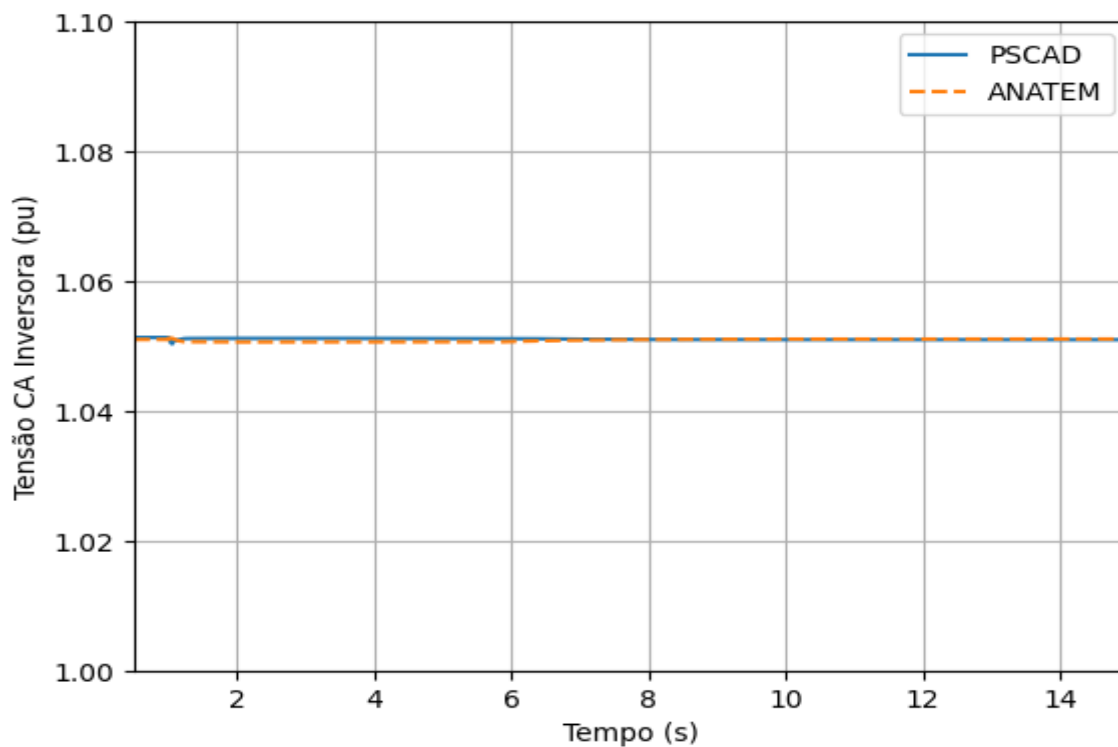


Figura 5-18 Tensão CA na inversora

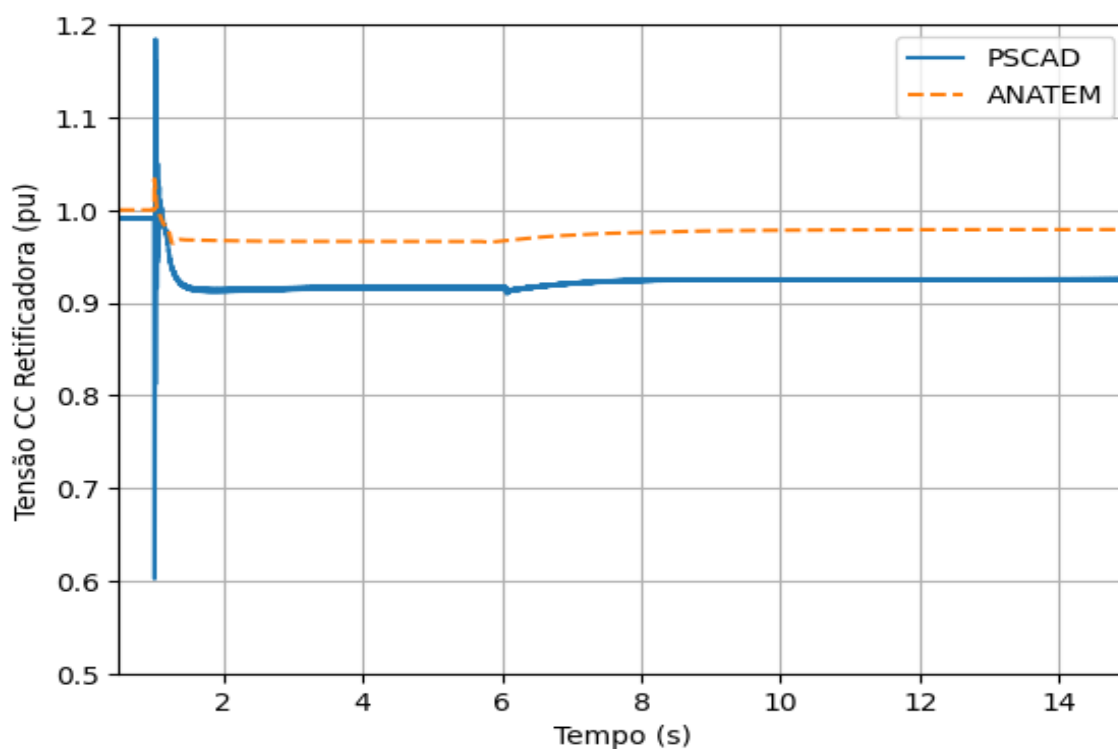


Figura 5-19 Tensão CC na retificadora

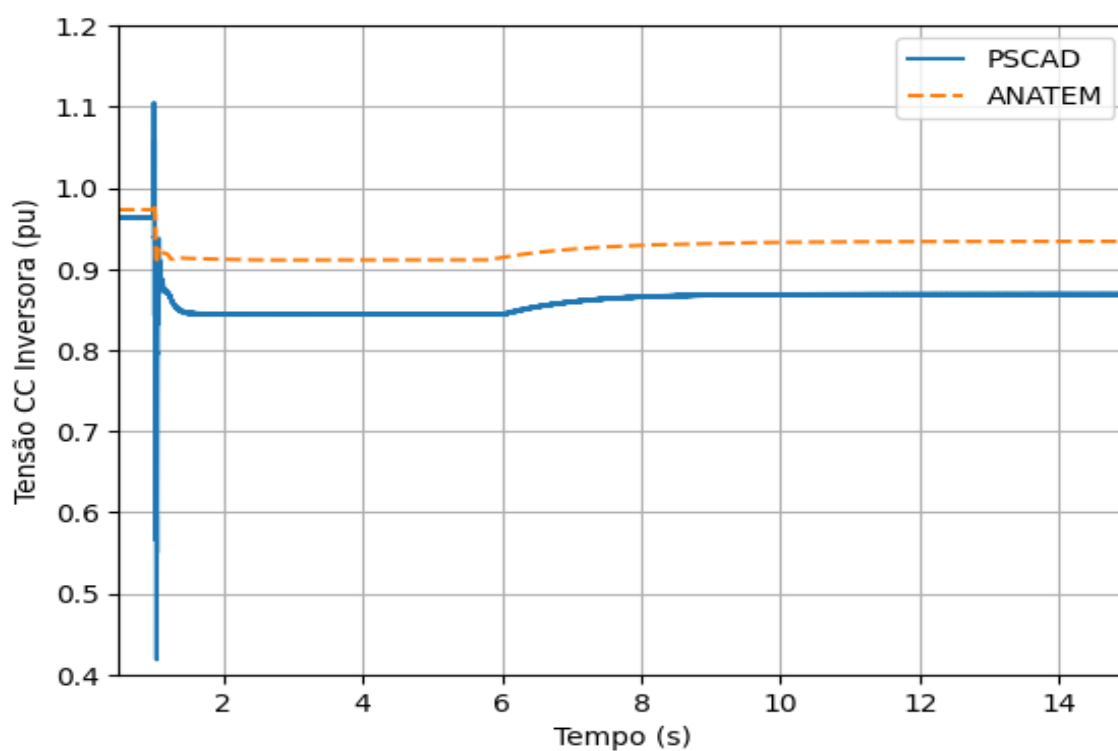


Figura 5-20 Tensão CC na inversora

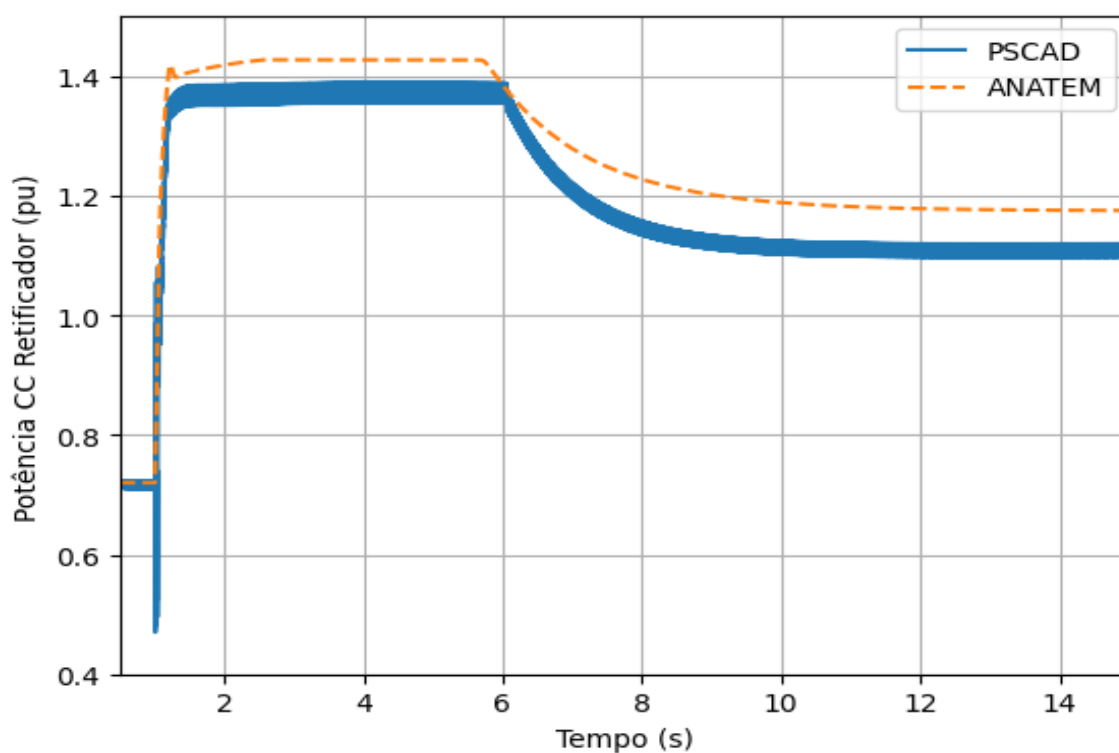


Figura 5-21 Potência CC na retificadora

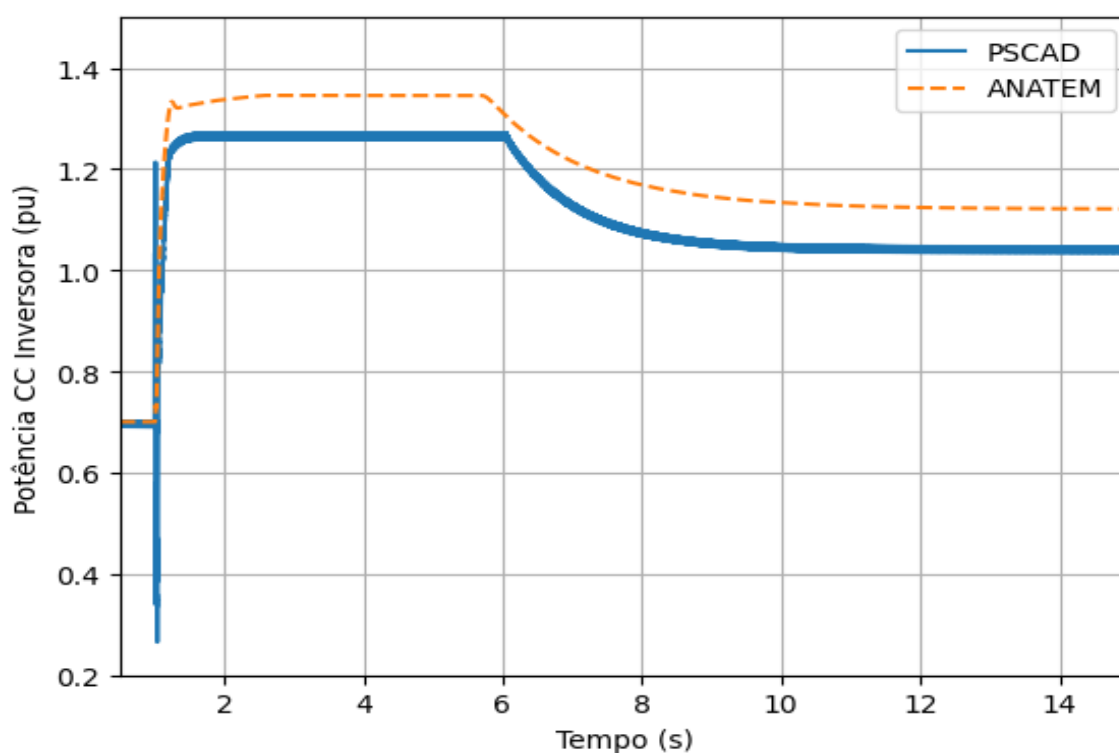


Figura 5-22 Potência CC na inversora

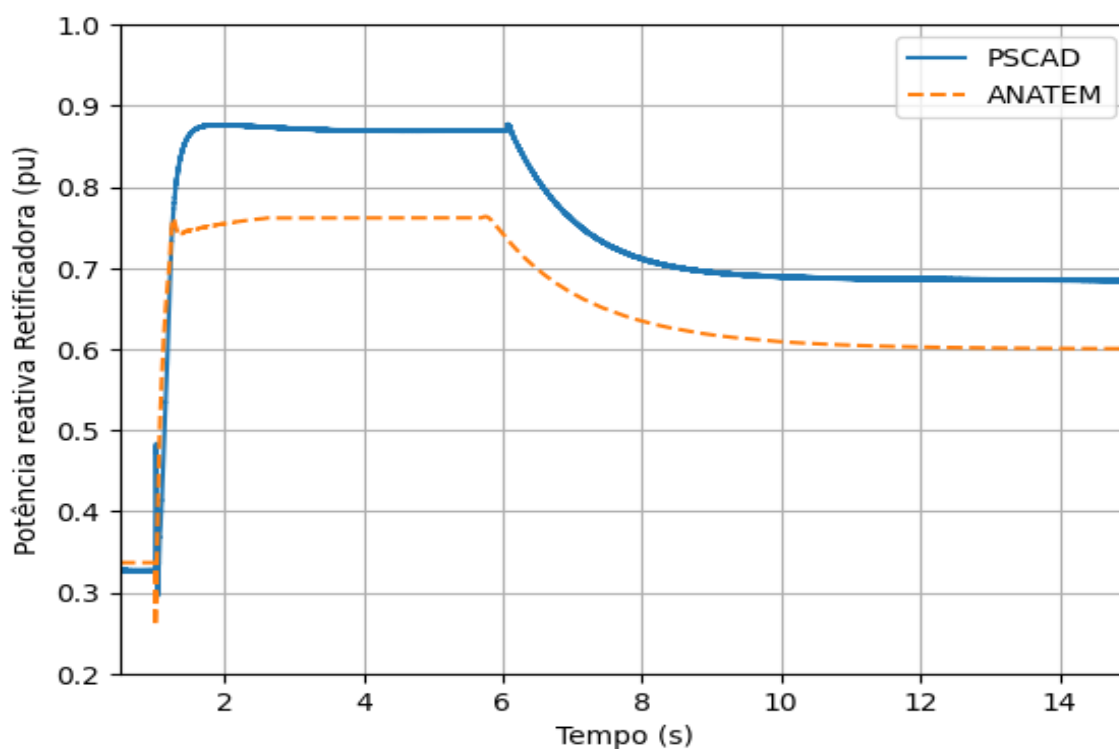


Figura 5-23 Potência reativa na retificadora

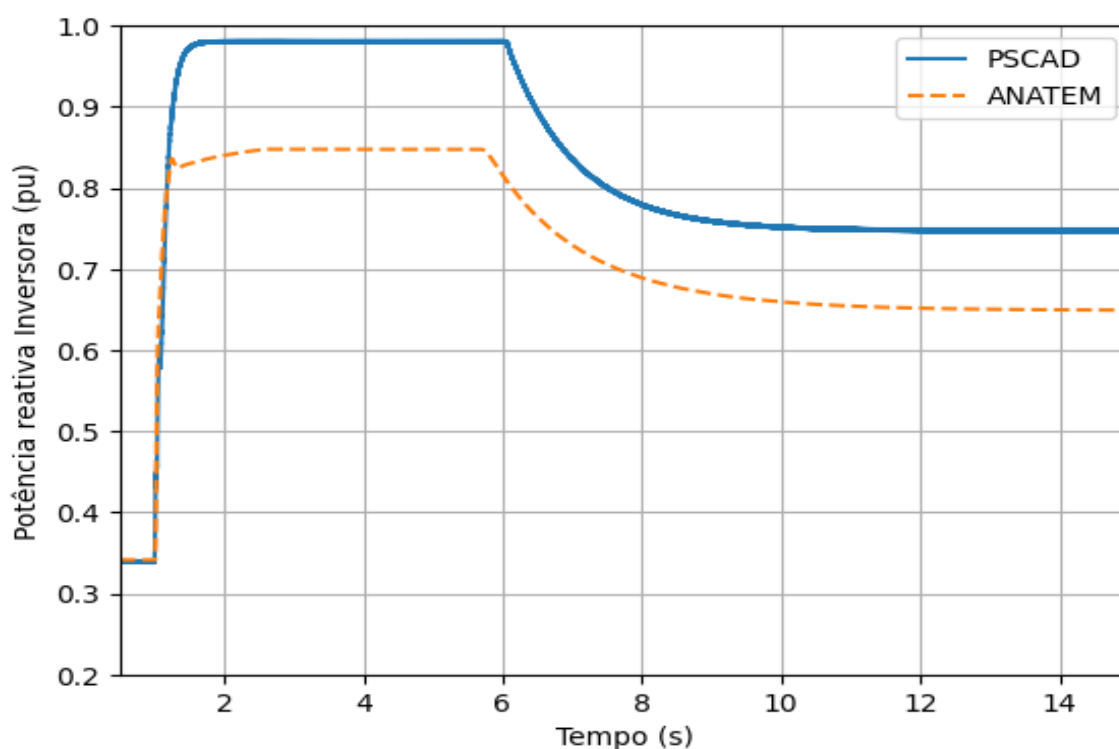


Figura 5-24 Potência reativa na inversora

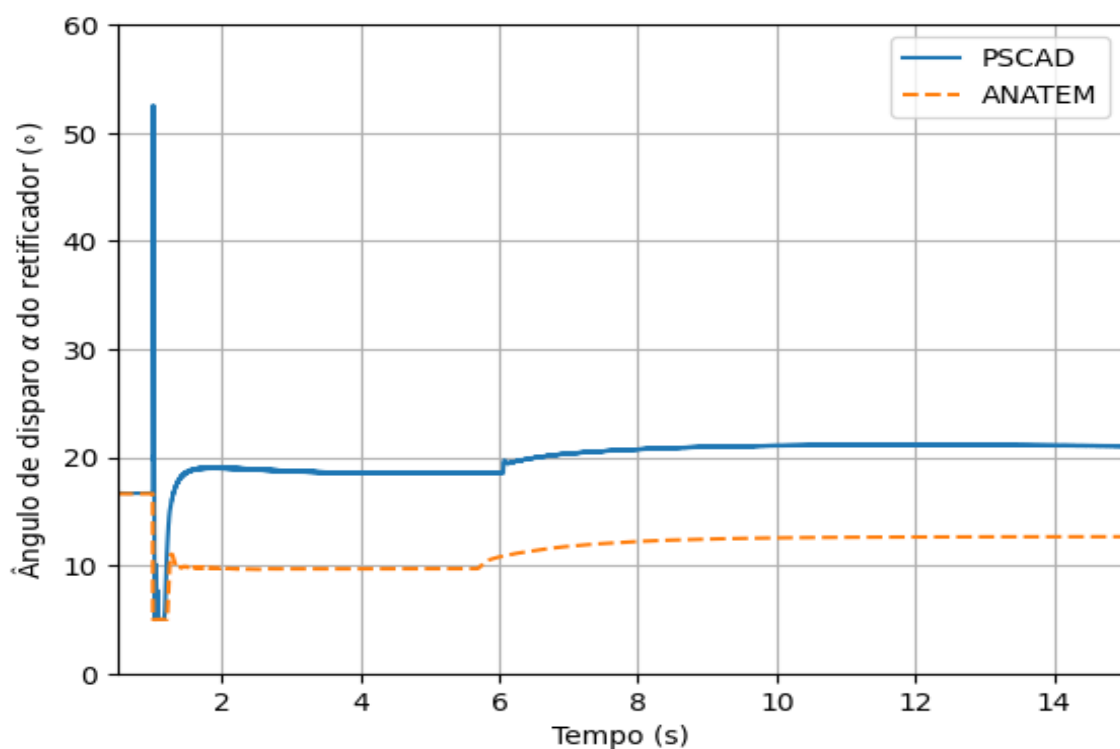


Figura 5-25 Ângulo de disparo da retificadora

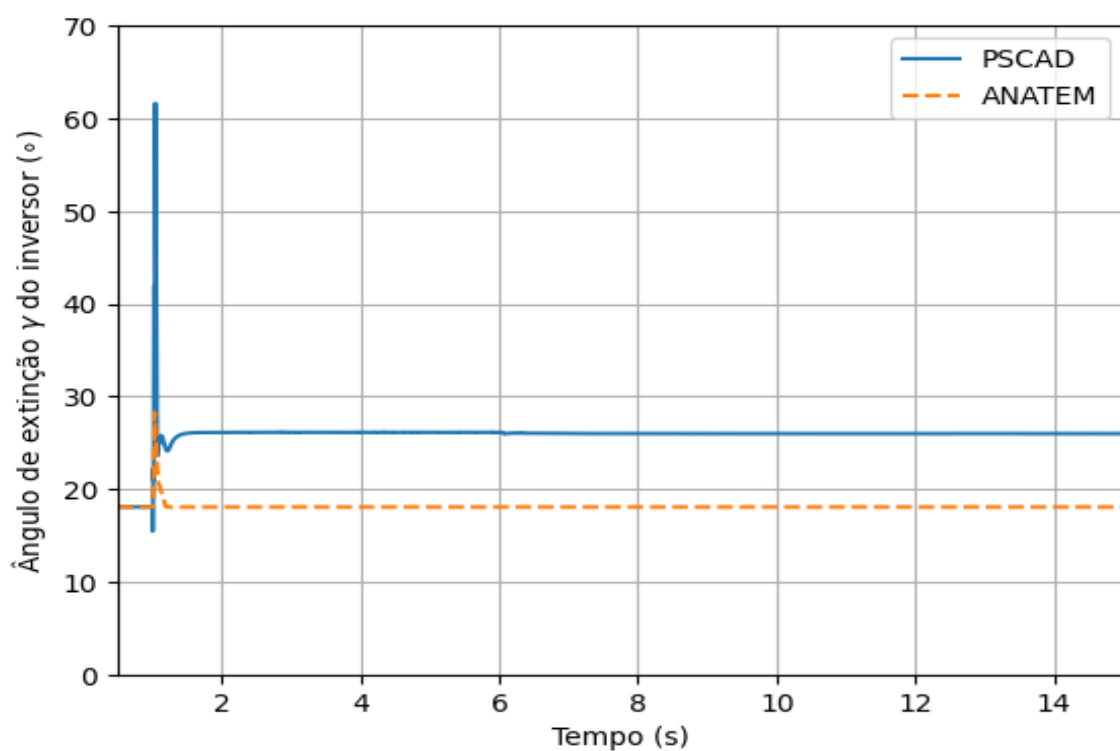


Figura 5-26 Ângulo de extinção da inversora

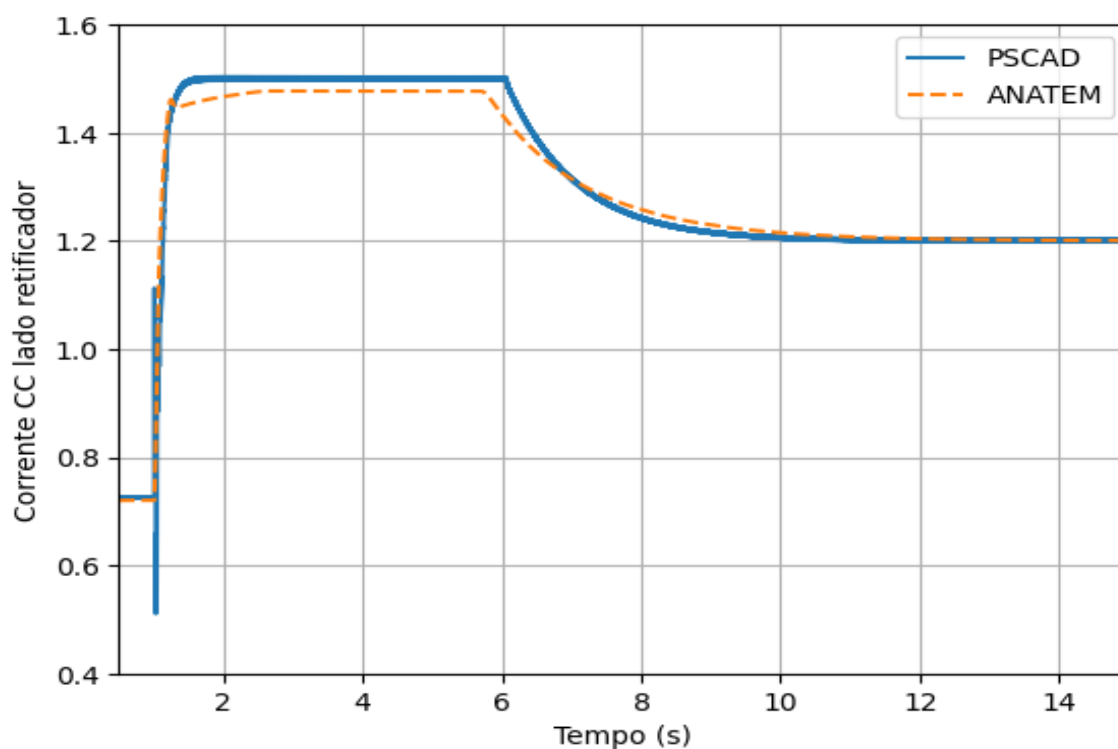


Figura 5-27 Corrente CC medida do lado retificador

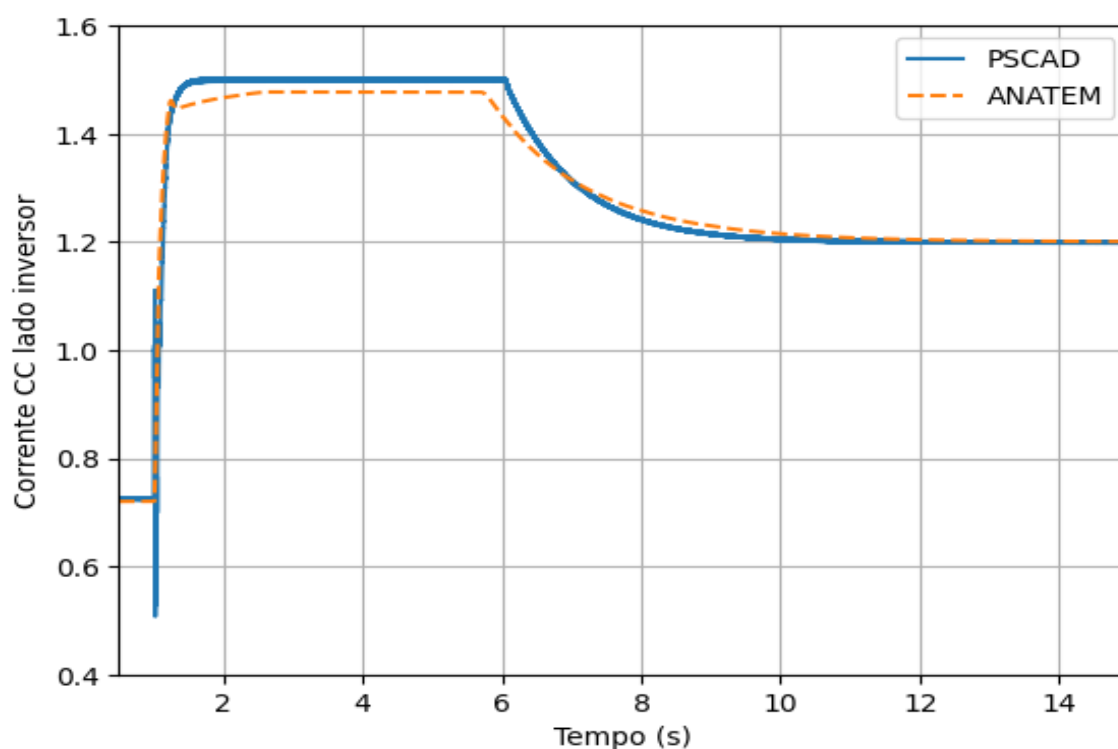


Figura 5-28 Corrente CC medida do lado inversor

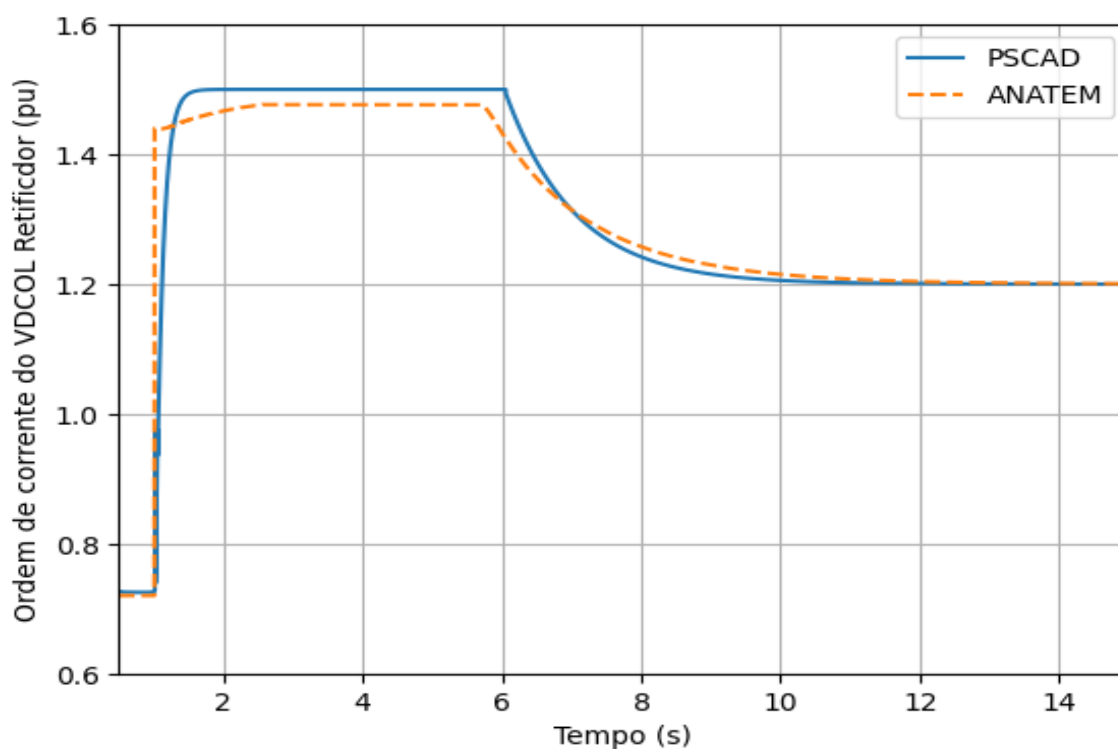


Figura 5-29 Ordem de corrente do VDCOL do retificador

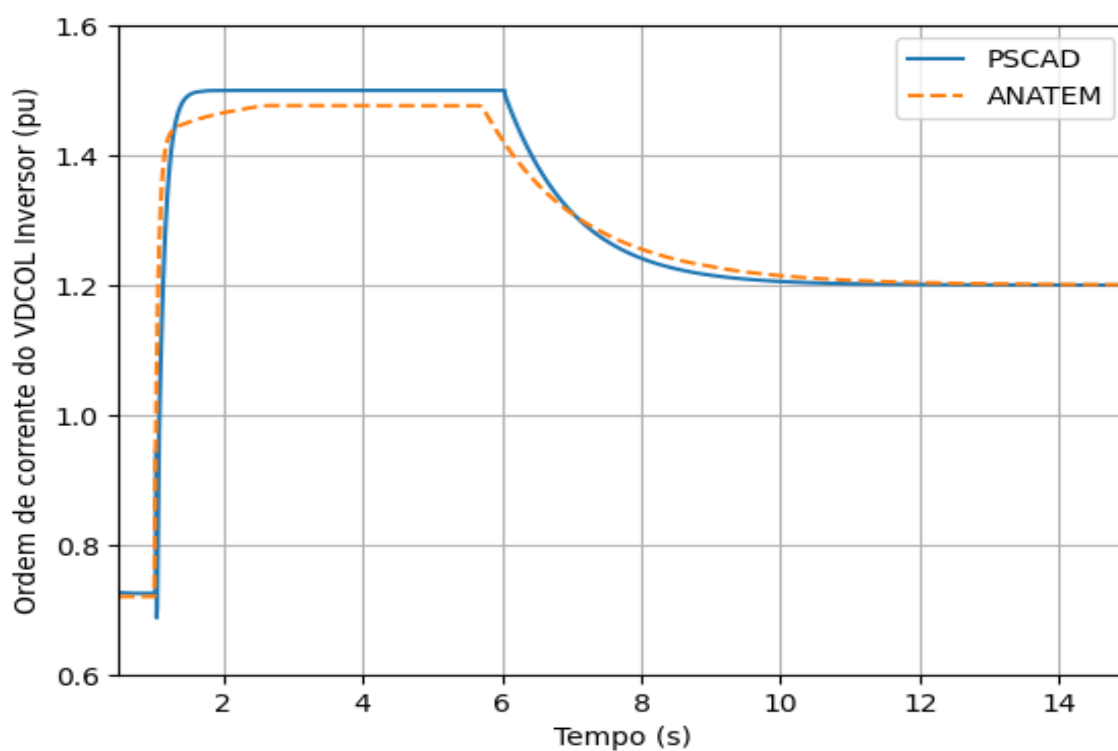


Figura 5-30 Ordem de corrente do VDCOL do inversor

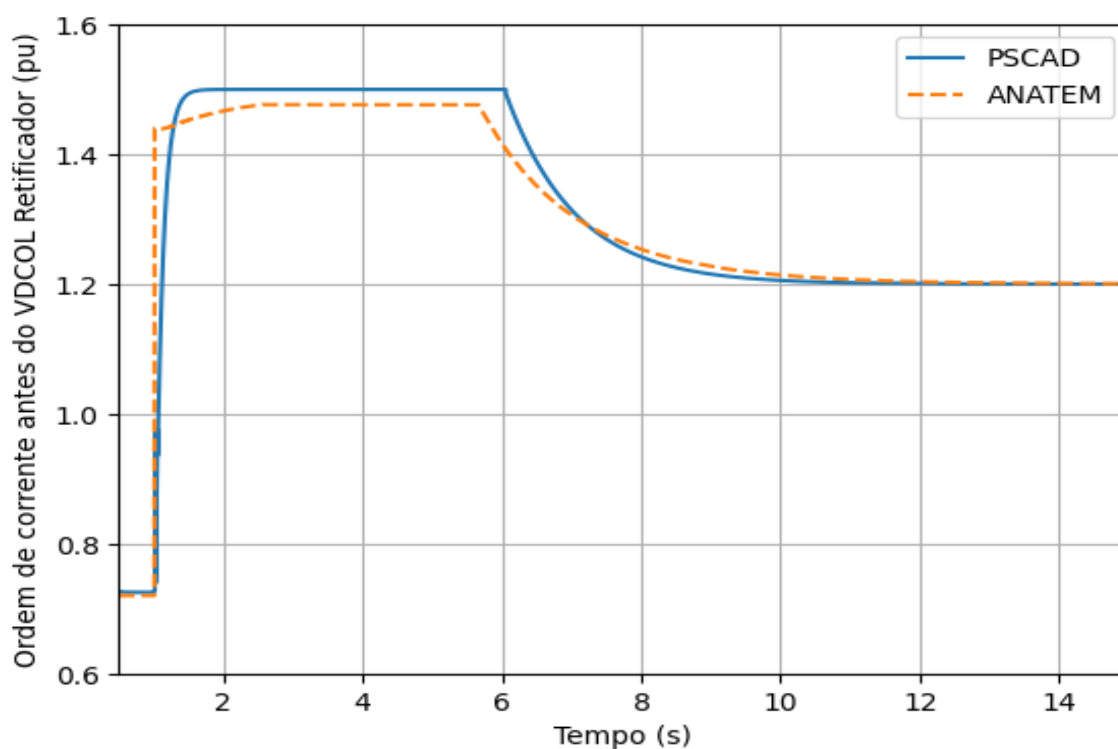


Figura 5-31 Ordem de corrente antes do VDCOL do retificador

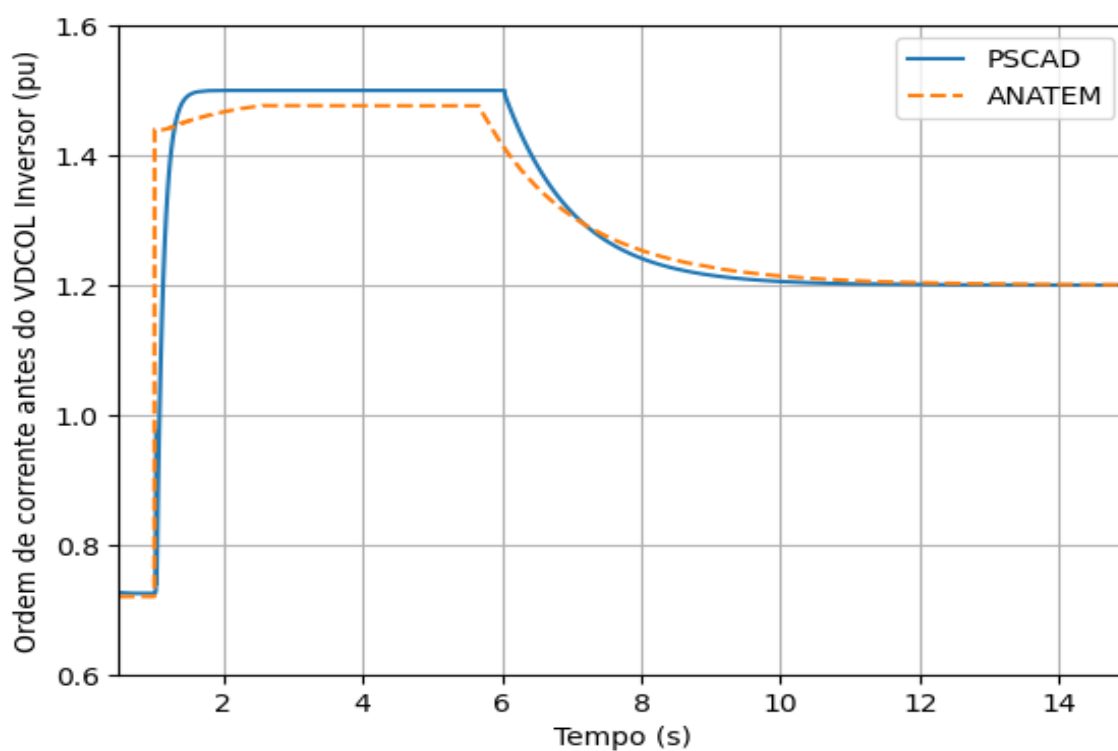


Figura 5-32 Ordem de corrente antes do VDCOL do inversor

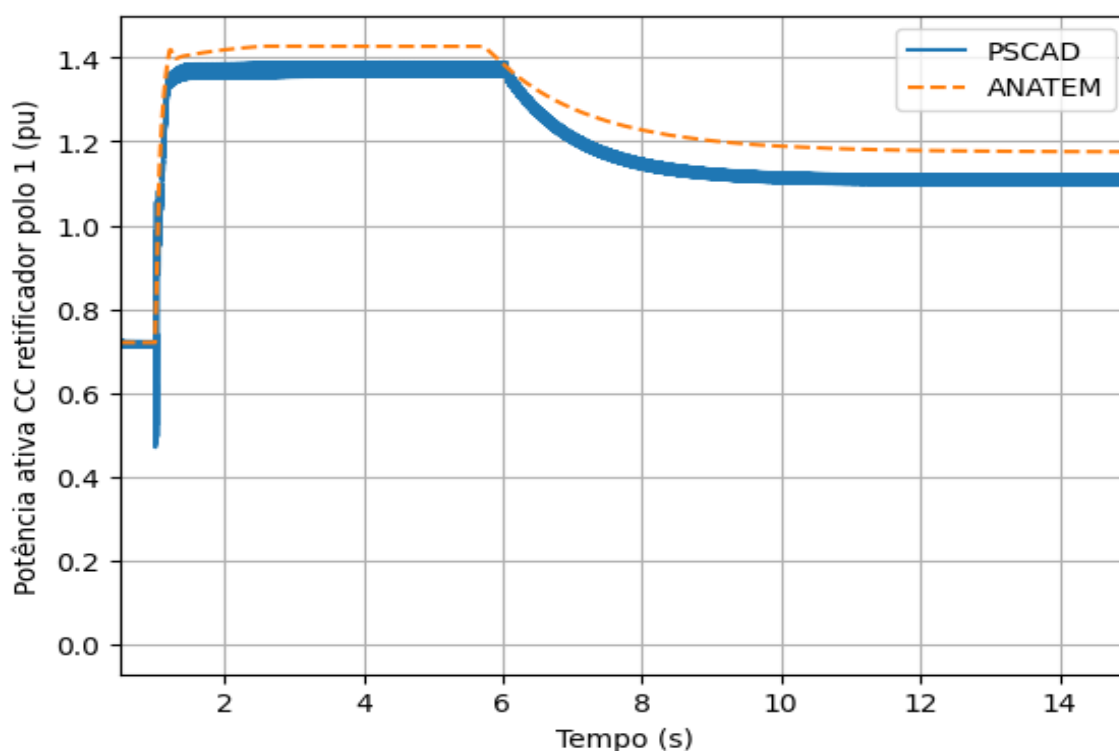


Figura 5-33 Potência ativa CC do retificador do polo 1

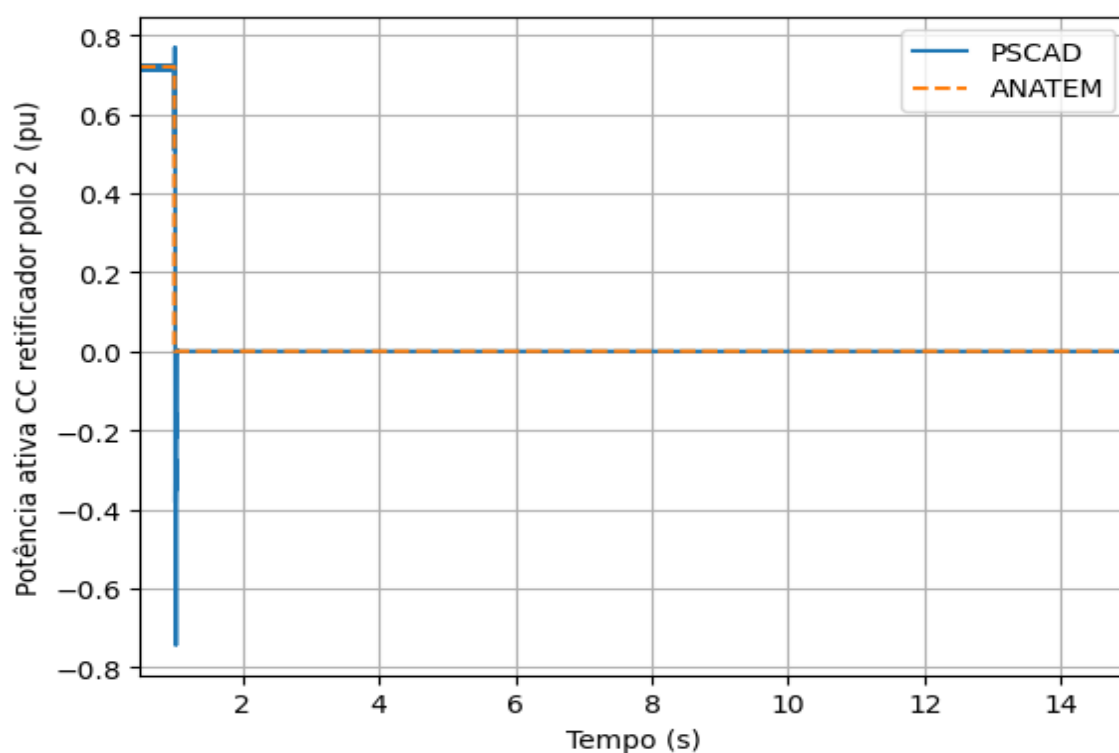


Figura 5-34 Potência ativa CC do retificador do polo 2

