Desenvolvimento de modelos dinâmicos para PSCAD

Produto 2

Relatório de validação dos modelos dinâmicos de máquinas síncronas e compensadores estáticos de reativos e seus controladores no PSCAD

Rev.	Data	Descrição	Elaborado	Aprovado
03	19/07/2023	Atendendo aos comentários da EPE	MJAS/GMG	VRO
02	12/06/2023	Consolidação de todos os equipamentos dinâmicos em um único relatório	MJAS/GMG	VRO
01	05/04/2023	Atendendo aos comentários da EPE	MJAS/GMG	VRO
00	14/12/2022	Emissão Inicial	MJAS/GMG	VRO

Cliente: Empresa de Pesquisa Energética (EPE)	Projeto **Desenvolvimento de modelos dinâmicos de máquinas para PSCAD** Título do Documento: **Produto 2** **Relatório de validação dos modelos dinâmicos de máquinas síncronas e compensadores estáticos de reativos e seus controladores no PSCAD**
JORDÃO SOLUÇÕES EM ENERGIA	Nº Projeto/Contrato Nº Documento RL-CL339-134-23 Revisão 03 Nº Folhas 711

Sumário

Sumário 2
1 Introdução 14
2 Conclusões 14
3 Sistema e Eventos Simulados 14
3.1 Sistemas Teste 14
3.1.1 Máquina em Vazio 14
3.1.2 Sistema Máquina x Barra Infinita 15
3.2 Eventos 15
3.3 Curva de Saturação 16
4 Validações de Modelos de Máquinas 18
4.1 UHE Boa esperança 1 18
4.1.1 Modelo da UHE Boa esperança 1 18
4.1.2 Curva de saturação 19
4.1.3 Máquina em Vazio 20
4.1.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 21
4.1.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 24
4.1.4 Sistema Máquina e Barra infinita 26
4.1.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 27
4.1.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 30
4.2 UHE Boa esperança 3 33
4.2.1 Modelo da UHE Boa esperança 3 33
4.2.2 Curva de saturação 33
4.2.3 Máquina em Vazio 35
4.2.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 36
4.2.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 39
4.2.4 Sistema Máquina e Barra infinita 41
4.2.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 42
4.2.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 45
4.3 CS Boa Esperança 4 48
4.3.1 Modelo do CS Boa Esperança 4 48
4.3.2 Curva de saturação 48
4.3.3 Máquina em Vazio 50
4.3.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 51
4.3.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 54
4.3.4 Sistema Máquina e Barra infinita 57

4.3.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 57
4.3.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 60
4.4 UHE Tucuruí 1 64
4.4.1 Modelo da UHE Tucuruí 1 64
4.4.2 Curva de saturação 65
4.4.3 Máquina em Vazio 66
4.4.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 67
4.4.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 68
4.4.4 Sistema Máquina e Barra infinita 70
4.4.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 70
4.4.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 73
4.5 UHE Tucuruí 2 77
4.5.1 Modelo da UHE Tucuruí 2 77
4.5.2 Curva de saturação 77
4.5.3 Máquina em Vazio 79
4.5.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 80
4.5.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 81
4.5.4 Sistema Máquina e Barra infinita 82
4.5.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 83
4.5.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 86
4.6 UHE Estreito 89
4.6.1 Modelo da UHE Estreito 89
4.6.2 Curva de saturação 89
4.6.3 Máquina em Vazio 91
4.6.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 92
4.6.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 95
4.6.4 Sistema Máquina e Barra infinita 97
4.6.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 98
4.6.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 101
4.6.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 104
4.7 CS Teresina 107
4.7.1 Modelo do CS Teresina 107
4.7.2 Curva de saturação 107
4.7.3 Máquina em Vazio 109
4.7.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 110
4.7.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 113
4.7.4 Sistema Máquina e Barra infinita 115
4.7.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 116
4.7.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 119
4.8 UHE Emborcação 122

4.8.1 Modelo da UHE Emborcação 122
4.8.2 Curva de saturação 122
4.8.3 Máquina em Vazio 124
4.8.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 125
4.8.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 128
4.8.4 Sistema Máquina e Barra infinita 130
4.8.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 131
4.8.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 134
4.8.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 137
4.9 UHE Jaguara 140
4.9.1 Modelo da UHE Jaguara 140
4.9.2 Curva de saturação 140
4.9.3 Máquina em Vazio 142
4.9.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 143
4.9.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 146
4.9.4 Sistema Máquina e Barra infinita 148
4.9.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 149
4.9.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 152
4.9.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 155
4.10 UHE Nova Ponte 158
4.10.1 Modelo da UHE Nova Ponte 158
4.10.2 Curva de saturação 158
4.10.3 Máquina em Vazio 160
4.10.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 161
4.10.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 164
4.10.4 Sistema Máquina e Barra infinita 166
4.10.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 167
4.10.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 170
4.10.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 173
4.11 UHE Volta Grande 176
4.11.1 Modelo da UHE Volta Grande 176
4.11.2 Curva de saturação 176
4.11.3 Máquina em Vazio 178
4.11.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 179
4.11.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 182
4.11.4 Sistema Máquina e Barra infinita 184
4.11.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 185
4.11.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 188
4.11.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 191
4.12 UNE Angra I 194

4.12.1 Modelo da UNE Angra I 194
4.12.2 Curva de saturação 194
4.12.3 Máquina em Vazio 196
4.12.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 197
4.12.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 198
4.12.4 Sistema Máquina e Barra infinita 199
4.12.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 200
4.12.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 203
4.13 UNE Angra II e III 206
4.13.1 Modelo das UNE Angra II e III 206
4.13.2 Curva de saturação 206
4.13.3 Máquina em Vazio 208
4.13.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 209
4.13.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 210
4.13.4 Sistema Máquina e Barra infinita 211
4.13.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 212
4.13.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 215
4.14 UHE Luiz Carlos Barreto 218
4.14.1 Modelo da UHE Luiz Carlos Barreto 218
4.14.2 Curva de saturação 218
4.14.3 Máquina em Vazio 220
4.14.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 221
4.14.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 224
4.14.4 Sistema Máquina e Barra infinita 226
4.14.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 227
4.14.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 230
4.14.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 233
4.15 UHE Furnas 236
4.15.1 Modelo da UHE Furnas 236
4.15.2 Curva de saturação 236
4.15.3 Máquina em Vazio 238
4.15.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 239
4.15.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 240
4.15.4 Sistema Máquina e Barra infinita 241
4.15.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 242
4.15.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 245
4.16 UHE Marimbondo 248
4.16.1 Modelo da UHE Marimbondo 248
4.16.2 Curva de saturação 248

4.16.3 Máquina em Vazio 250
4.16.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 251
4.16.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 254
4.16.4 Sistema Máquina e Barra infinita 256
4.16.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 257
4.16.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 260
4.17 UHE Mascarenhas de Moraes A 263
4.17.1 Modelo da UHE Mascarenhas de Moraes A 263
4.17.2 Curva de saturação 263
4.17.3 Máquina em Vazio 265
4.17.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 266
4.17.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 267
4.17.4 Sistema Máquina e Barra infinita 268
4.17.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 269
4.17.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 272
4.18 UHE Itumbiara 275
4.18.1 Modelo da UHE Itumbiara 275
4.18.2 Curva de saturação 275
4.18.3 Máquina em Vazio 277
4.18.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 278
4.18.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 281
4.18.4 Sistema Máquina e Barra infinita 283
4.18.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 284
4.18.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 287
4.18.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 290
4.19 CS Furnas 293
4.19.1 Modelo do CS Furnas 293
4.19.2 Curva de saturação 293
4.19.3 Máquina em Vazio 295
4.19.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 296
4.19.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 297
4.19.4 Sistema Máquina e Barra infinita 298
4.19.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 299
4.19.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 302
4.20 CS Luiz Carlos Barreto 305
4.20.1 Modelo do CS Luiz Carlos Barreto 305
4.20.2 Curva de saturação 305
4.20.3 Máquina em Vazio 307
4.20.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 308
4.20.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 311

4.20.4 Sistema Máquina e Barra infinita 313
4.20.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 314
4.20.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 317
4.21 CS Tijuco Preto 320
4.21.1 Modelo do CS Tijuco Preto 320
4.21.2 Curva de saturação 320
4.21.3 Máquina em Vazio 322
4.21.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 323
4.21.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 324
4.21.4 Sistema Máquina e Barra infinita 325
4.21.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 326
4.21.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 329
4.22 CS Ibiúna 332
4.22.1 Modelo do CS Ibiúna 332
4.22.2 Curva de saturação 332
4.22.3 Máquina em Vazio 334
4.22.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 335
4.22.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 336
4.22.4 Sistema Máquina e Barra infinita 337
4.22.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 338
4.22.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 340
4.23 UTE Baixada Fluminense – Gás 342
4.23.1 Modelo da UTE Baixada Fluminense – Gás 342
4.23.2 Curva de saturação 342
4.23.3 Máquina em Vazio 344
4.23.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 345
4.23.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 348
4.23.4 Sistema Máquina e Barra infinita 350
4.23.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 351
4.23.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 354
4.23.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 357
4.24 UTE Baixada Fluminense – Vapor 360
4.24.1 Modelo da UTE Baixada Fluminense – Vapor 360
4.24.2 Curva de saturação 360
4.24.3 Máquina em Vazio 362
4.24.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 363
4.24.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 366
4.24.4 Sistema Máquina e Barra infinita 368
4.24.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 369
4.24.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 372

4.24.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 375
4.25 UTE Companhia Siderurgica do Atlantico – Vapor 378
4.25.1 Modelo da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Vapor 378
4.25.2 Curva de saturação 378
4.25.3 Máquina em Vazio 380
4.25.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 381
4.25.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 384
4.25.4 Sistema Máquina e Barra infinita 386
4.25.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 387
4.25.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 390
4.25.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 393
4.26 UTE Companhia Siderurgica do Atlantico – Gás GP10 396
4.26.1 Modelo da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Gás GP10 396
4.26.2 Curva de saturação 396
4.26.3 Máquina em Vazio 398
4.26.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 399
4.26.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 402
4.26.4 Sistema Máquina e Barra infinita 404
4.26.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 405
4.26.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 408
4.26.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 411
4.27 UTE Companhia Siderurgica do Atlantico – Gás GP20 414
4.27.1 Modelo da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Gás GP20 414
4.27.2 Curva de saturação 414
4.27.3 Máquina em Vazio 416
4.27.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 417
4.27.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 420
4.27.4 Sistema Máquina e Barra infinita 422
4.27.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 423
4.27.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 426
4.27.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 429
4.28 CS Estreito 432
4.28.1 Modelo do CS Estreito 432
4.28.2 Curva de saturação 432
4.28.3 Máquina em Vazio 434
4.28.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 435
4.28.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 438
4.28.4 Sistema Máquina e Barra infinita 440
4.28.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 441
4.28.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 444

4.29 UHE Belo Monte 447
4.29.1 Modelo da UHE Belo Monte 447
4.29.2 Curva de saturação 447
4.29.3 Máquina em Vazio 449
4.29.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 450
4.29.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 451
4.29.4 Sistema Máquina e Barra infinita 452
4.29.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 453
4.29.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 456
4.30 CS Terminal Rio 459
4.30.1 Modelo do CS Terminal Rio 459
4.30.2 Curva de saturação 460
4.30.3 Máquina em Vazio 461
4.30.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 462
4.30.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 465
4.30.4 Sistema Máquina e Barra infinita 467
4.30.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 468
4.30.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 471
4.31 CS Belo Monte 474
4.31.1 Modelo do CS Belo Monte 474
4.31.2 Curva de saturação 475
4.31.3 Máquina em Vazio 476
4.31.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 477
4.31.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 480
4.31.4 Sistema Máquina e Barra infinita 482
4.31.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 483
4.31.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 486
4.32 CS Araraquara 489
4.32.1 Modelo do CS Araraquara 489
4.32.2 Curva de saturação 489
4.32.3 Máquina em Vazio 491
4.32.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 492
4.32.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 495
4.32.4 Sistema Máquina e Barra infinita 497
4.32.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 498
4.32.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 501
4.33 UTE Maranhao IV – gas 504
4.33.1 Modelo da UTE Maranhão IV – gás 504
4.33.2 Curva de saturação 504

4.33.3 Máquina em Vazio 506
4.33.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 507
4.33.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 510
4.33.4 Sistema Máquina e Barra infinita 512
4.33.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 513
4.33.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 516
4.33.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 519
4.34 UTE Maranhao V – gás 522
4.34.1 Modelo da UTE Maranhão V – gás 522
4.34.2 Curva de saturação 522
4.34.3 Máquina em Vazio 524
4.34.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 525
4.34.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 528
4.34.4 Sistema Máquina e Barra infinita 530
4.34.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 531
4.34.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 534
4.34.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 537
4.35 UTE Maranhao III – GP10 540
4.35.1 Modelo da UTE Maranhão III – GP10 540
4.35.2 Curva de saturação 540
4.35.3 Máquina em Vazio 542
4.35.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 543
4.35.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 546
4.35.4 Sistema Máquina e Barra infinita 548
4.35.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 549
4.35.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 552
4.35.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 555
4.36 UTE Maranhao III – GP20 558
4.36.1 Modelo da UTE Maranhão III – GP20 558
4.36.2 Curva de saturação 558
4.36.3 Máquina em Vazio 560
4.36.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 561
4.36.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 564
4.36.4 Sistema Máquina e Barra infinita 566
4.36.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 567
4.36.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 570
4.36.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 573
4.37 UTE Parnaíba IV 576
4.37.1 Modelo da UTE Parnaíba IV 576
4.37.2 Curva de saturação 576

4.37.3 Máquina em Vazio 578
4.37.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 579
4.37.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 582
4.37.4 Sistema Máquina e Barra infinita 584
4.37.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 585
4.37.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 588
4.38 UTE PARNAÍBA 5ª 591
4.38.1 Modelo da UTE PARNAÍBA 5ª 591
4.38.2 Curva de saturação 591
4.38.3 Máquina em Vazio 593
4.38.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 594
4.38.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 597
4.38.4 Sistema Máquina e Barra infinita 599
4.38.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 600
4.38.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 603
4.38.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 606
4.39 UTE PARNAÍBA 5B 609
4.39.1 Modelo da UTE PARNAÍBA 5B 609
4.39.2 Curva de saturação 609
4.39.3 Máquina em Vazio 611
4.39.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 612
4.39.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 615
4.39.4 Sistema Máquina e Barra infinita 617
4.39.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 618
4.39.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 621
4.39.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado 624
4.40 CS Emborcação 627
4.40.1 Modelo do CS Emborcação 627
4.40.2 Curva de saturação 627
4.40.3 Máquina em Vazio 629
4.40.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 630
4.40.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 633
4.40.4 Sistema Máquina e Barra infinita 635
4.40.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 636
4.40.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 639
4.41 CS Nova Ponte 642
4.41.1 Modelo do CS Nova Ponte 642
4.41.2 Curva de saturação 642
4.41.3 Máquina em Vazio 644
4.41.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 645

4.41.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 648
4.41.4 Sistema Máquina e Barra infinita 650
4.41.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 651
4.41.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 654
4.42 CS Volta Grande 657
4.42.1 Modelo do CS Volta Grande 657
4.42.2 Curva de saturação 657
4.42.3 Máquina em Vazio 659
4.42.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 660
4.42.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 663
4.42.4 Sistema Máquina e Barra infinita 665
4.42.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 666
4.42.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 669
4.43 CS Graça Aranha 672
4.43.1 Modelo do CS Graça Aranha 672
4.43.2 Curva de saturação 672
4.43.3 Máquina em Vazio 674
4.43.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 675
4.43.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 678
4.43.4 Sistema Máquina e Barra infinita 680
4.43.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 681
4.43.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 684
4.44 CS Silvania 687
4.44.1 Modelo do CS Silvania 687
4.44.2 Curva de saturação 687
4.44.3 Máquina em Vazio 689
4.44.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 690
4.44.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 693
4.44.4 Sistema Máquina e Barra infinita 695
4.44.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão 696
4.44.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão 699
5 Validação dos compensadores estáticos de reativos 702
5.1 Sistema Utilizado 702
5.2 Premissas Utilizadas 702
5.3 Validação 703
5.3.1 Degrau de tensão de ±2% 703
5.3.1.1 Degrau de tensão positivo 2% 703
5.3.1.2 Degrau de tensão negativo 2% 705
5.3.2 Curto-circuito 707

5.3.2.1 Curto-circuito 707
6 Referências 710
7 Equipe Técnica 711

1 INTRODUÇÃO

Este documento apresenta os resultados referentes ao Produto 2 do projeto “Desenvolvimento de modelos para análise de desempenho de sistemas planejados em Corrente Contínua em Alta Tensão”, que consiste no desenvolvimento de equivalentes de rede, em ambiente PSCAD™.