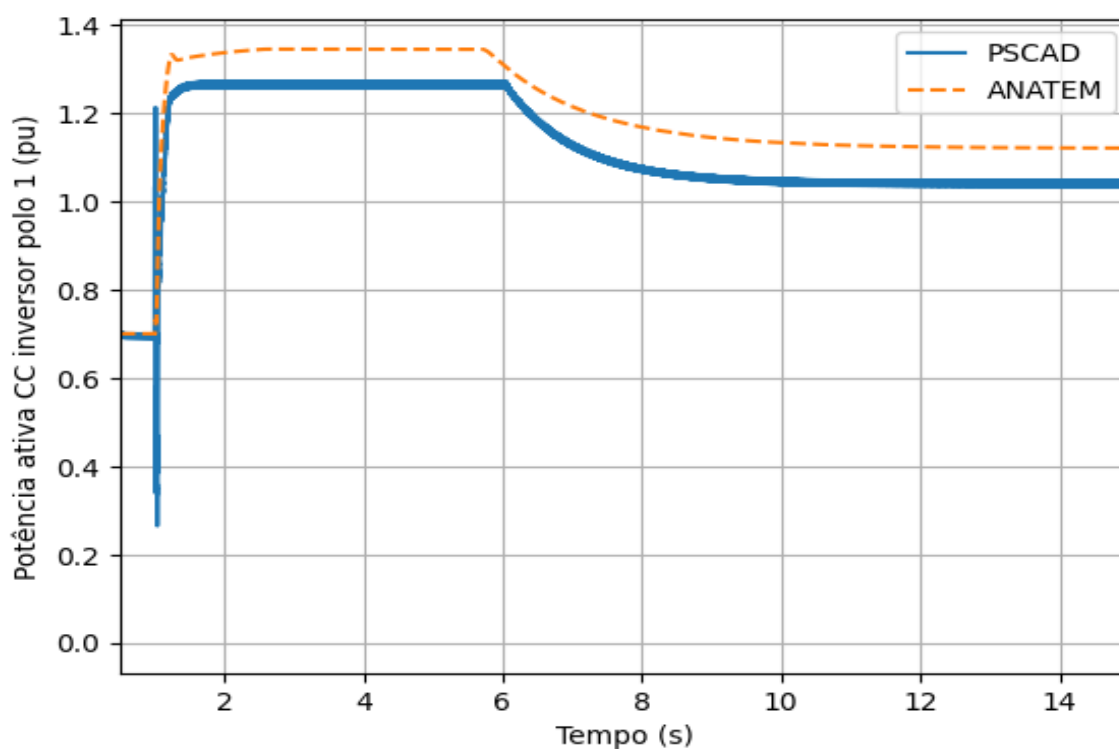


Figura 5-35 Potência ativa CC do inversor do polo 1

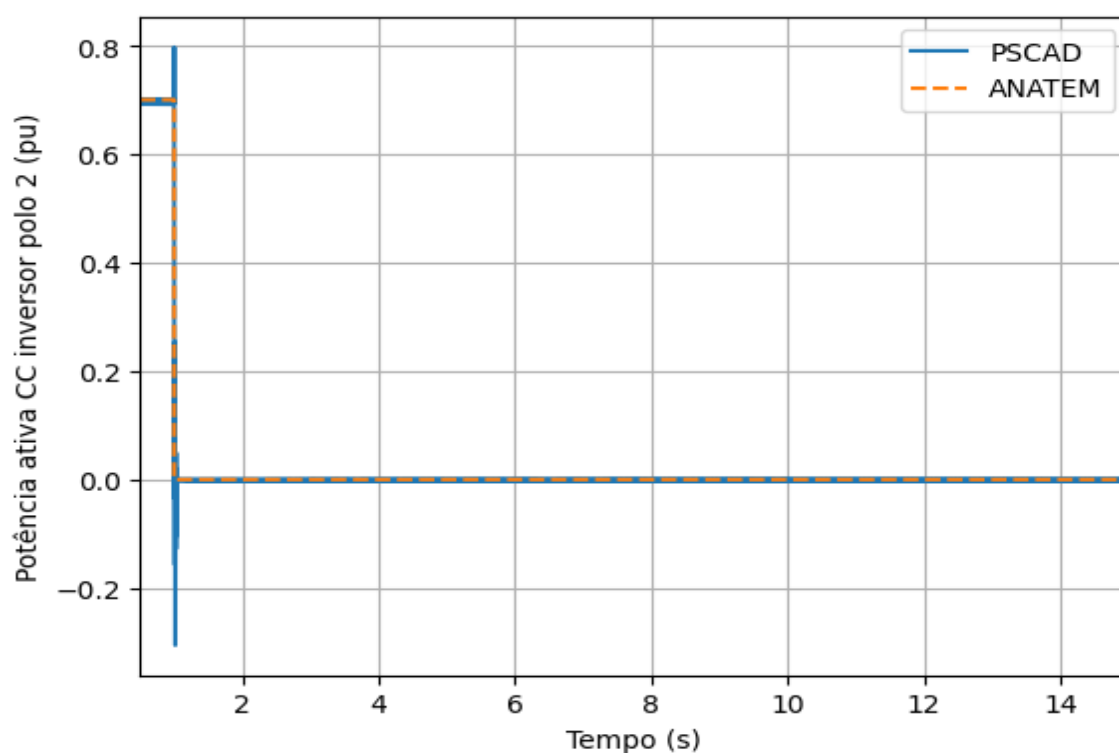


Figura 5-36 Potência ativa CC do inversor do polo 2

5.3 CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REMANESCENTE DE 0.2 PU

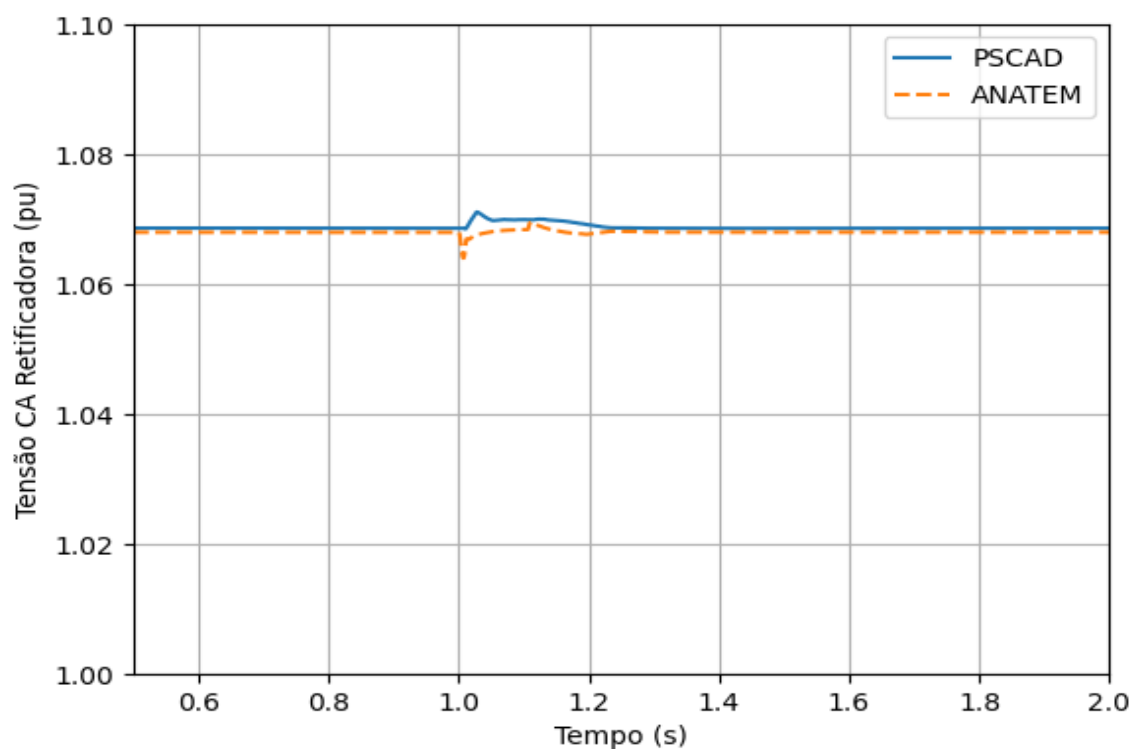


Figura 5-37 Tensão CA na retificadora

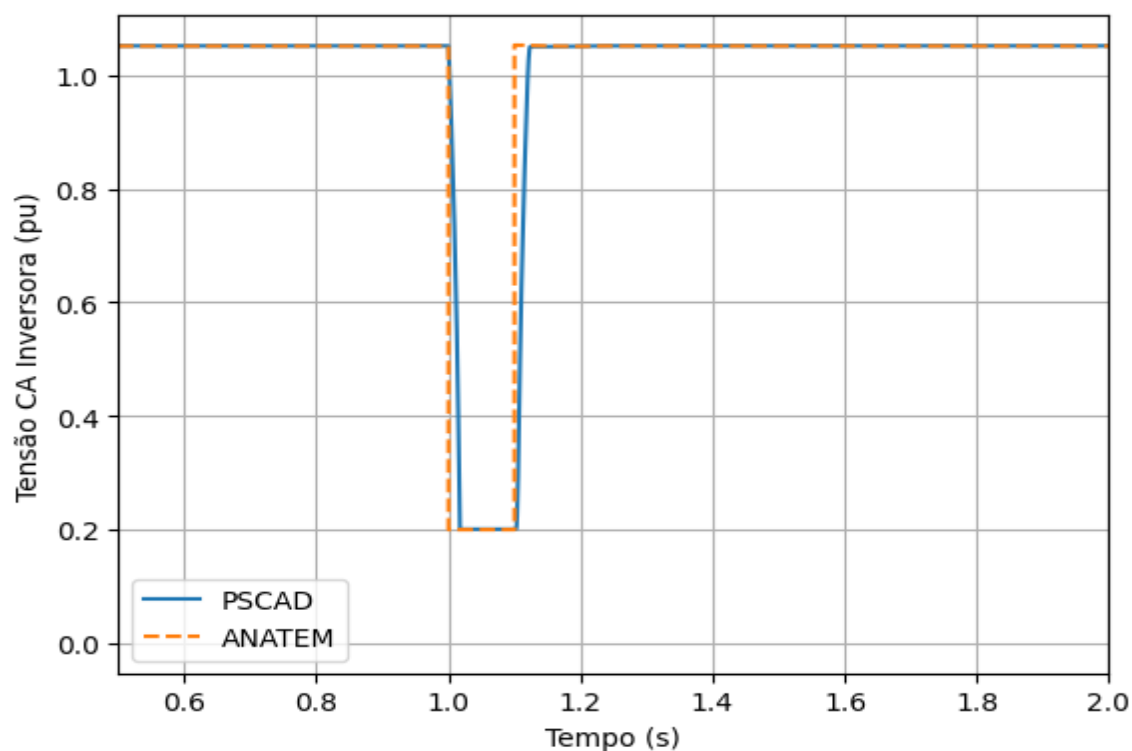


Figura 5-38 Tensão CA na inversora

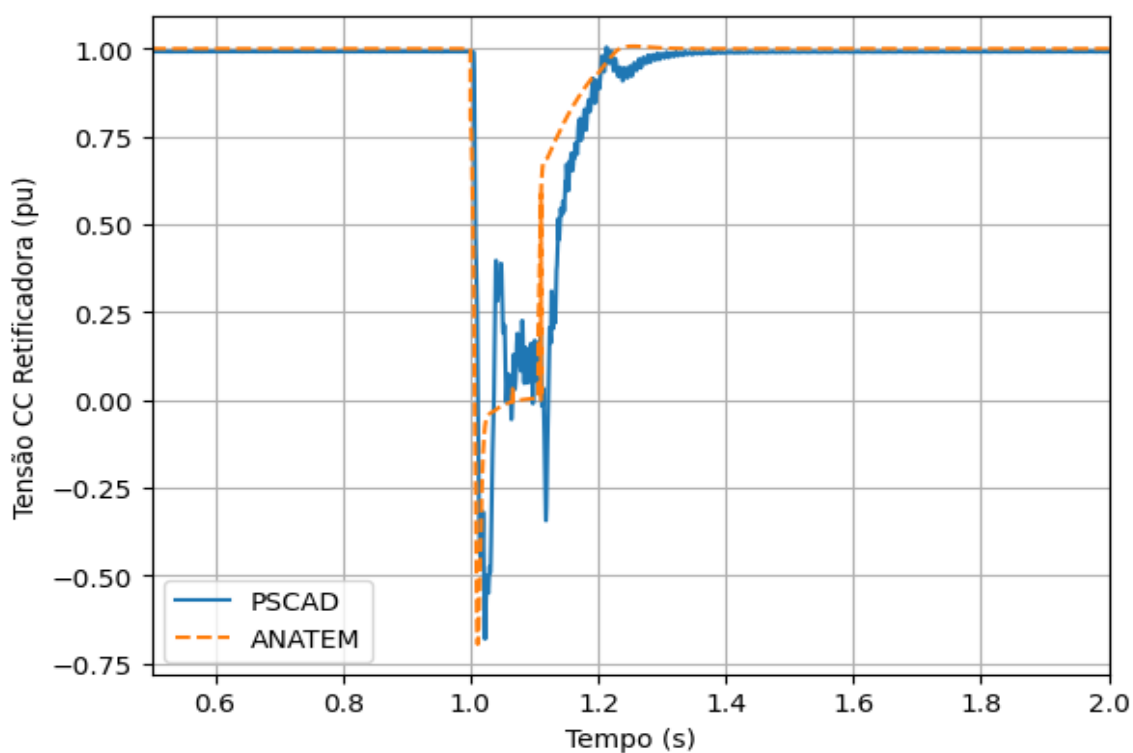


Figura 5-39 Tensão CC na retificadora

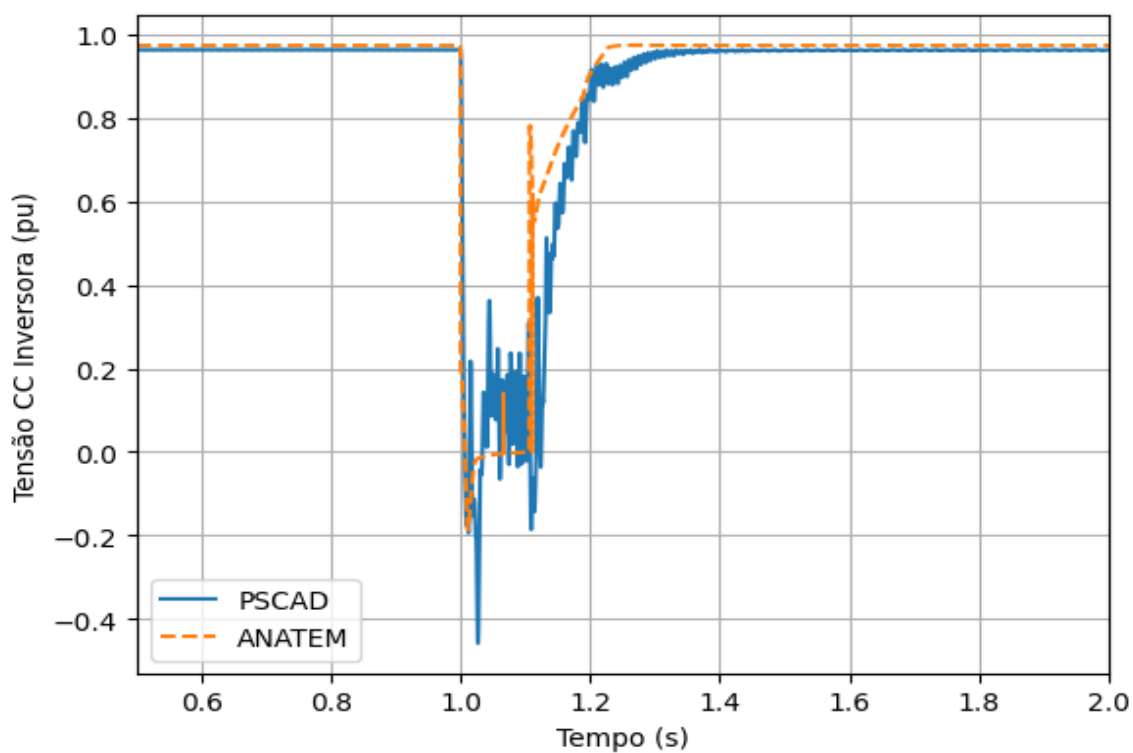


Figura 5-40 Tensão CC na inversora

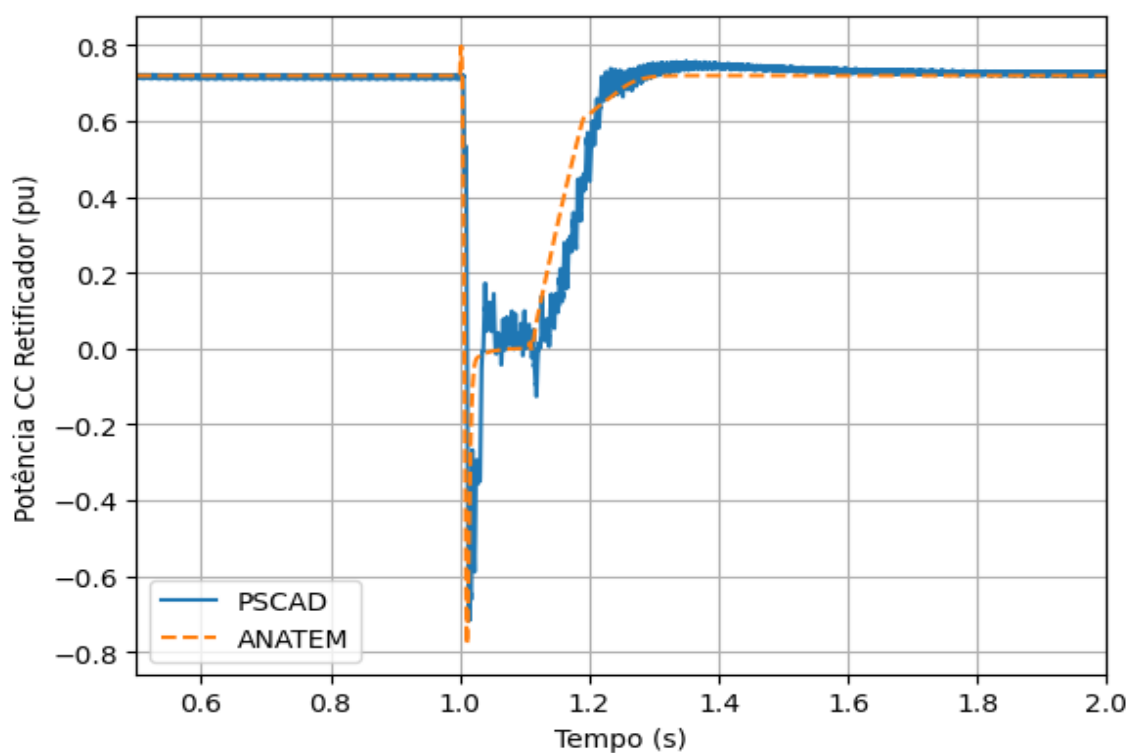


Figura 5-41 Potência CC na retificadora

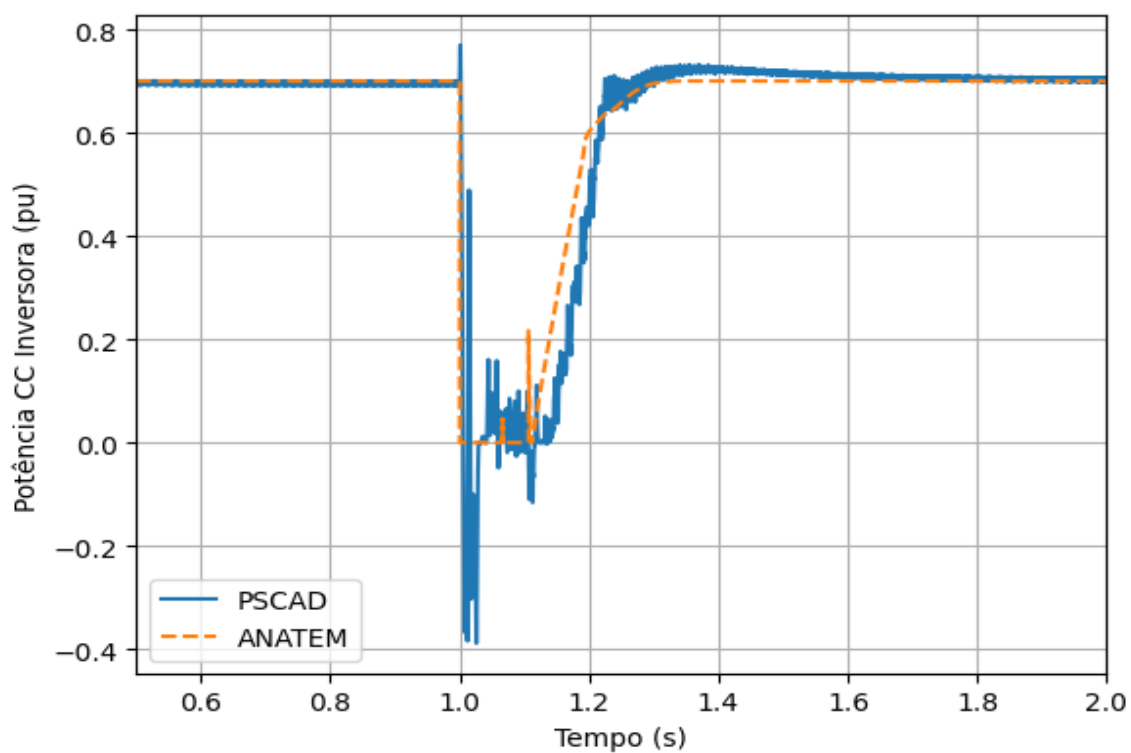


Figura 5-42 Potência CC na inversora

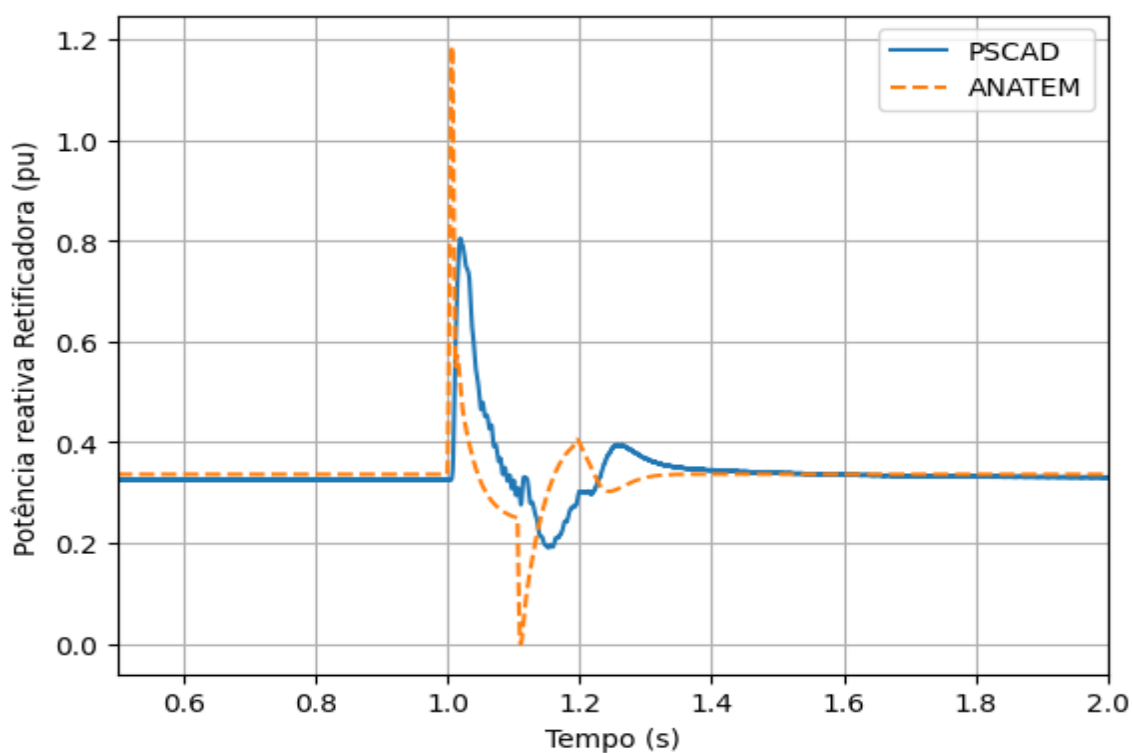


Figura 5-43 Potência reativa na retificadora

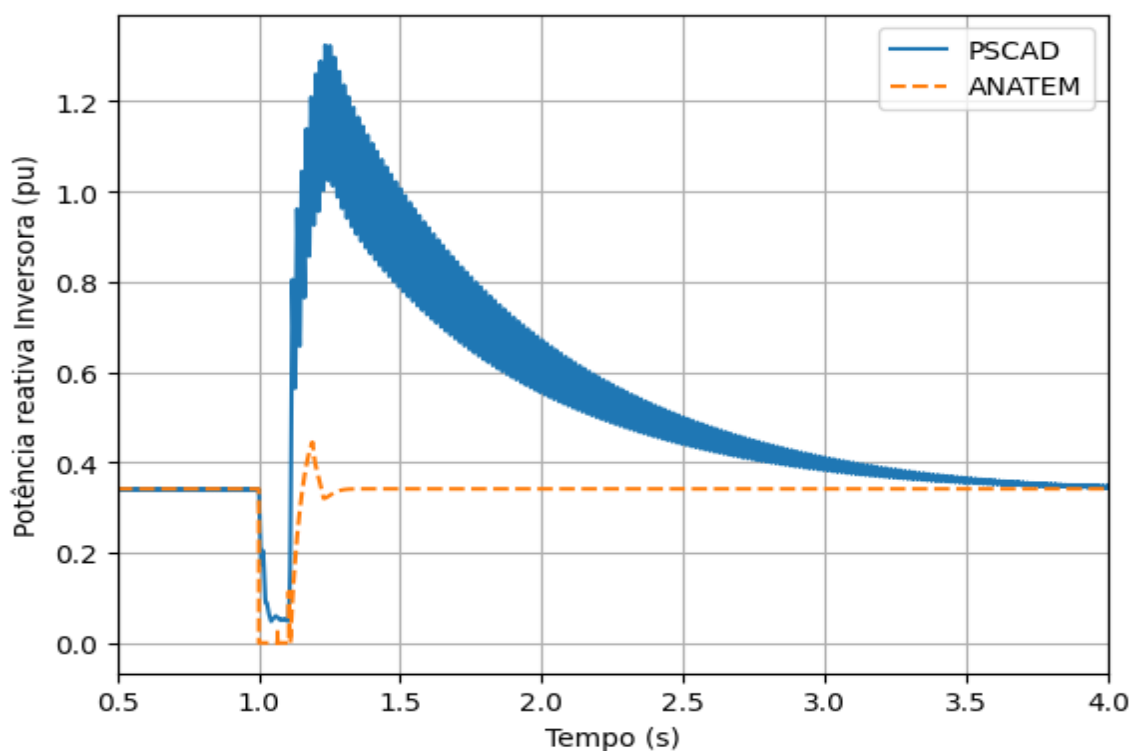


Figura 5-44 Potência reativa na inversora

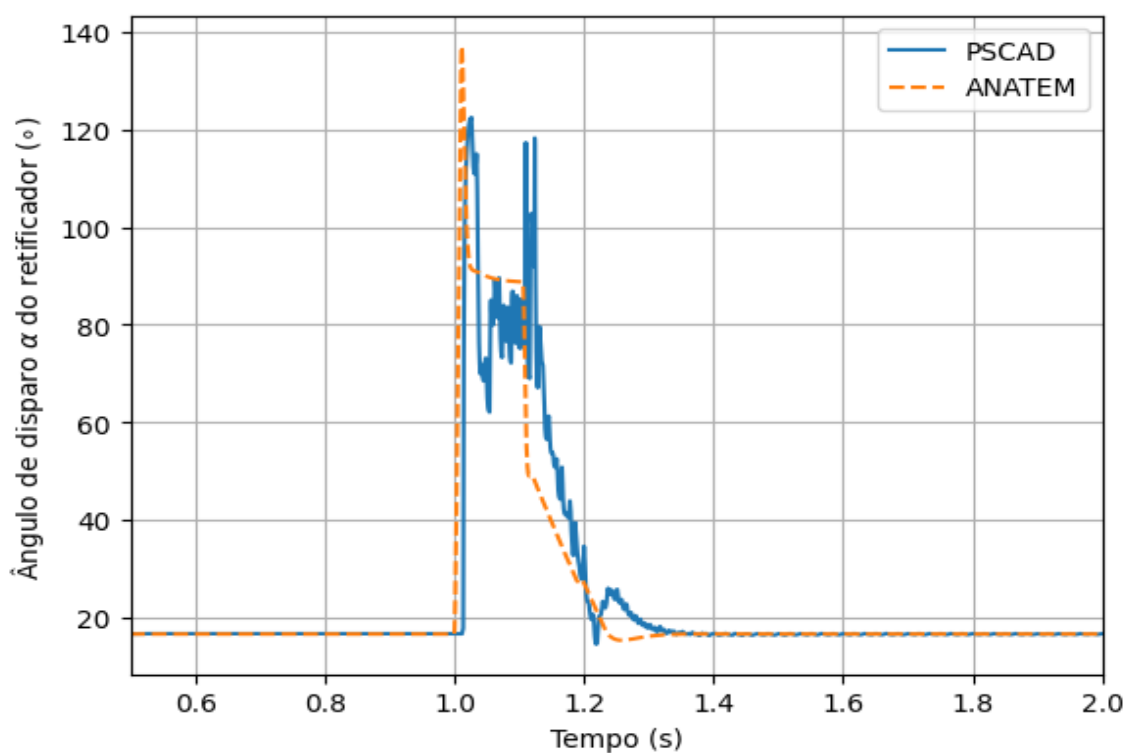


Figura 5-45 Ângulo de disparo da retificadora

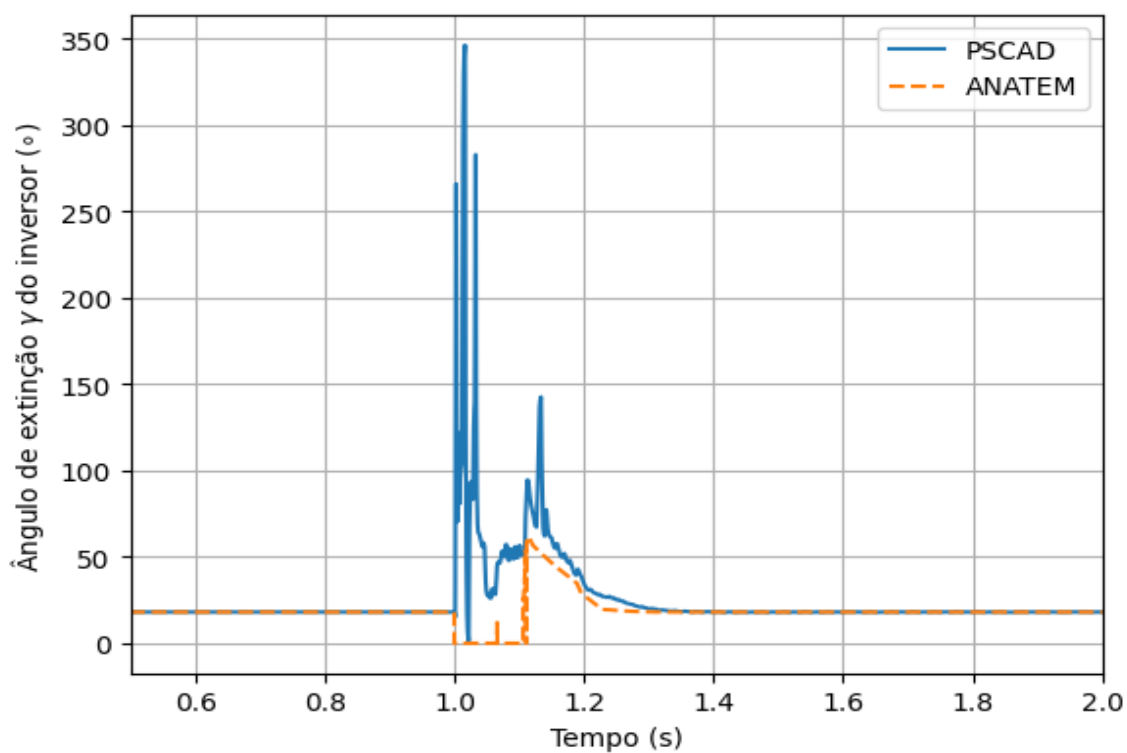


Figura 5-46 Ângulo de extinção da inversora

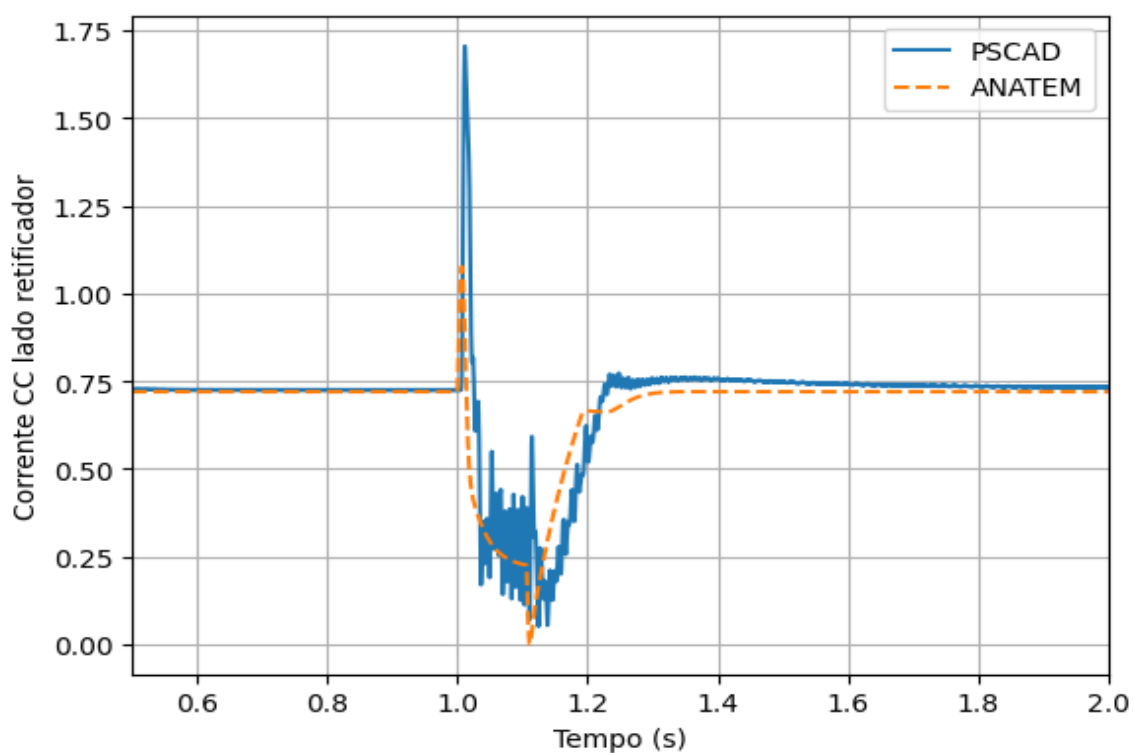


Figura 5-47 Corrente CC medida do lado retificador

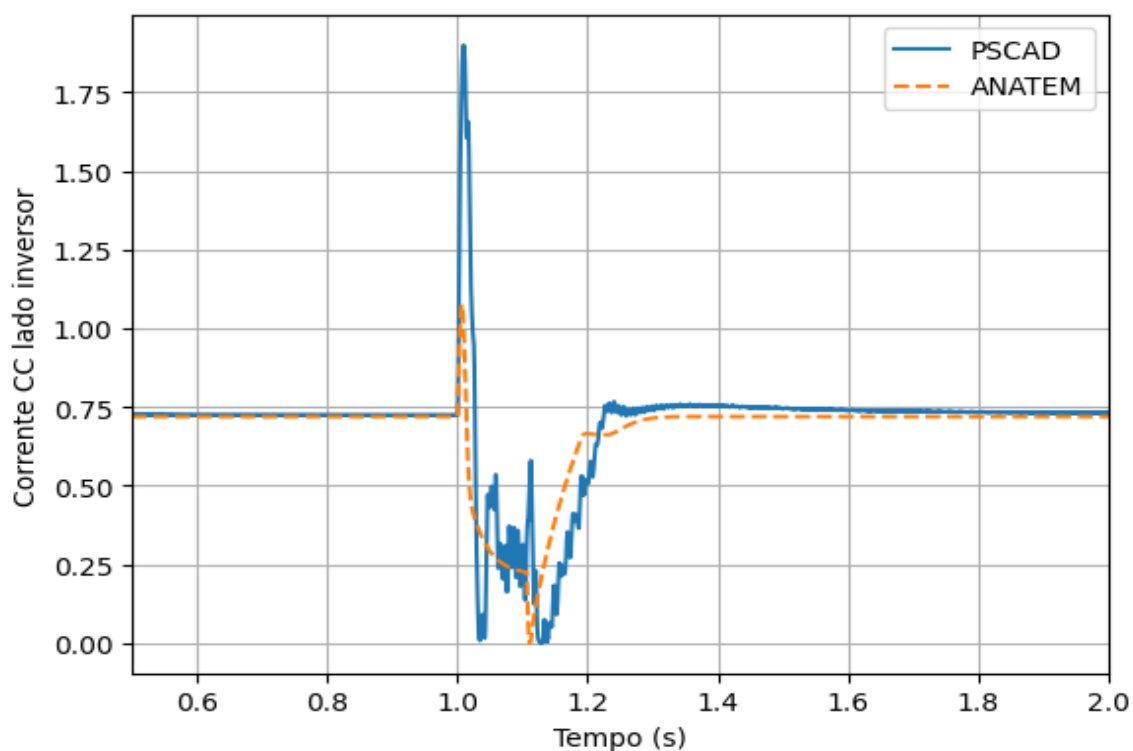


Figura 5-48 Corrente CC medida do lado inversor

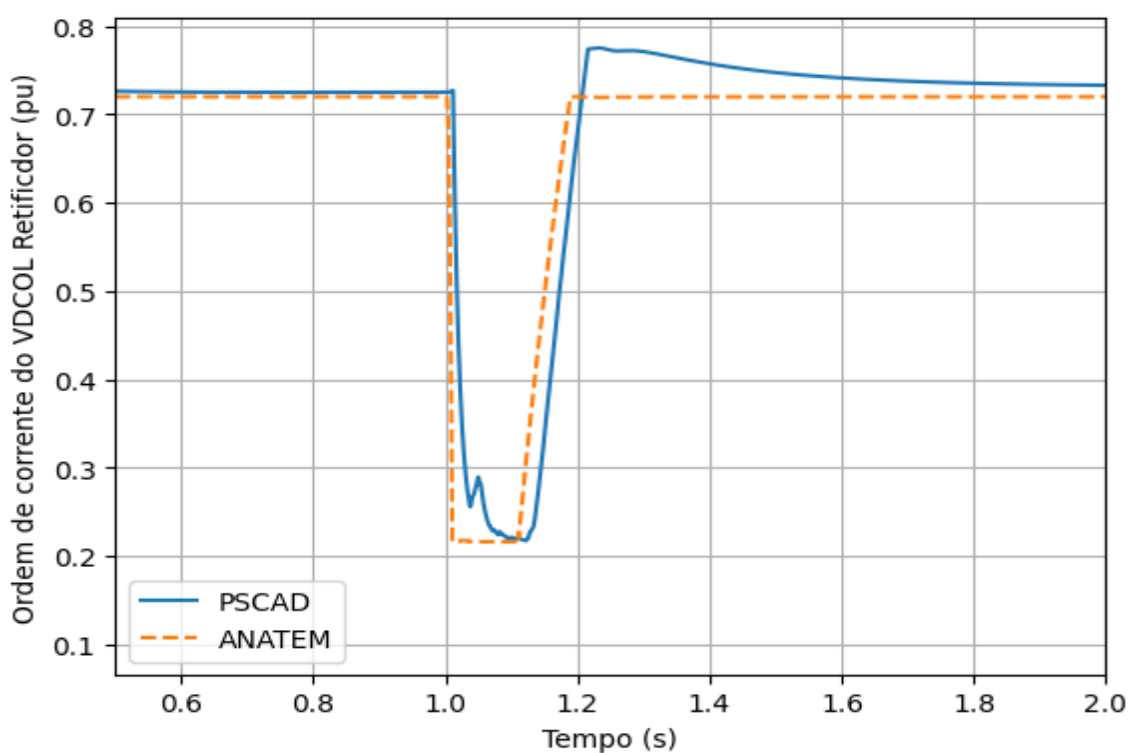


Figura 5-49 Ordem de corrente do VDCOL do retificador

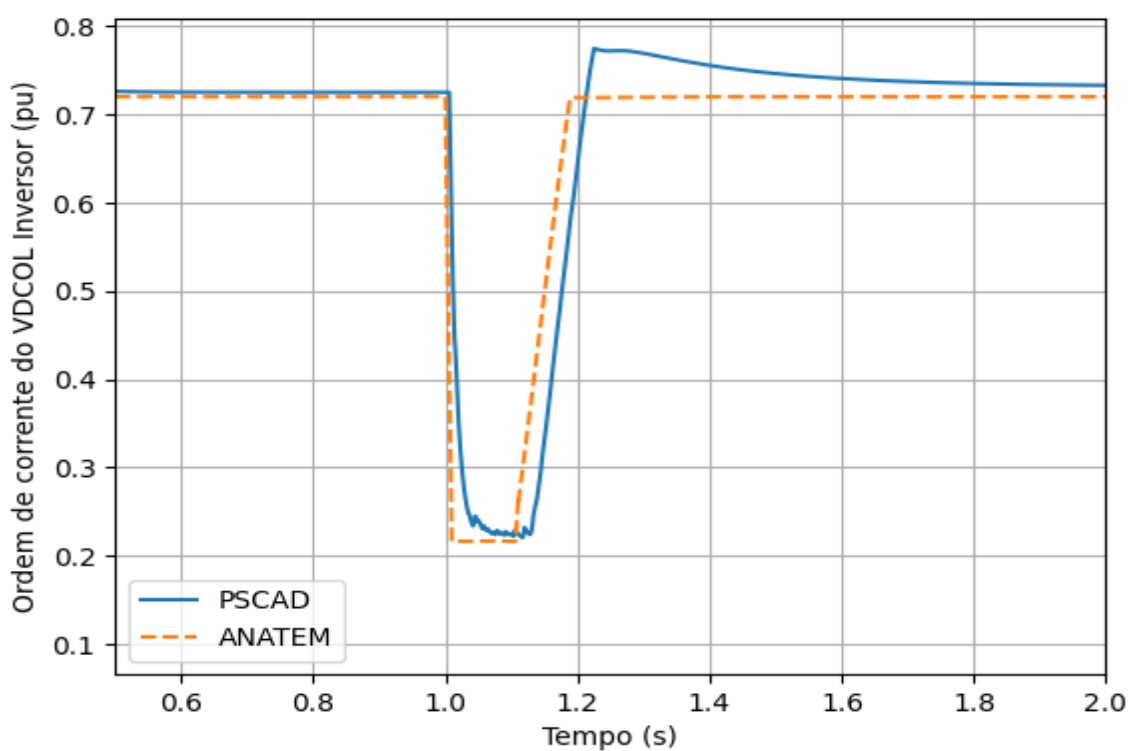


Figura 5-50 Ordem de corrente do VDCOL do inversor

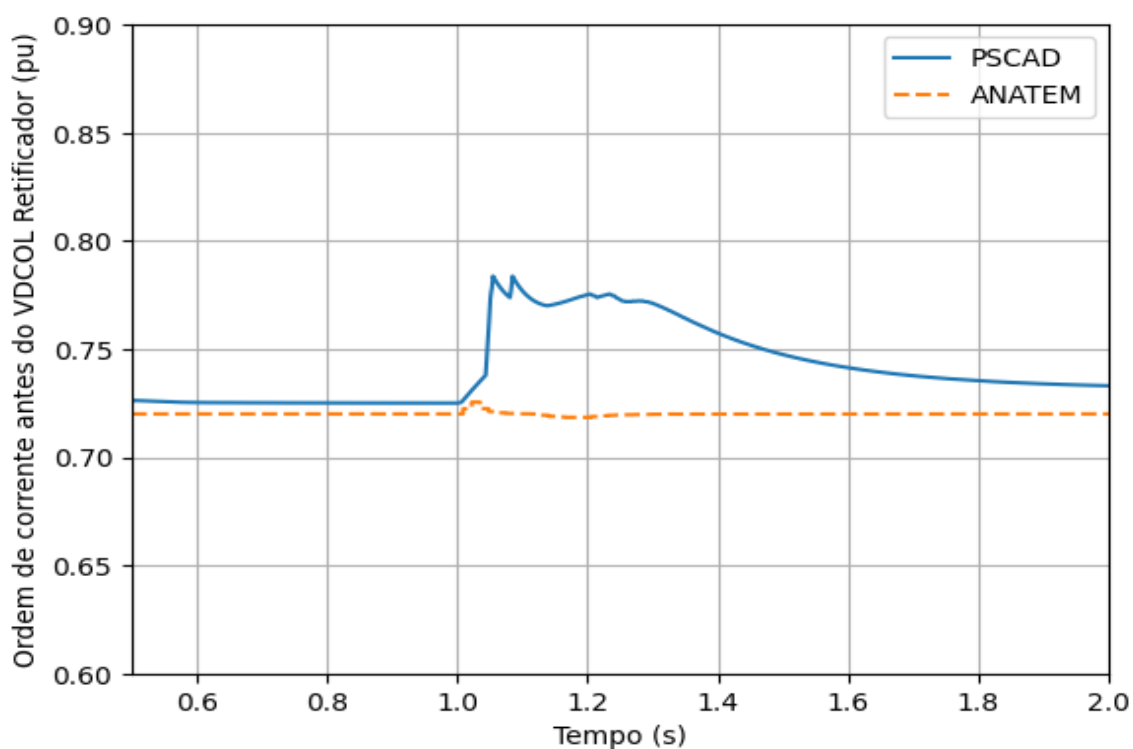


Figura 5-51 Ordem de corrente antes do VDCOL do retificador

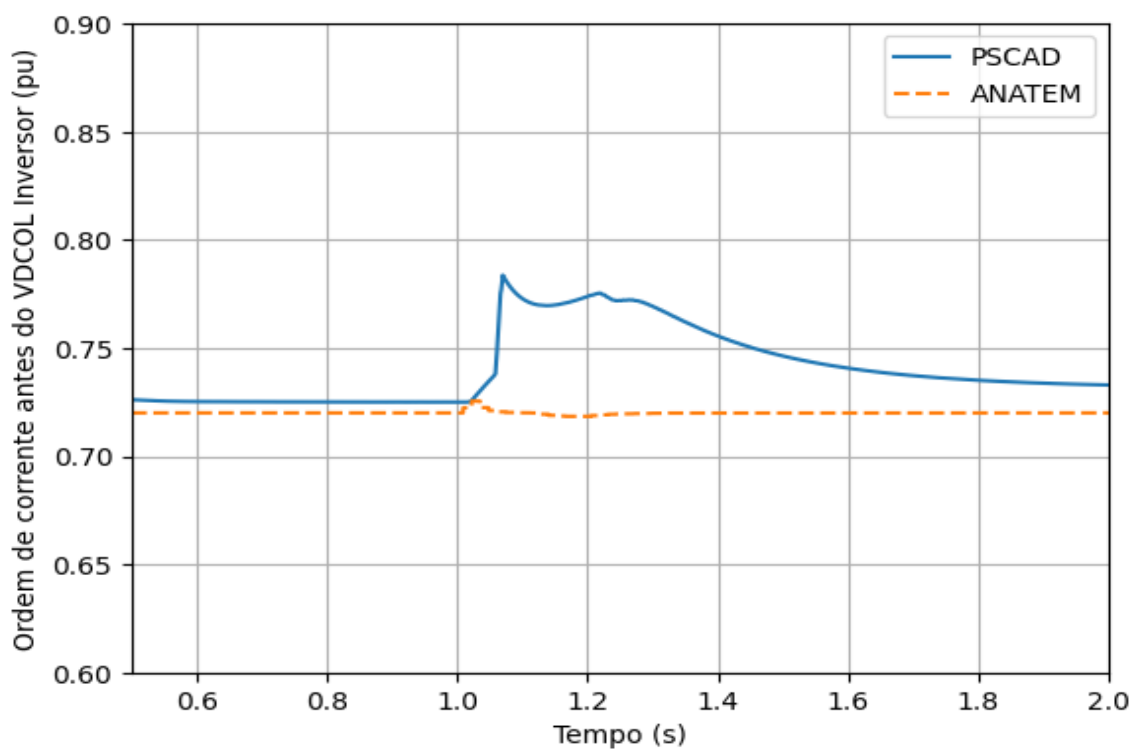


Figura 5-52 Ordem de corrente antes do VDCOL do inversor

5.4 CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REMANESCENTE DE 0.7 PU

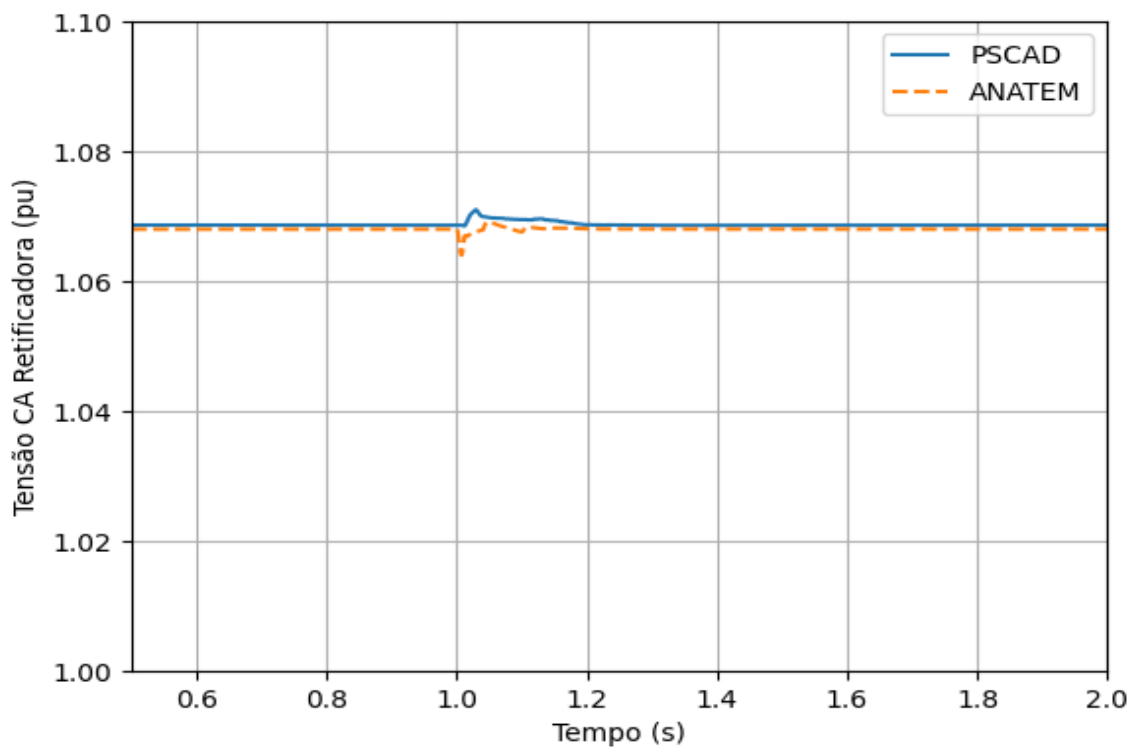


Figura 5-53 Tensão CA na retificadora

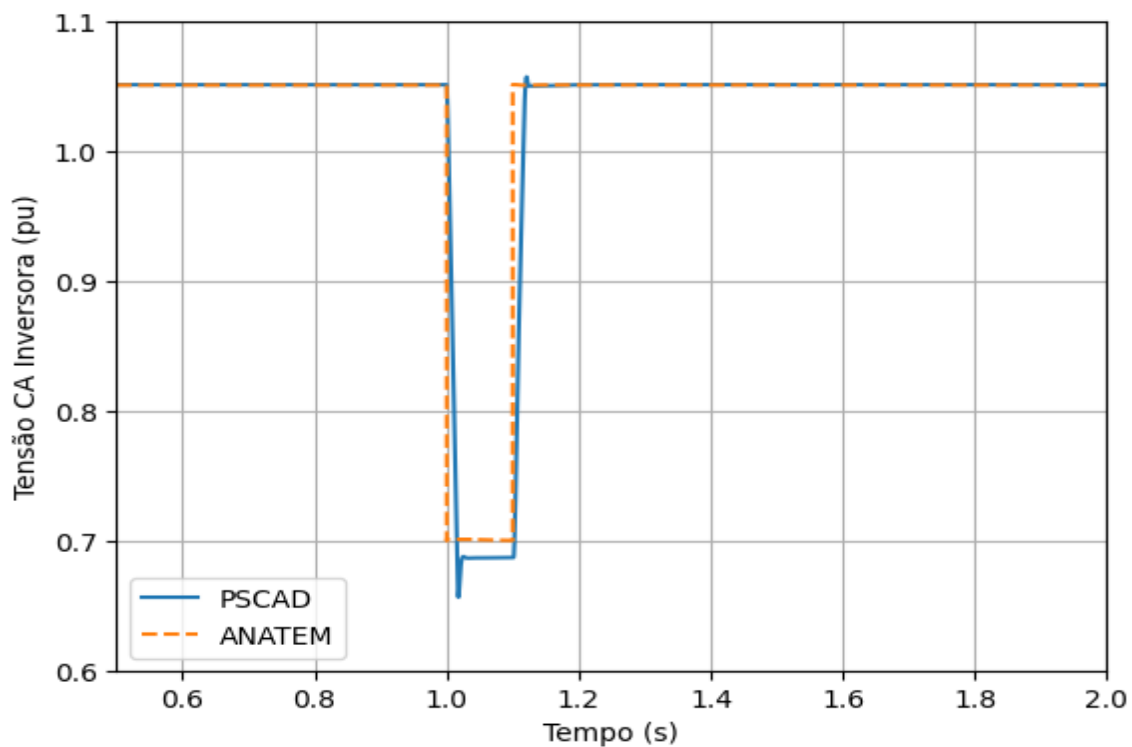


Figura 5-54 Tensão CA na inversora

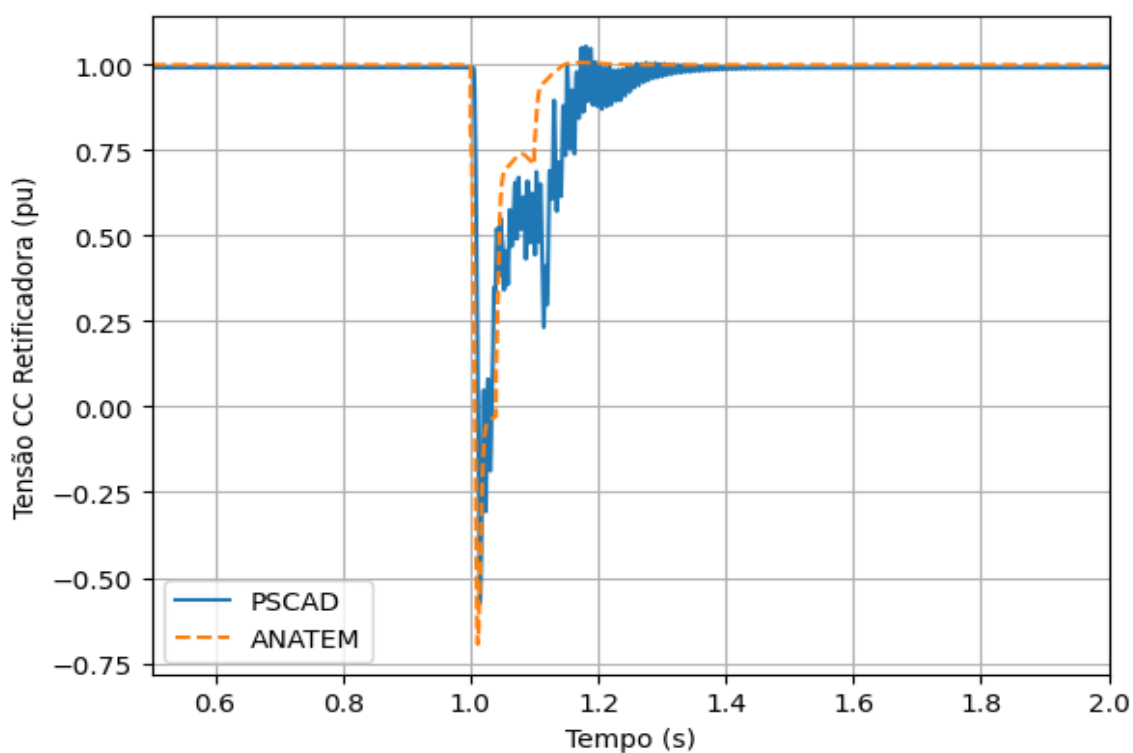


Figura 5-55 Tensão CC na retificadora

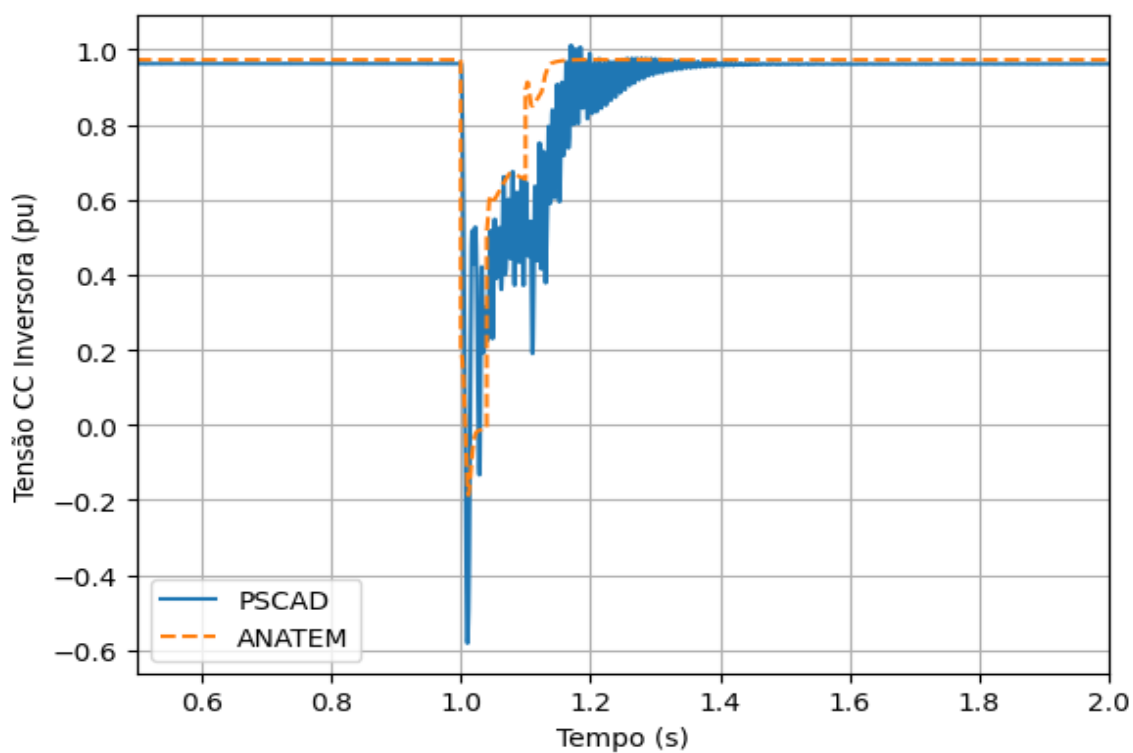


Figura 5-56 Tensão CC na inversora

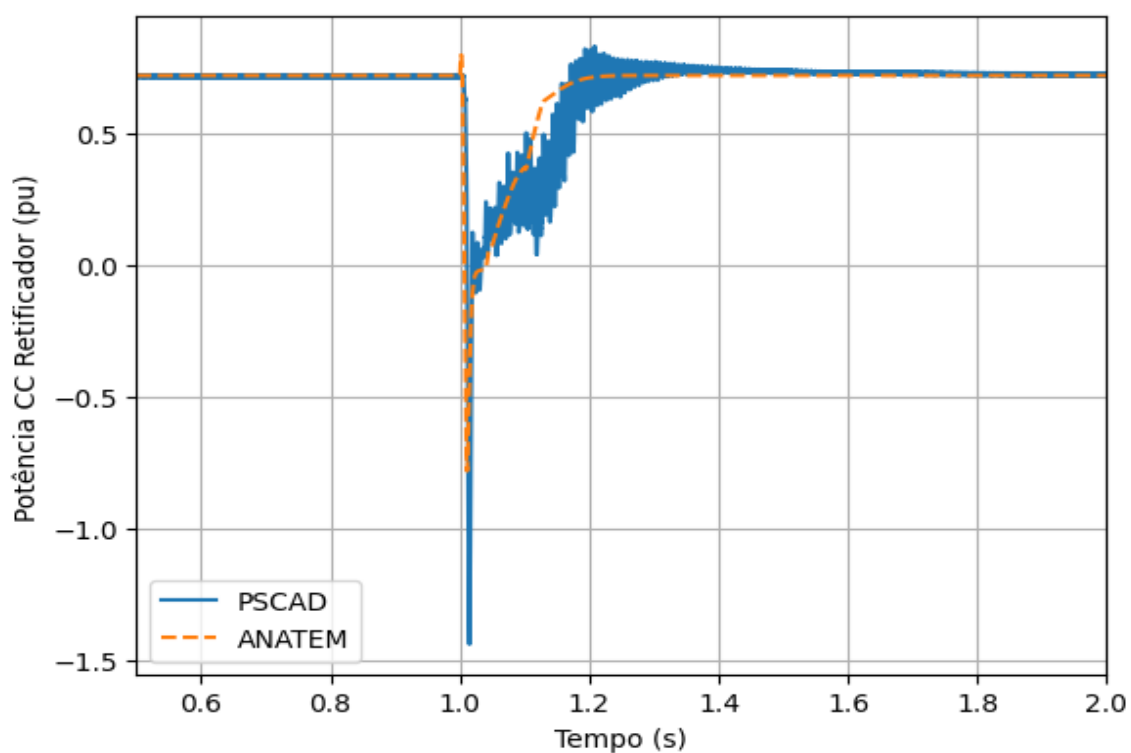


Figura 5-57 Potência CC na retificadora

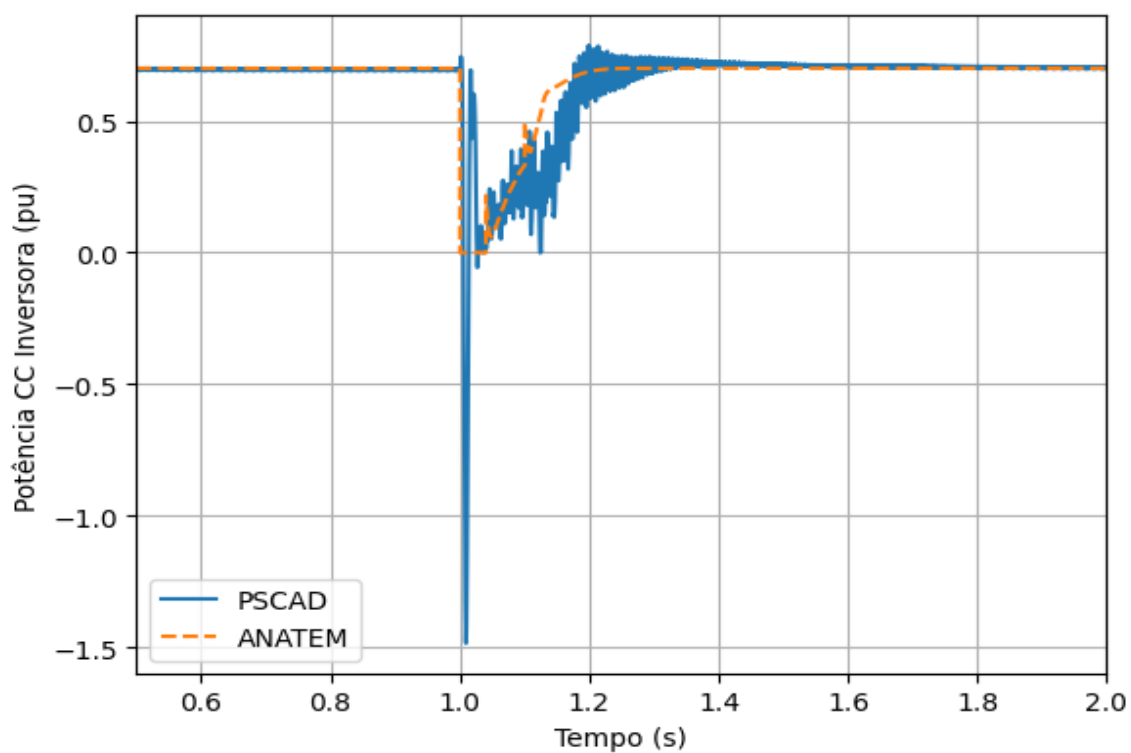


Figura 5-58 Potência CC na inversora

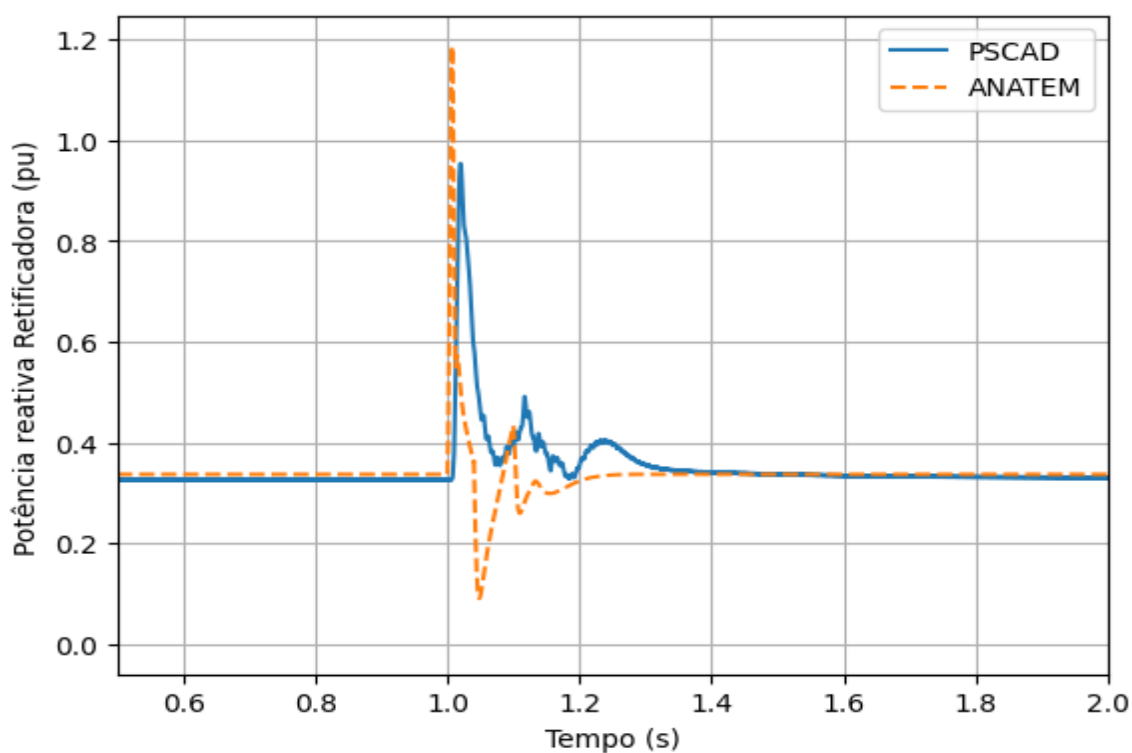


Figura 5-59 Potência reativa na retificadora

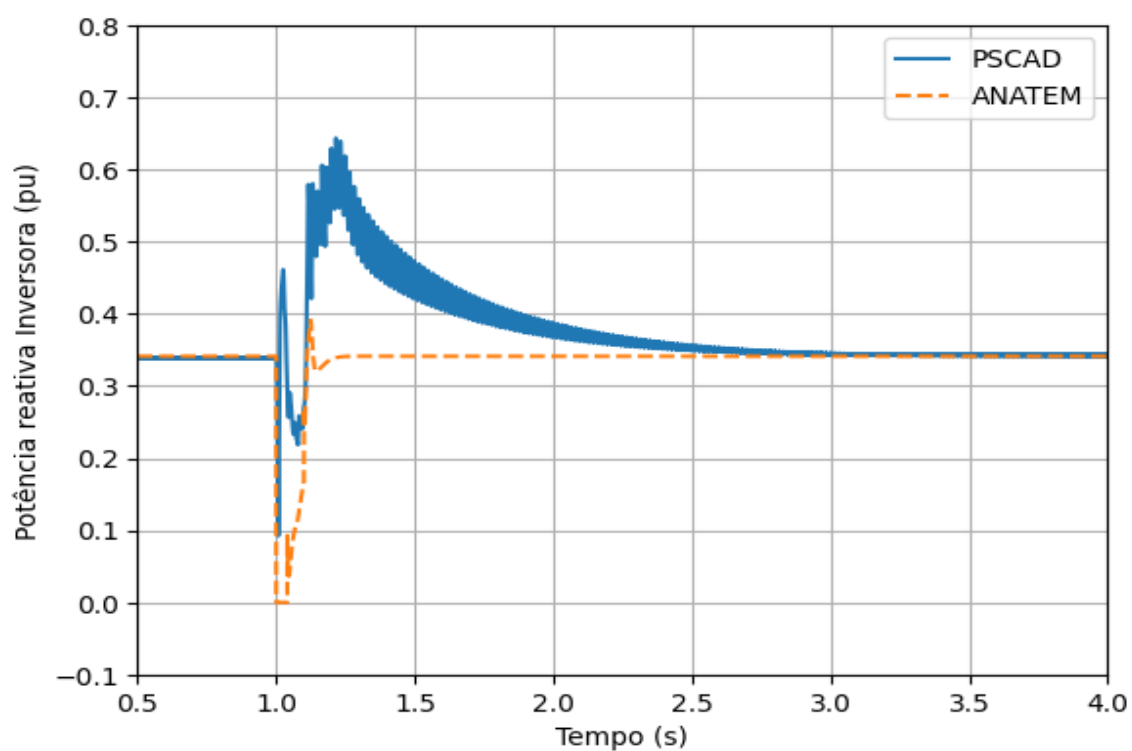


Figura 5-60 Potência reativa na inversora

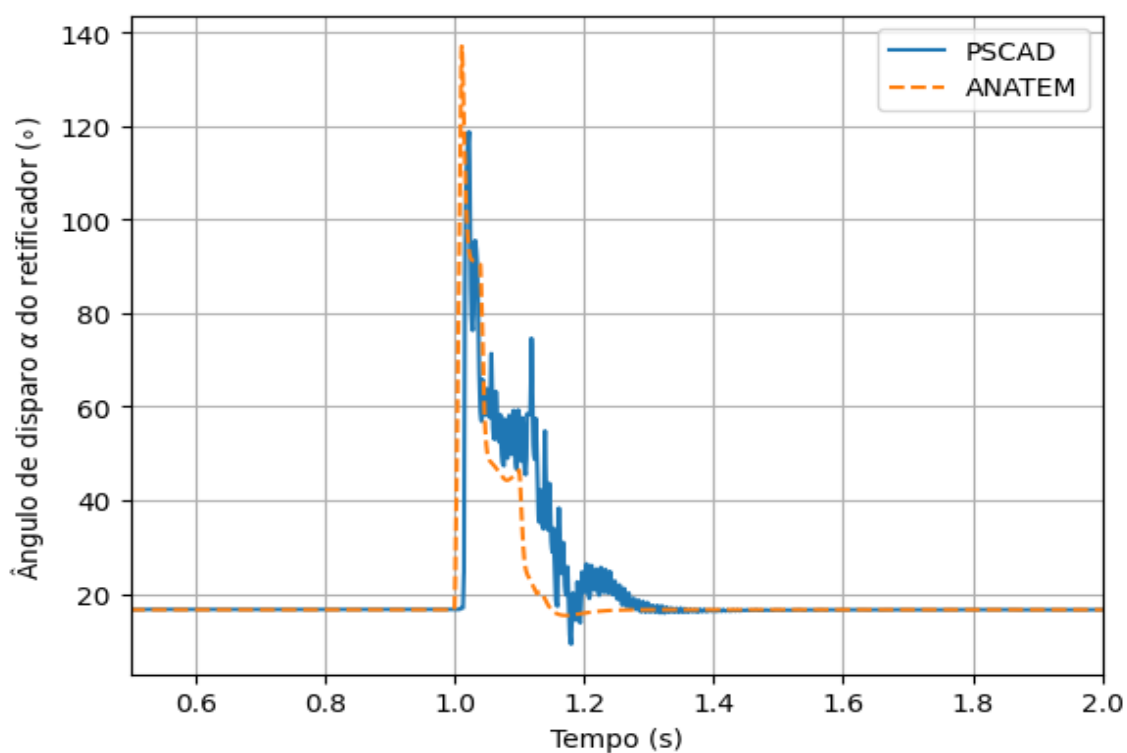


Figura 5-61 Ângulo de disparo da retificadora

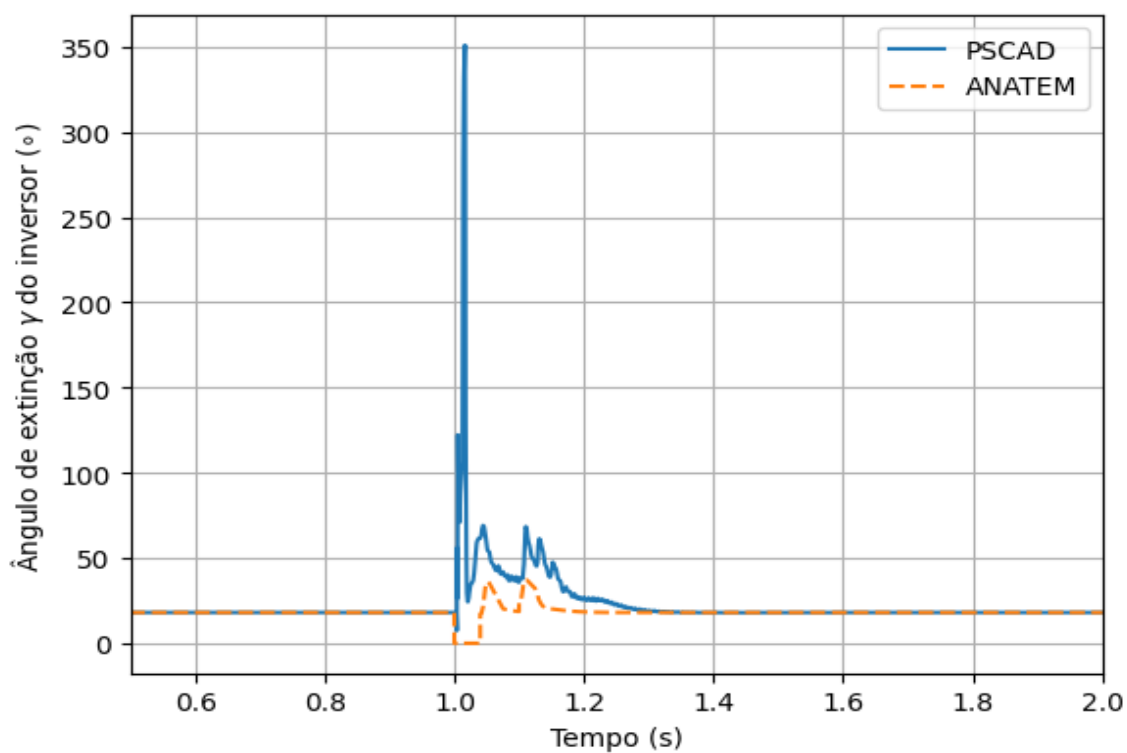


Figura 5-62 Ângulo de extinção da inversora

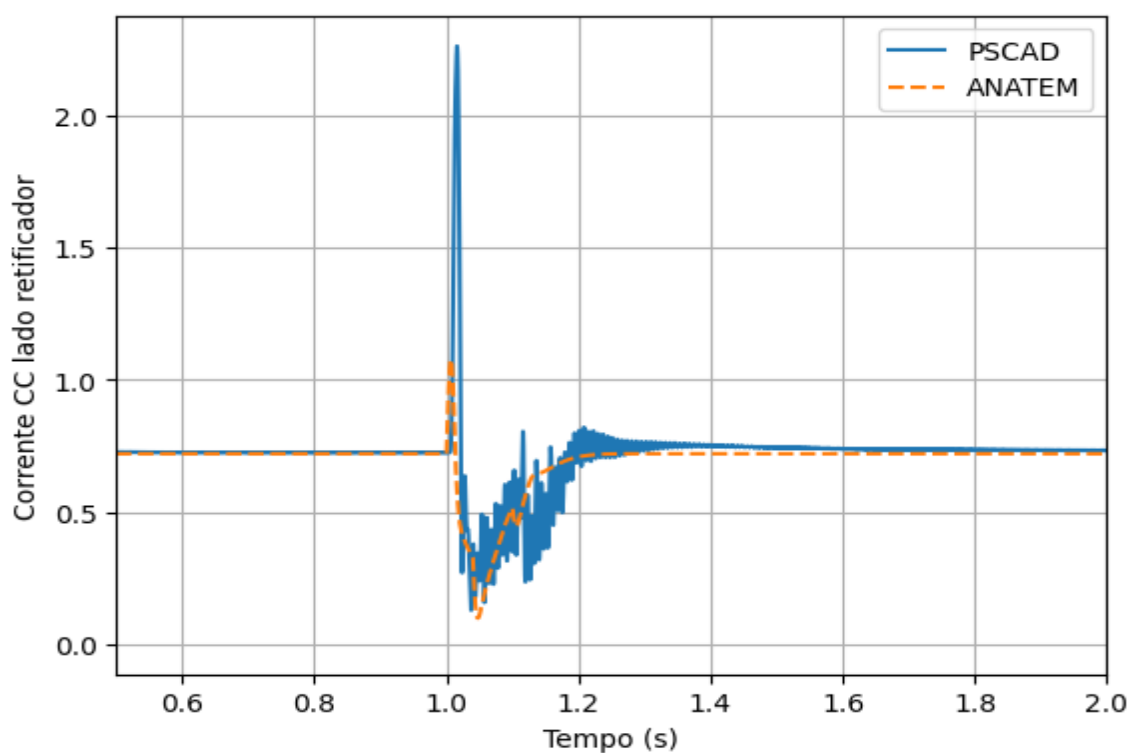


Figura 5-63 Corrente CC medida do lado retificador

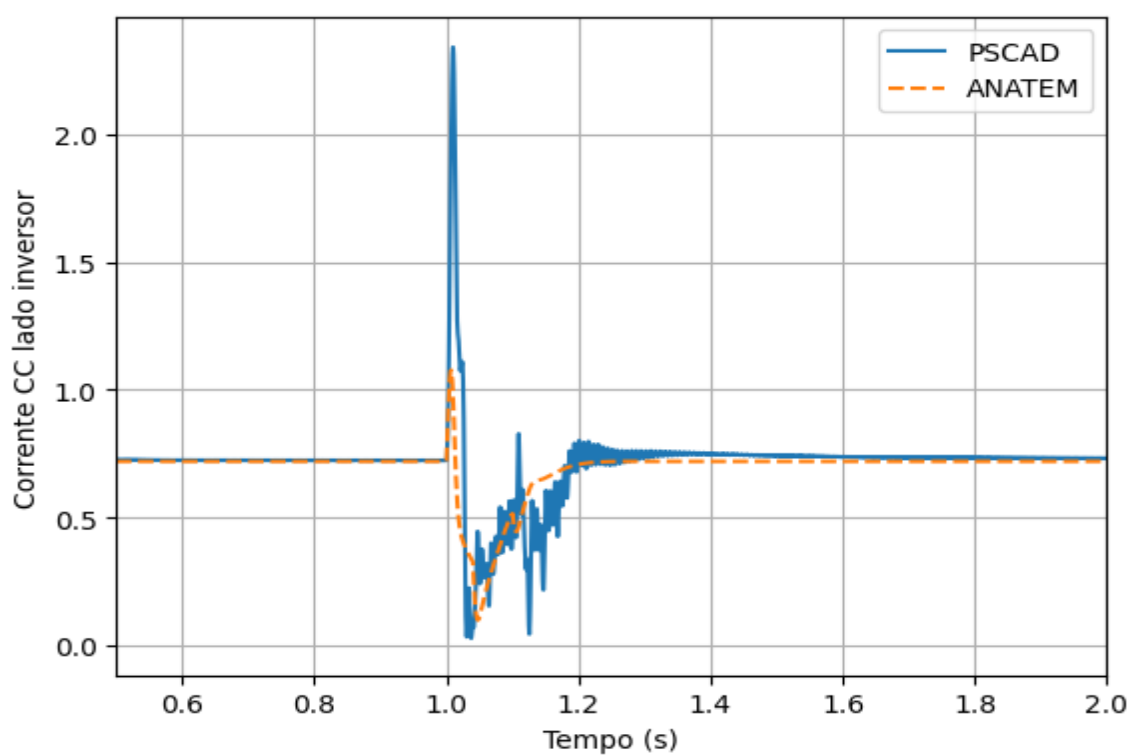


Figura 5-64 Corrente CC medida do lado inversor

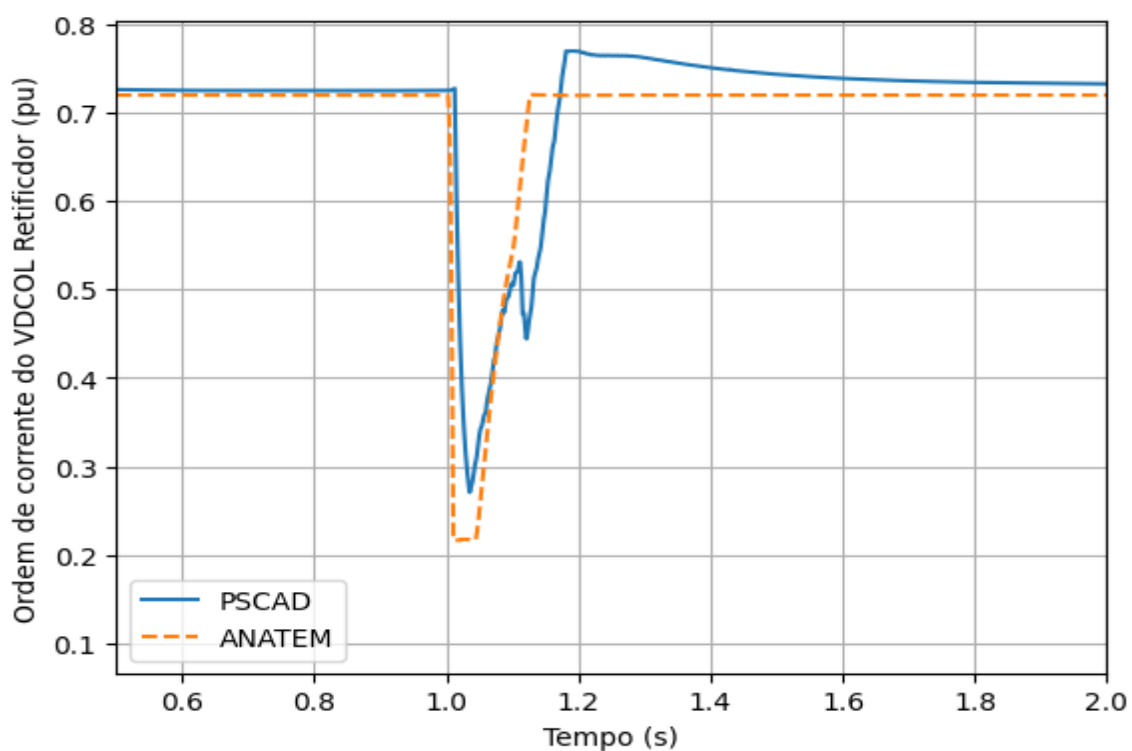


Figura 5-65 Ordem de corrente do VDCOL do retificador

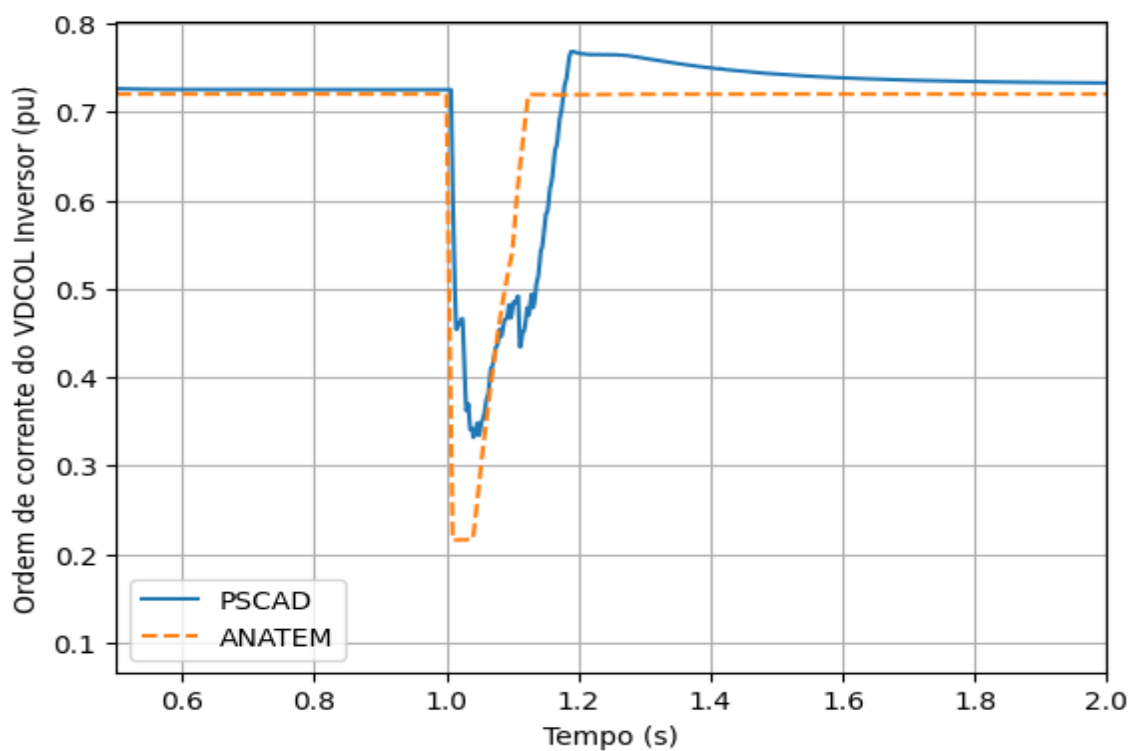


Figura 5-66 Ordem de corrente do VDCOL do inversor