O escopo deste relatório consiste na validação dos modelos de máquinas síncronas e compensadores estáticos de reativos representados na rede retida dos equivalentes de redes, por meio de comparação de resultados de simulação de eventos pré-programados, nos programas ANATEM e PSCAD, nas configurações a vazio e em sistema Máquina x Barra Infinita.

Os modelos de máquinas do ANATEM foram extraídos da base de dados de transitórios eletromecânicos da EPE [1] e foram convertidos para PSCAD pela equipe do projeto. Simplificações e adequações precisaram ser feitas nesses modelos para a referida conversão para o ambiente PSCAD, o que justifica diferenças de resultados nas simulações utilizando os diferentes programas. Soma-se a essa questão a diferença entre as metodologias de cálculo e modelagem de elementos da rede adotadas nos programas ANATEM e PSCAD, o que já justifica as diferenças esperadas nos resultados entre os dois programas.

2 CONCLUSÕES

A partir das simulações realizadas, foi observado que o desempenho transitório das máquinas, durante a aplicação de eventos, apresentou tendência semelhante nos programas ANATEM e PSCAD.

Pode-se concluir que os referidos modelos podem ser utilizados nos equivalentes de redes PSCAD, de modo que o desempenho dinâmico da rede será próximo àquele observado no programa ANATEM.

3 SISTEMA E EVENTOS SIMULADOS

3.1 Sistemas Teste

Para validação dos modelos de máquina e de seus controladores, no PSCAD, serão utilizados modelos de rede simplificados. Nestes sistemas estarão presentes somente a dinâmica das máquinas e de seus controladores, o que facilita sobremaneira a validação dos modelos.

3.1.1 Máquina em Vazio

O primeiro sistema representa a máquina em vazio, como ilustra a Figura 3-1. Este sistema será utilizado para ajustar e validar a malha principal de controle do regulador de tensão, ou seja, para obter um ajuste que seja rápido e eficaz.

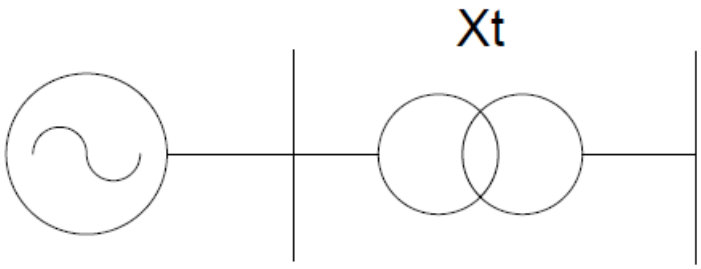

Figura 3-1 - Sistema Máquina em vazio

3.1.2 Sistema Máquina x Barra Infinita

O segundo sistema representa a máquina ligada a uma barra infinita por meio de uma impedância, apresentado na Figura 3-2. A impedância de ligação com a barra infinita é a impedância de curto-circuito, que representa o acoplamento desta máquina com o sistema no qual está conectada. Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão, quando a máquina está em carga e ligada ao sistema.

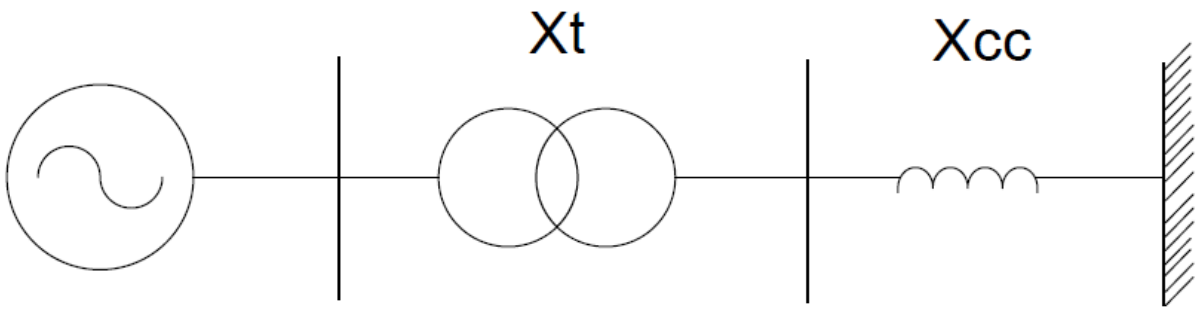

Figura 3-2 - Sistema Máquina Barra infinita

3.2 EVENTOS

Para validação dos modelos de máquinas e controladores, foram testados os seguintes eventos:

➢ Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão, com a máquina a vazio (desconectada do sistema);

➢ Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com a máquina a vazio (desconectada do sistema);

➢ Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão, com a máquina em carga;

➢ Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com a máquina em carga.

Em caso de a máquina possuir PSS, todos os eventos anteriores são feitos sem PSS e mais um evento será feito:

➢ Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com a máquina em carga e PSS ligado.

Para avaliar o desempenho dinâmico do modelo após a aplicação dos eventos, foram comparadas as seguintes grandezas nos programas ANATEM e PSCAD:

- ➢ Tensão terminal;
- ➢ Tensão de campo;
- ➢ Corrente de campo;
- ➢ Potência Reativa;
- ➢ Potência Ativa;
- ➢ Frequência.

Para que o modelo no PSCAD ficasse equivalente àquele do ANATEM, a corrente de campo extraída da máquina síncrona foi multiplicada por um fator antes de sua entrada no regulador de tensão. Seu valor é dado pelo inverso da subtração entre a reatância de eixo direto e a reatância de Potier: $\frac{1}{x_d - x_p}$.

Cabe ressaltar que os eventos aplicados são suficientes para testar e validar o comportamento de todas as malhas de controle envolvidas, uma vez que um degrau na referência de tensão altera tanto a velocidade da máquina quanto a potência elétrica, variáveis estas que influenciam no comportamento do regulador de velocidade e PSS, caso a máquina possua. Não foram realizados testes exaustivos com os reguladores de velocidade, em função de limitação de tempo para conclusão do projeto e pelo fato do controle de frequência não ser o objetivo principal do estudo.

No caso da máquina em vazio, as potências ativas e reativas serão nulas, não sendo possível observá-las nos gráficos plotados, uma vez que a escala foi definida padrão de 0 a 110% do valor máximo encontrado no PSCAD.

3.3 Curva de Saturação

Os modelos de curva de saturação do ANATEM são do tipo exponencial definida por três parâmetros, conforme mostra a Figura 3-3. A partir desta curva são calculados os pontos a serem introduzidos no PSCAD. Os valores para cada máquina serão mostrados em cada subseção de validação correspondente à máquina.

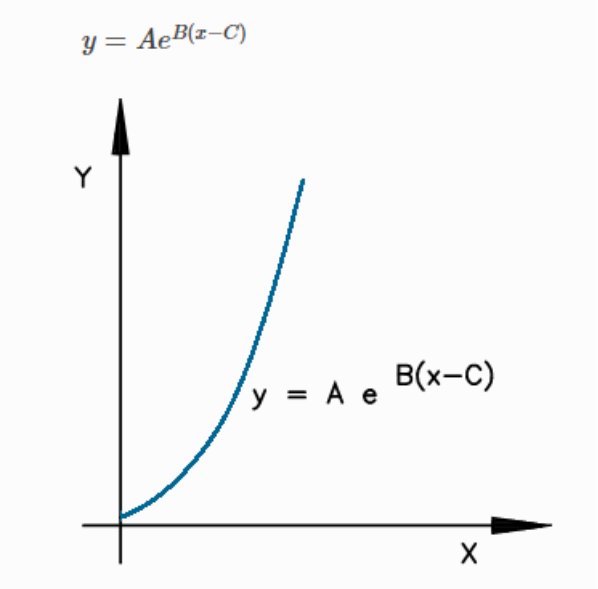

Figura 3-3 - Curva de saturação (modelo ANATEM).

4 VALIDAÇÕES DE MODELOS DE MÁQUINAS

4.1 UHE BOA ESPERANÇA 1

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Boa esperança 1, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão e velocidade, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.1.1 Modelo da UHE Boa esperança 1

A Tabela 4-1 apresenta os parâmetros da UHE Boa esperança 1 disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-1 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	79	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	49	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	24	I(KA)	2,184	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	14,5	H(s)	4,1	
xl(%)	13	D(pu)	0	
T'd(s)	4	Ra(pu)	0,004	
		xp(pu)	0,13	Reatância de Potier
T''d(s)	0,033	xd(pu)	0,79	
T''q(s)	0,068	xd_(pu)	0,24	x'd
Ra(%)	0,4	Td0_(s)	4	T'd
H(s)	4,1	xd__(pu)	0,145	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,033	T''d
S(MVA)	52,2	Xq(pu)	0,49	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,145	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,068	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.1.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-2, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Boa esperança 1 estão apresentados na Tabela 4-3. A partir dos parâmetros da Tabela 4-2, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-3. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-1.

Tabela 4-2 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Boa esperança 1	
Ag	**Y1**	0,0184
Bg	**Y2**	9,28
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-3 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,818	0,800
1,024	0,950
1,068	0,975
1,118	1,000
1,193	1,033
1,286	1,067
1,398	1,100
1,953	1,200
3,205	1,300

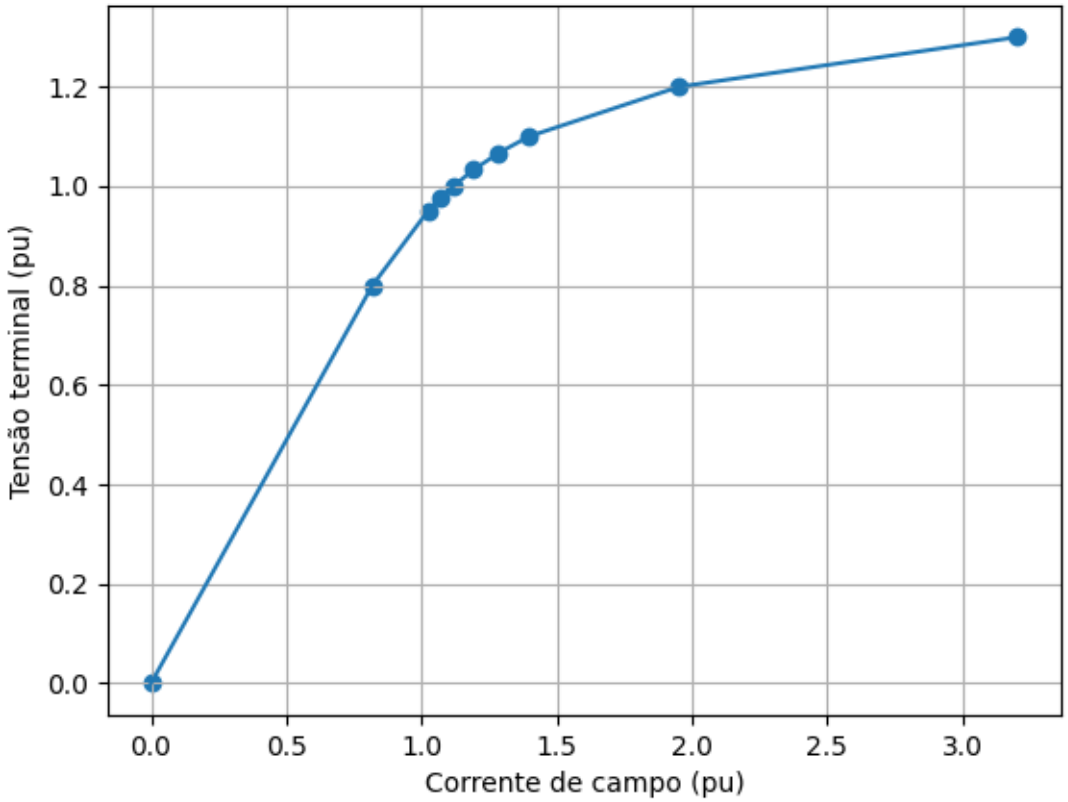

Figura 4-1 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.1.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.1.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.1.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.1.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