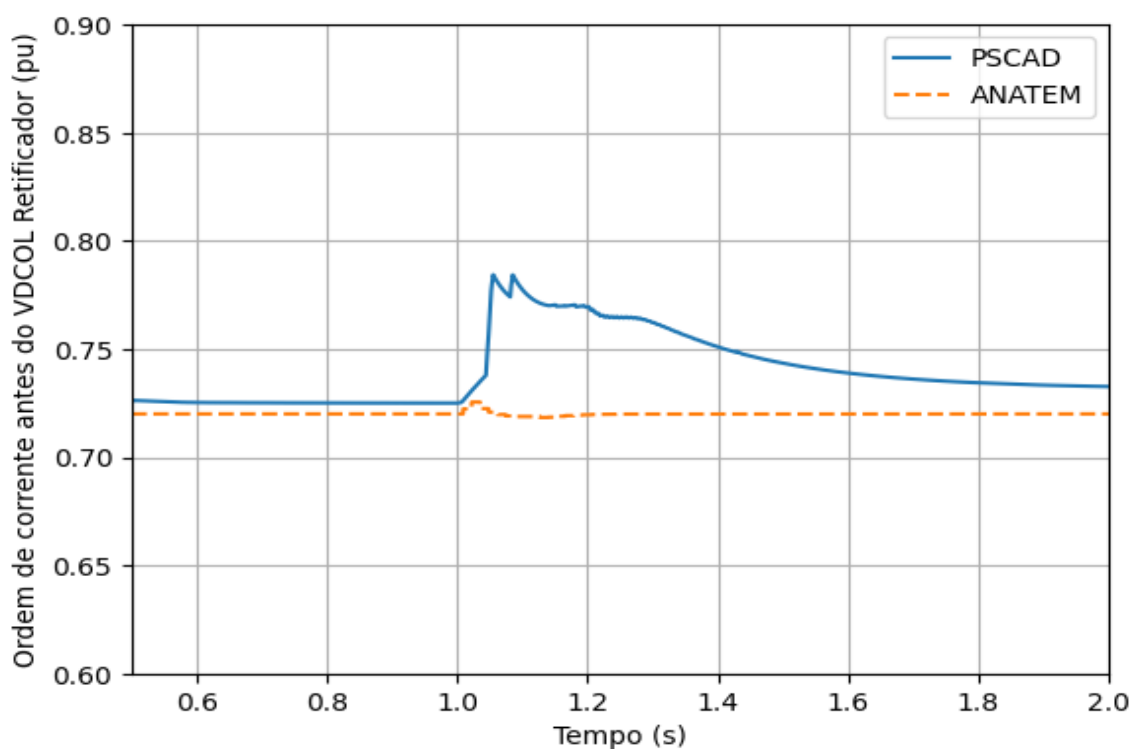


Figura 5-67 Ordem de corrente antes do VDCOL do retificador

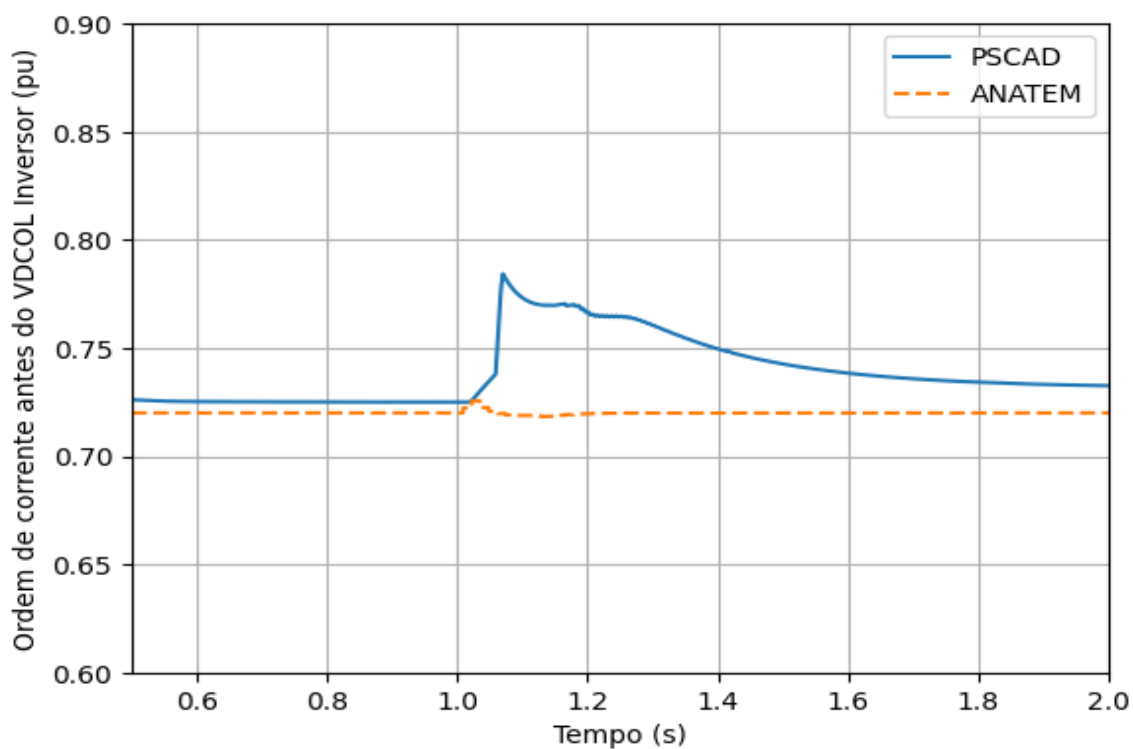


Figura 5-68 Ordem de corrente antes do VDCOL do inversor

6 VALIDAÇÃO DA REDE EQUIVALENTE

O evento normalmente utilizado para análise de *Multi-infeed* é o curto-circuito monofásico, entretanto, para realizar a comparação entre o ANATEM e o PSCAD deve-se levar em consideração algumas diferenças entre os programas.

O curto-circuito monofásico no ANATEM é equivalente ao curto-circuito trifásico por impedância no PSCAD, portanto, para obter respostas semelhantes entre esses programas deve-se ajustar a impedância do curto-circuito trifásico aplicado no PSCAD para obter a mesma queda de tensão do ANATEM.

Assim, para validação do Produto 3 foi comparada a dinâmica dos elos CCAT após um curto-circuito trifásico com impedância na barra de Silvânia. A impedância do curto-circuito trifásico foi ajustada de forma a obter tensão RMS trifásica de aproximadamente 70% da tensão pré-falta na barra em curto.

A partir do arquivo .log do ANATEM é possível ter acesso à impedância de curto aplicada, a qual está apresentada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Impedância de curto por cenário

Cenário	Xc (%)	L (mH)
1 - Leve	1,1274	74,76303
1 - Média	1,0664	70,71785
2 - Média	1,0721	71,09584
3 - Média	1,1187	74,1861

As seções 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam os resultados da comparação para todos os cenários operativos modelados.

6.1 CENÁRIO 1 – CARGA LEVE

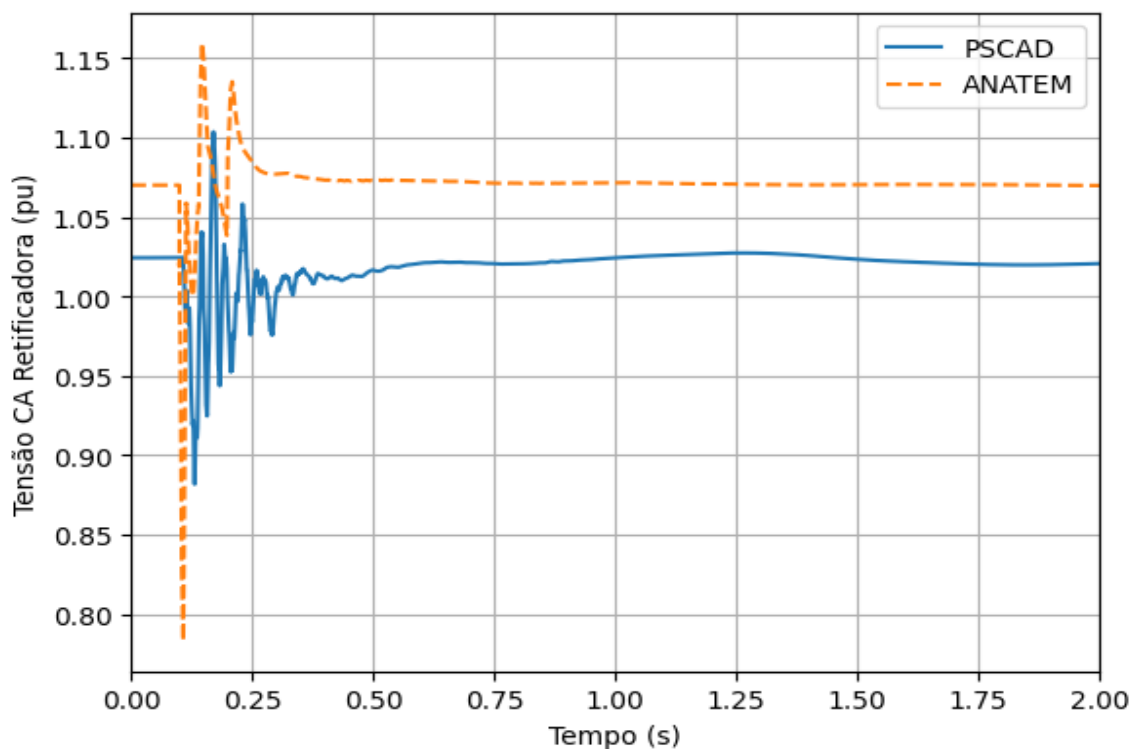


Figura 6-1 Tensão CA na retificadora

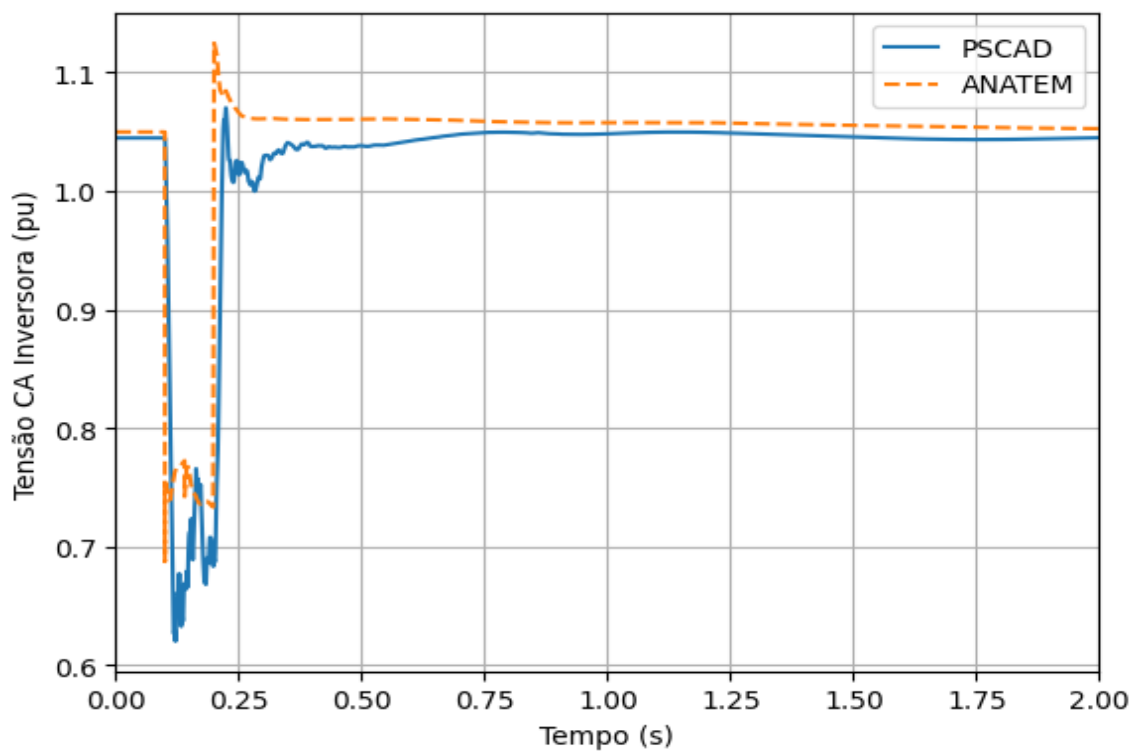


Figura 6-2 Tensão CA na inversora

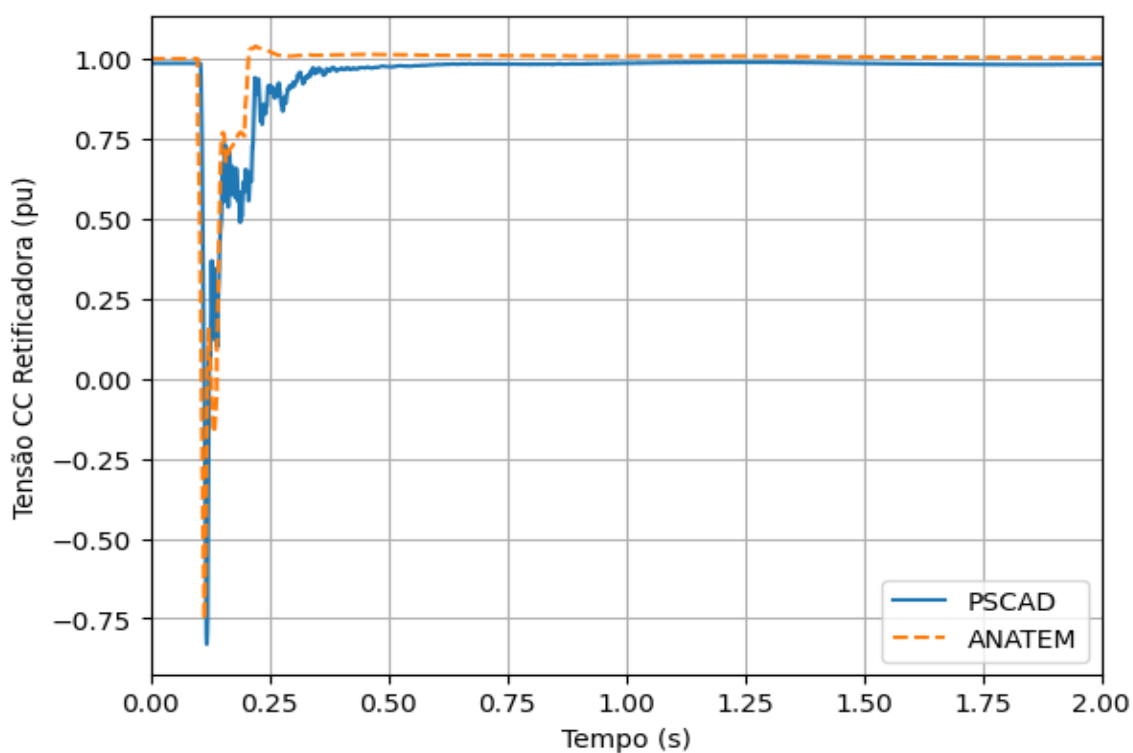


Figura 6-3 Tensão CC na retificadora

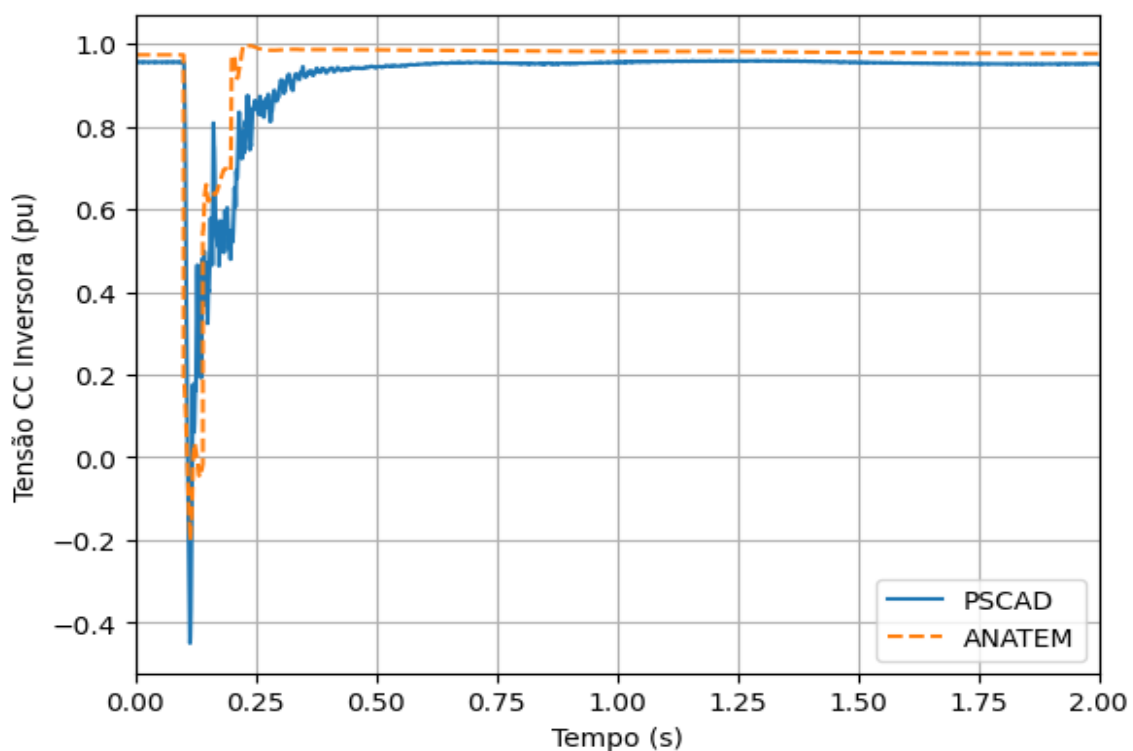


Figura 6-4 Tensão CC na inversora

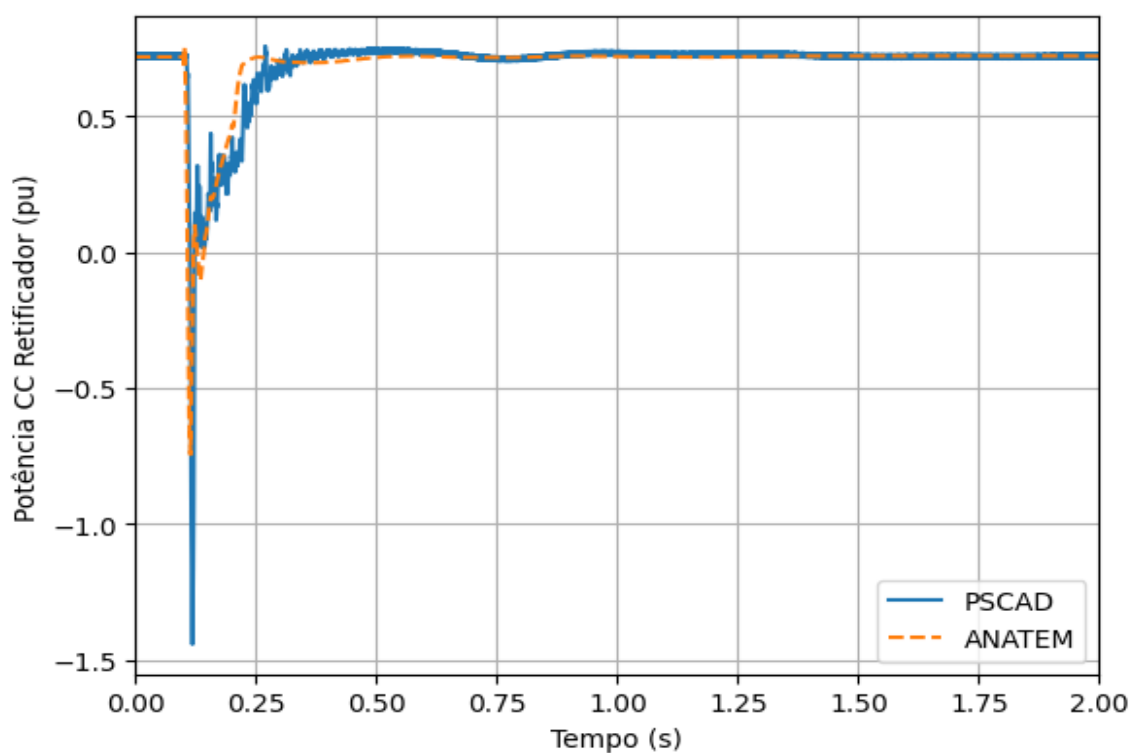


Figura 6-5 Potência CC na retificadora

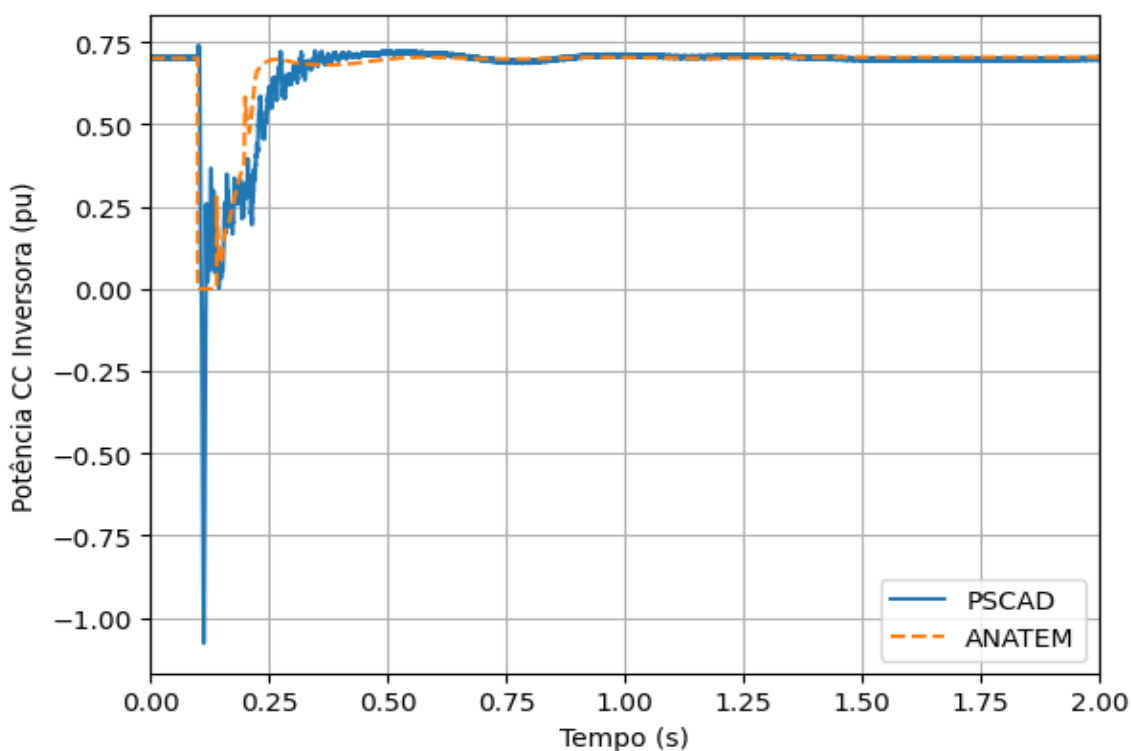


Figura 6-6 Potência CC na inversora

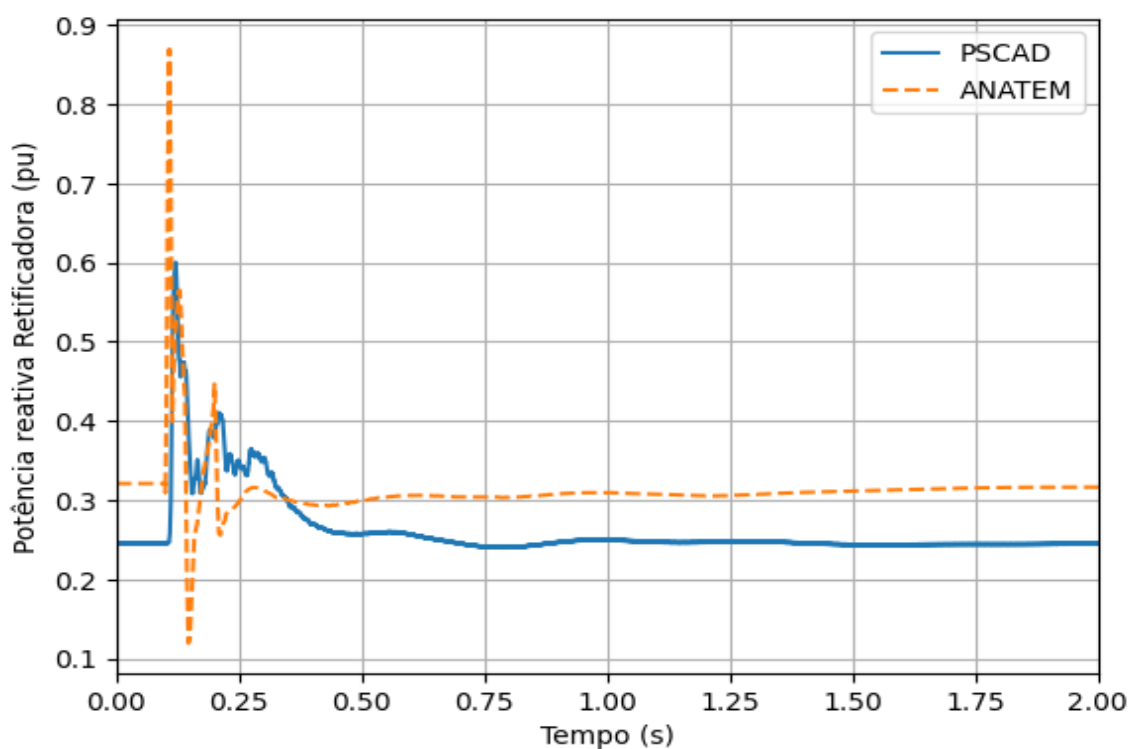


Figura 6-7 Potência reativa na retificadora

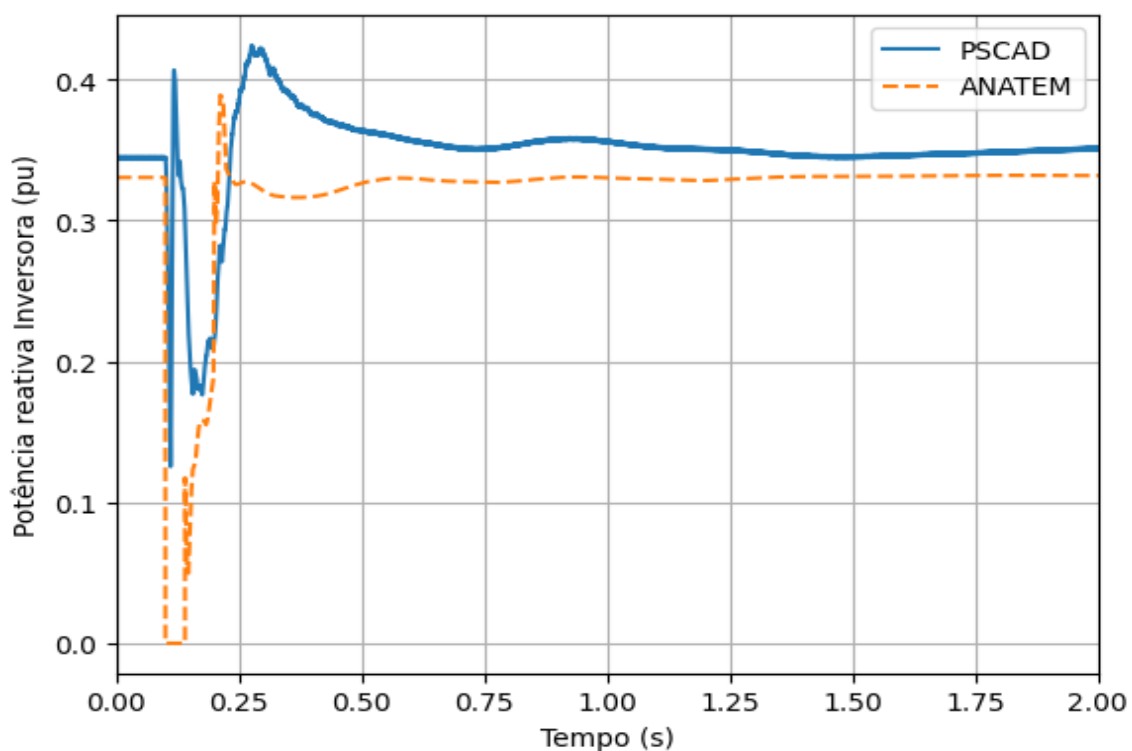


Figura 6-8 Potência reativa na inversora

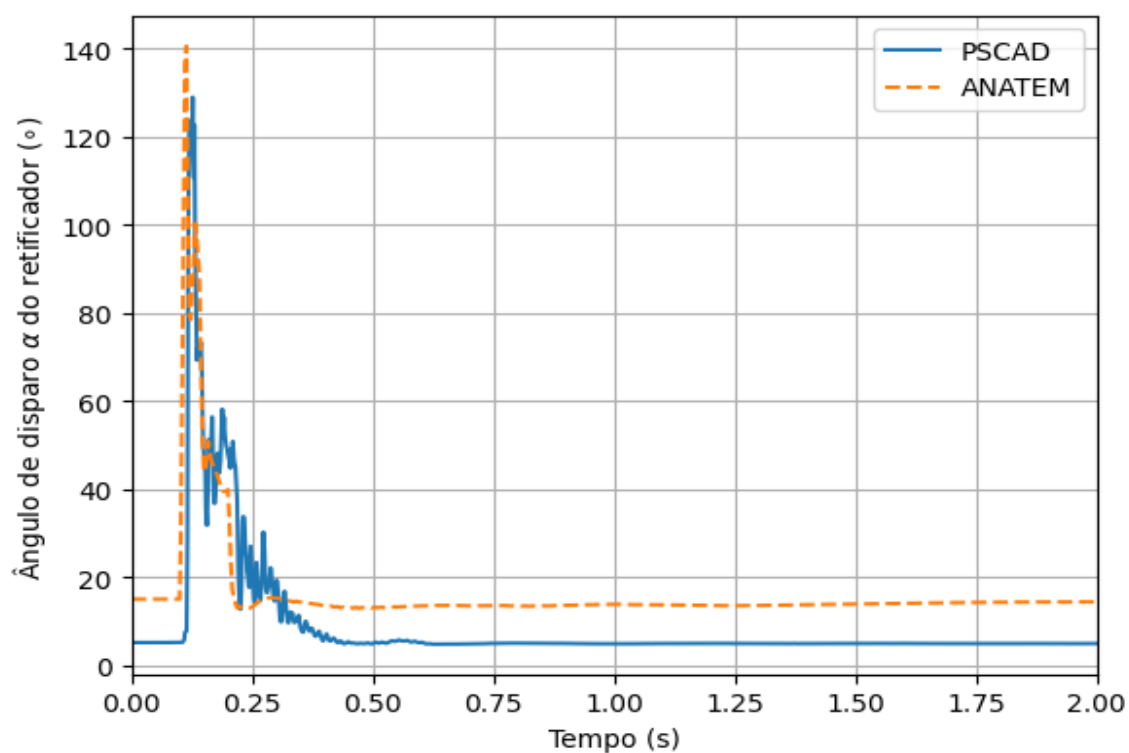


Figura 6-9 Ângulo de disparo da retificadora

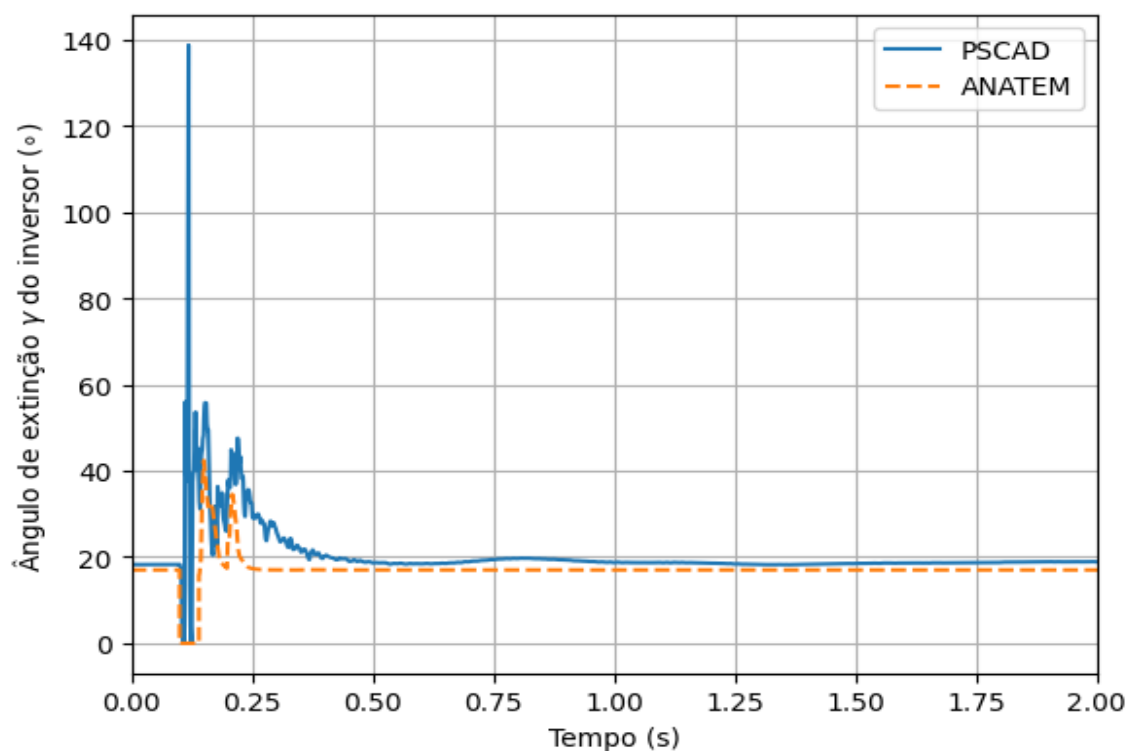


Figura 6-10 Ângulo de extinção da inversora

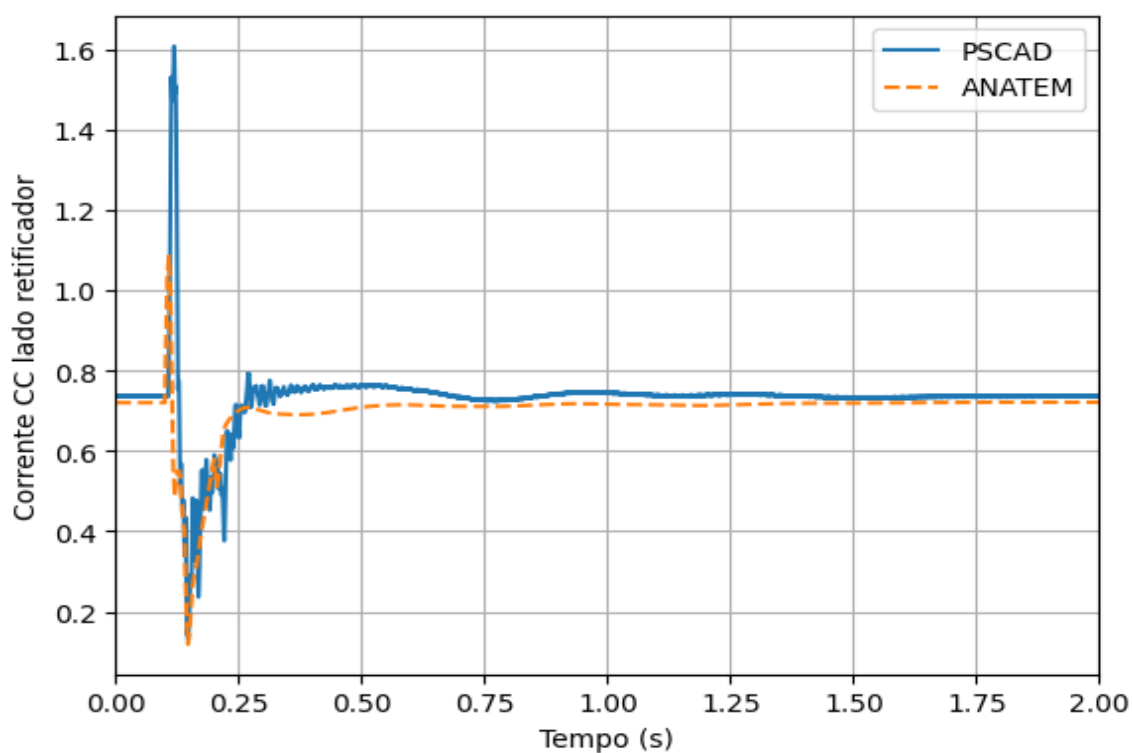


Figura 6-11 Corrente CC medida do lado retificador

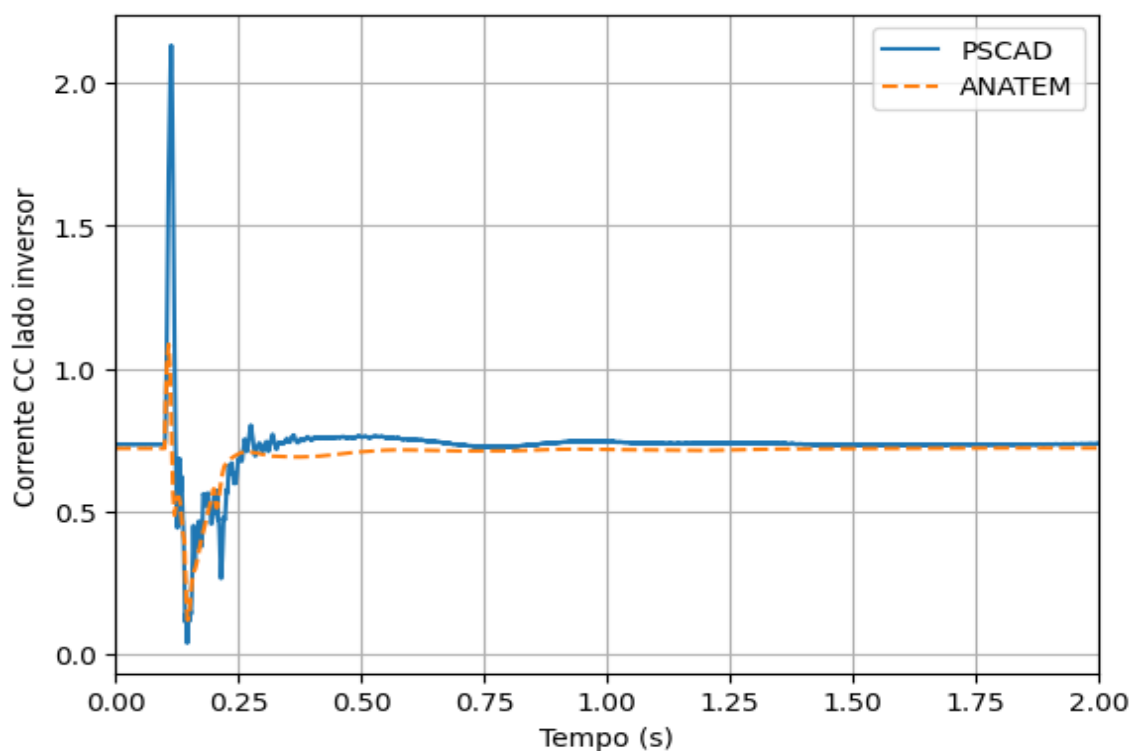


Figura 6-12 Corrente CC medida do lado inversor

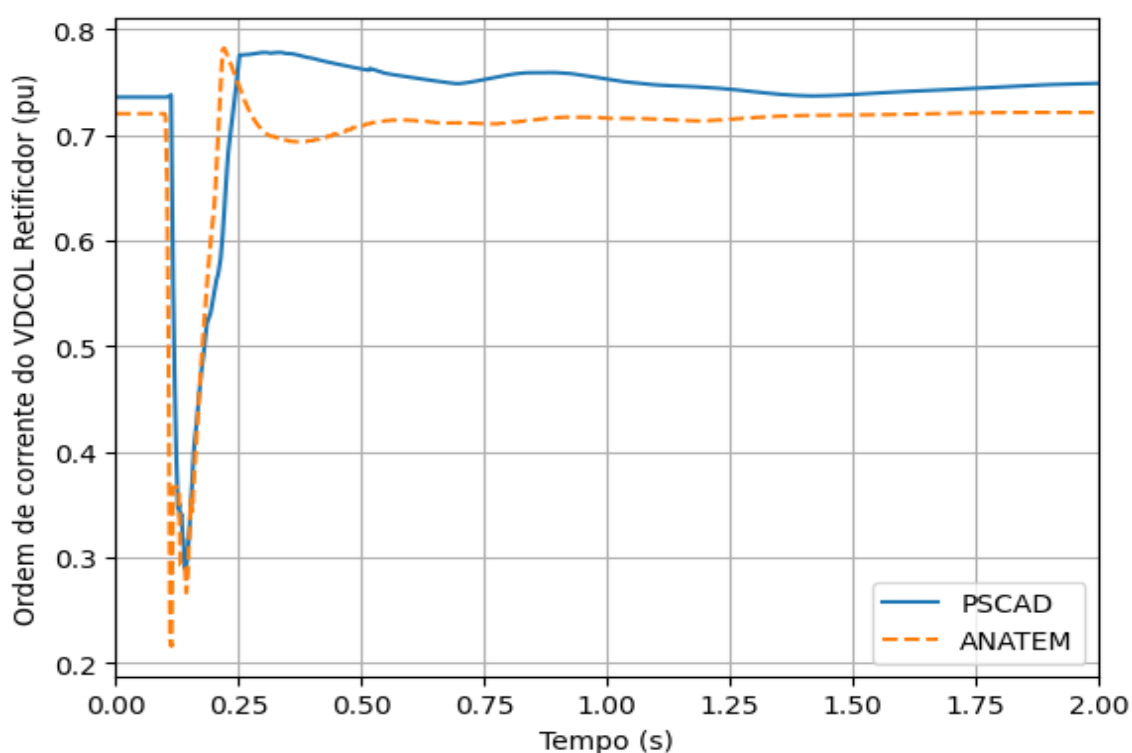


Figura 6-13 Ordem de corrente do VDCOL do retificador

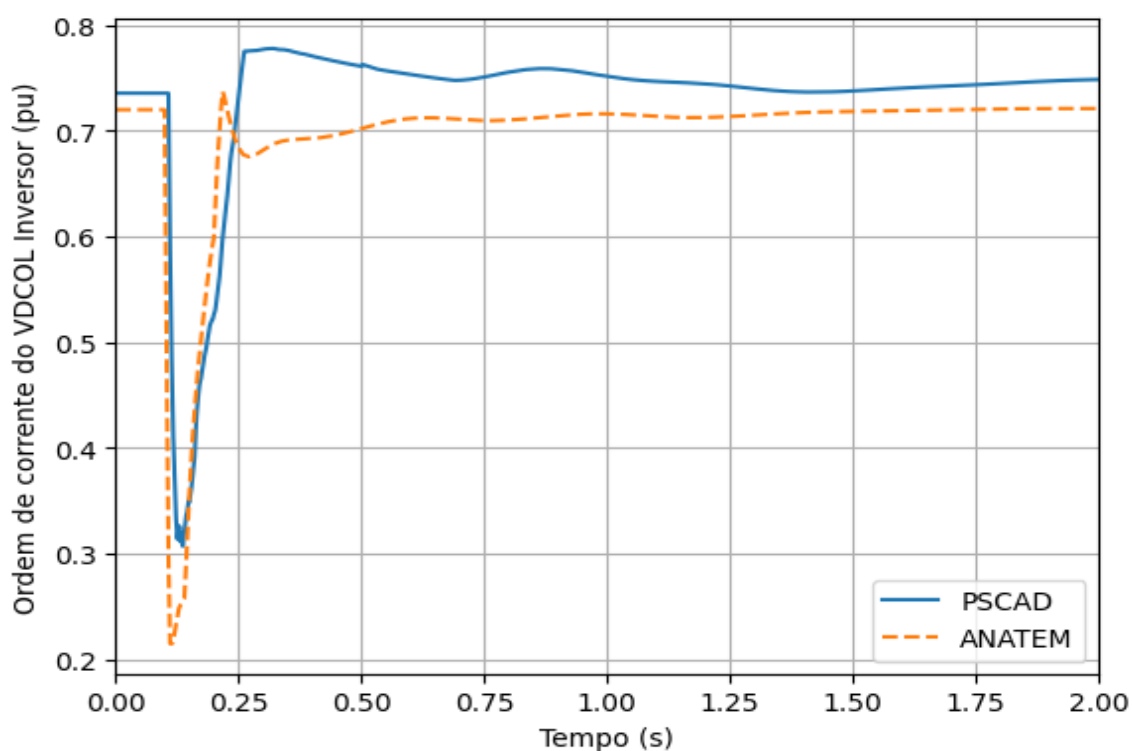


Figura 6-14 Ordem de corrente do VDCOL do inversor

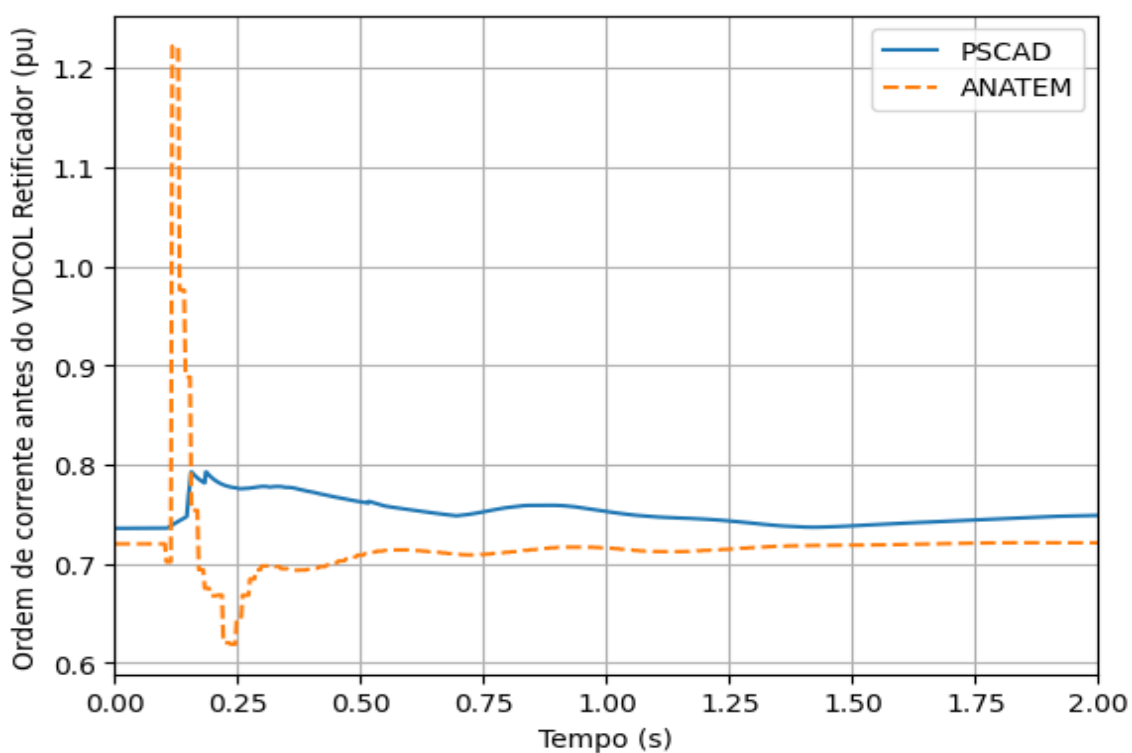


Figura 6-15 Ordem de corrente antes do VDCOL do retificador

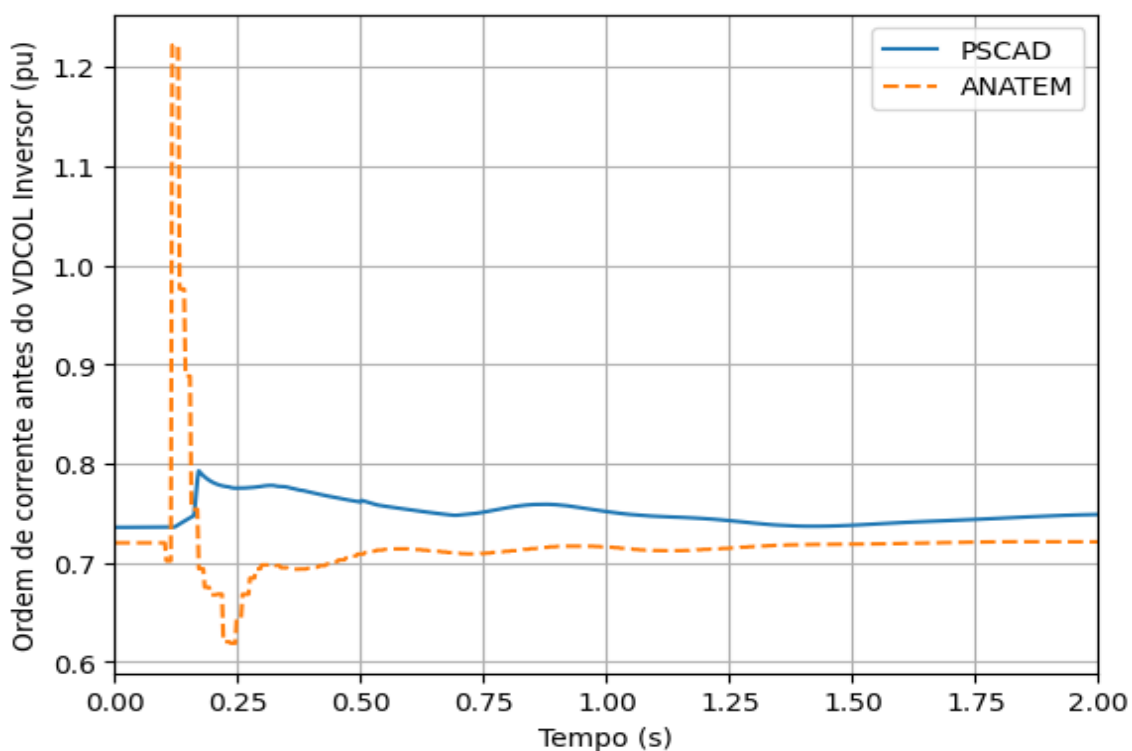


Figura 6-16 Ordem de corrente antes do VDCOL do inversor

6.2 CENÁRIO 1 – CARGA MÉDIA

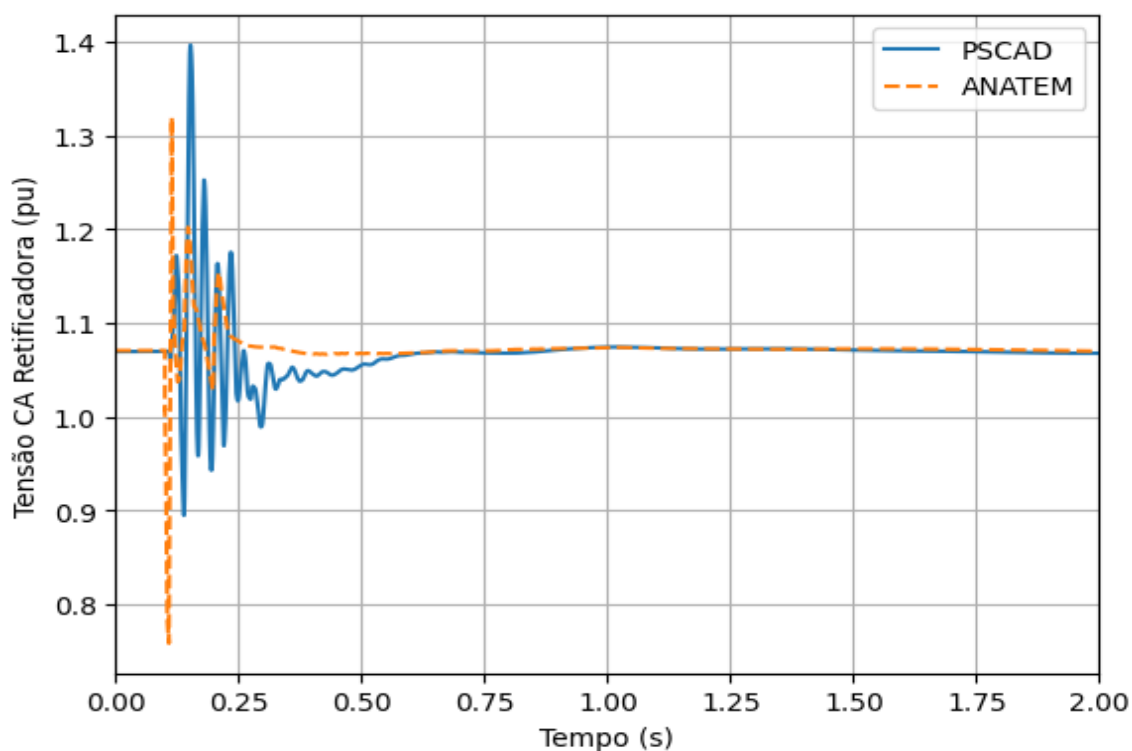


Figura 6-17 Tensão CA na retificadora

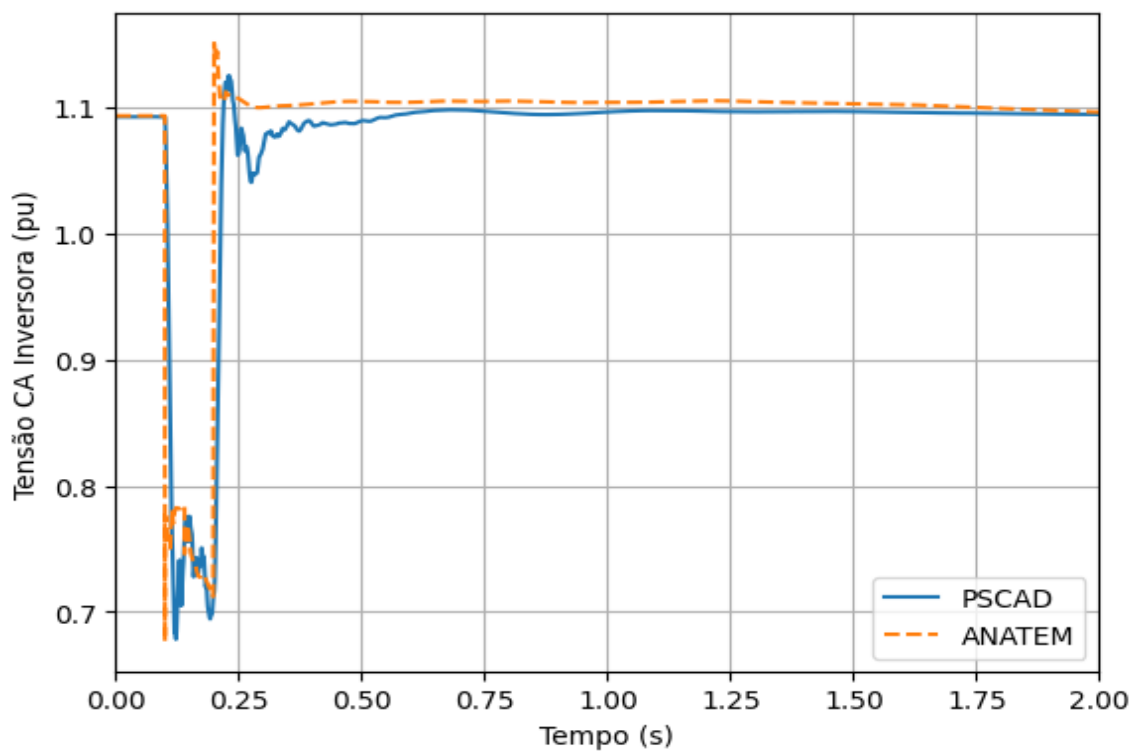


Figura 6-18 Tensão CA na inversora

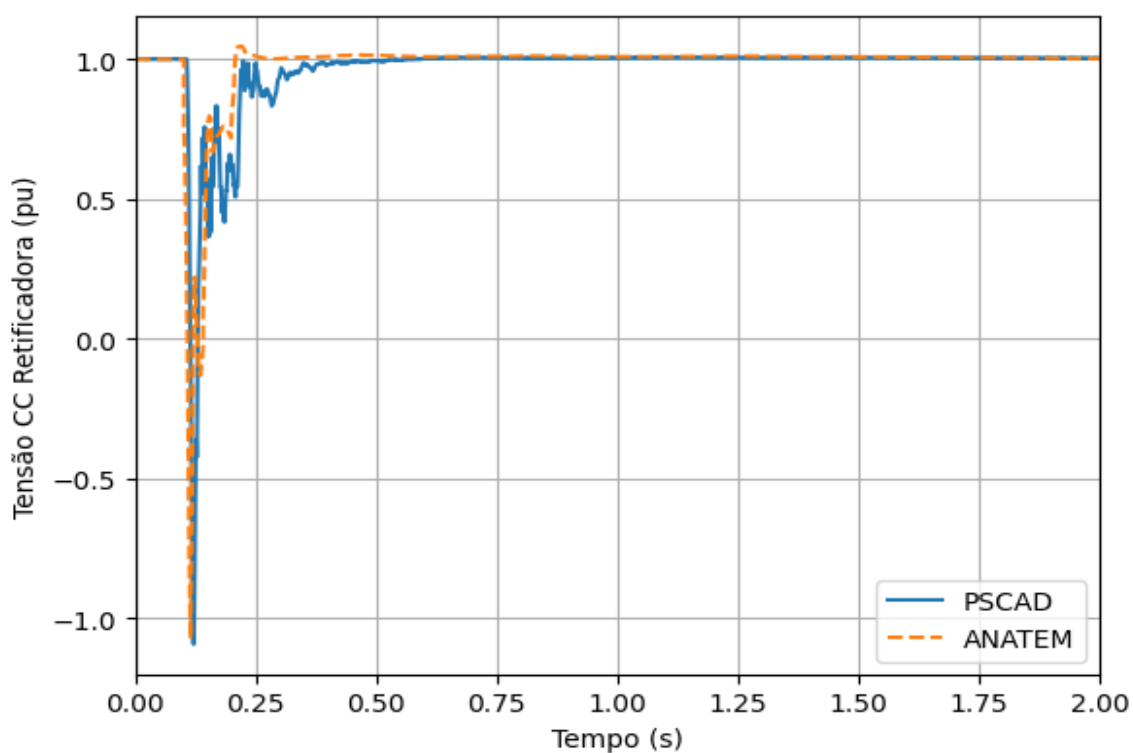


Figura 6-19 Tensão CC na retificadora

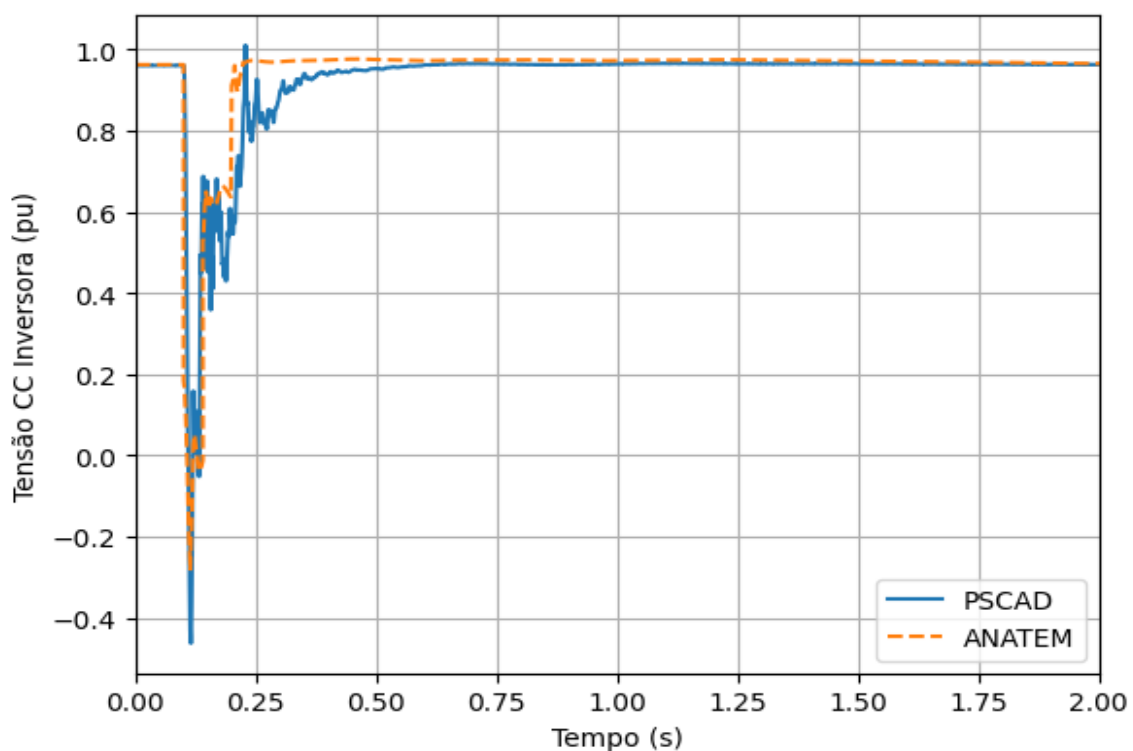


Figura 6-20 Tensão CC na inversora