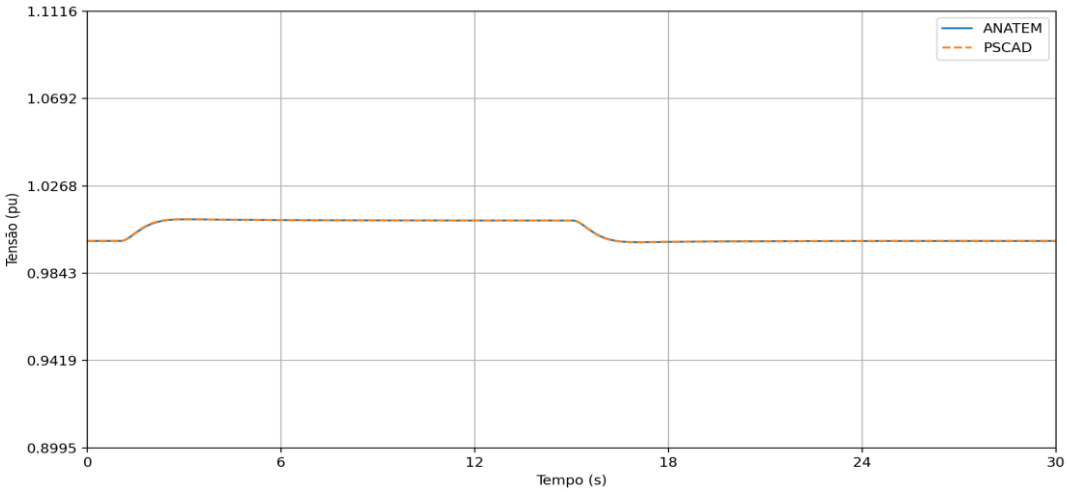

Figura 4-2 - Tensão terminal

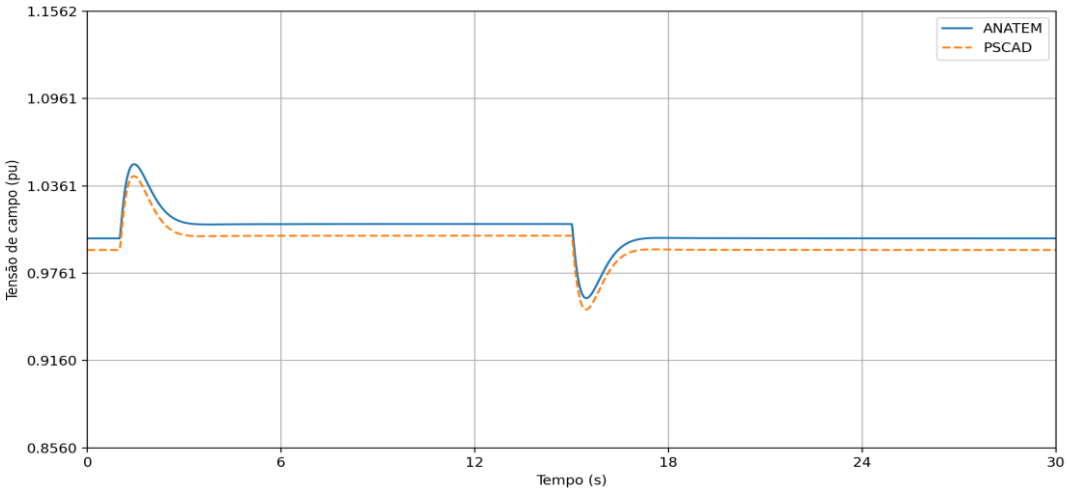

Figura 4-3 - Tensão de campo

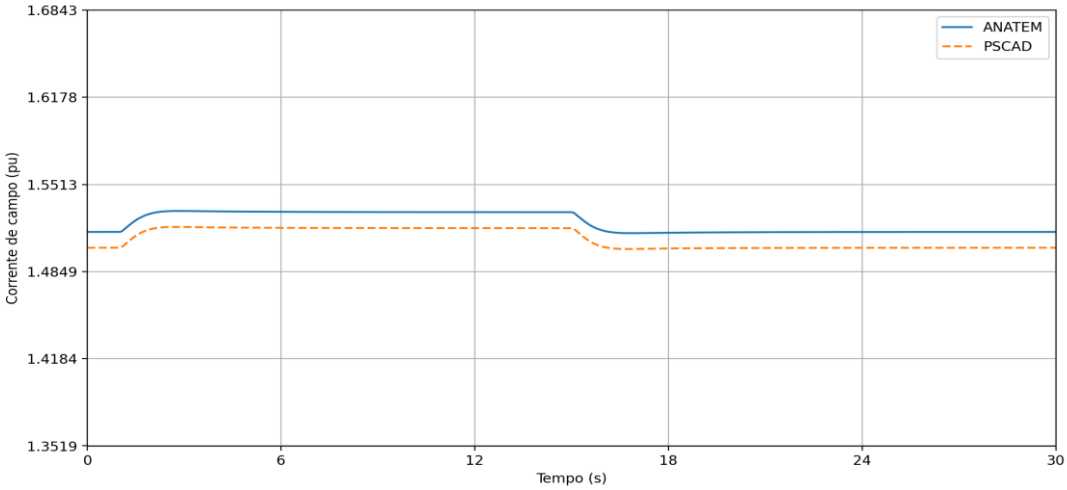

Figura 4-4 - Corrente de campo

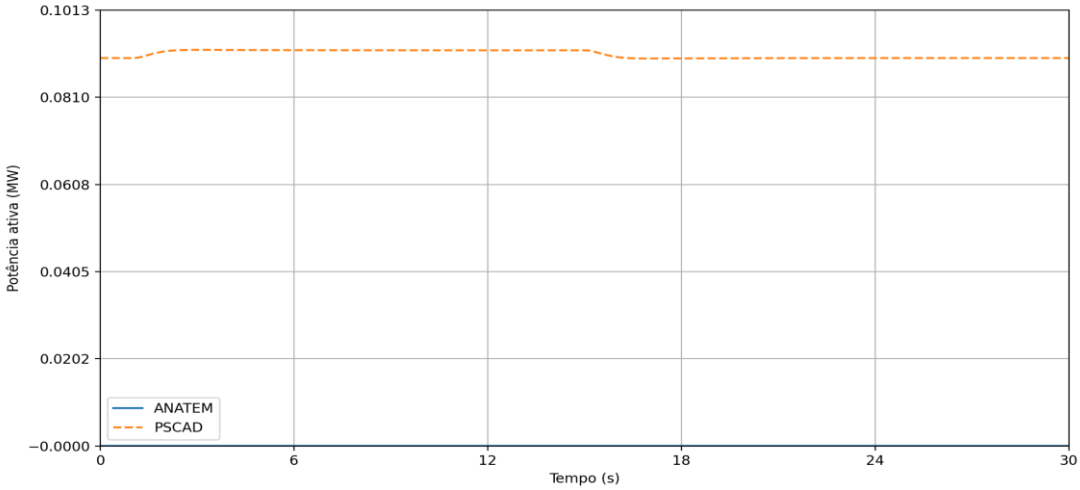

Figura 4-5 - Potência ativa

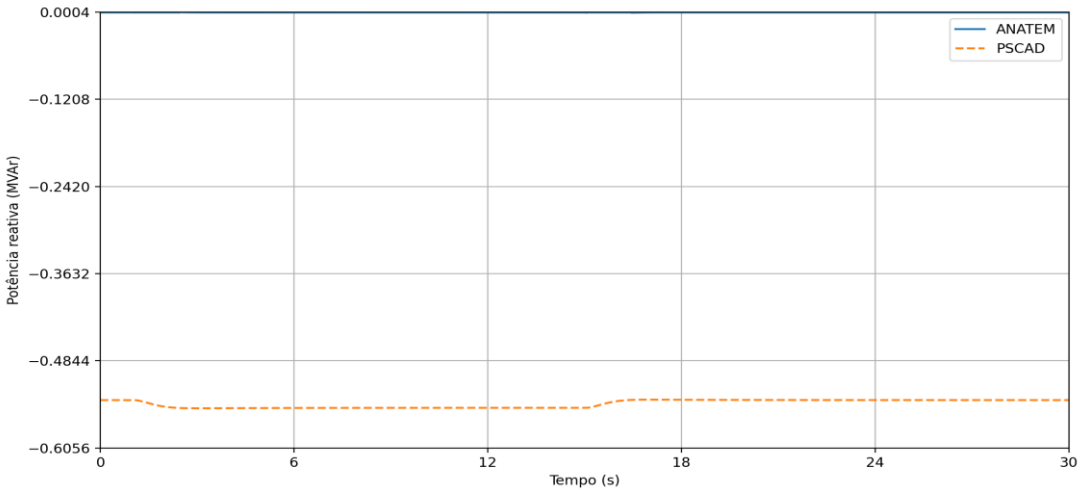

Figura 4-6 - Potência reativa

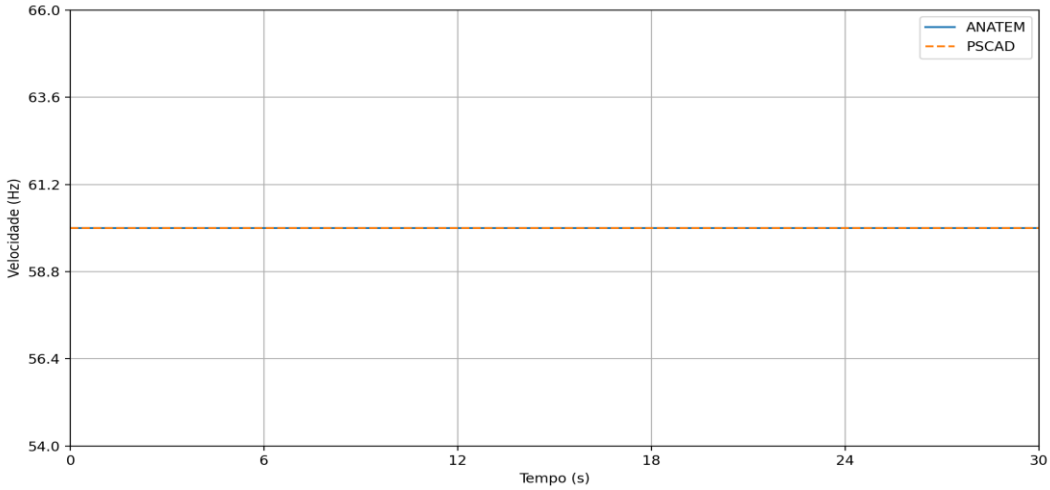

Figura 4-7 - Velocidade da máquina

4.1.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

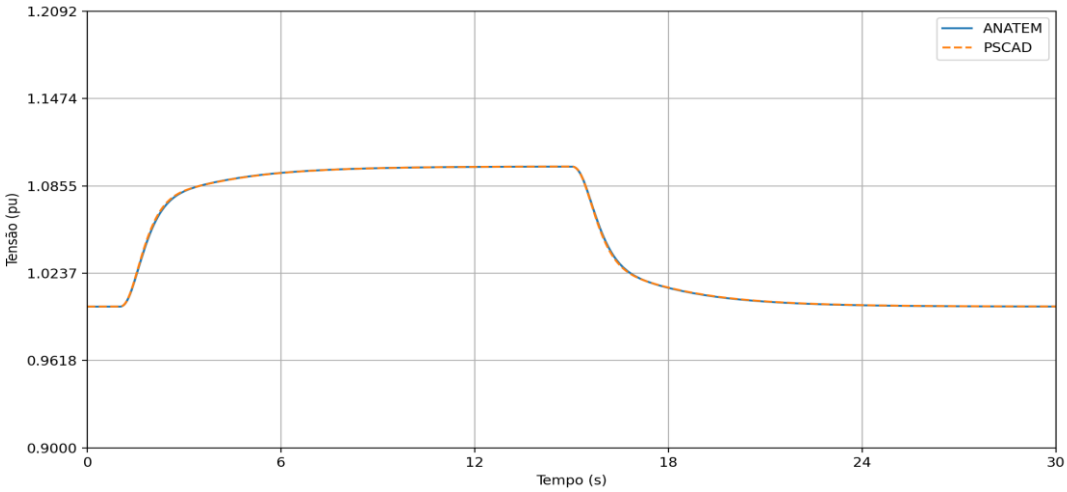

Figura 4-8 - Tensão terminal

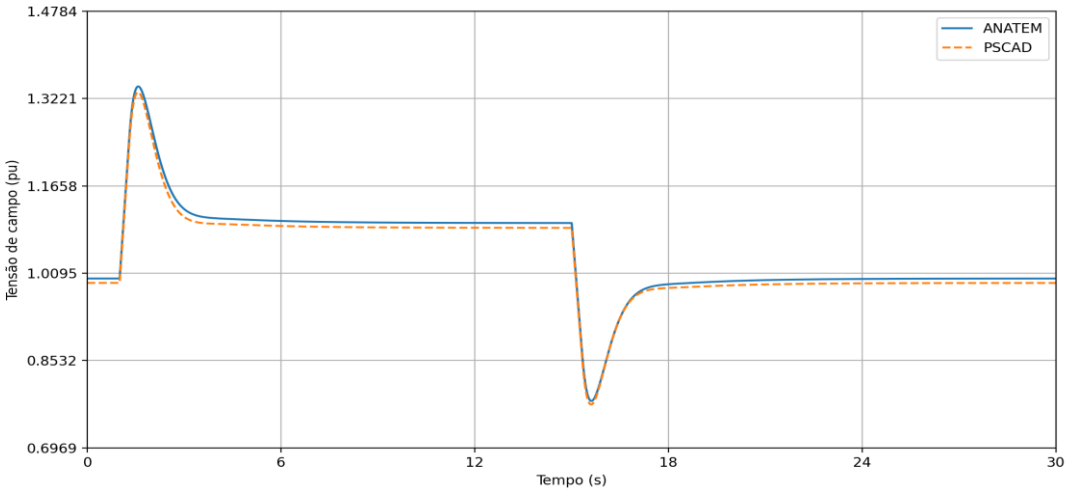

Figura 4-9 - Tensão de campo

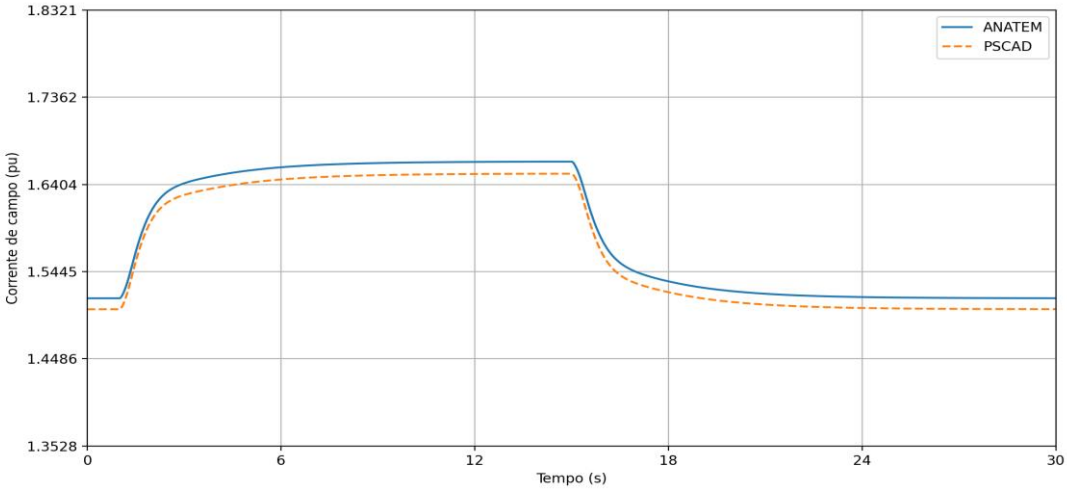

Figura 4-10 - Corrente de campo

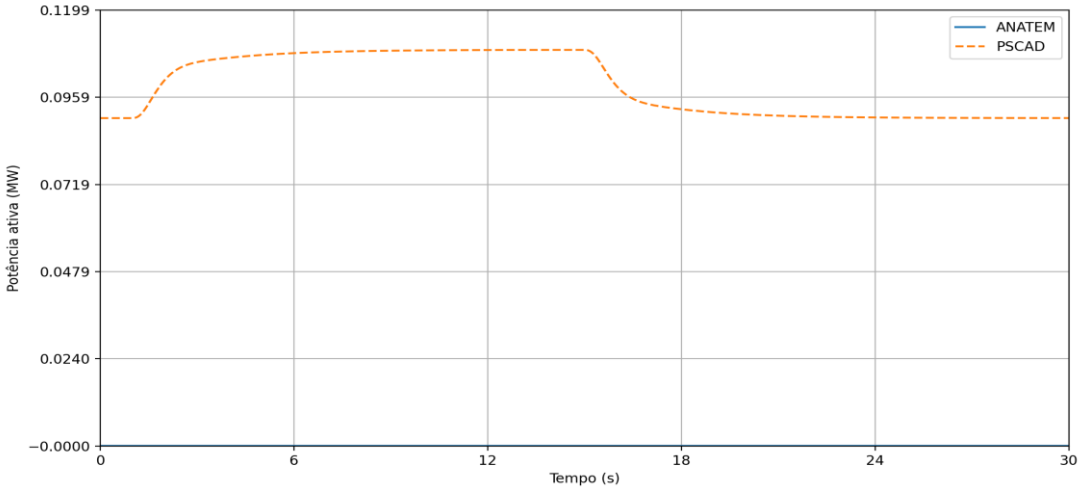

Figura 4-11 - Potência ativa

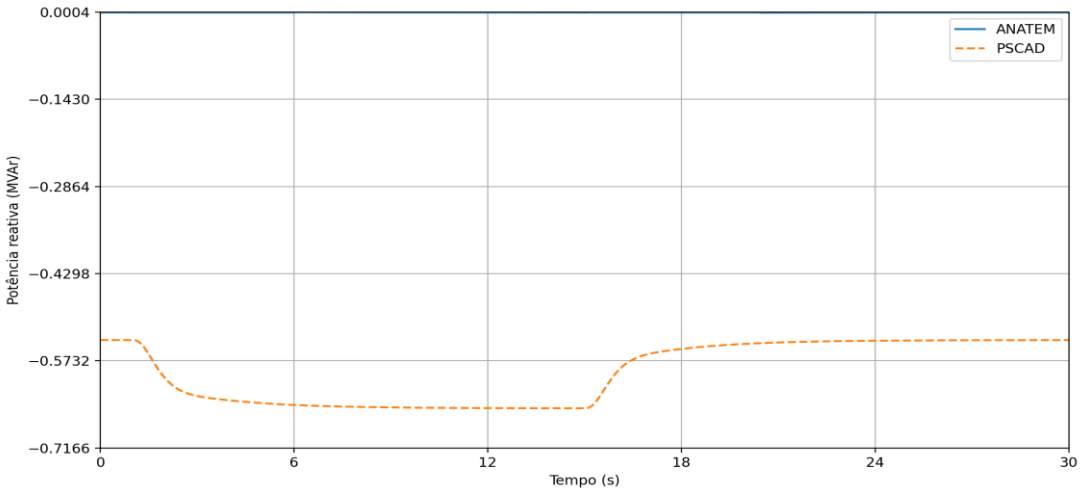

Figura 4-12 - Potência reativa

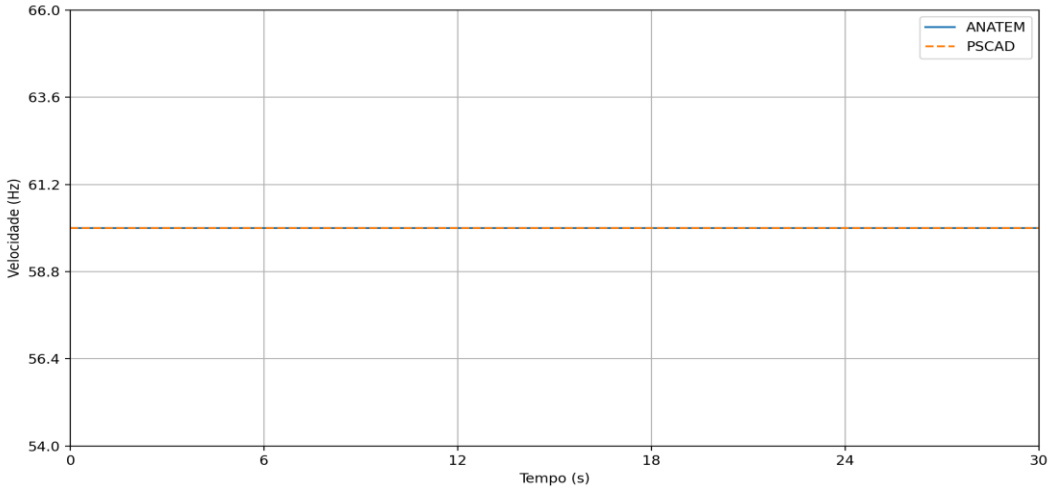

Figura 4-13 - Velocidade da máquina

4.1.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.1.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.1.4.2.

4.1.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

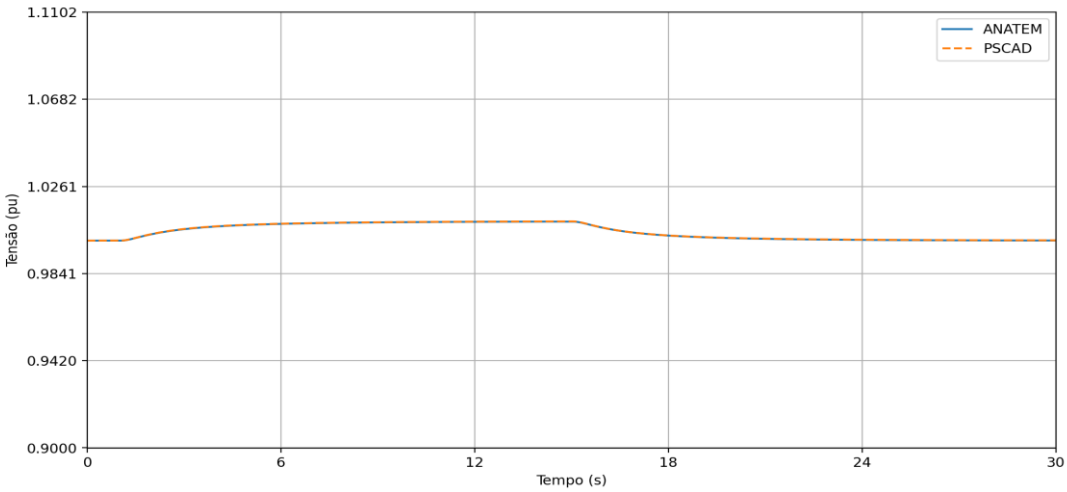

Figura 4-14 - Tensão terminal

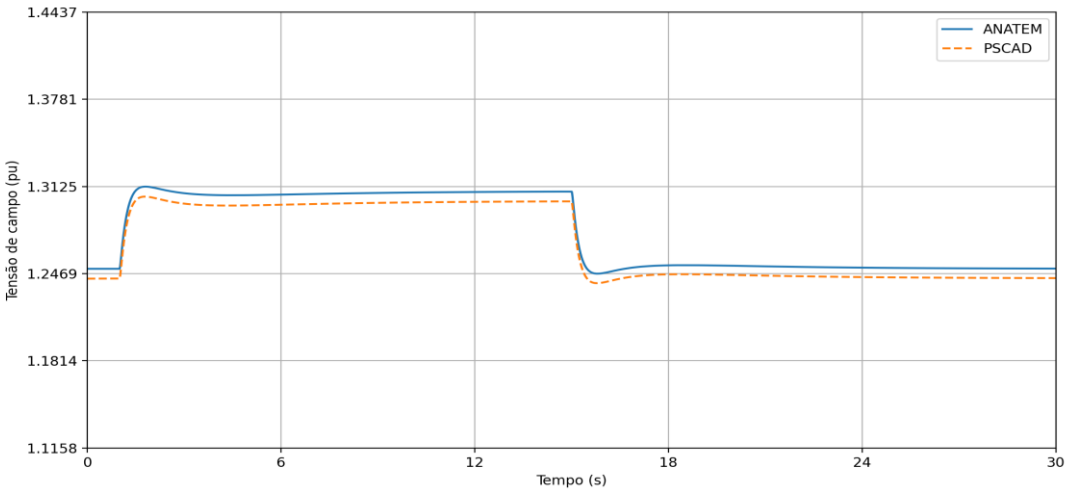

Figura 4-15 - Tensão de campo

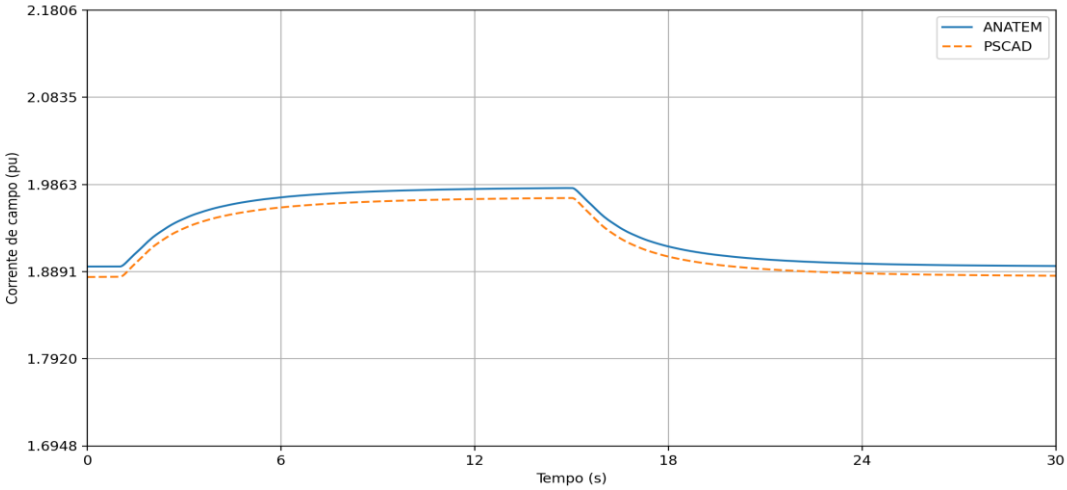

Figura 4-16 - Corrente de campo

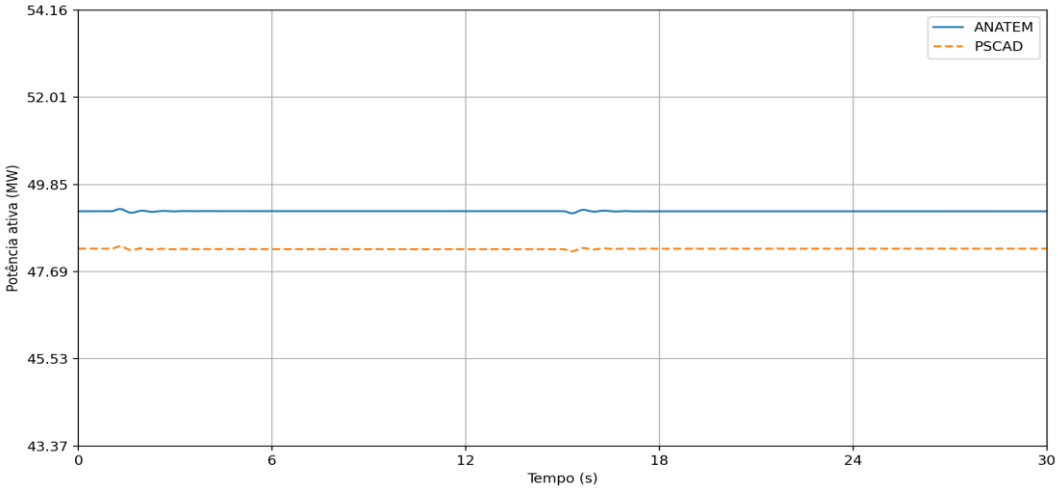

Figura 4-17 - Potência ativa

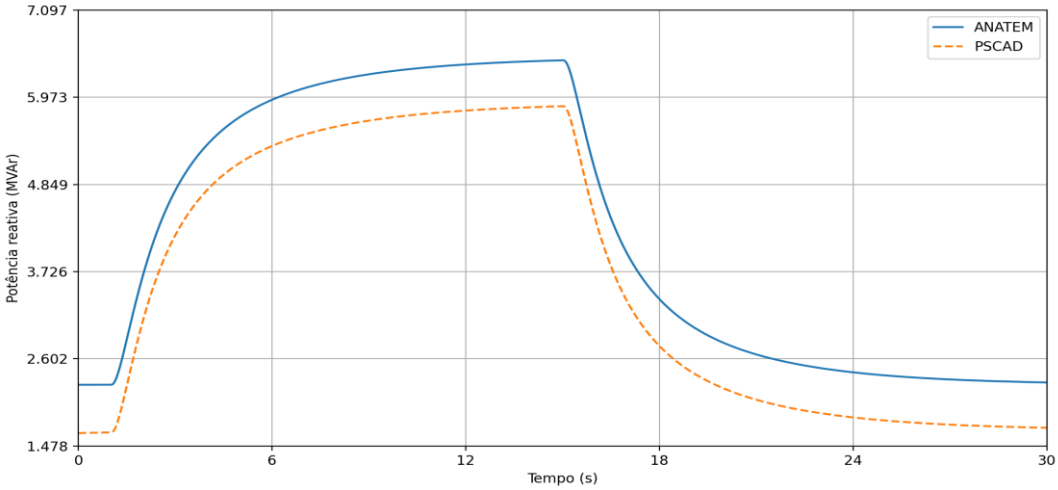

Figura 4-18 - Potência reativa

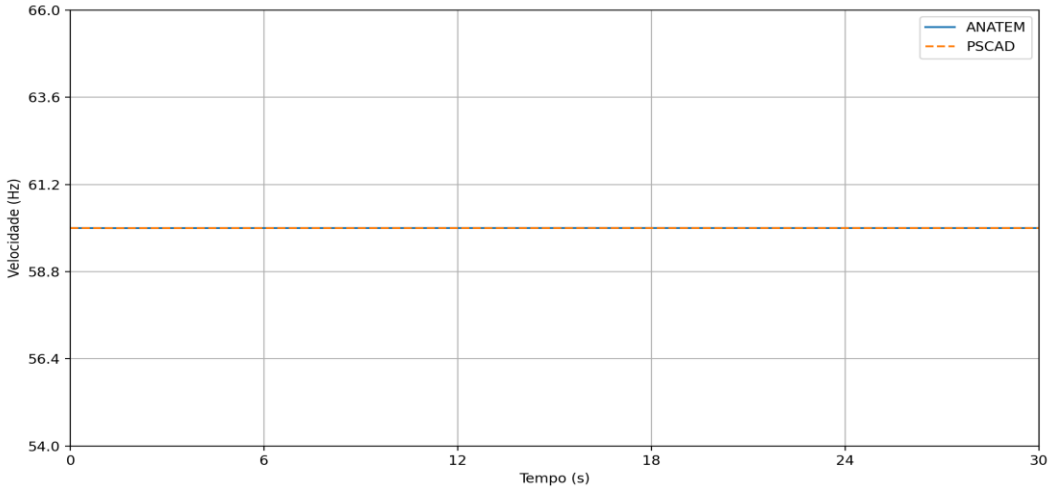

Figura 4-19 - Velocidade da máquina

4.1.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

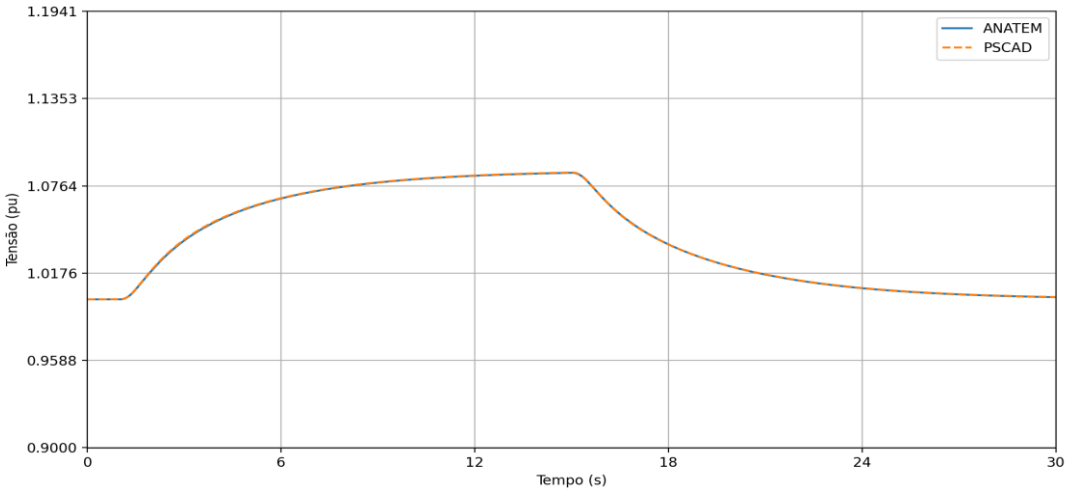

Figura 4-20 - Tensão terminal

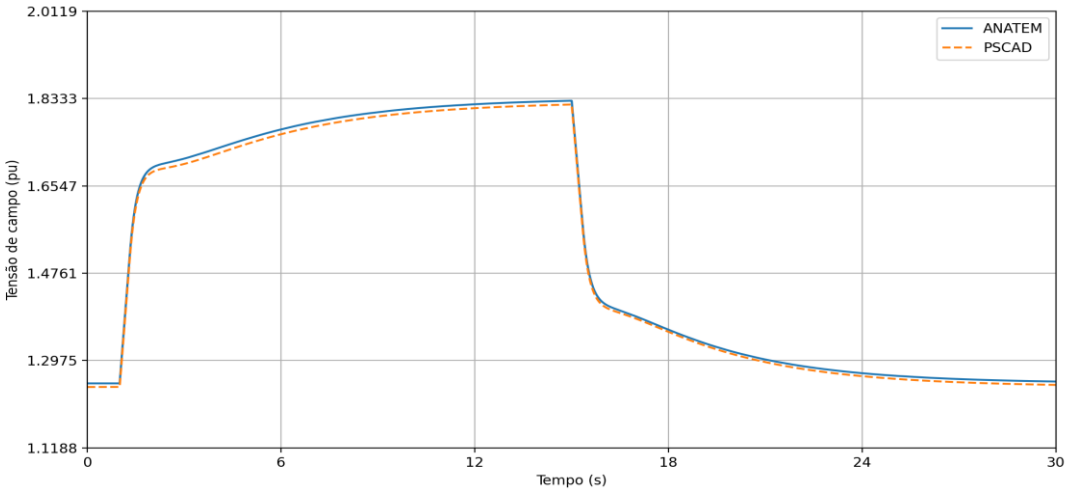

Figura 4-21 - Tensão de campo

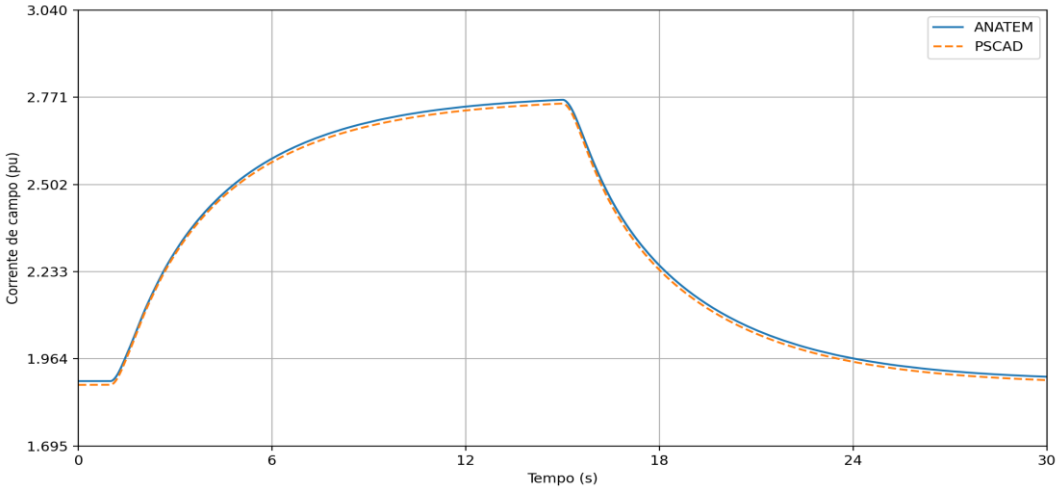

Figura 4-22 - Corrente de campo

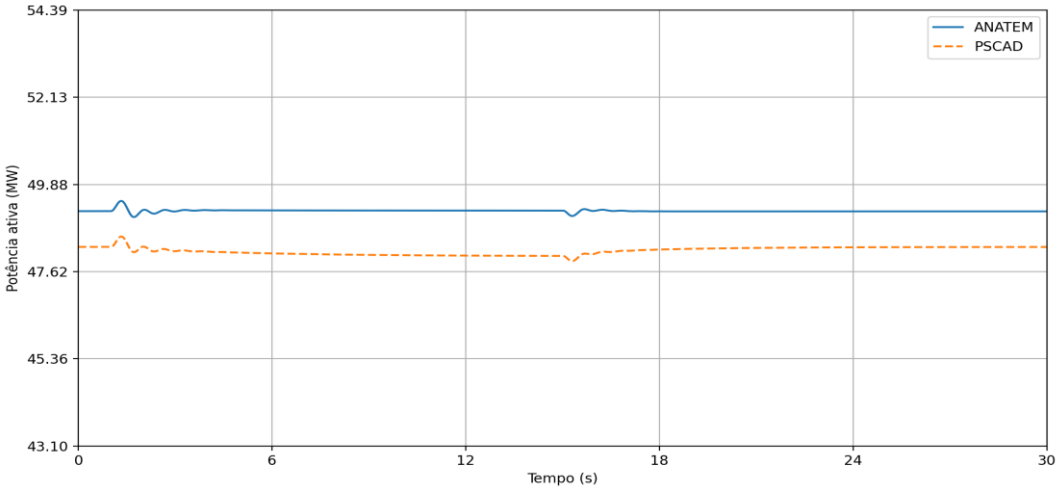

Figura 4-23 - Potência ativa

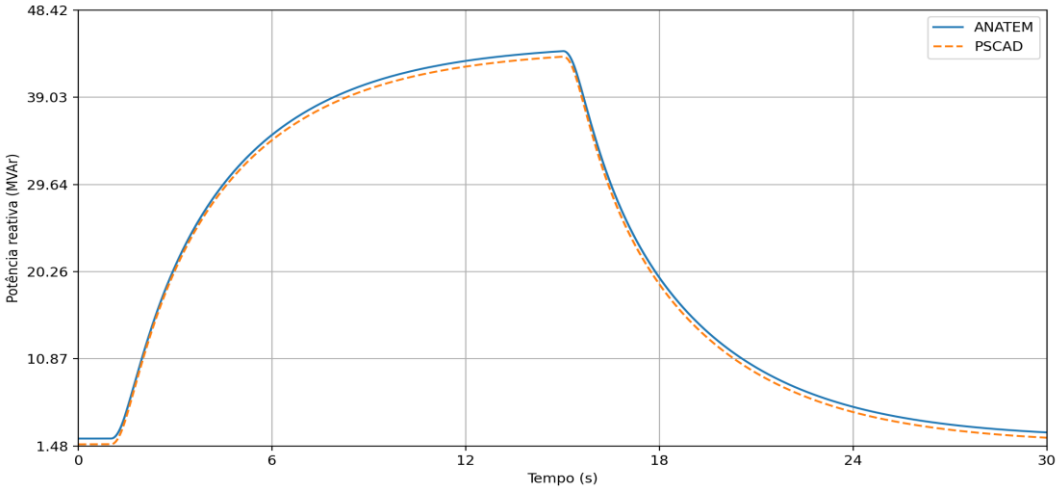

Figura 4-24 - Potência reativa

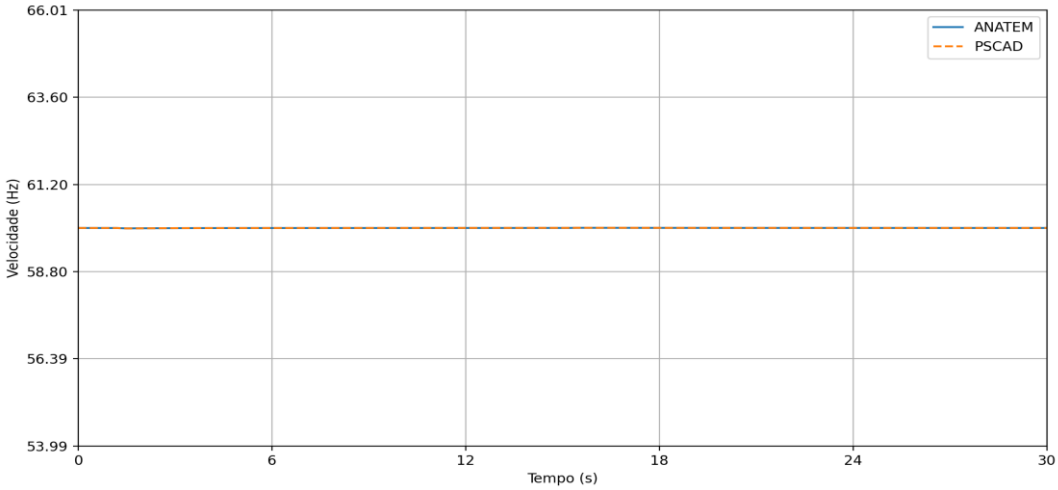

Figura 4-25 - Velocidade da máquina

4.2 UHE BOA ESPERANÇA 3

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Boa esperança 3, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão e velocidade, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.2.1 Modelo da UHE Boa esperança 3

A Tabela 4-4 apresenta os parâmetros da UHE Boa esperança 3 disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-4 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	100	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	68	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	30	I(KA)	2,803	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	22	H(s)	3,92	