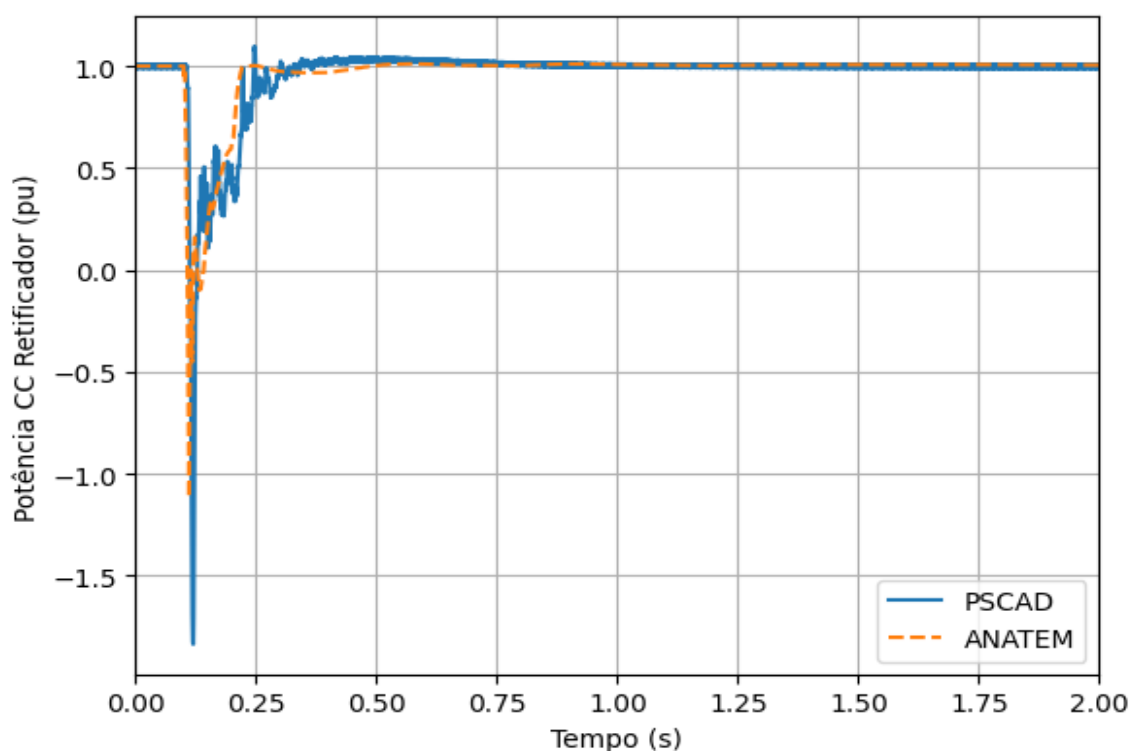


Figura 6-21 Potência CC na retificadora

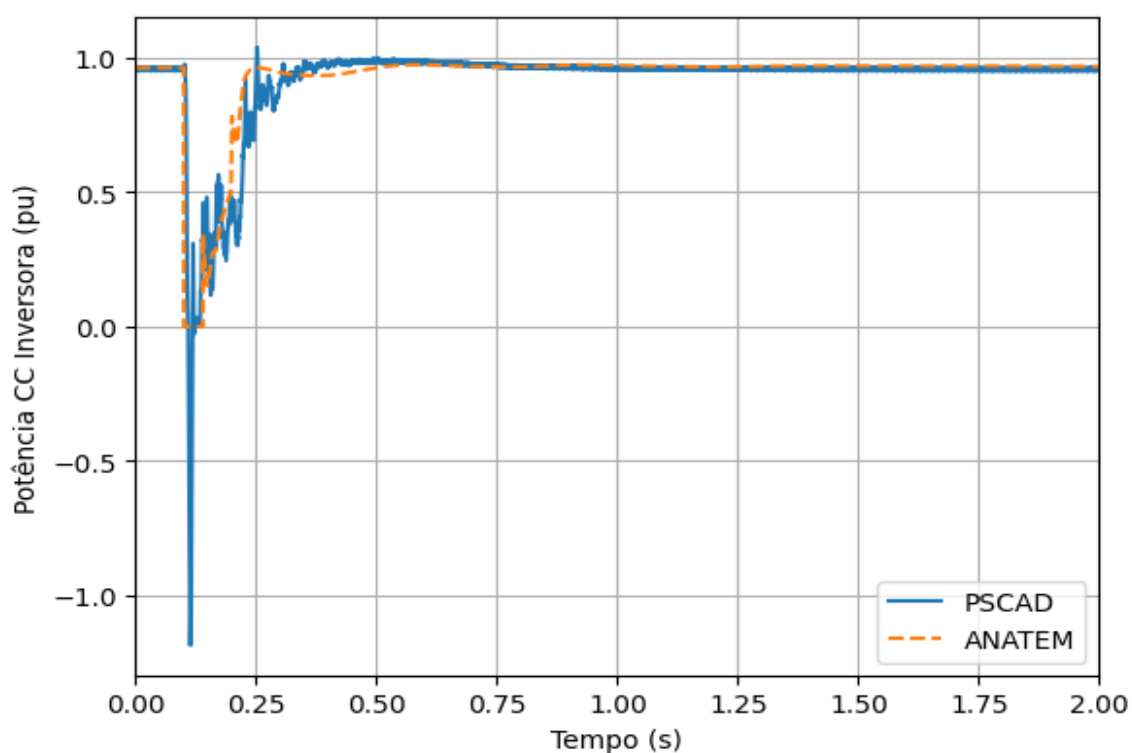


Figura 6-22 Potência CC na inversora

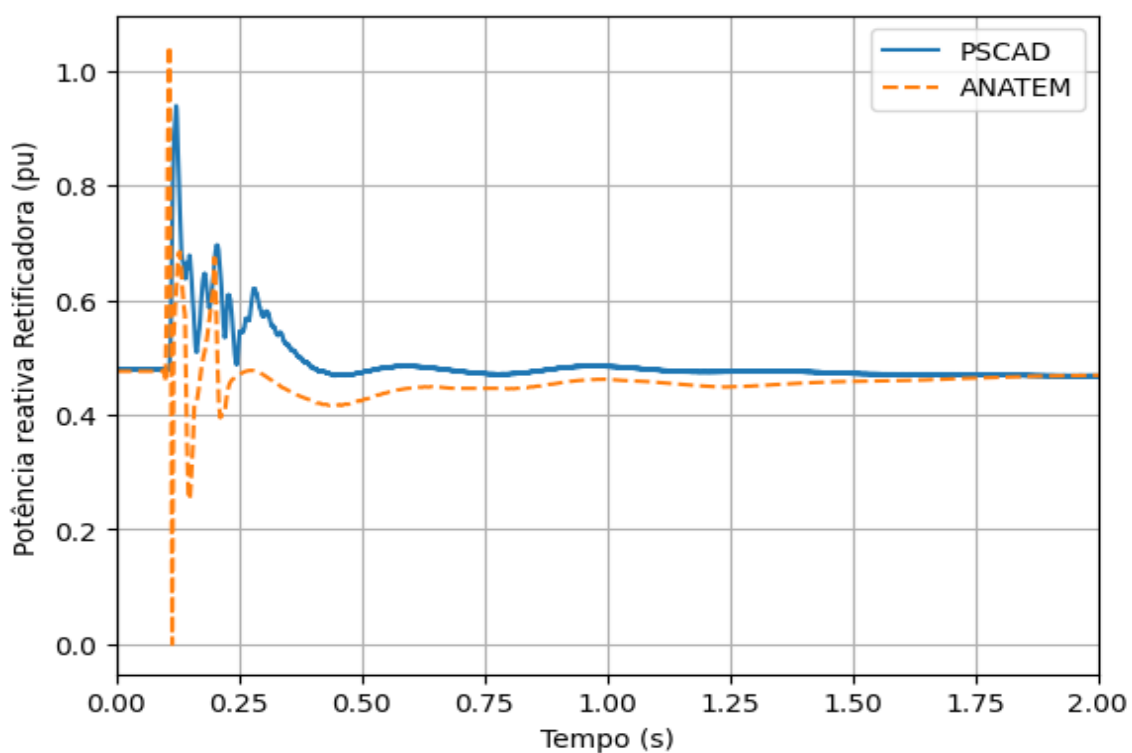


Figura 6-23 Potência reativa na retificadora

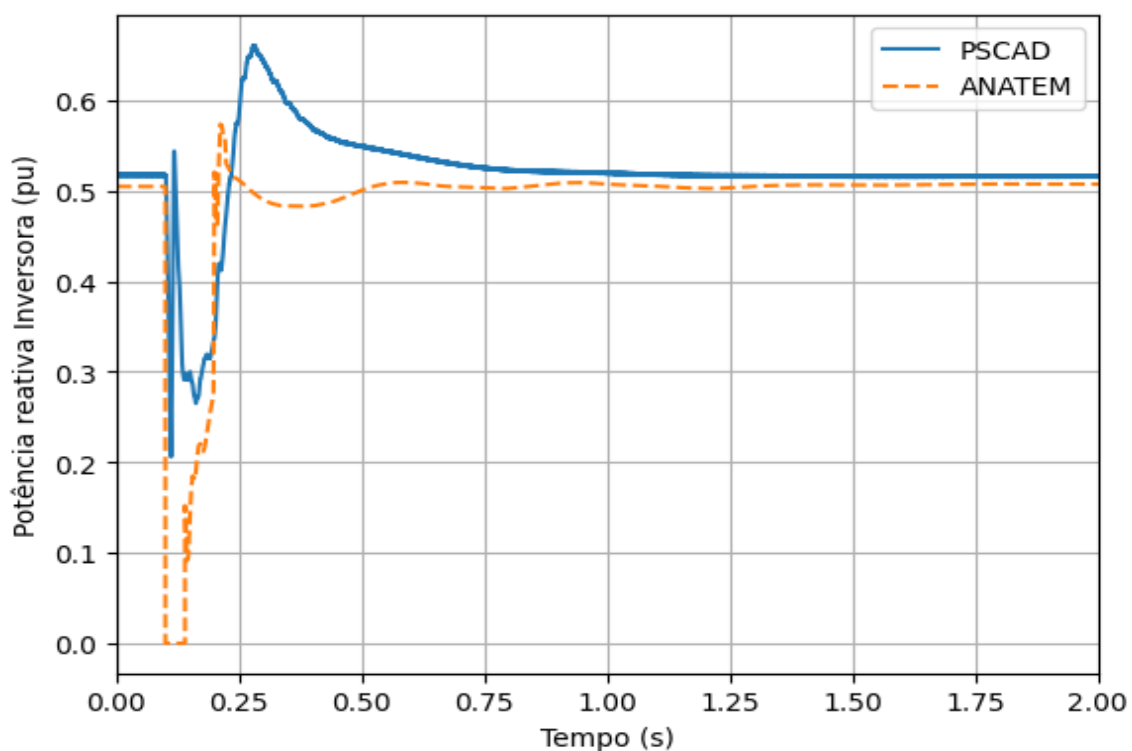


Figura 6-24 Potência reativa na inversora

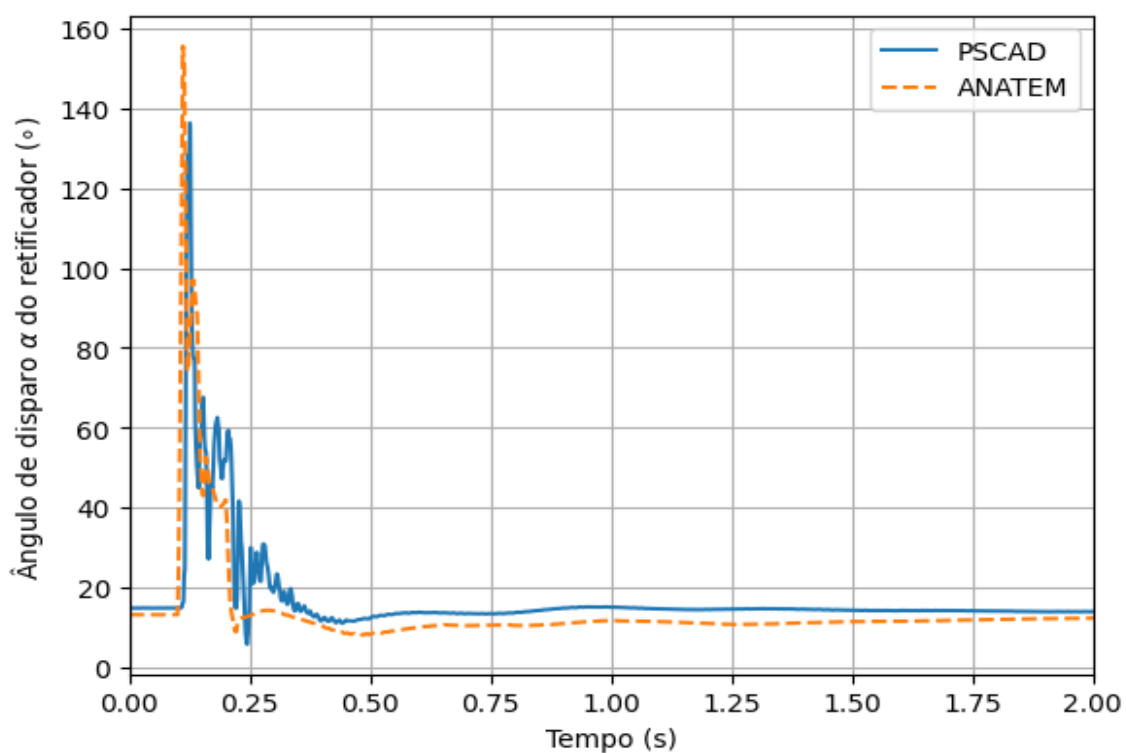


Figura 6-25 Ângulo de disparo da retificadora

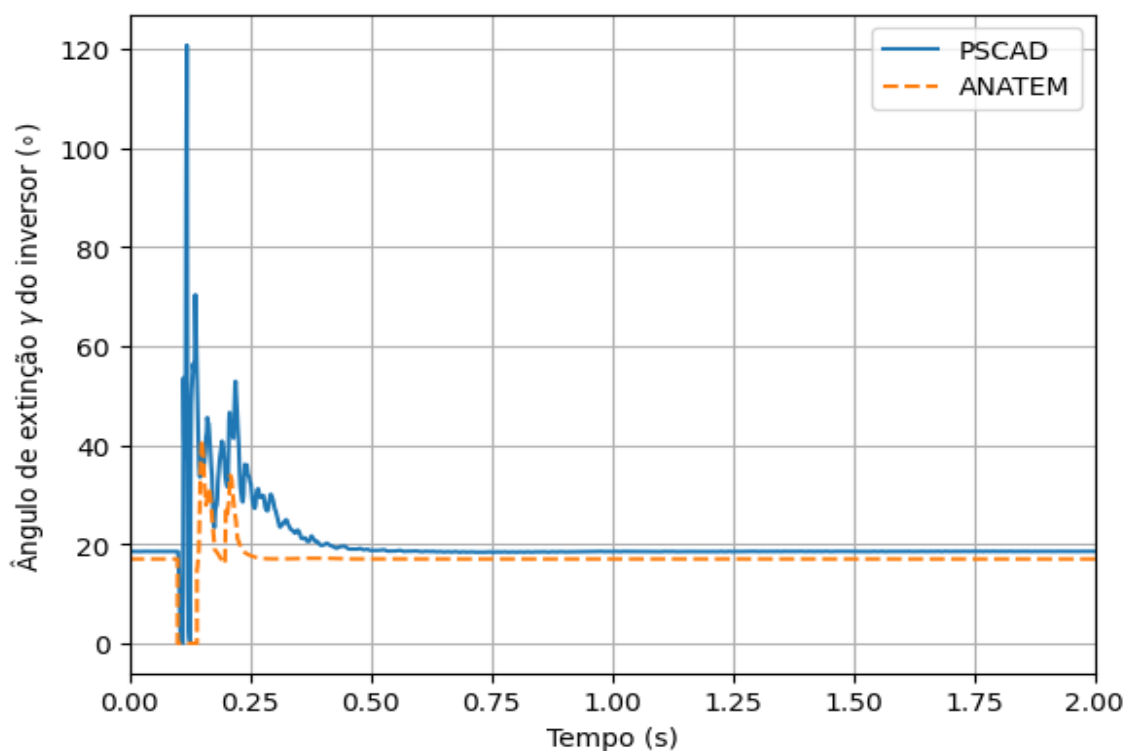


Figura 6-26 Ângulo de extinção da inversora

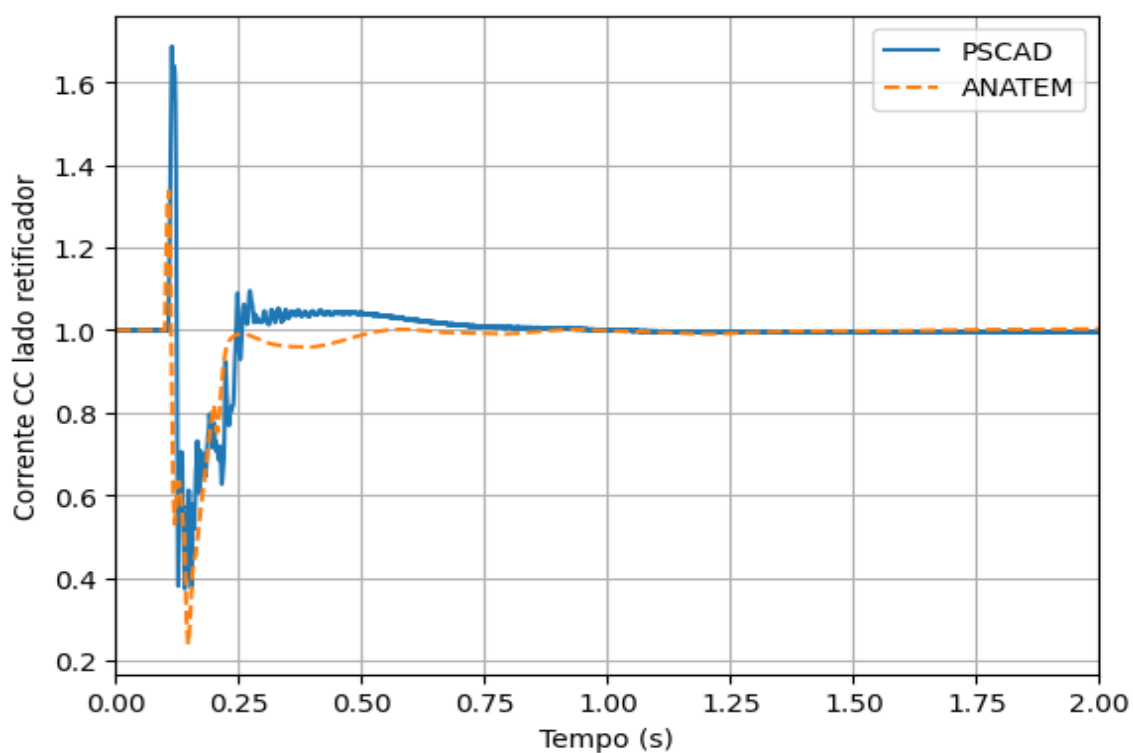


Figura 6-27 Corrente CC medida do lado retificador

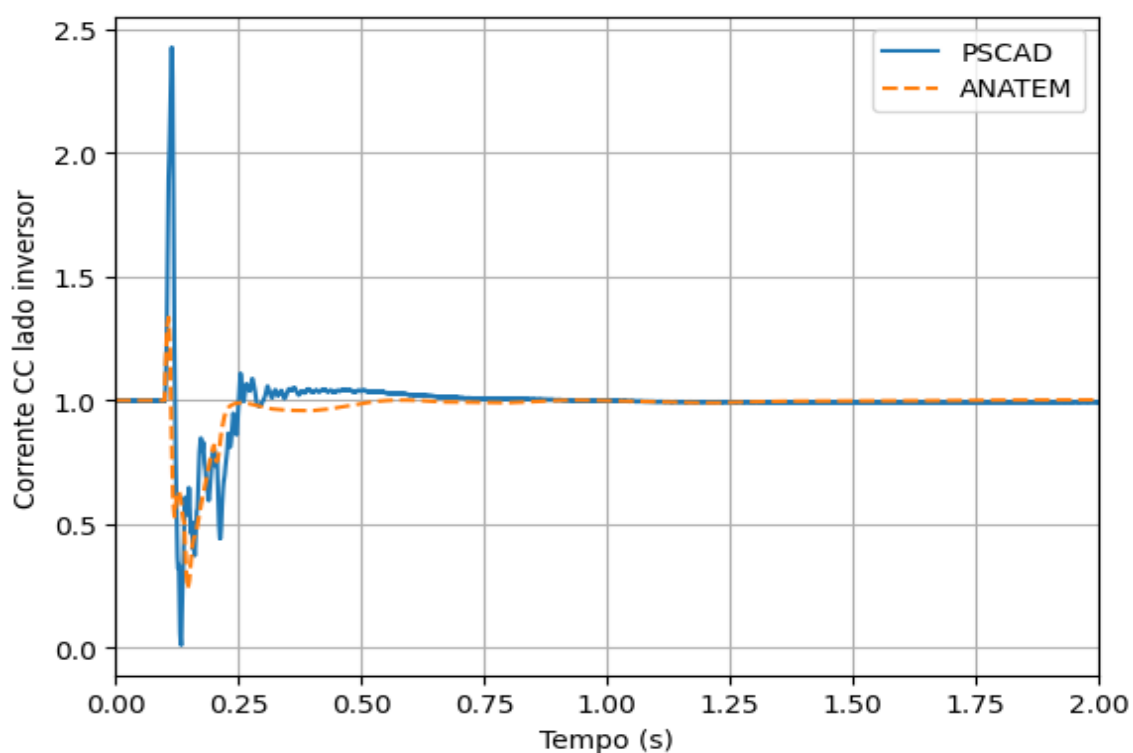


Figura 6-28 Corrente CC medida do lado inversor

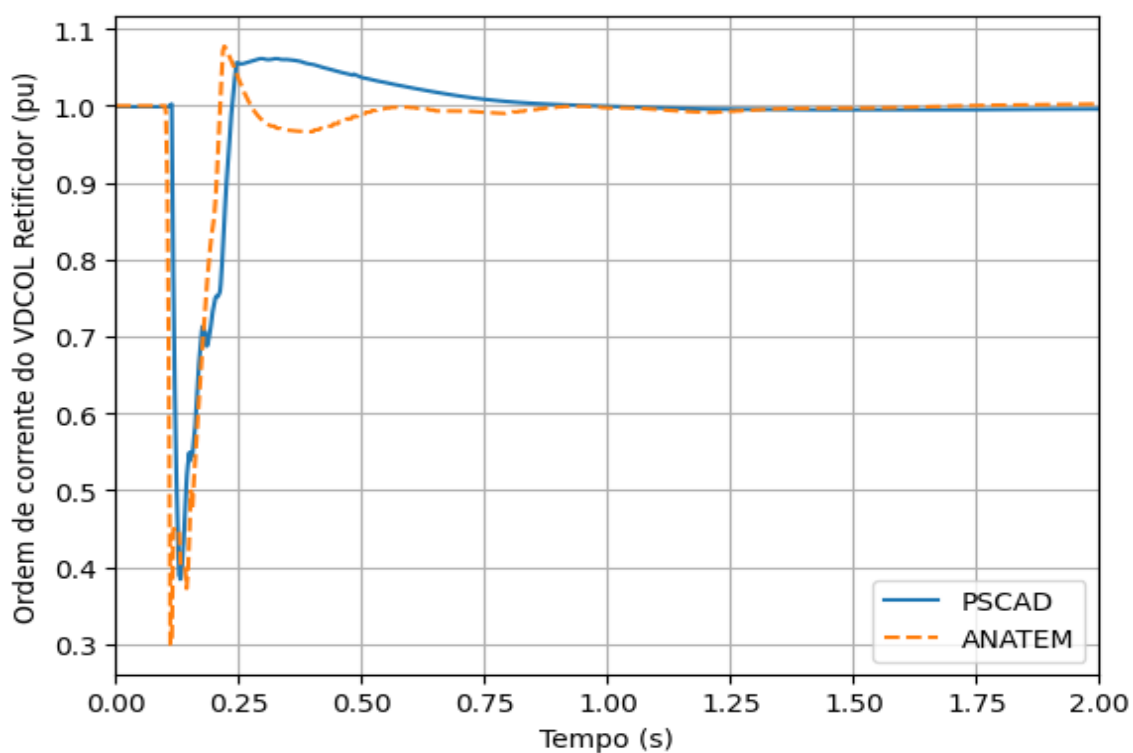


Figura 6-29 Ordem de corrente do VDCOL do retificador

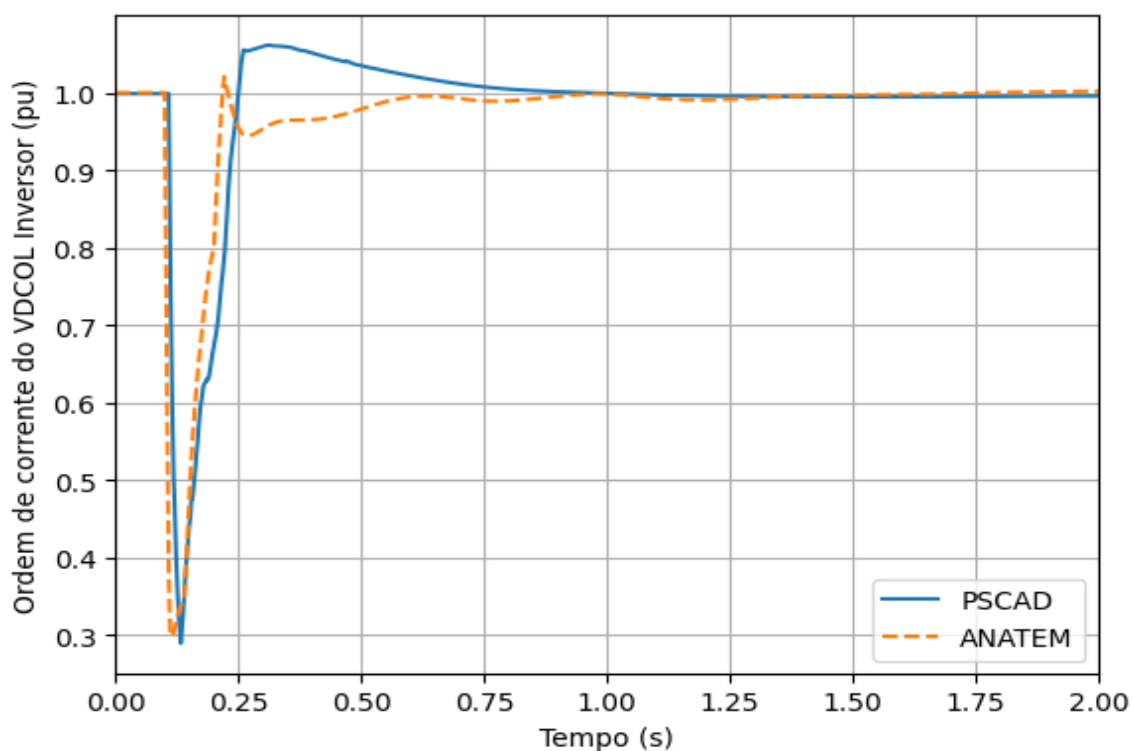


Figura 6-30 Ordem de corrente do VDCOL do inversor

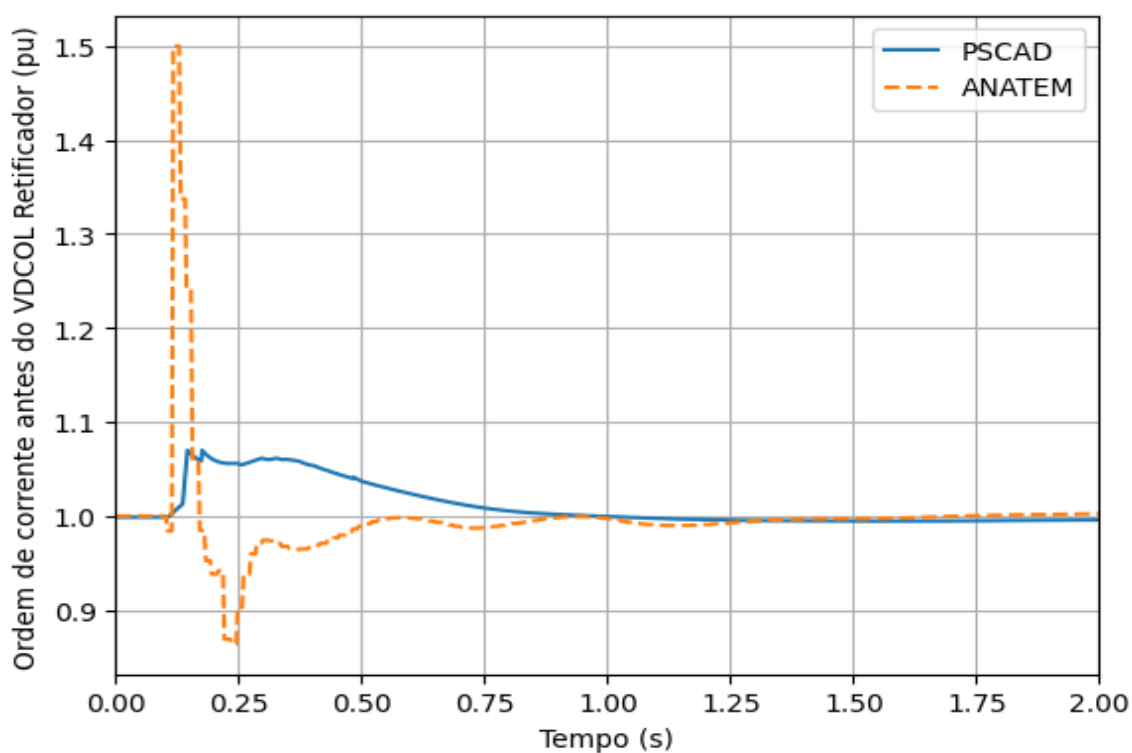


Figura 6-31 Ordem de corrente antes do VDCOL do retificador

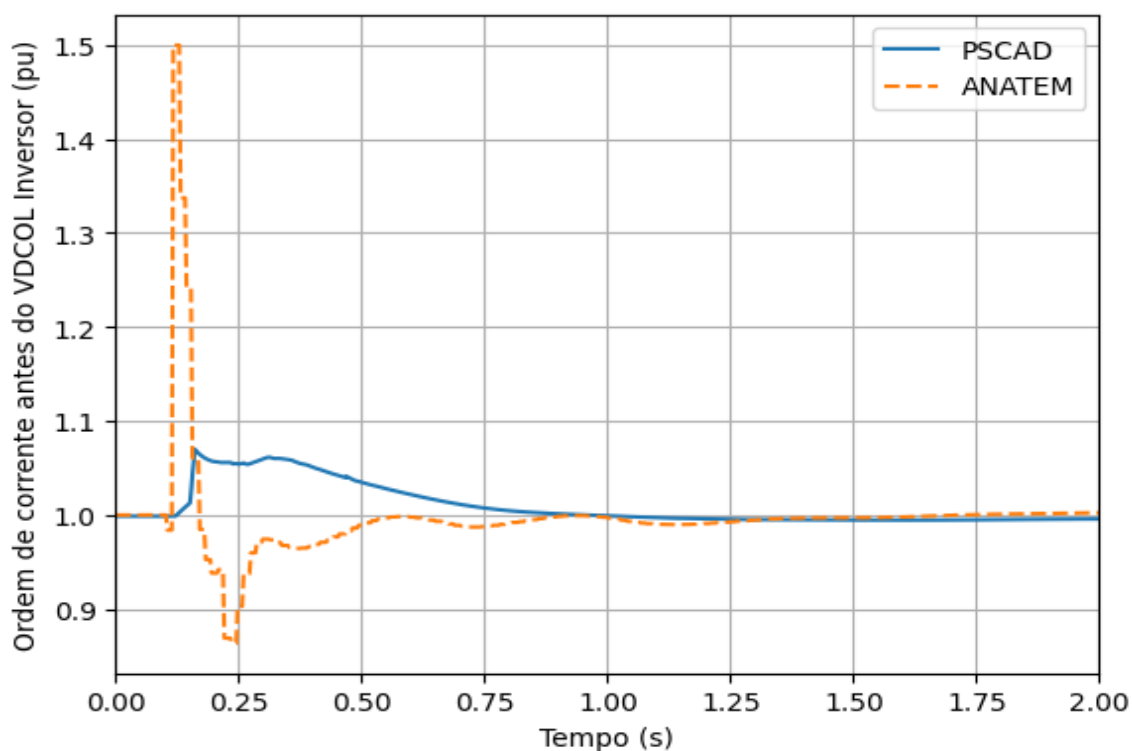


Figura 6-32 Ordem de corrente antes do VDCOL do inversor

6.3 CENÁRIO 2 – CARGA MÉDIA

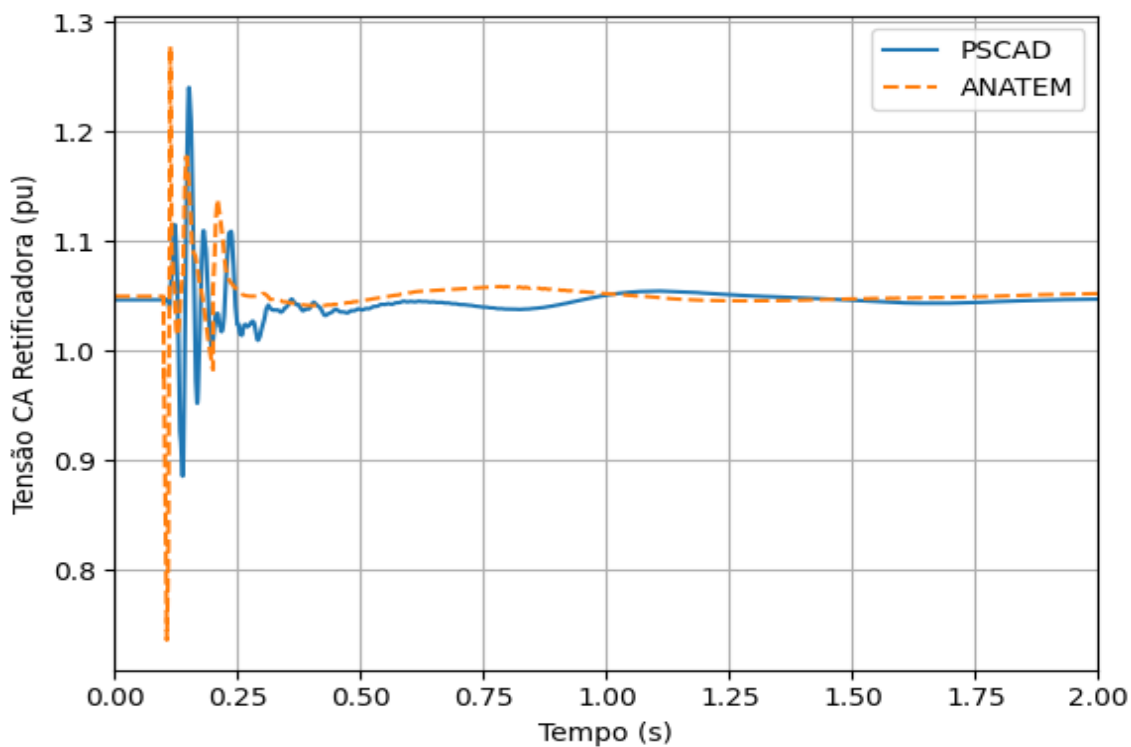


Figura 6-33 Tensão CA na retificadora

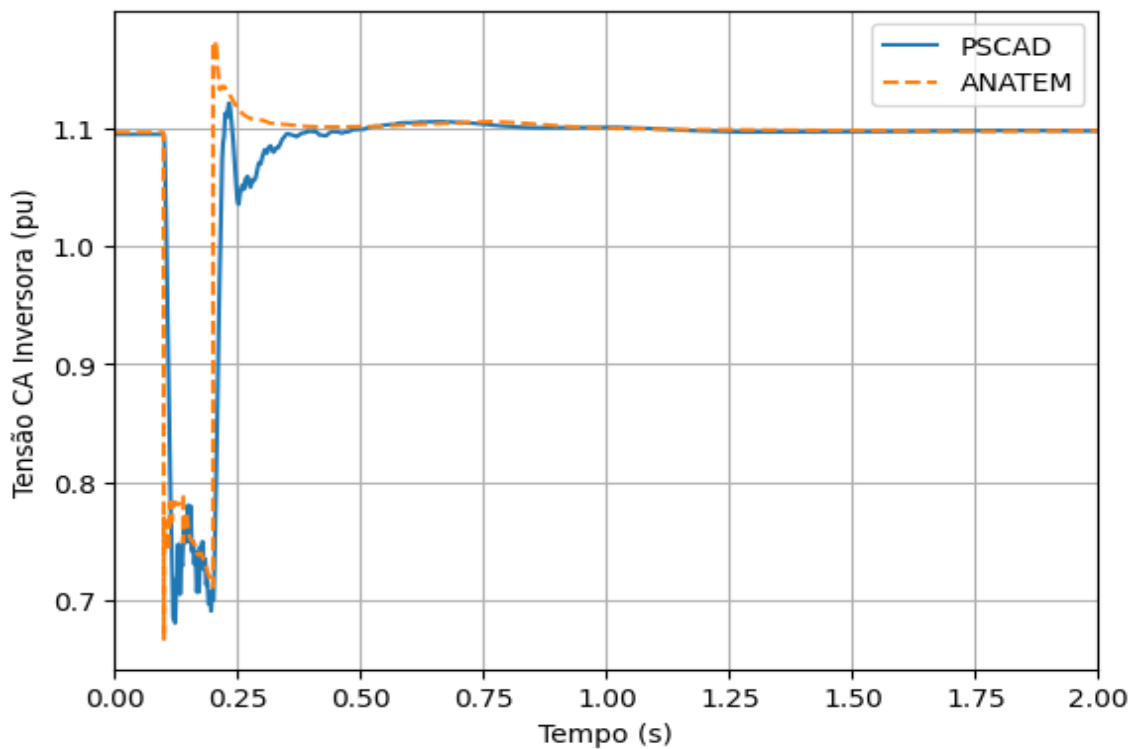


Figura 6-34 Tensão CA na inversora

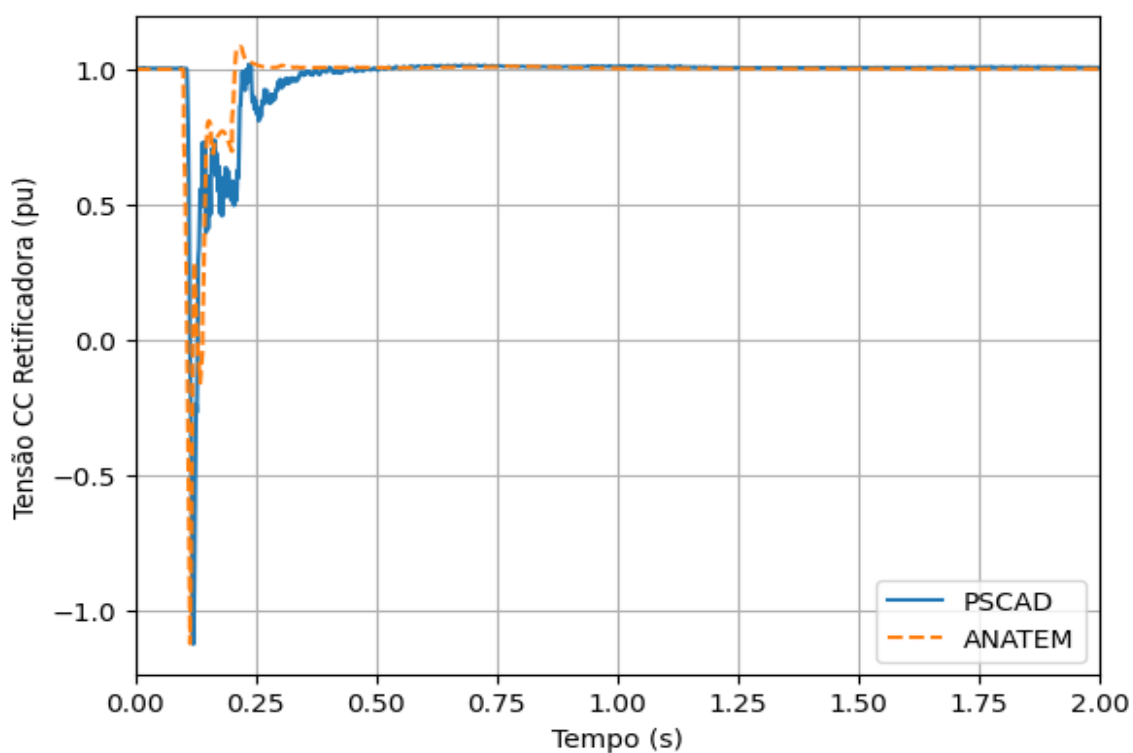


Figura 6-35 Tensão CC na retificadora

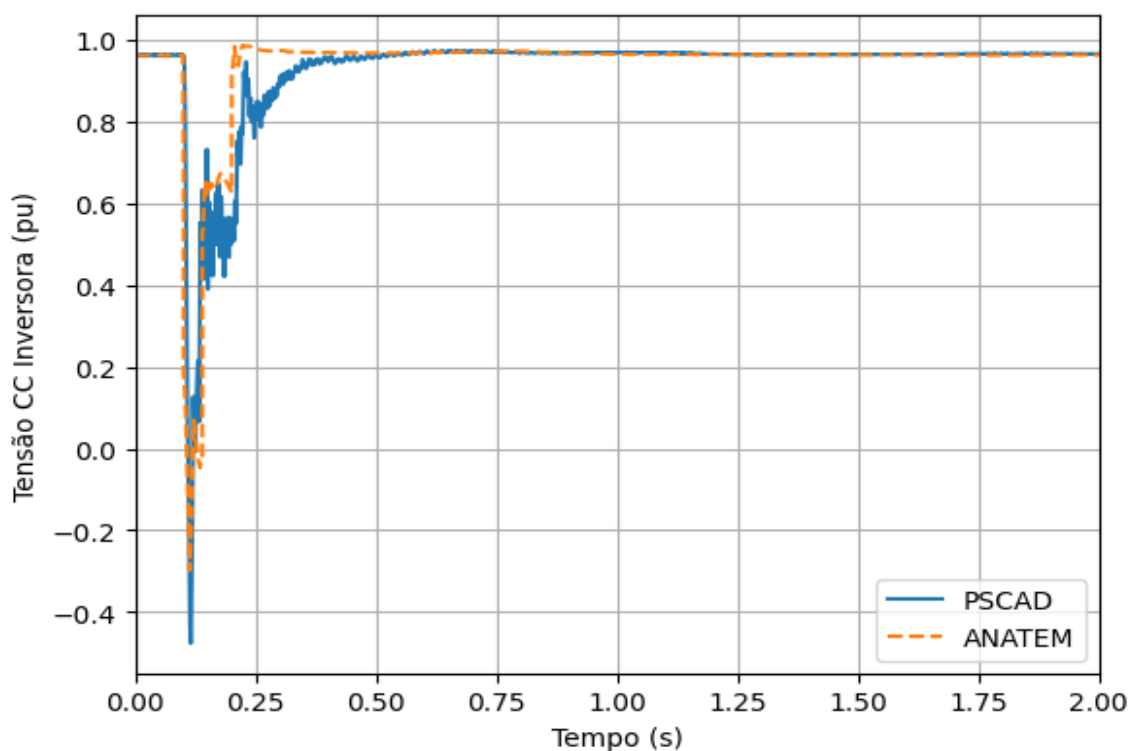


Figura 6-36 Tensão CC na inversora

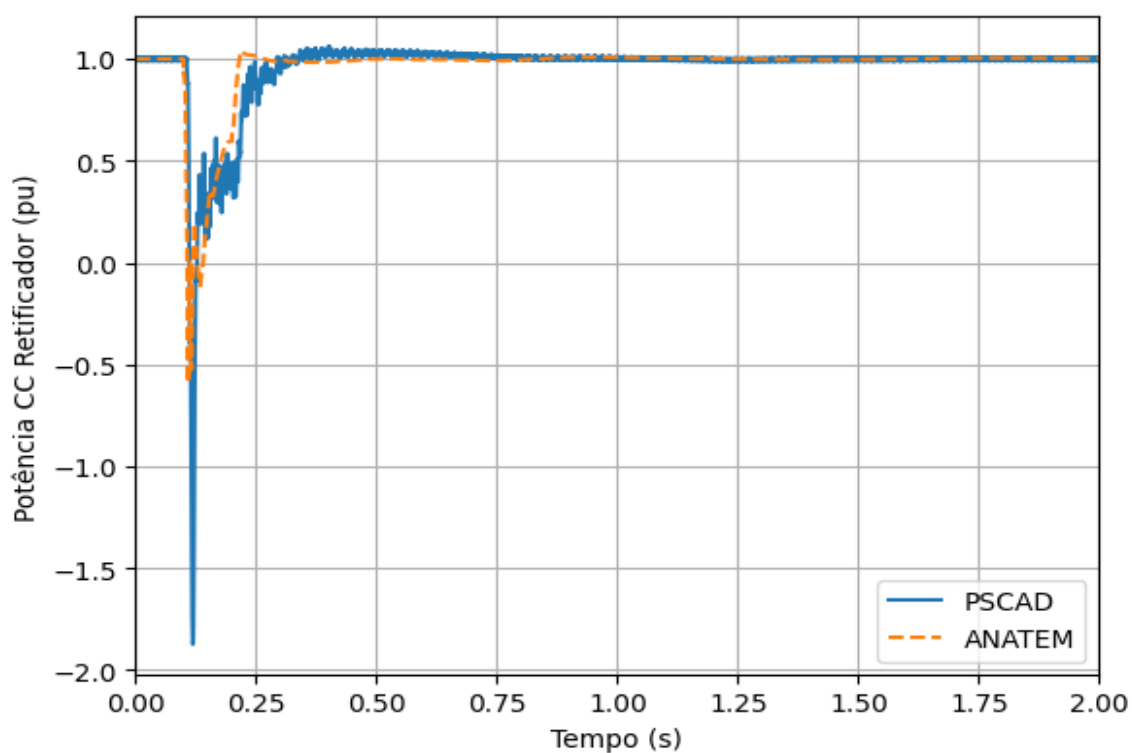


Figura 6-37 Potência CC na retificadora

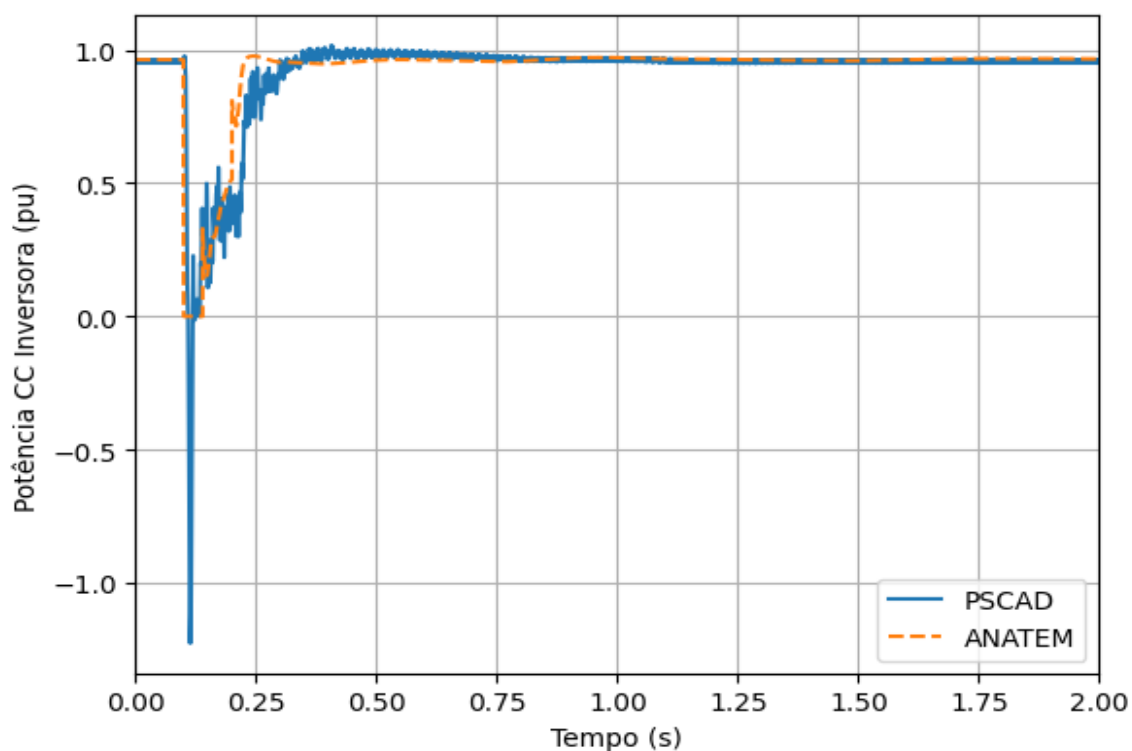


Figura 6-38 Potência CC na inversora

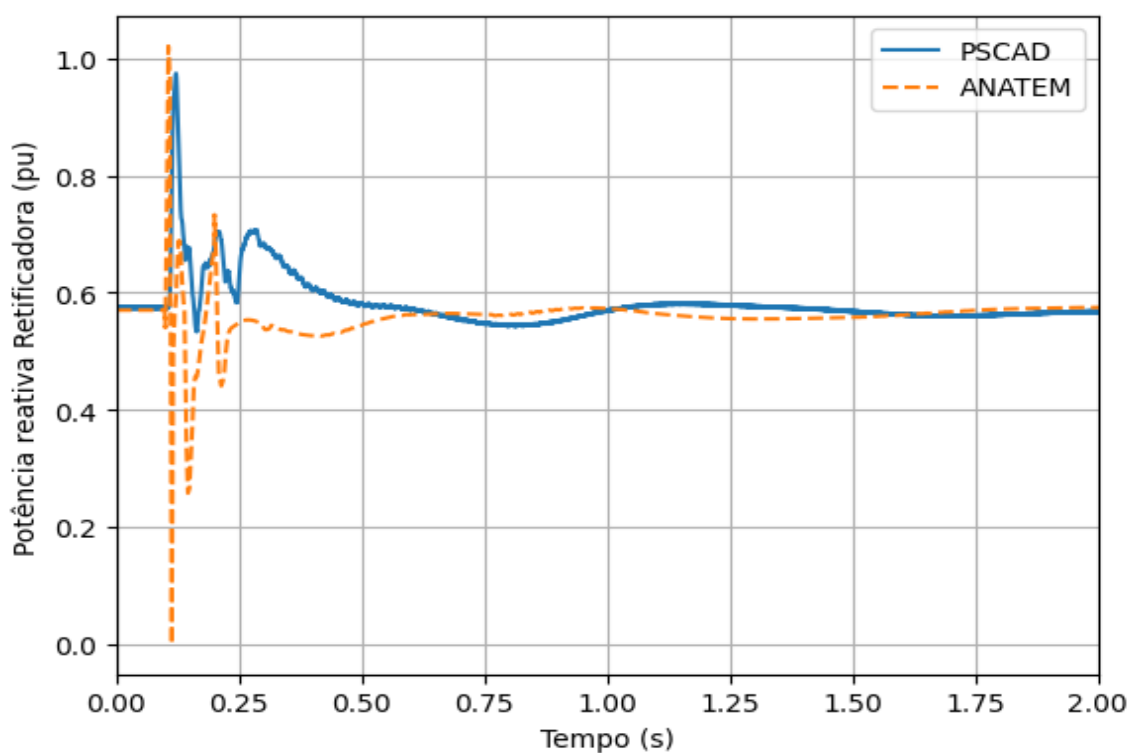


Figura 6-39 Potência reativa na retificadora

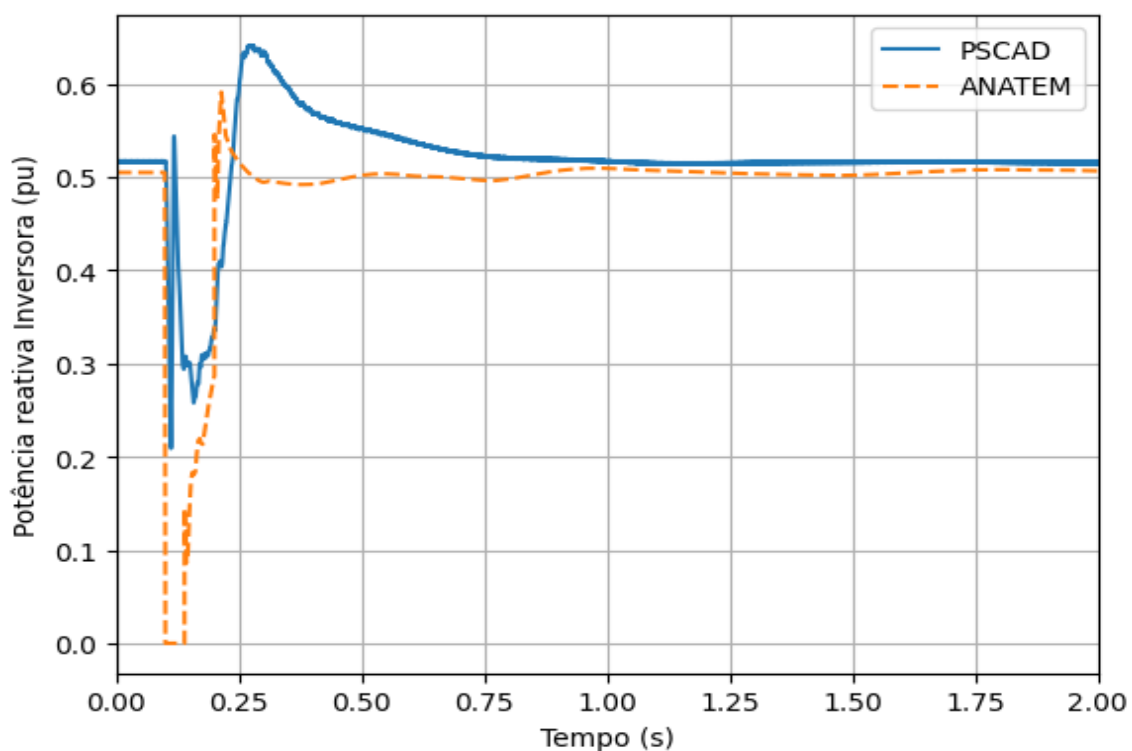


Figura 6-40 Potência reativa na inversora

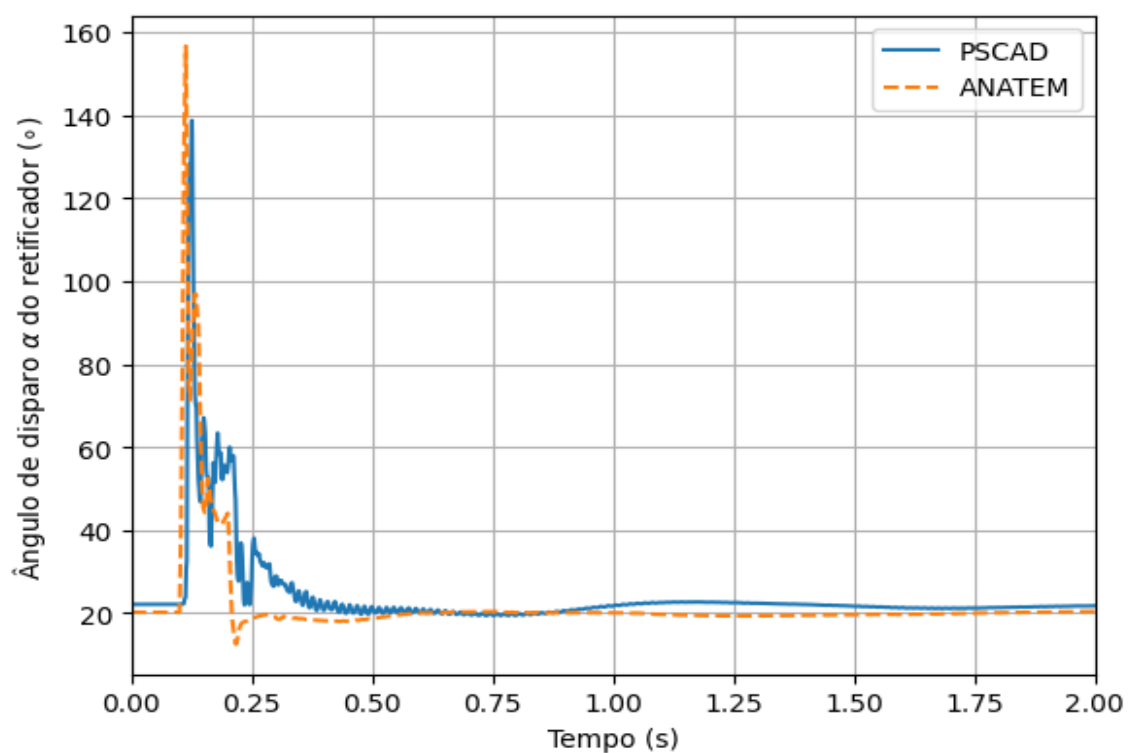


Figura 6-41 Ângulo de disparo da retificadora

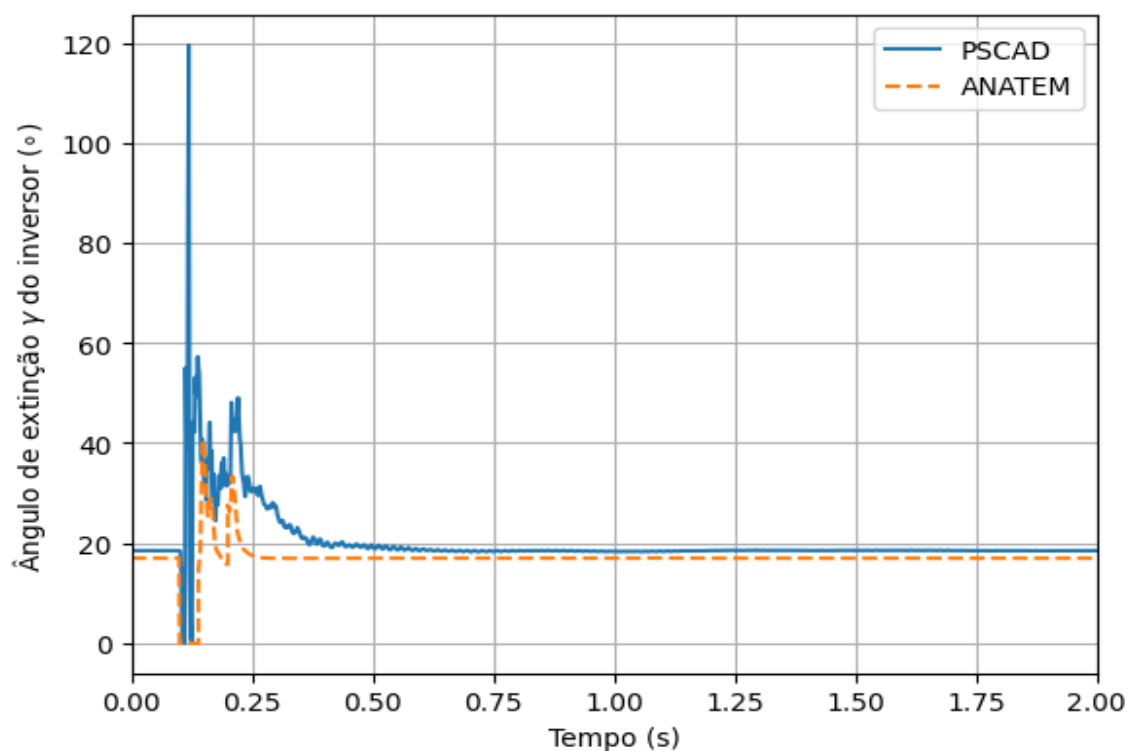


Figura 6-42 Ângulo de extinção da inversora

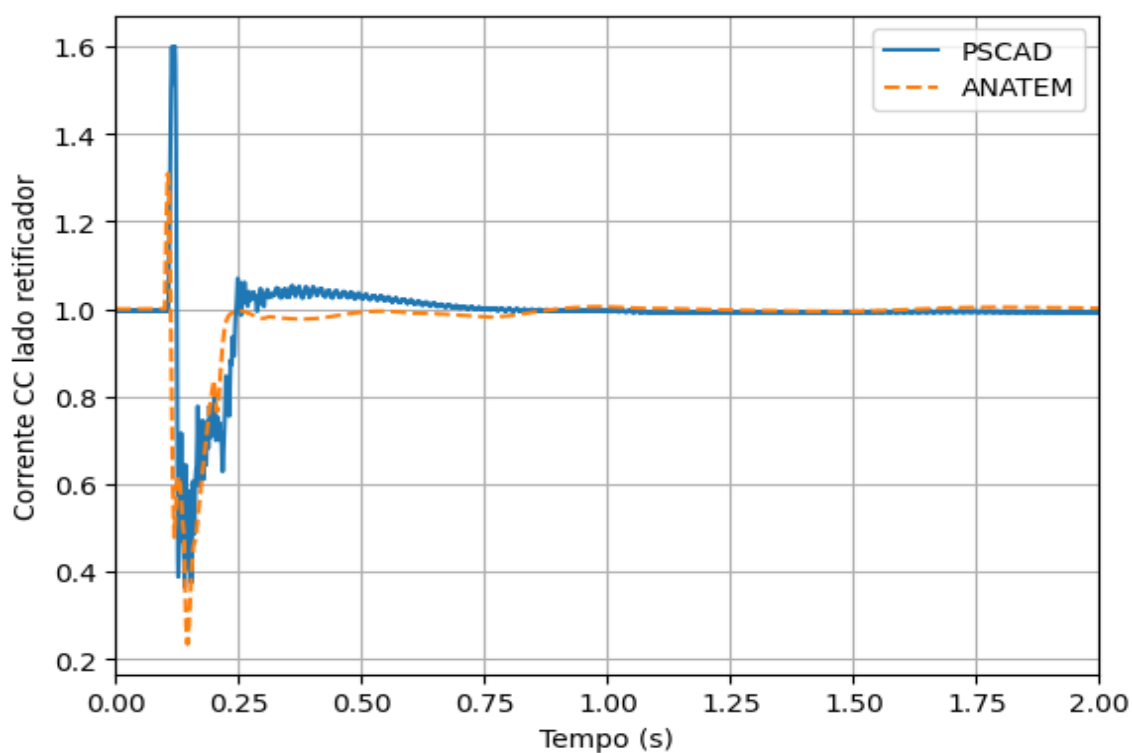


Figura 6-43 Corrente CC medida do lado retificador

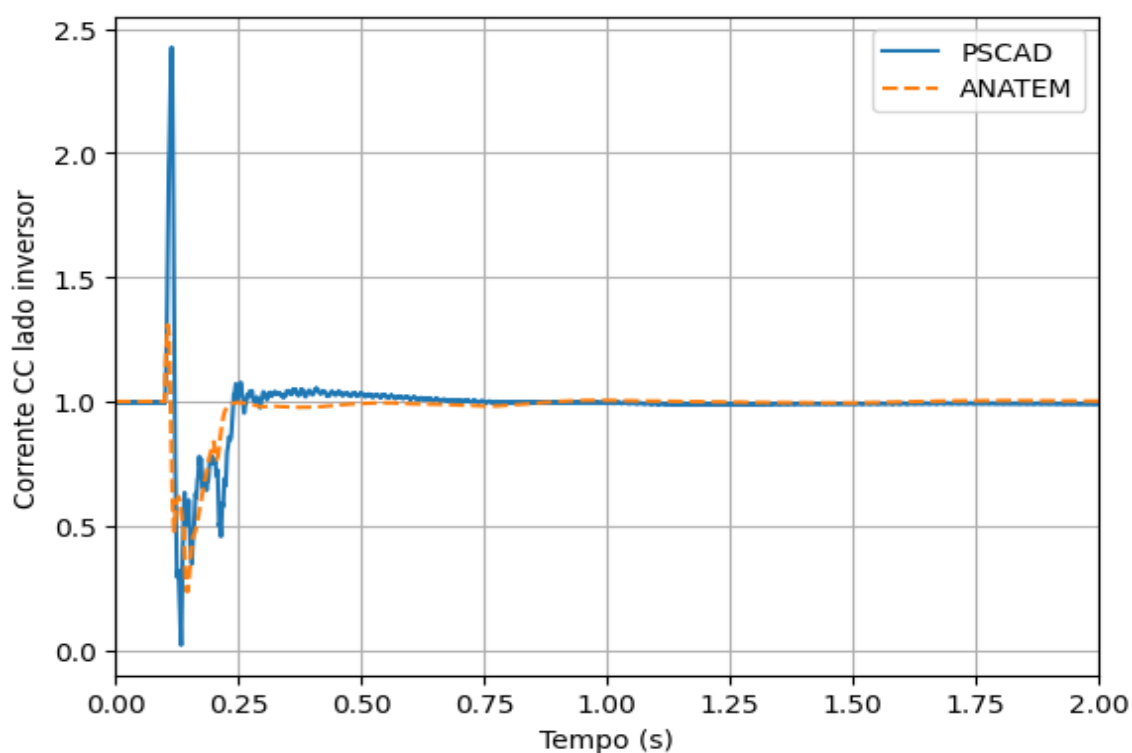


Figura 6-44 Corrente CC medida do lado inversor

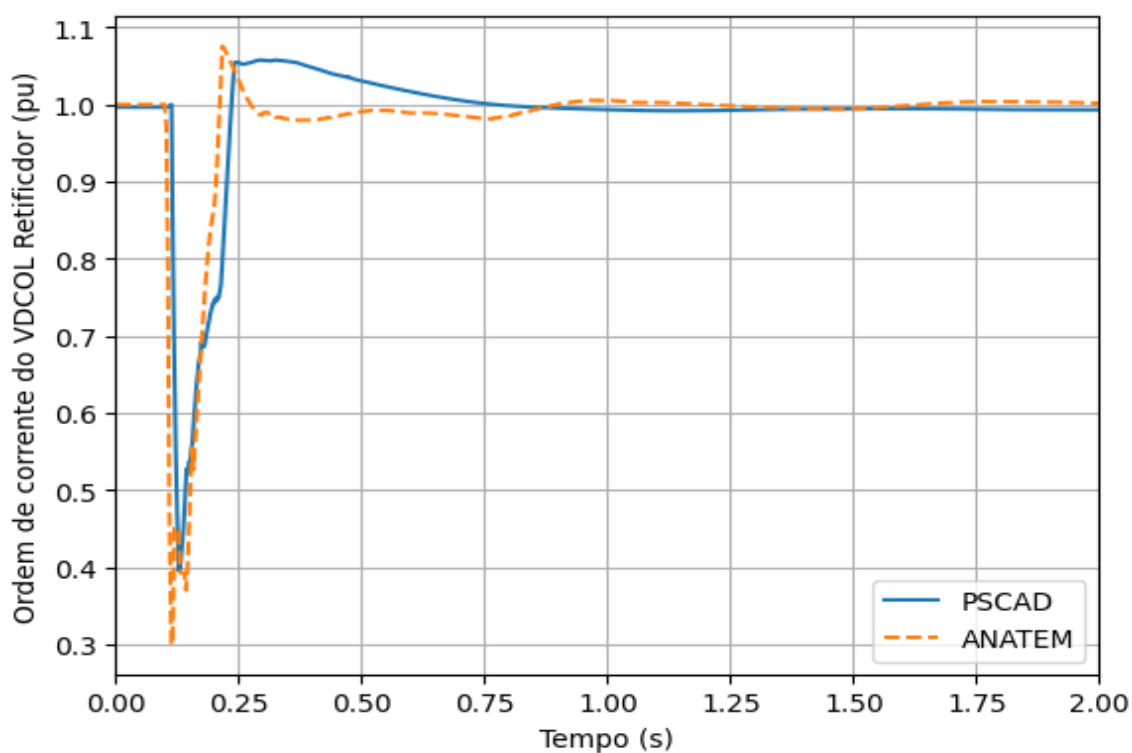


Figura 6-45 Ordem de corrente do VDCOL do retificador

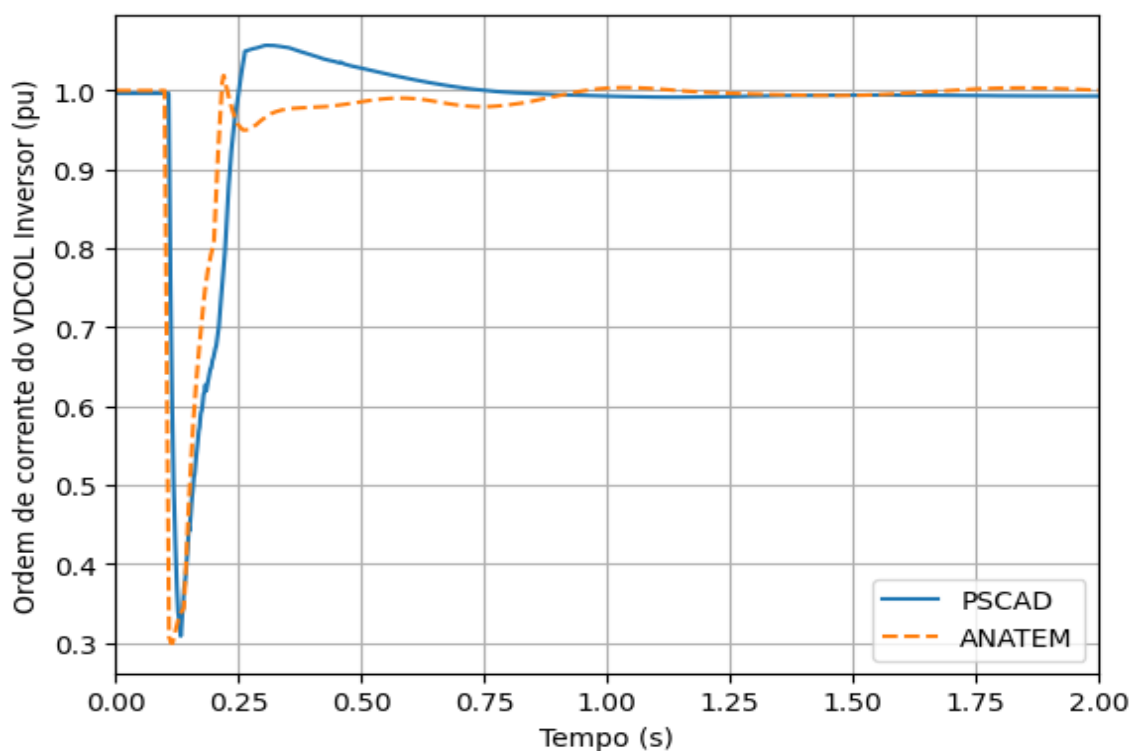


Figura 6-46 Ordem de corrente do VDCOL do inversor

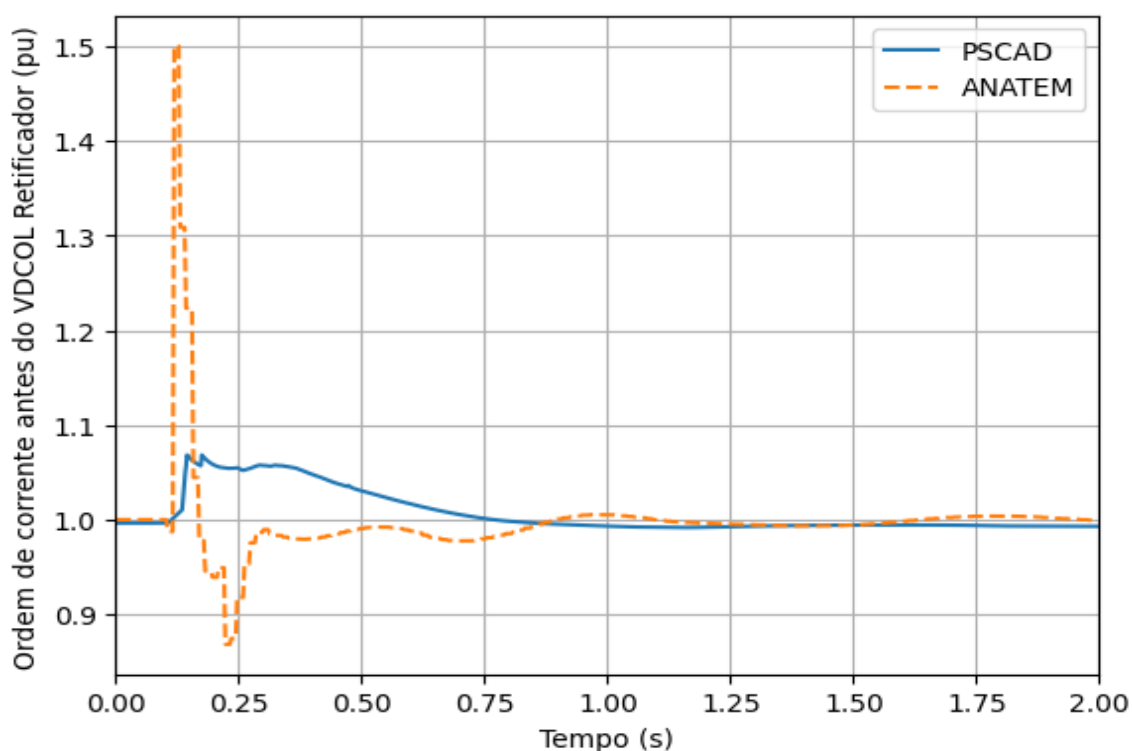


Figura 6-47 Ordem de corrente antes do VDCOL do retificador

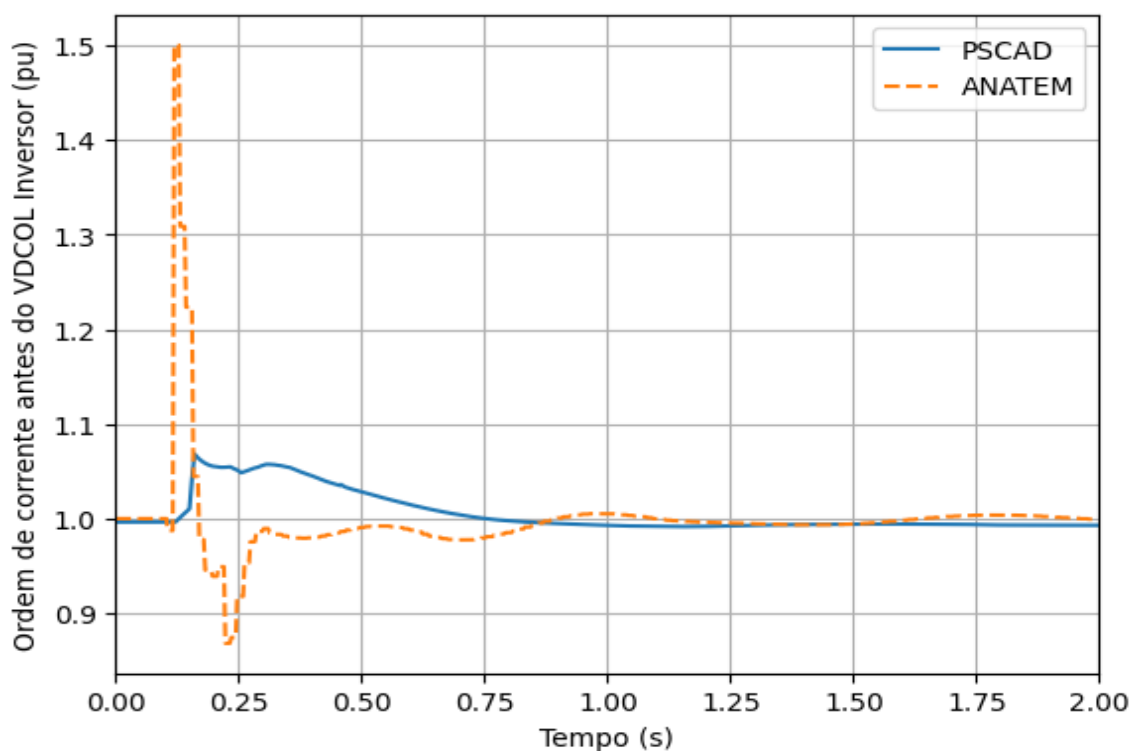


Figura 6-48 Ordem de corrente antes do VDCOL do inversor

6.4 CENÁRIO 3 – CARGA MÉDIA

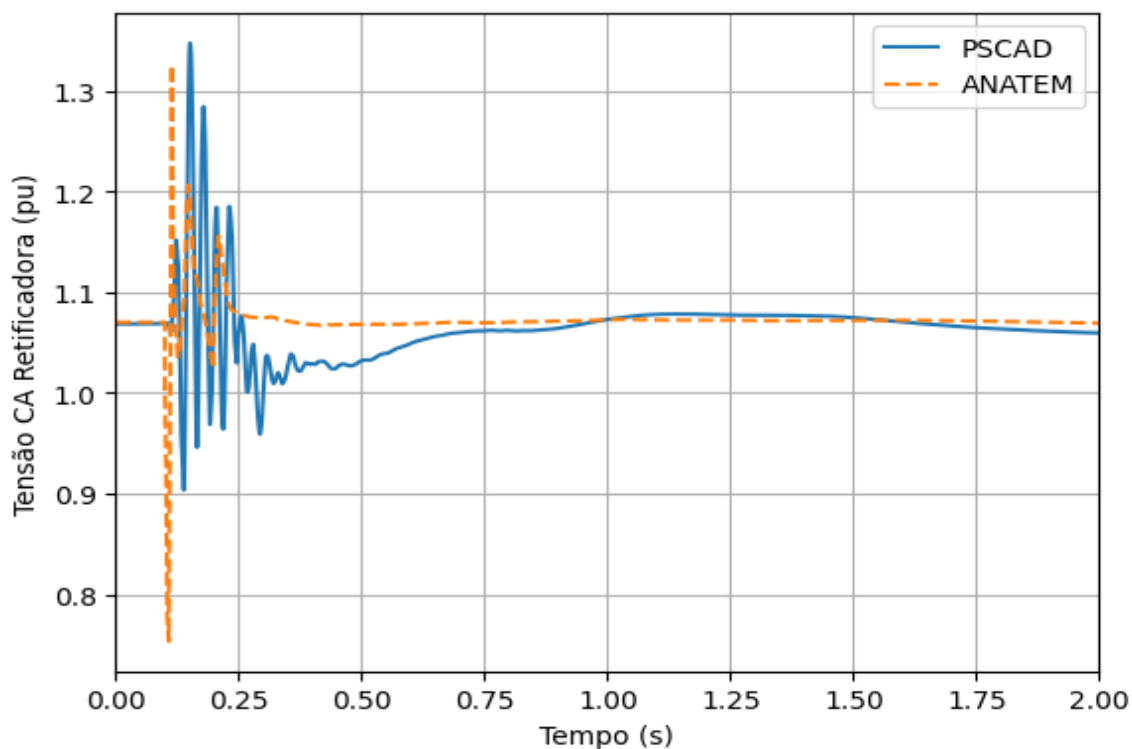


Figura 6-49 Tensão CA na retificadora

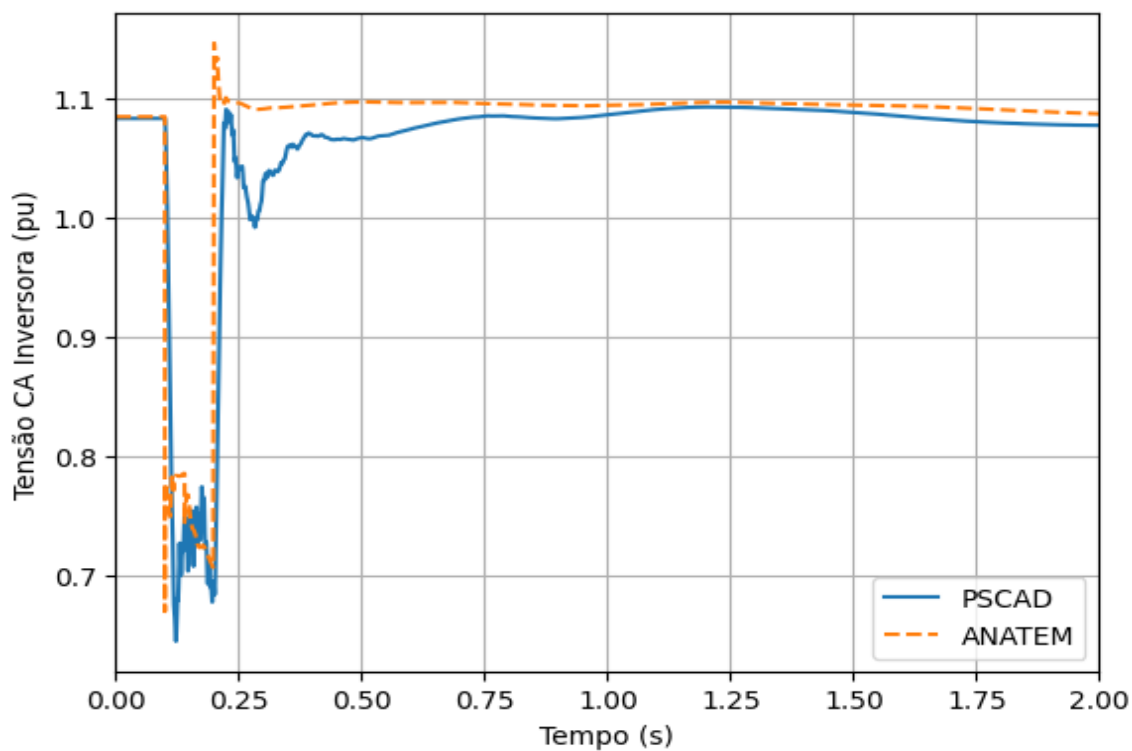


Figura 6-50 Tensão CA na inversora

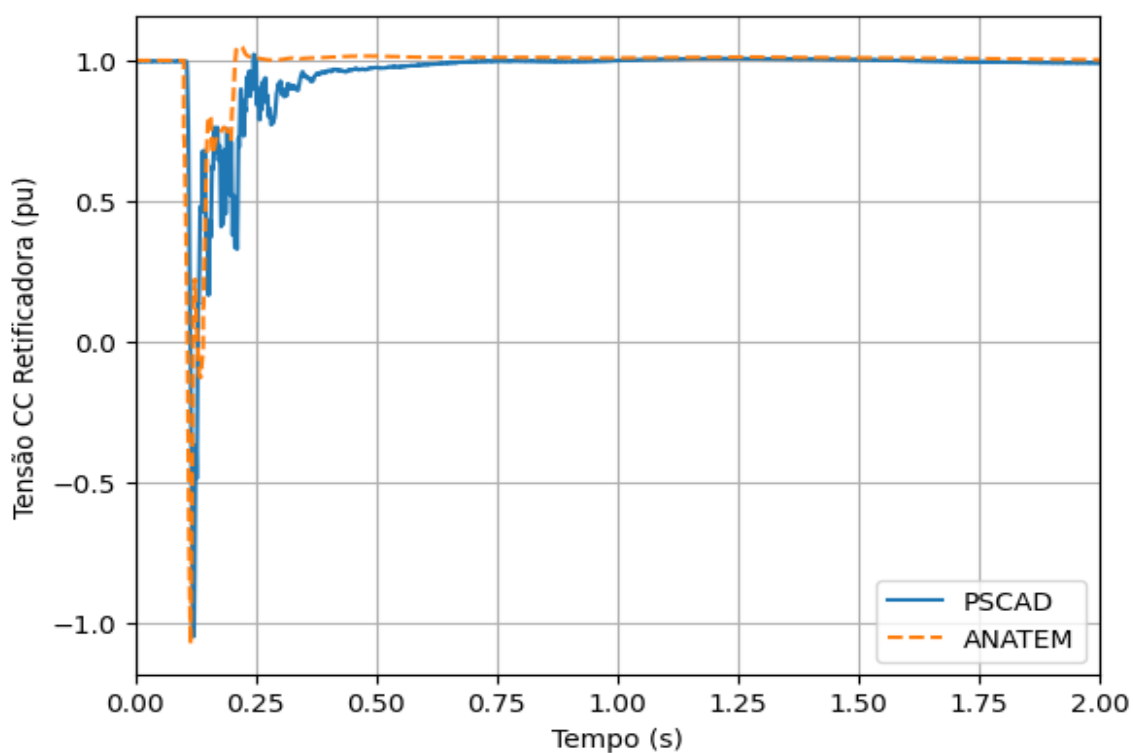


Figura 6-51 Tensão CC na retificadora

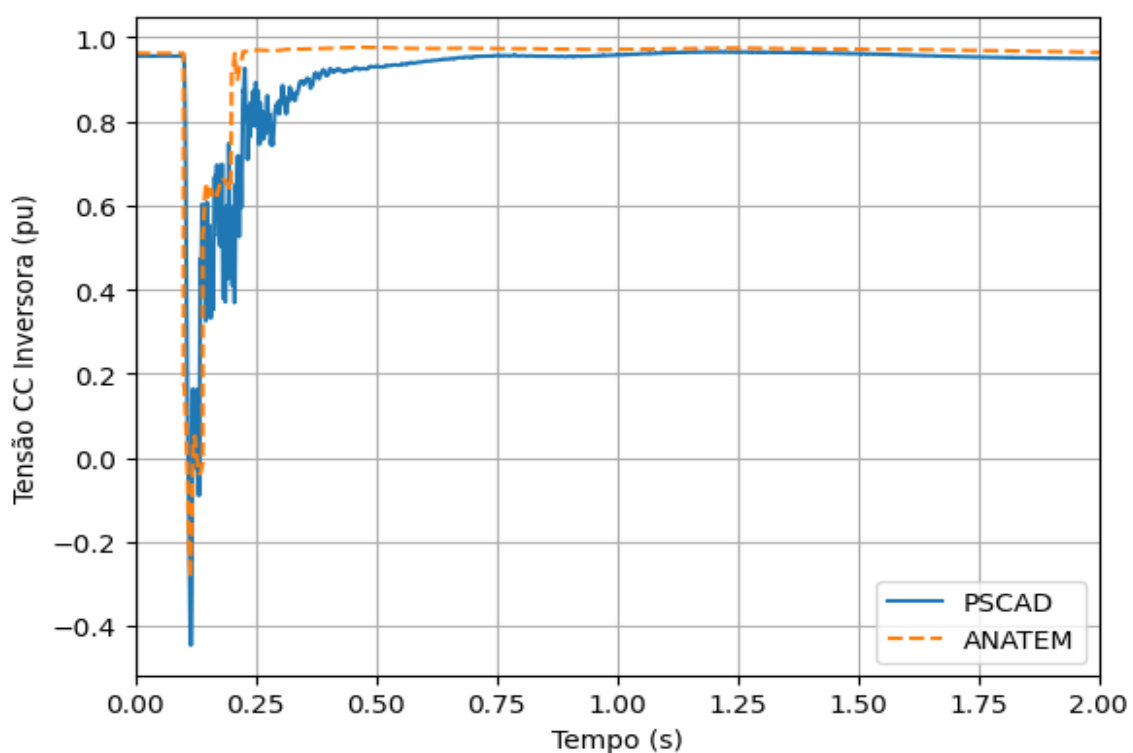


Figura 6-52 Tensão CC na inversora

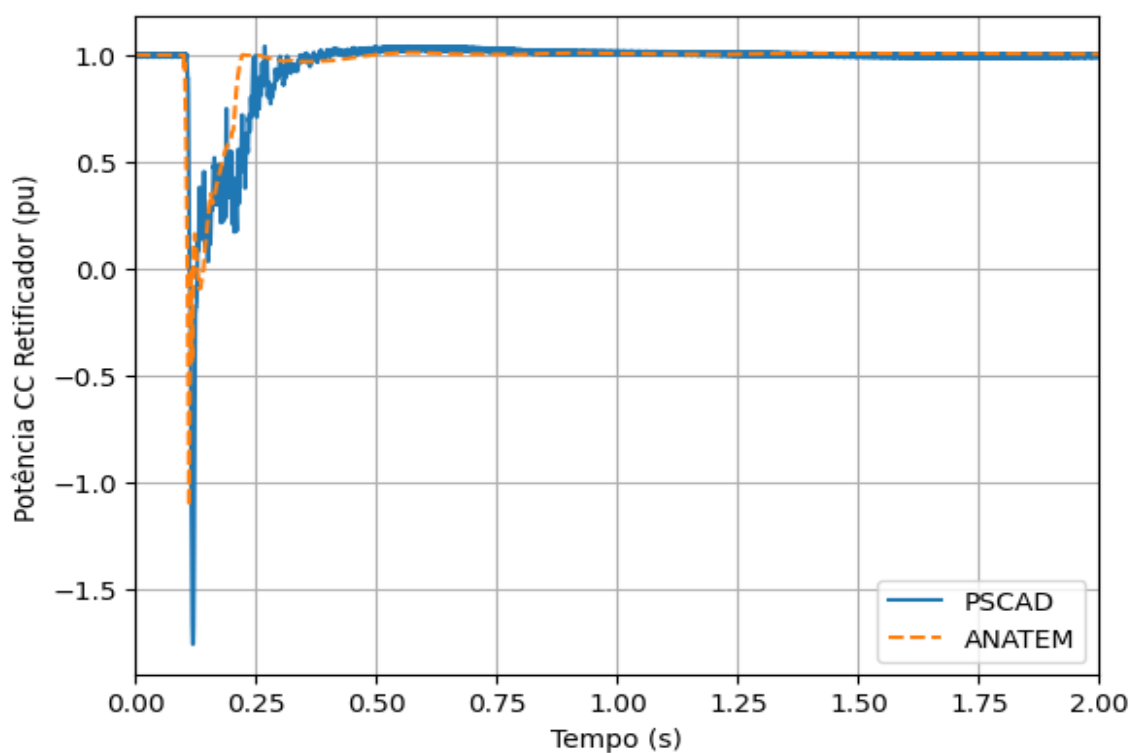


Figura 6-53 Potência CC na retificadora

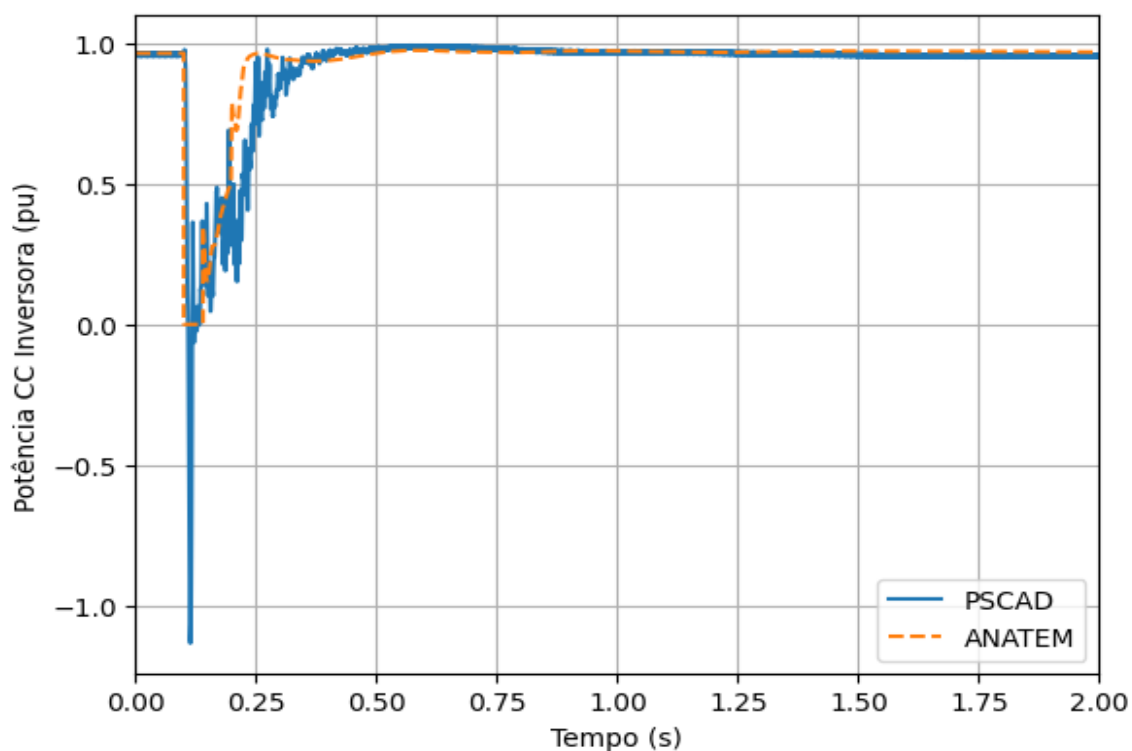


Figura 6-54 Potência CC na inversora

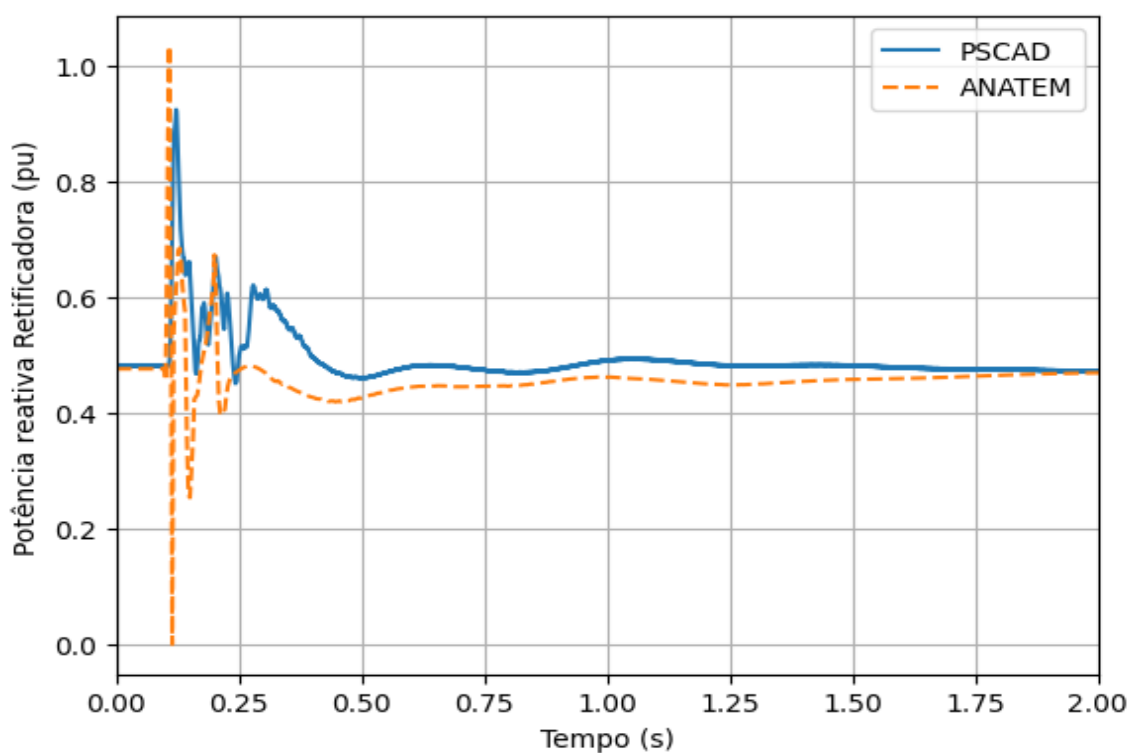


Figura 6-55 Potência reativa na retificadora

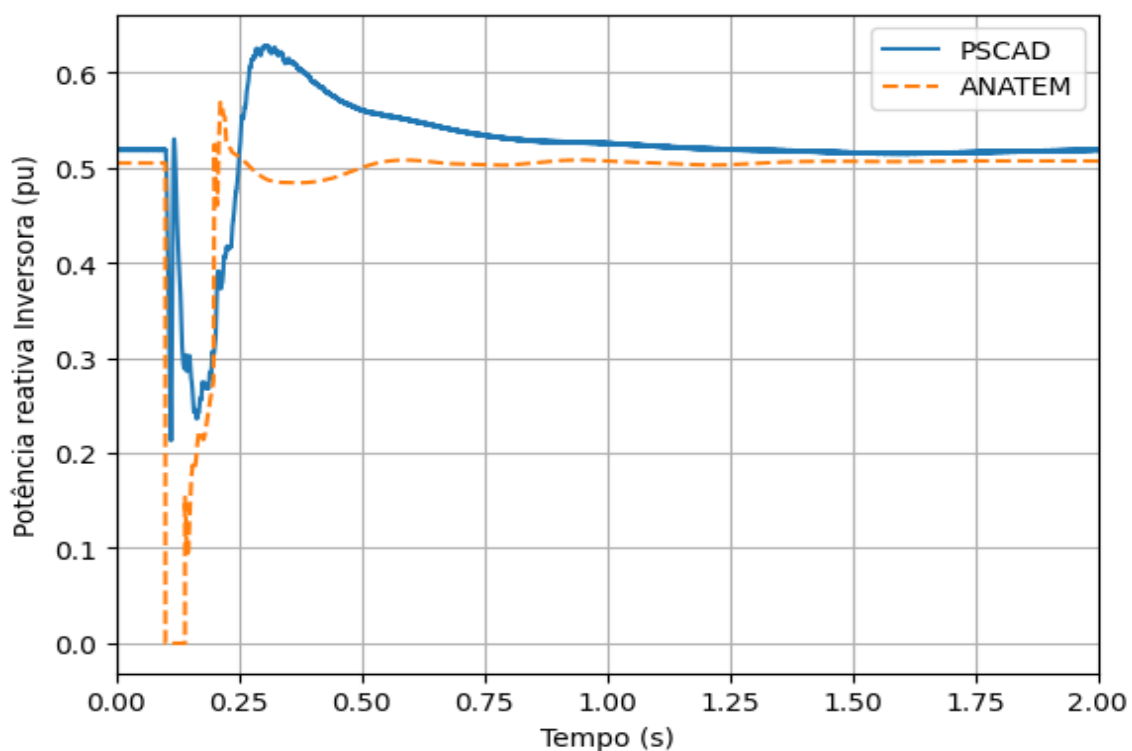


Figura 6-56 Potência reativa na inversora

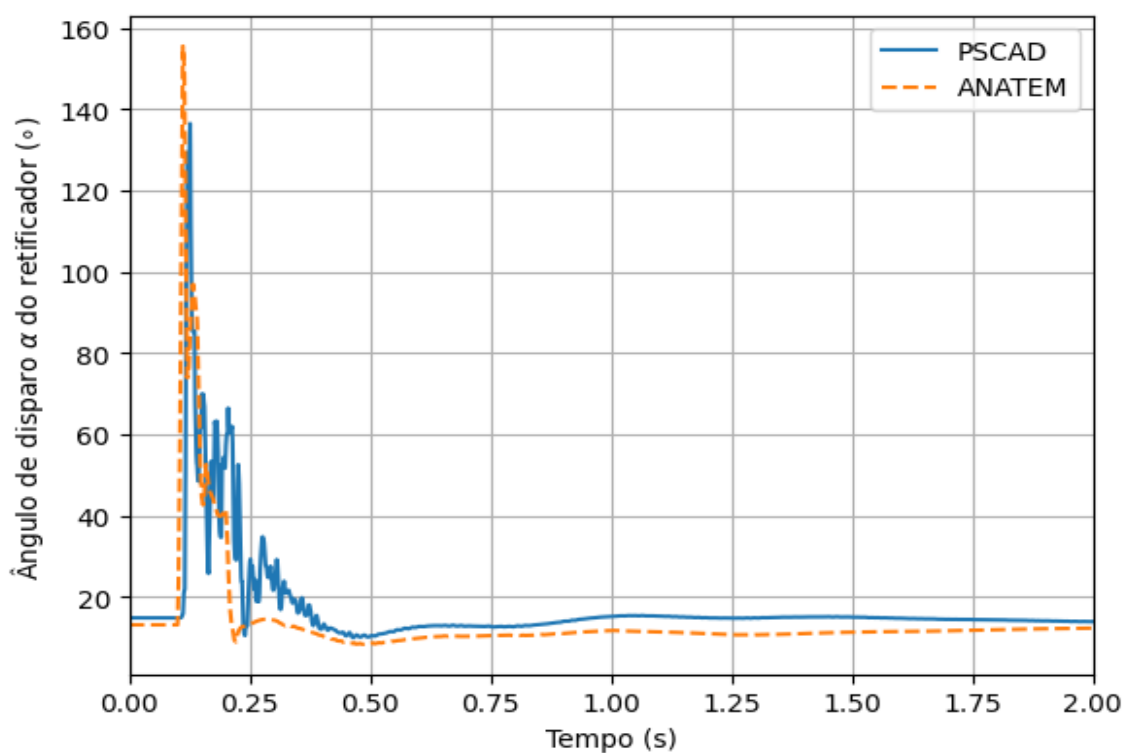


Figura 6-57 Ângulo de disparo da retificadora

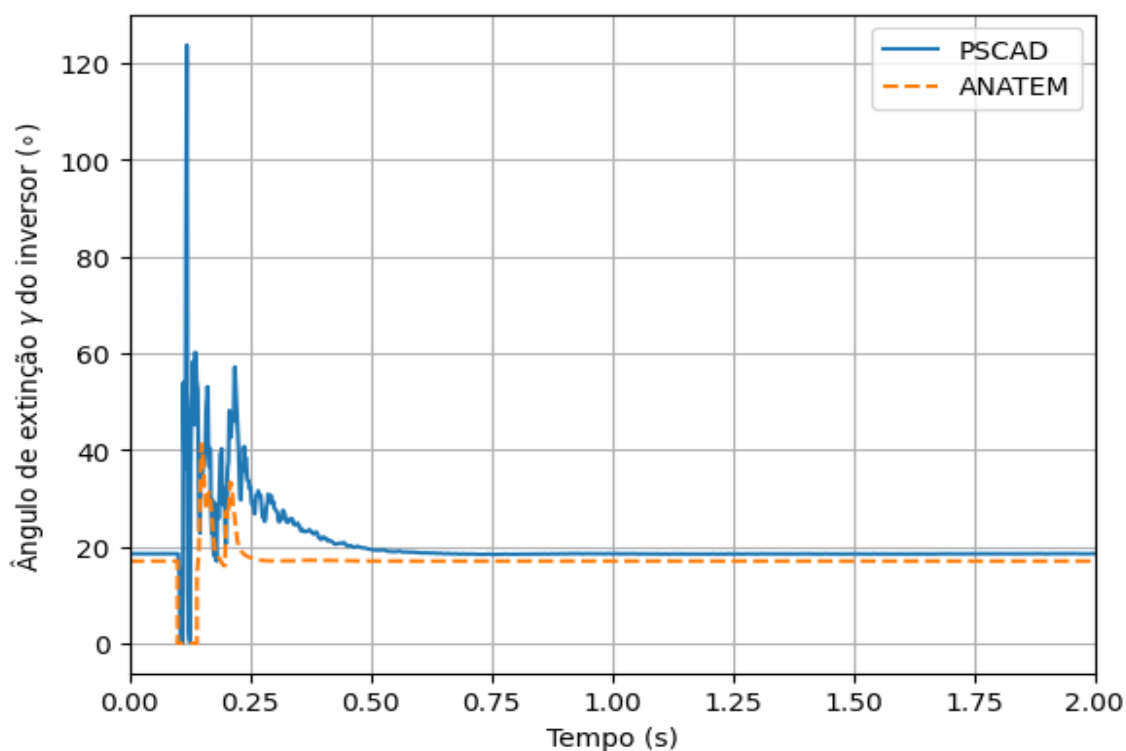


Figura 6-58 Ângulo de extinção da inversora

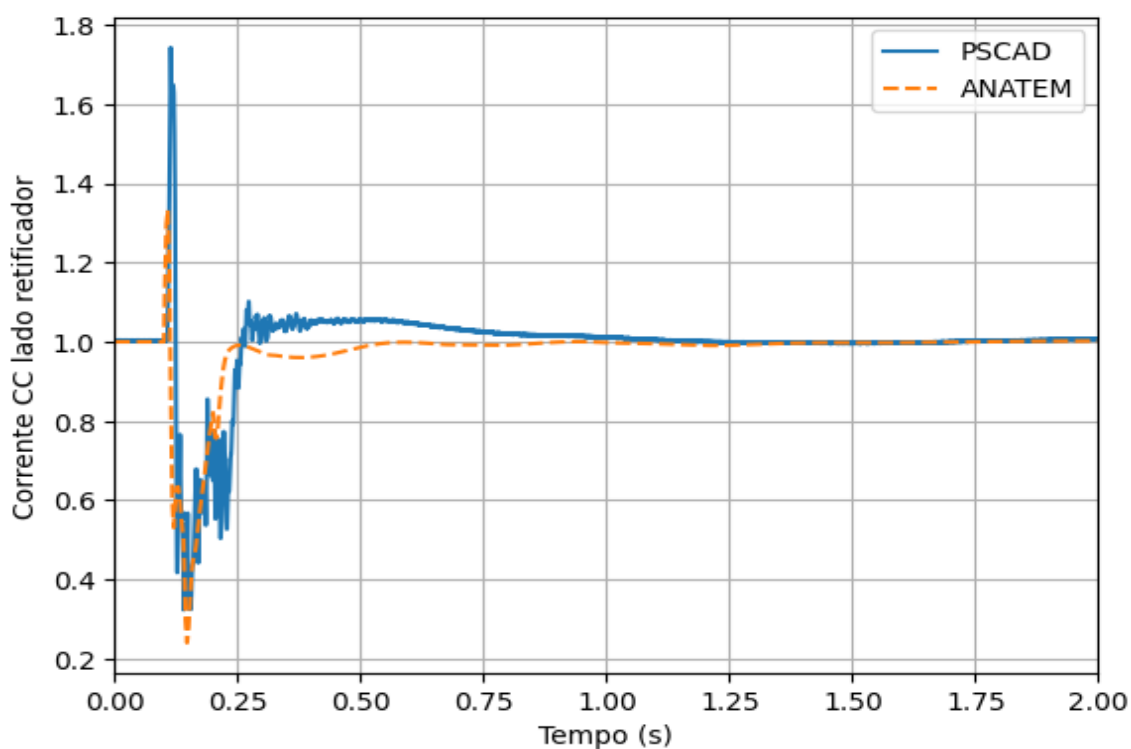


Figura 6-59 Corrente CC medida do lado retificador

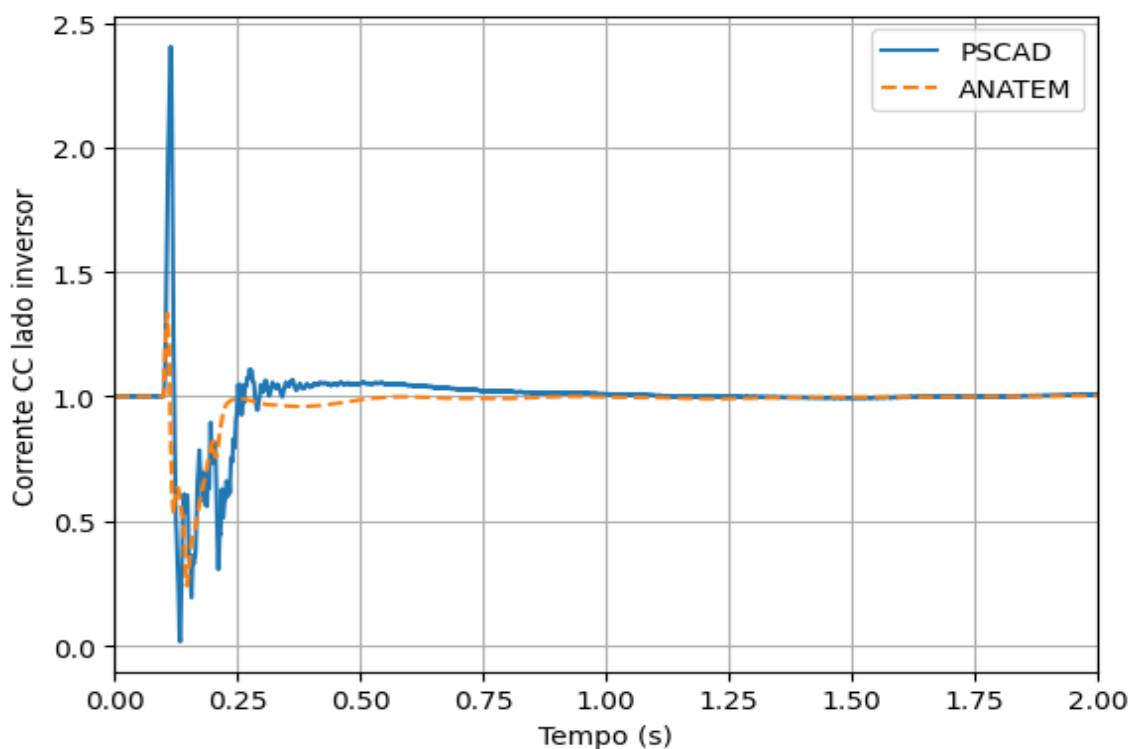