xl(%)	7,5	D(pu)	0	
T'd(s)	6,89	Ra(pu)	0,004	
		xp(pu)	0,075	Reatância de Potier
T''d(s)	0,04	xd(pu)	1	
T''q(s)	0,11	xd_(pu)	0,3	x'd
Ra(%)	0,4	Td0_(s)	6,89	T'd
H(s)	3,92	xd__(pu)	0,22	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,04	T''d
S(MVA)	67	Xq(pu)	0,68	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,22	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,11	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.2.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-5, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Boa esperança 3 estão apresentados na Tabela 4-6. A partir dos parâmetros da Tabela 4-5, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-6. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-26.

Tabela 4-5 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Boa esperança 3	
Ag	**Y1**	0,04724
Bg	**Y2**	6,97121
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-6 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,847	0,800
1,084	0,950
1,135	0,975
1,19	1,000
1,273	1,033
1,371	1,067
1,482	1,100
1,968	1,200
2,842	1,300

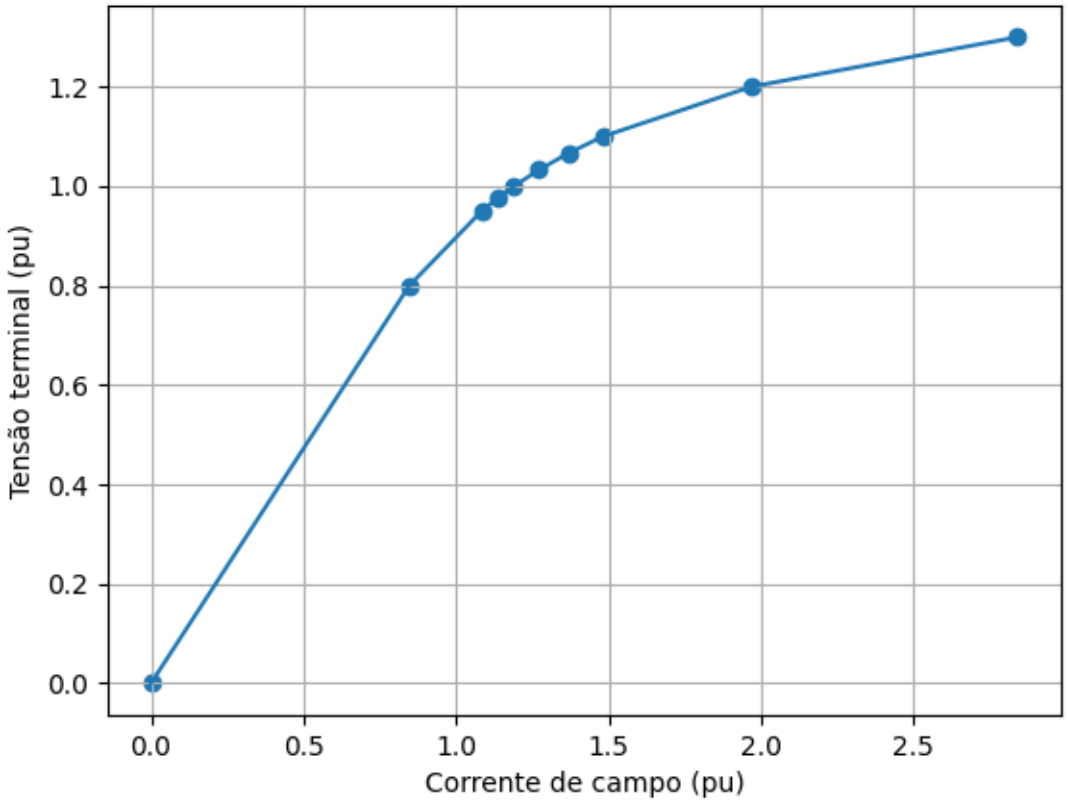

Figura 4-26 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.2.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.2.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.2.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.2.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