Figura 6-60 Corrente CC medida do lado inversor

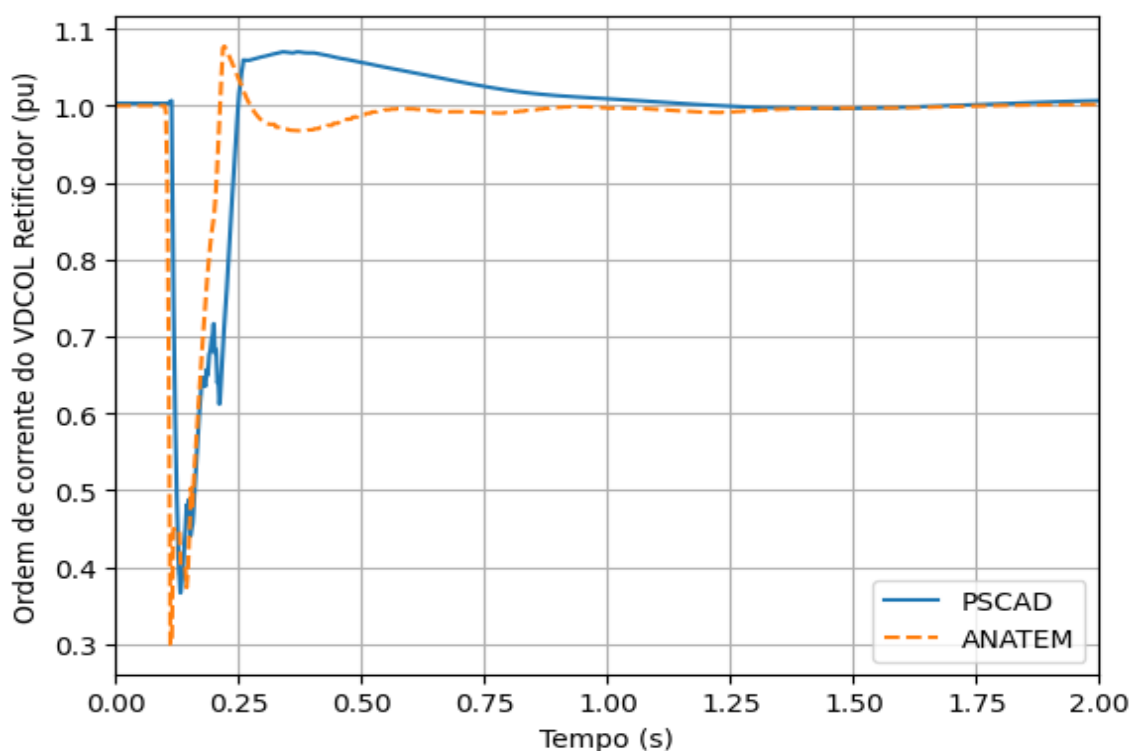


Figura 6-61 Ordem de corrente do VDCOL do retificador

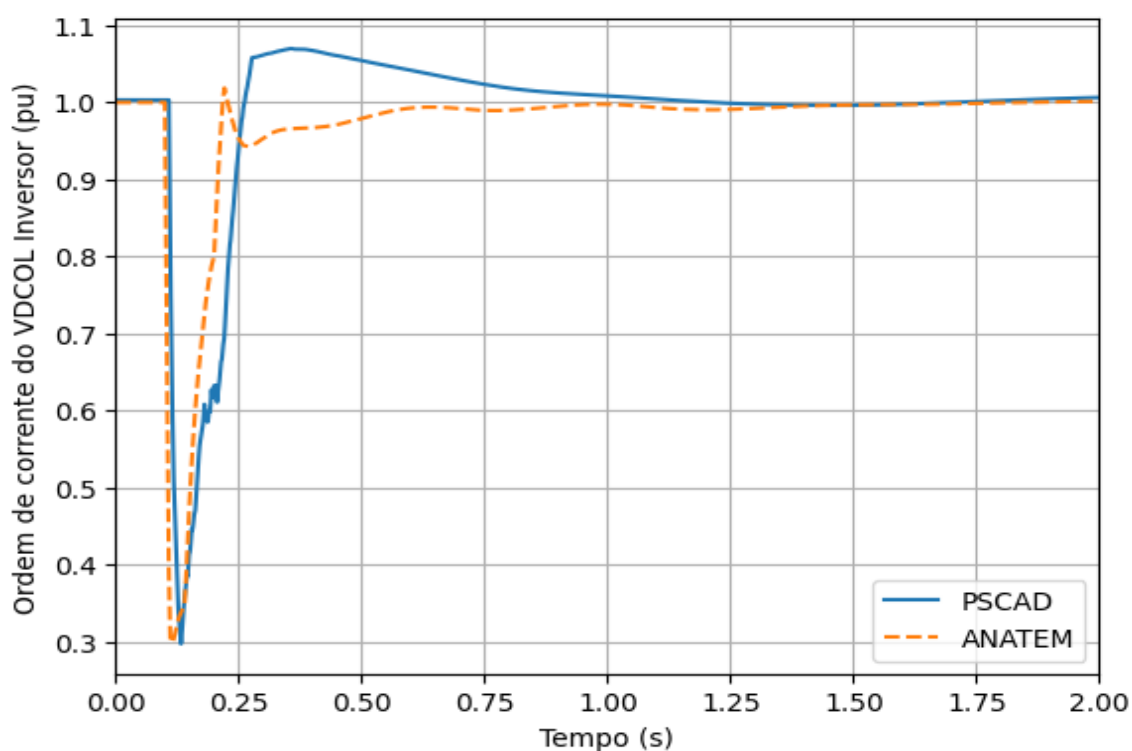


Figura 6-62 Ordem de corrente do VDCOL do inversor

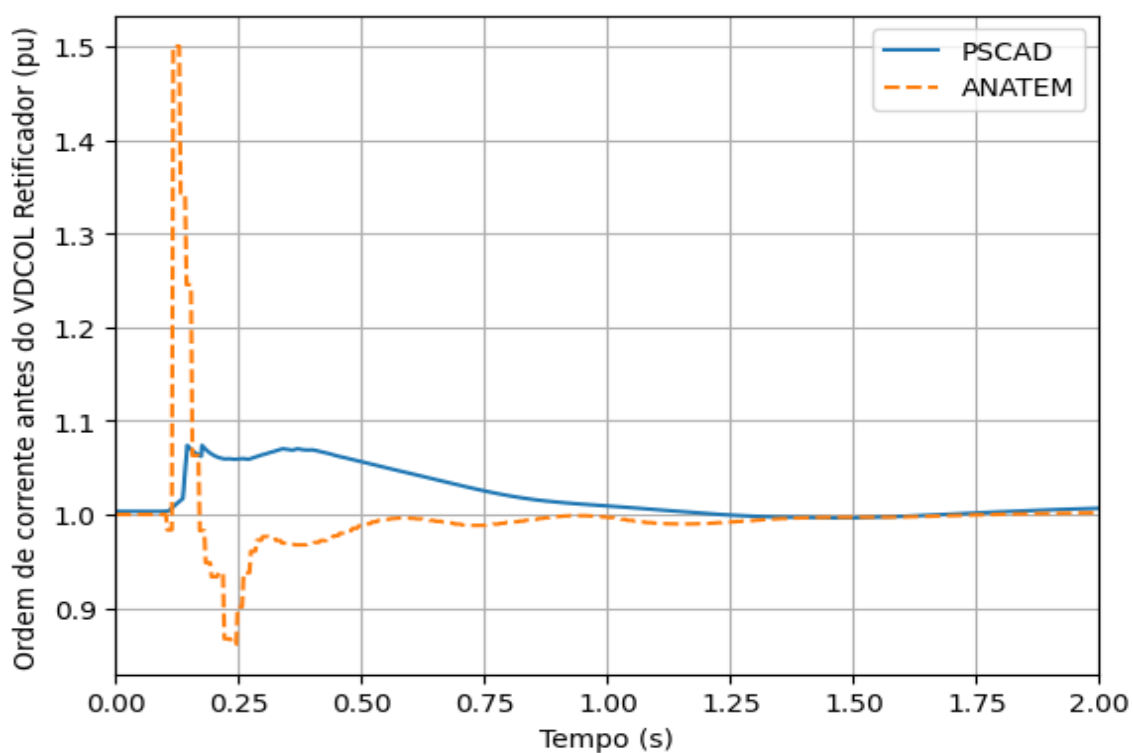


Figura 6-63 Ordem de corrente antes do VDCOL do retificador

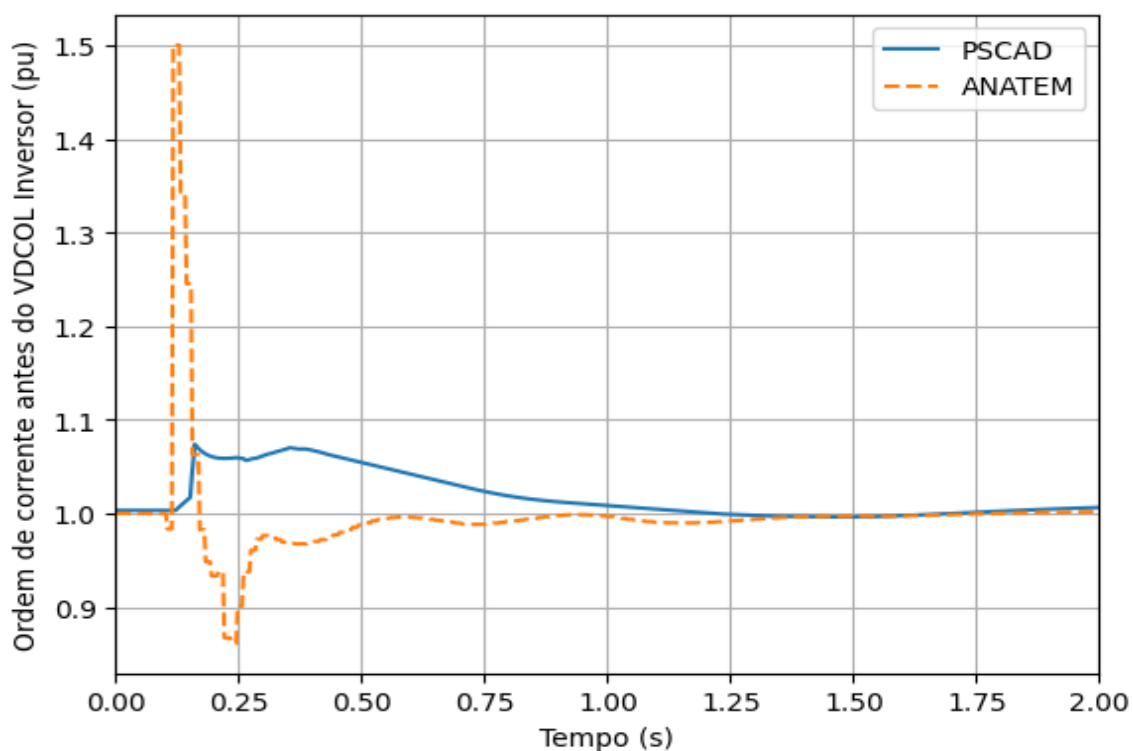


Figura 6-64 Ordem de corrente antes do VDCOL do inversor

7 REFERÊNCIAS

- [1] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Termo de Referência TR/EPE/DEE/STE/01/2021. Desenvolvimento de modelos para análise de desempenho de sistemas planejados em Corrente Contínua em Alta Tensão. 2021.
- [2] EPE – Empresa de Pesquisa Energética, “EPE-DEE-RE-136/2014-rev0 - Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste – Elo de Corrente Contínua $\pm$ 800 kV Xingu – Terminal Rio - Relatório R2,” 2014.
- [3] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. “Base de Dados de Transitórios Eletromecânicos”. [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/planejamento-da-transmissao/bases-de-dados-de-simulacao>. [Acesso em: 2022].
- [4] RL-CL339-082-22 - Equivalentes estáticos de rede elétrica em PSCAD.pdf – versão 1 – 13/04/2023.
- [5] RL-CL339-134-23 - Relatório de validação dos modelos dinâmicos de máquinas síncronas - rev02.pdf– versão 2 – 12/06/2023.
- [6] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Procedimentos de Rede. Módulo 2 – Critérios e Requisitos: Submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos. Revisão 2021.8.
- [7] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão: Estudos Elétricos, Especificação de Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão. 2013.
- [8] Power System Control and Stability, P. M. Anderson A. A. Fouad, Second Edition