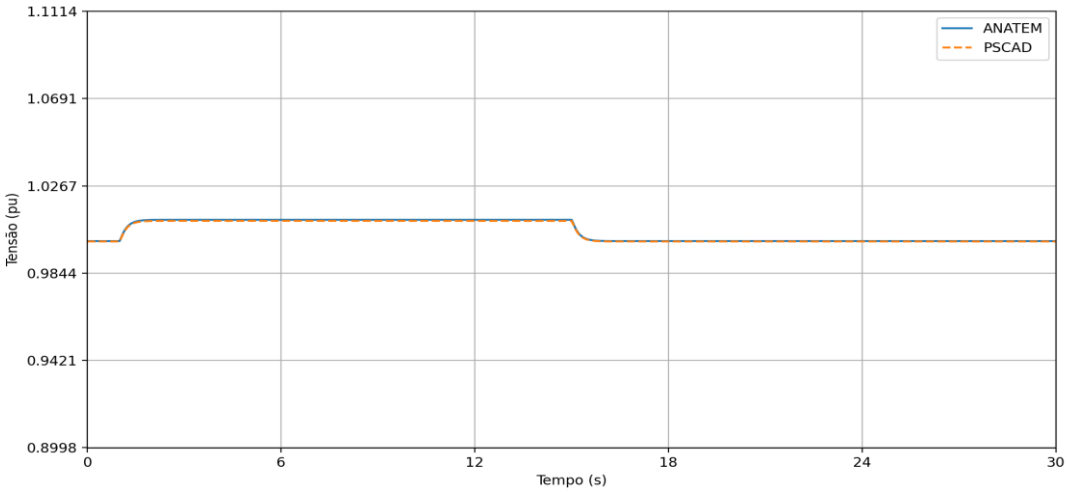

Figura 4-27 - Tensão terminal

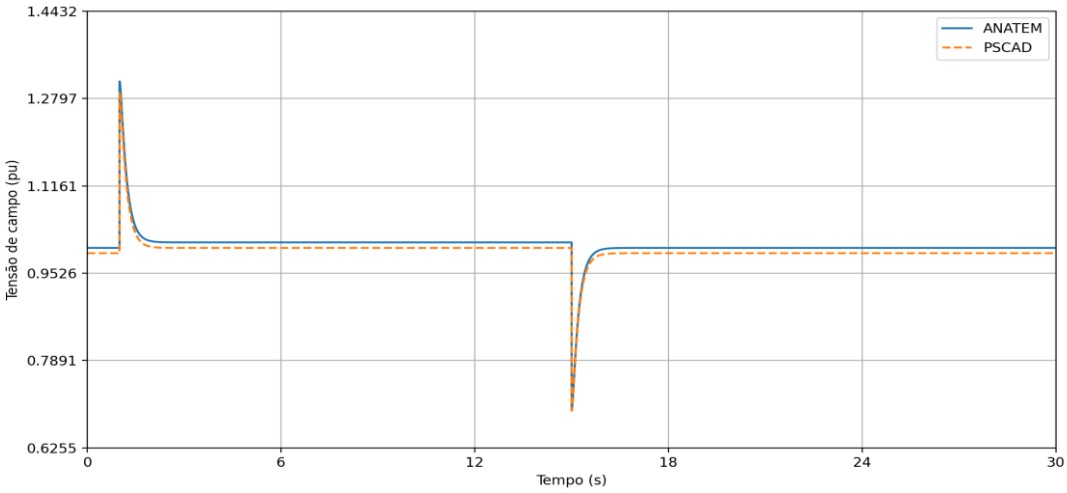

Figura 4-28 - Tensão de campo

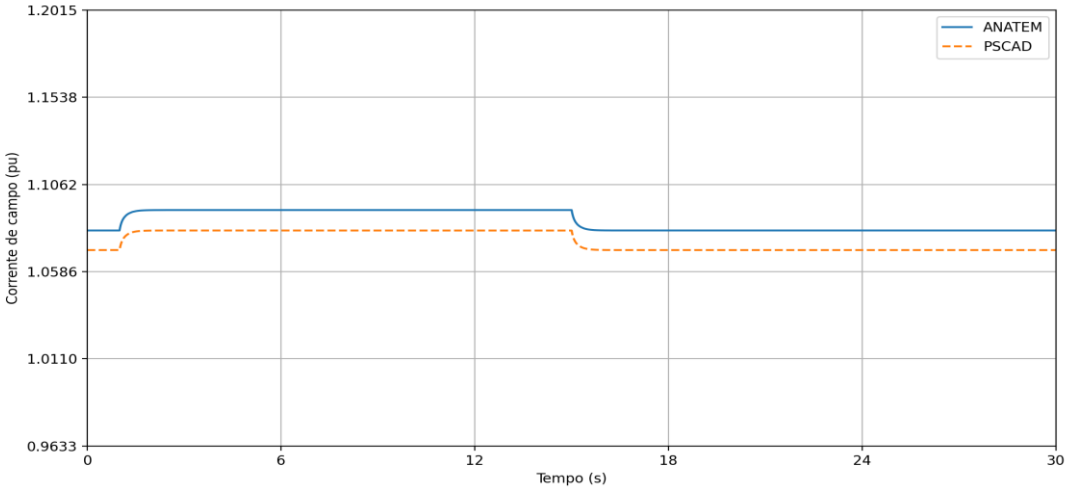

Figura 4-29 - Corrente de campo

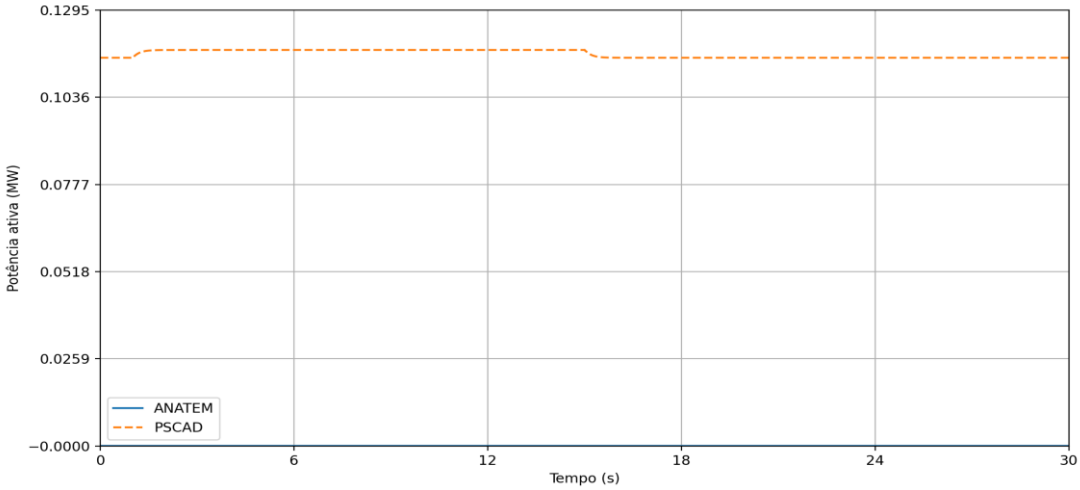

Figura 4-30 - Potência ativa

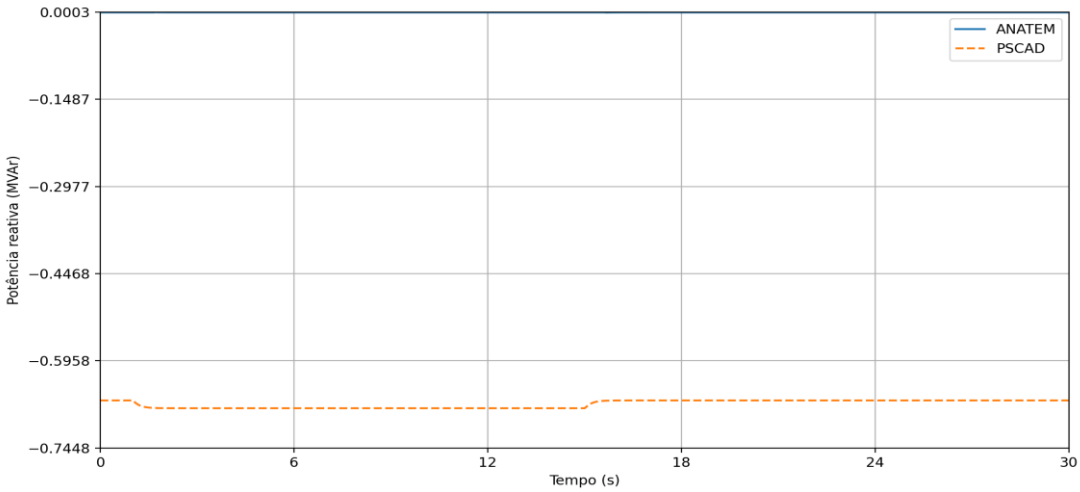

Figura 4-31 - Potência reativa

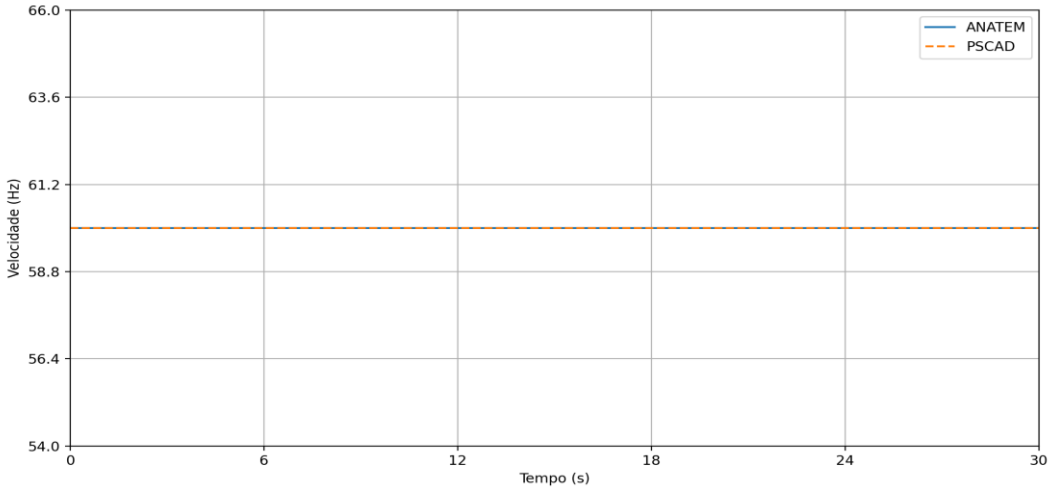

Figura 4-32 - Velocidade da máquina

4.2.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

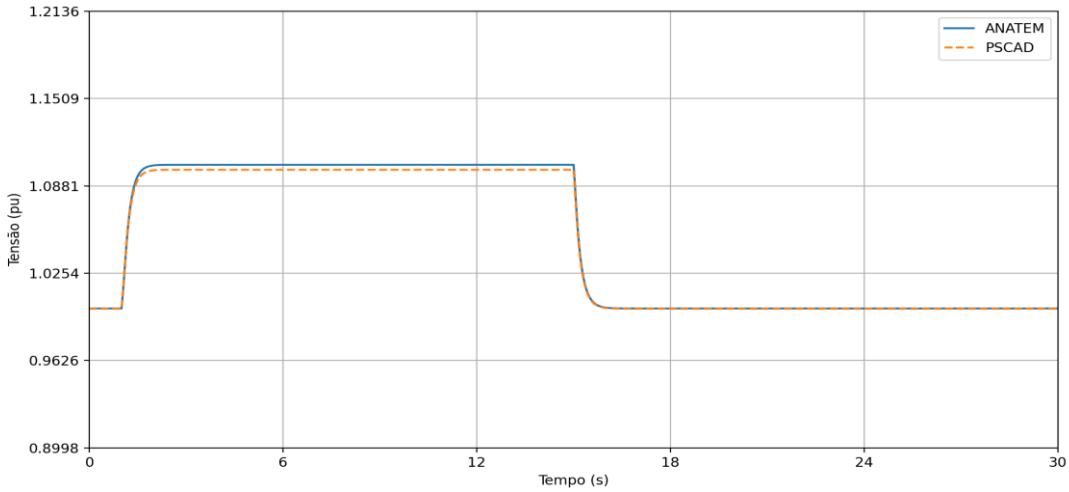

Figura 4-33 - Tensão terminal

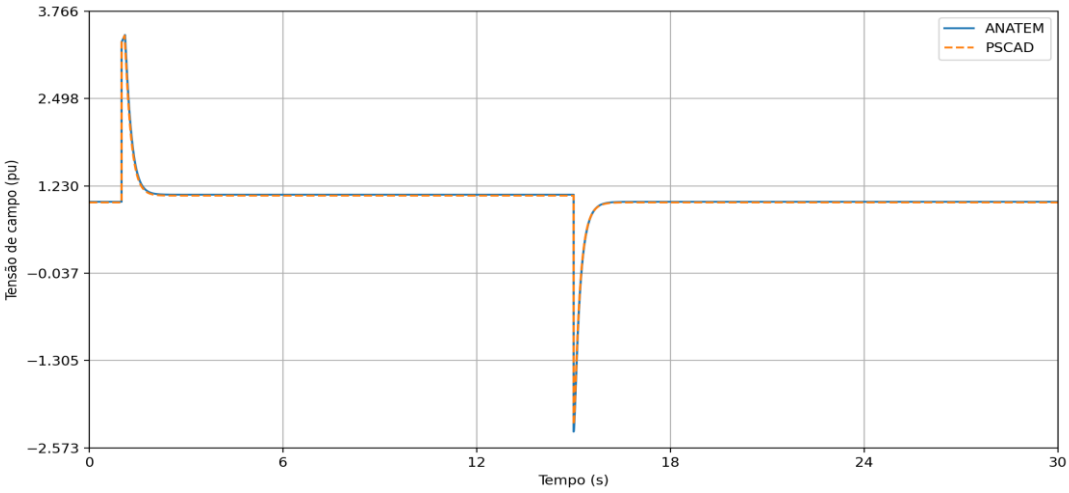

Figura 4-34 - Tensão de campo

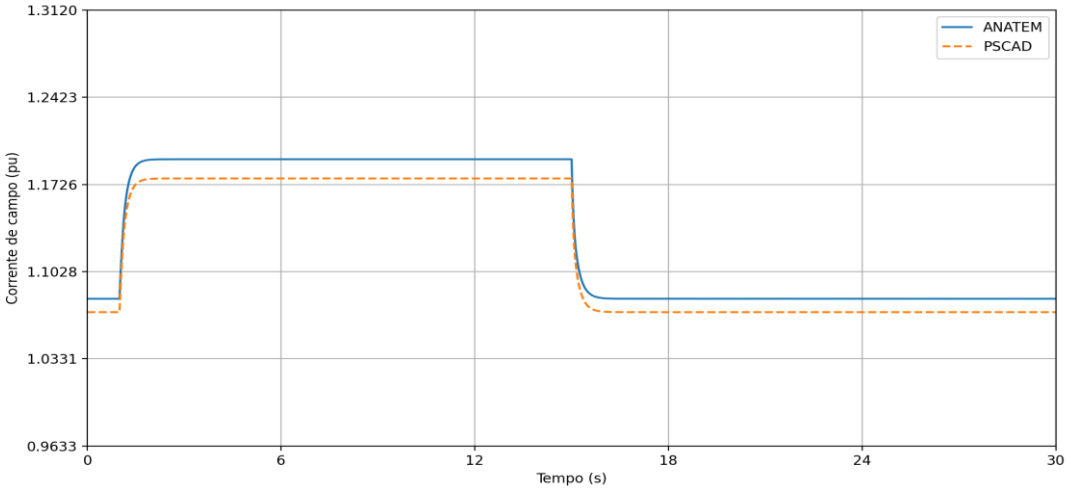

Figura 4-35 - Corrente de campo

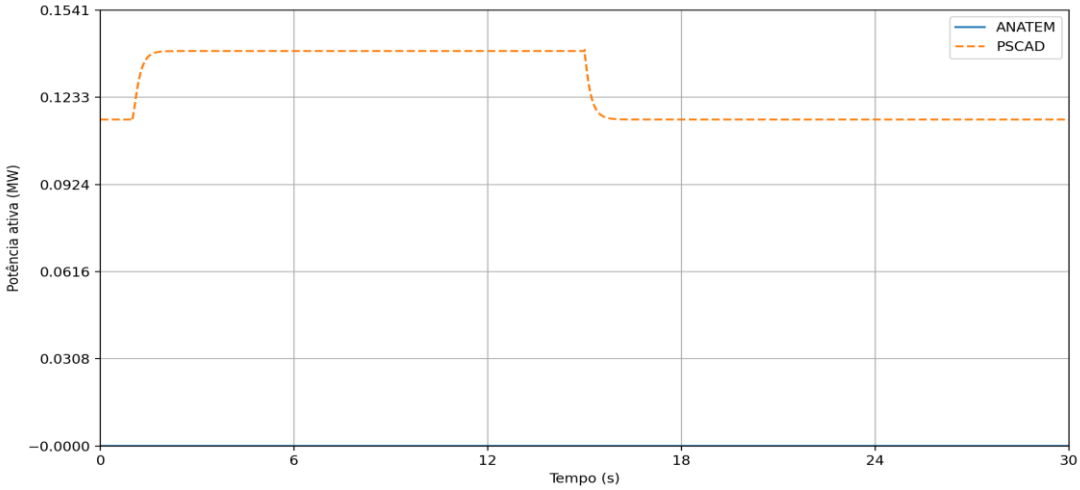

Figura 4-36 - Potência ativa

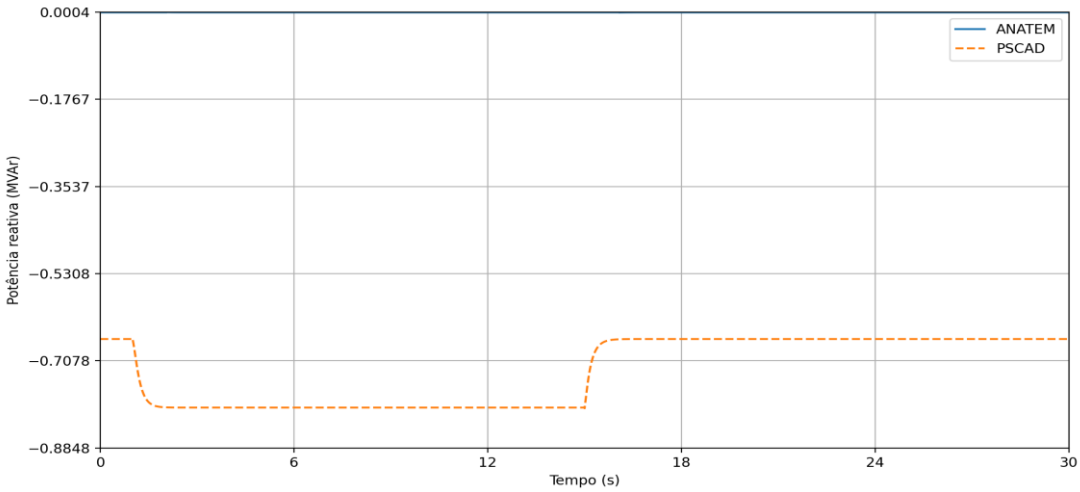

Figura 4-37 - Potência reativa

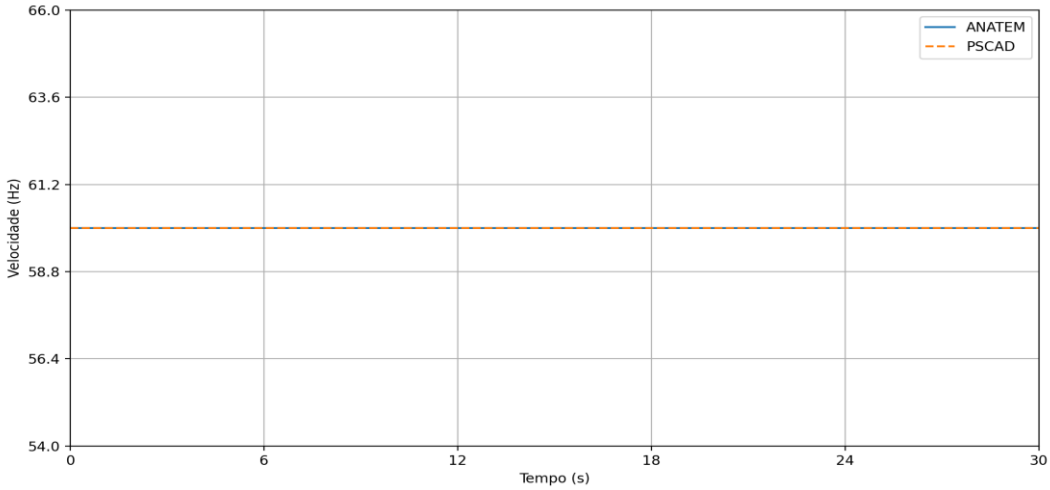

Figura 4-38 - Velocidade da máquina

4.2.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.2.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.2.4.2.

4.2.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

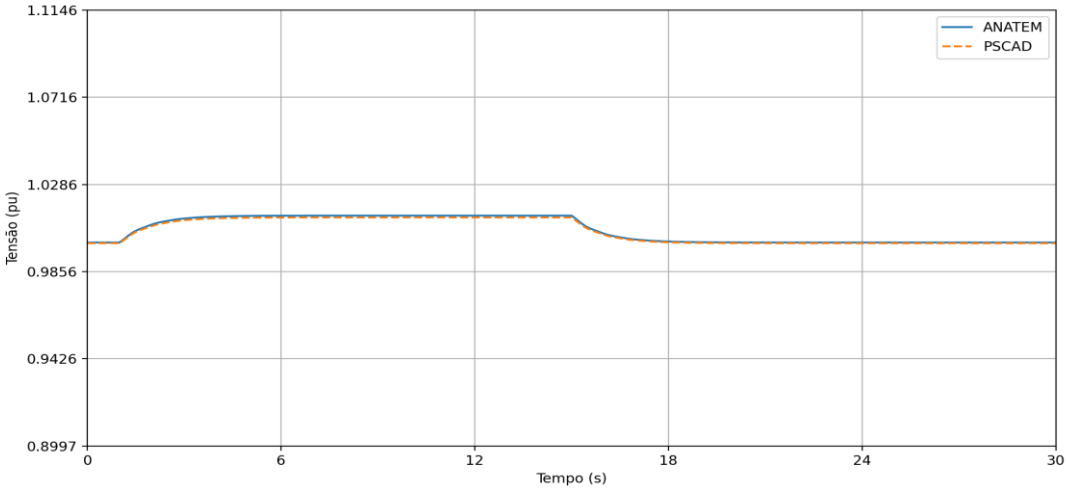

Figura 4-39 - Tensão terminal

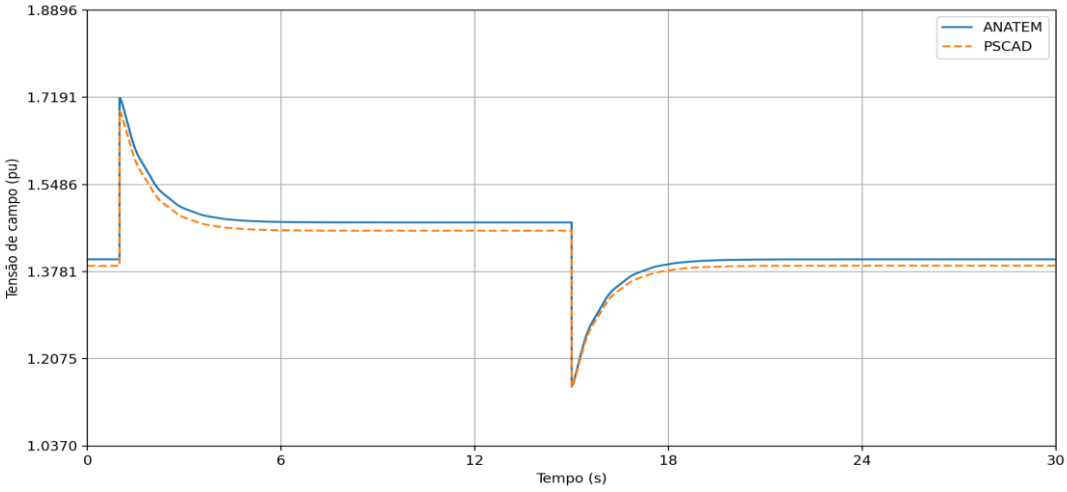

Figura 4-40 - Tensão de campo

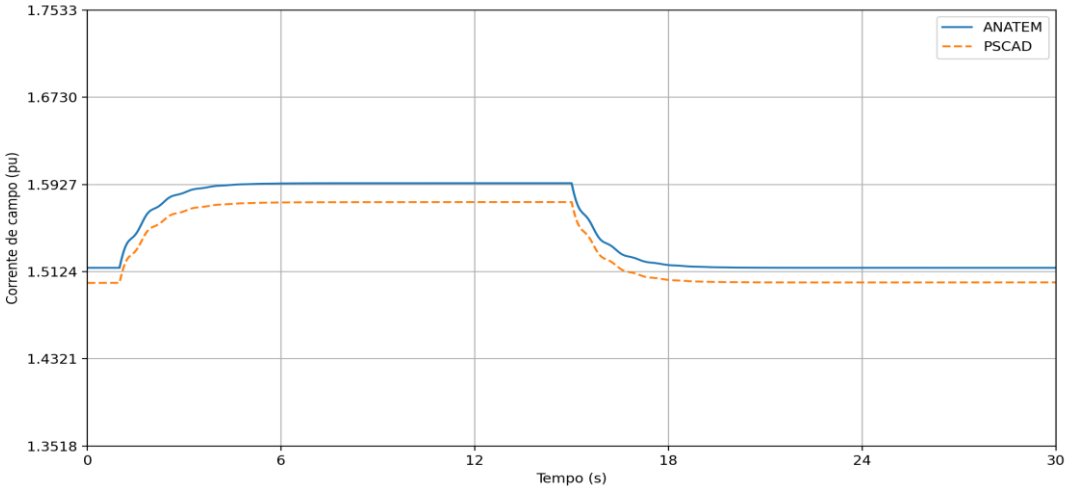

Figura 4-41 - Corrente de campo

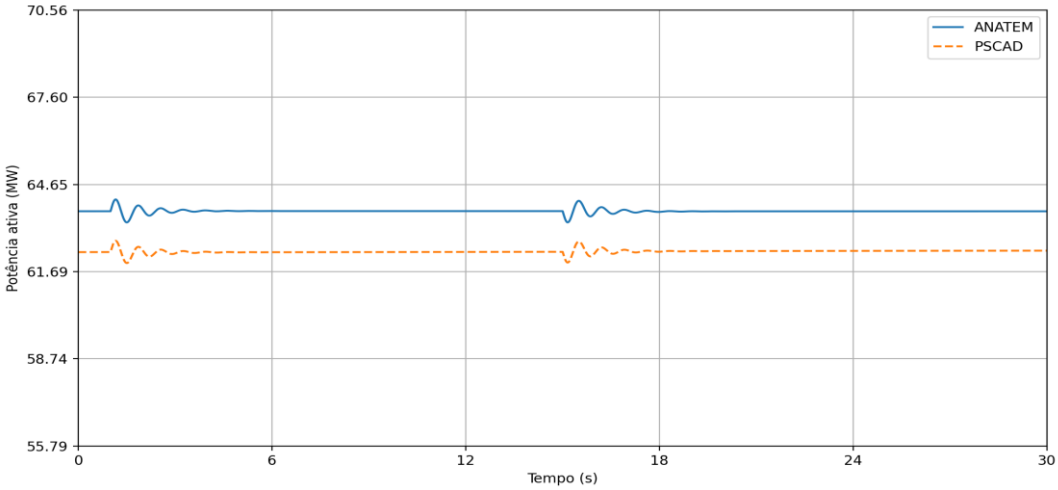

Figura 4-42 - Potência ativa

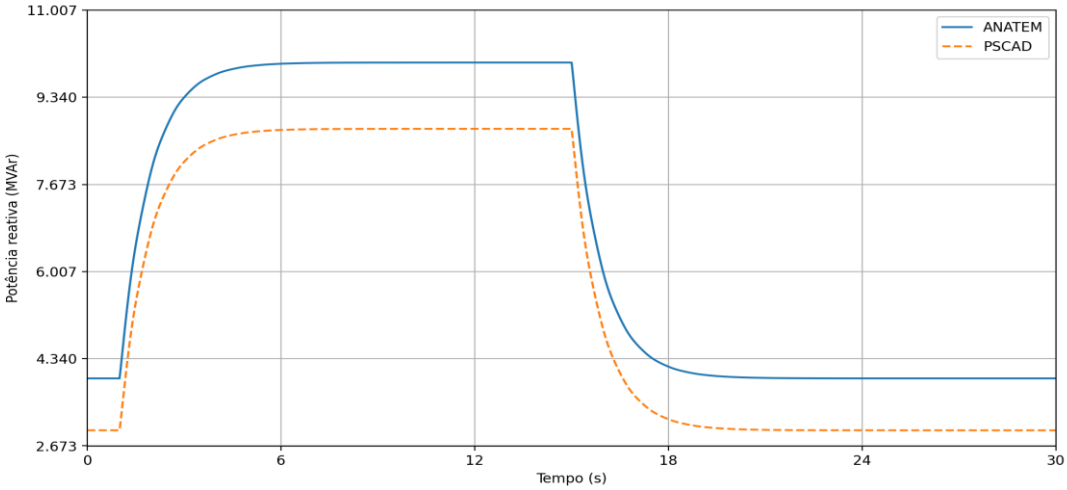

Figura 4-43 - Potência reativa

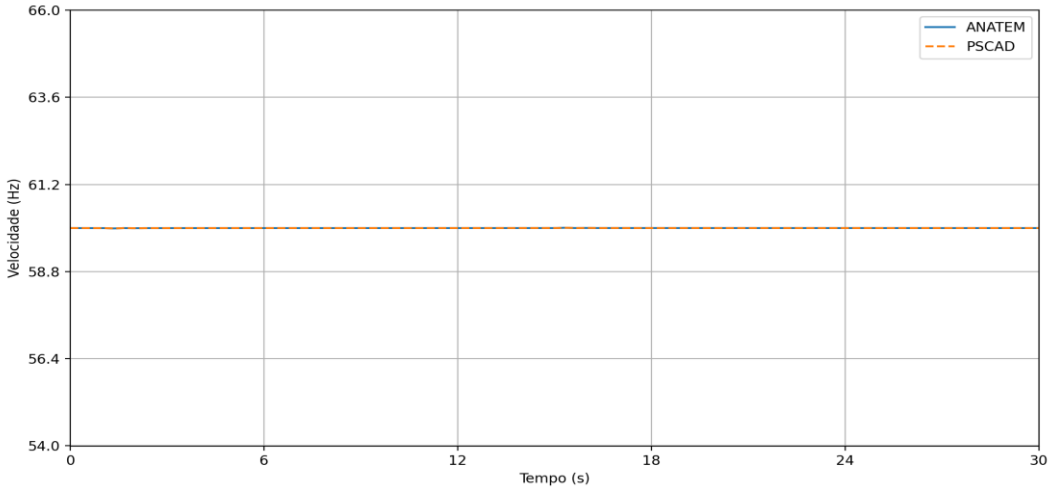

Figura 4-44 - Velocidade da máquina

4.2.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

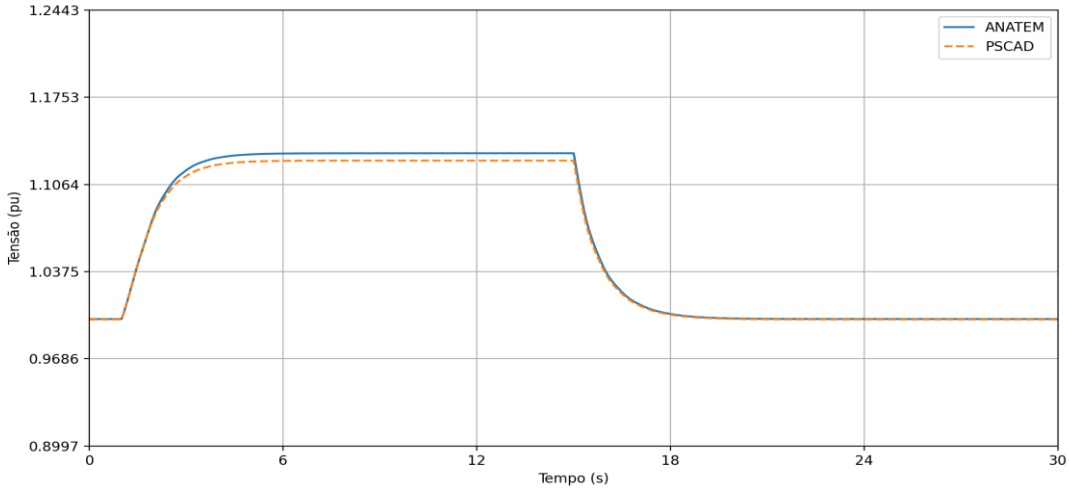

Figura 4-45 - Tensão terminal

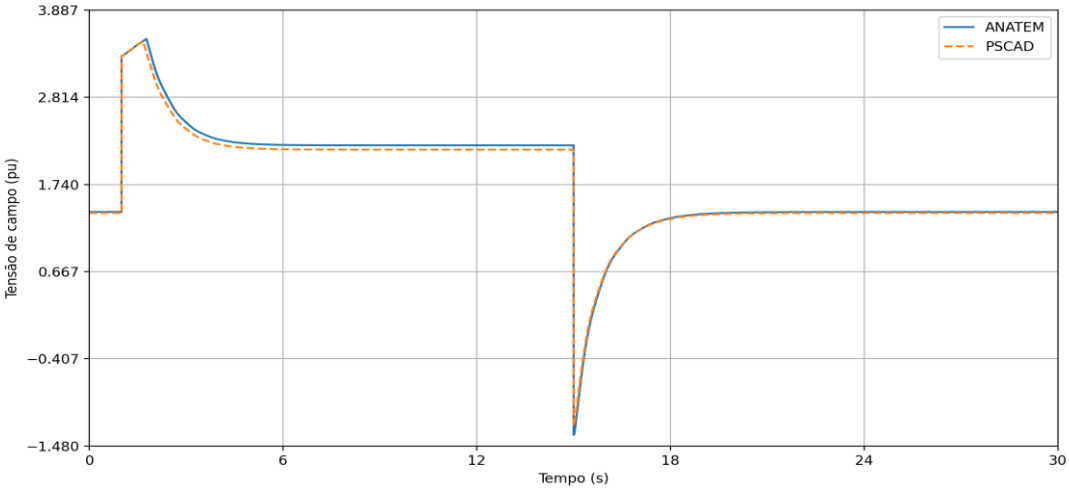

Figura 4-46 - Tensão de campo

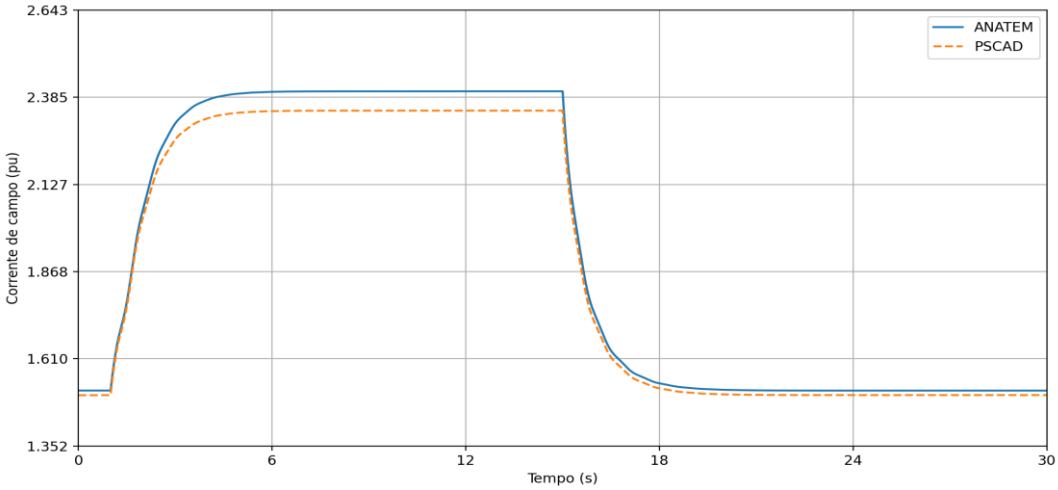

Figura 4-47 - Corrente de campo

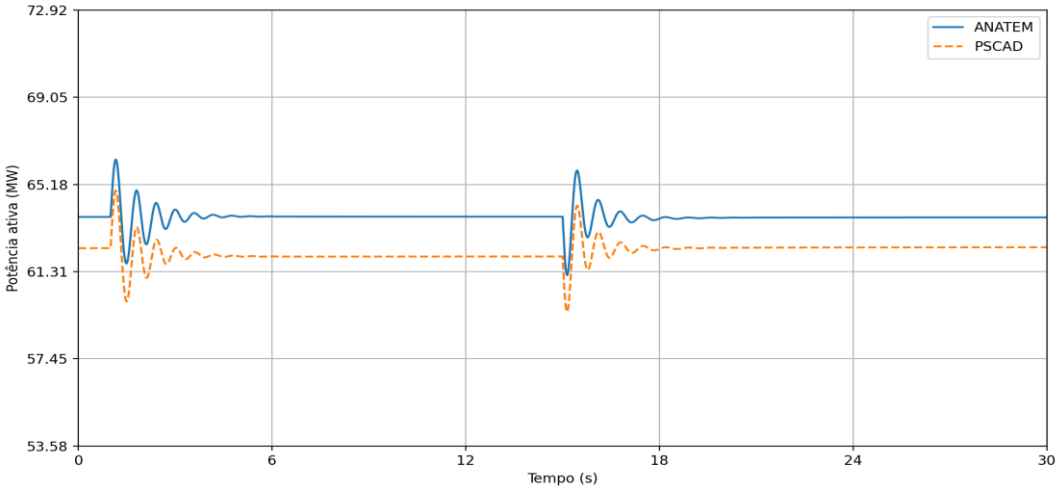

Figura 4-48 - Potência ativa

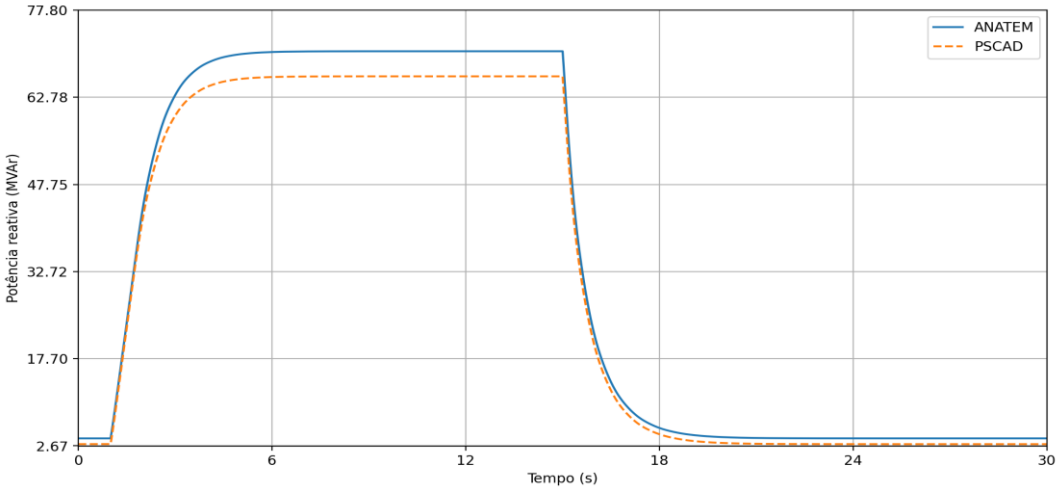

Figura 4-49 - Potência reativa

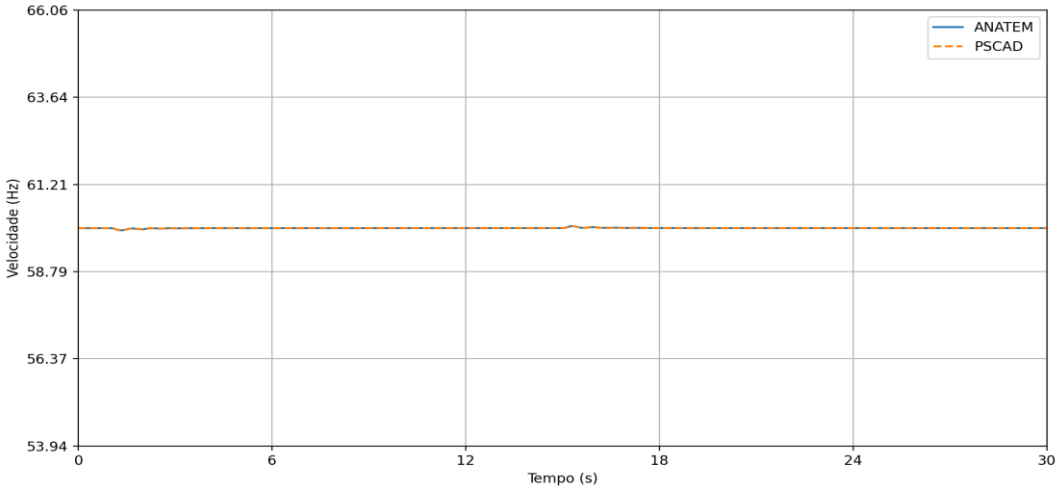

Figura 4-50 - Velocidade da máquina

4.3 CS BOA ESPERANÇA 4

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Boa Esperança 4, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.3.1 Modelo do CS Boa Esperança 4

A Tabela 4-7 apresenta os parâmetros do CS Boa Esperança 4 disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-7 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	100	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	68	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	30	I(KA)	2,803	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	22	H(s)	3,92	
xl(%)	7,5	D(pu)	0	
T'd(s)	6,89	Ra(pu)	0,004	
		xp(pu)	0,075	Reatância de Potier
T''d(s)	0,04	xd(pu)	1	
T''q(s)	0,11	xd_(pu)	0,3	x'd
Ra(%)	0,4	Td0_(s)	6,89	T'd
H(s)	3,92	xd__(pu)	0,22	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,04	T''d
S(MVA)	67	Xq(pu)	0,68	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,22	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,11	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.3.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-8, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Boa Esperança 4 estão apresentados na Tabela 4-9.

A partir dos parâmetros da Tabela 4-8, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-9. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-51.

Tabela 4-8 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Boa Esperança 4	
Ag	**Y1**	0,04724
Bg	**Y2**	6,97121
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-9 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,847	0,800
1,084	0,950
1,135	0,975
1,19	1,000
1,273	1,033
1,371	1,067
1,482	1,100
1,968	1,200
2,842	1,300

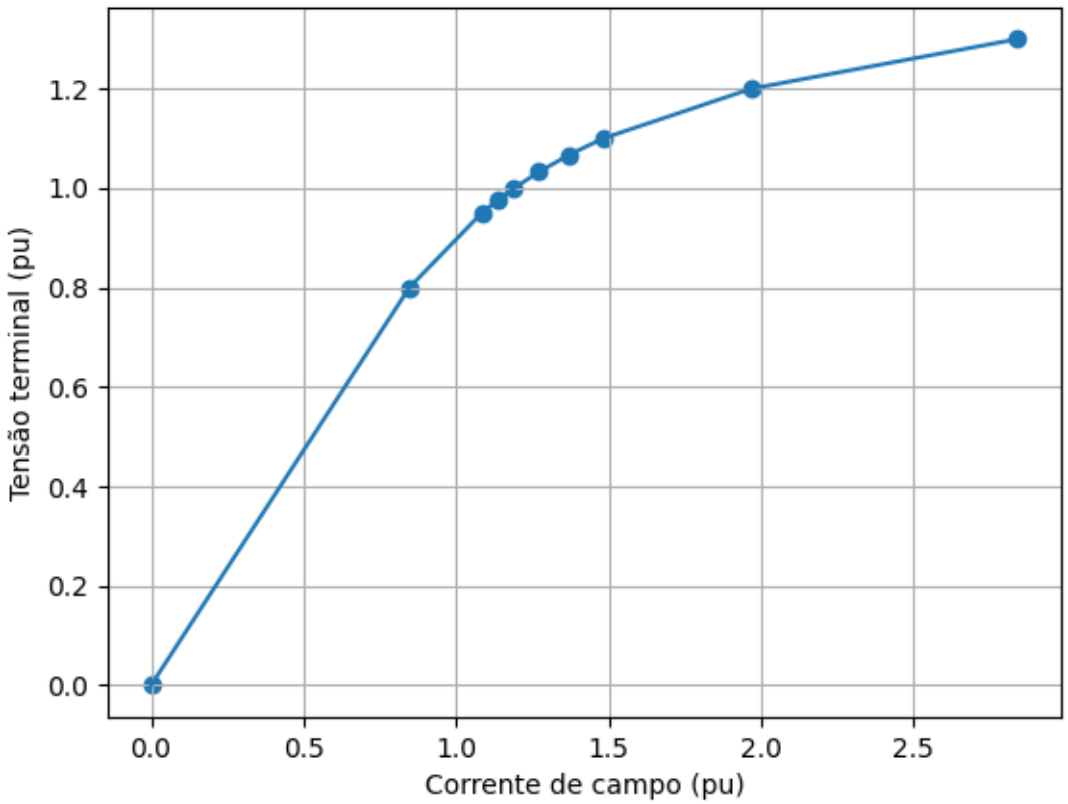

Figura 4-51 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.3.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.3.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.3.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.3.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

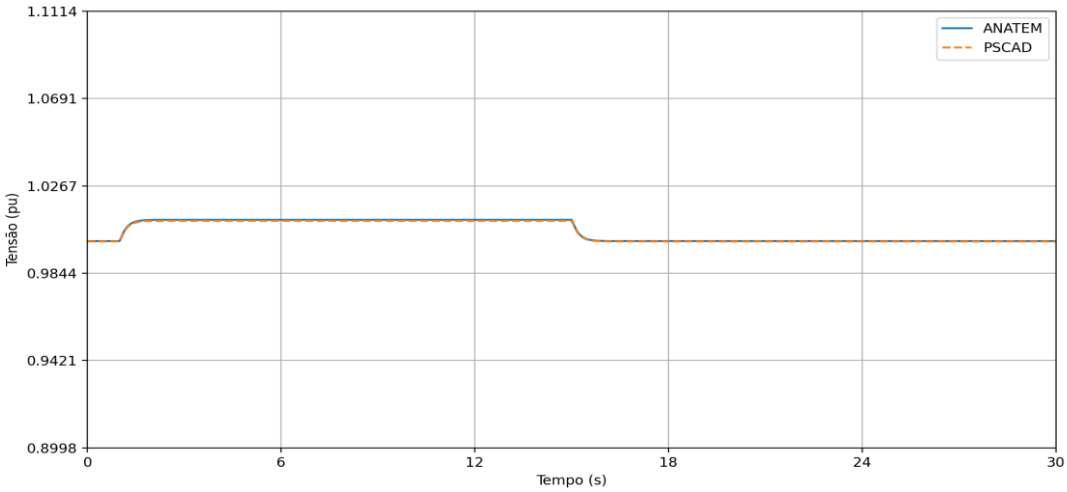

Figura 4-52 - Tensão terminal

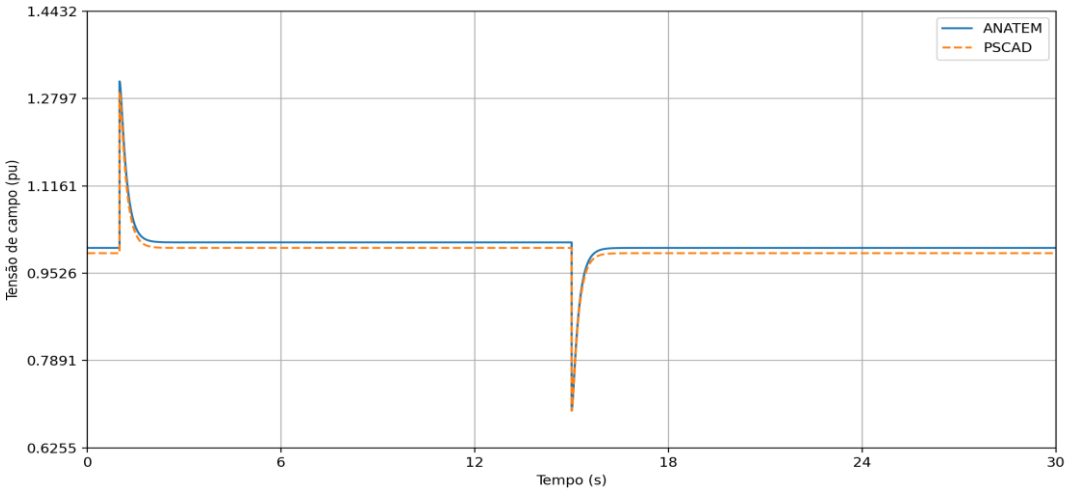

Figura 4-53 - Tensão de campo

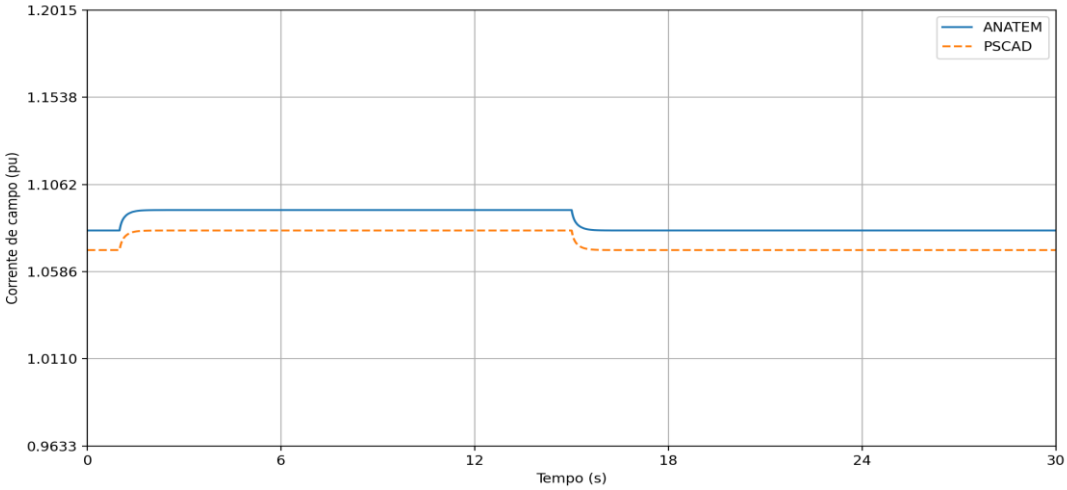

Figura 4-54 - Corrente de campo

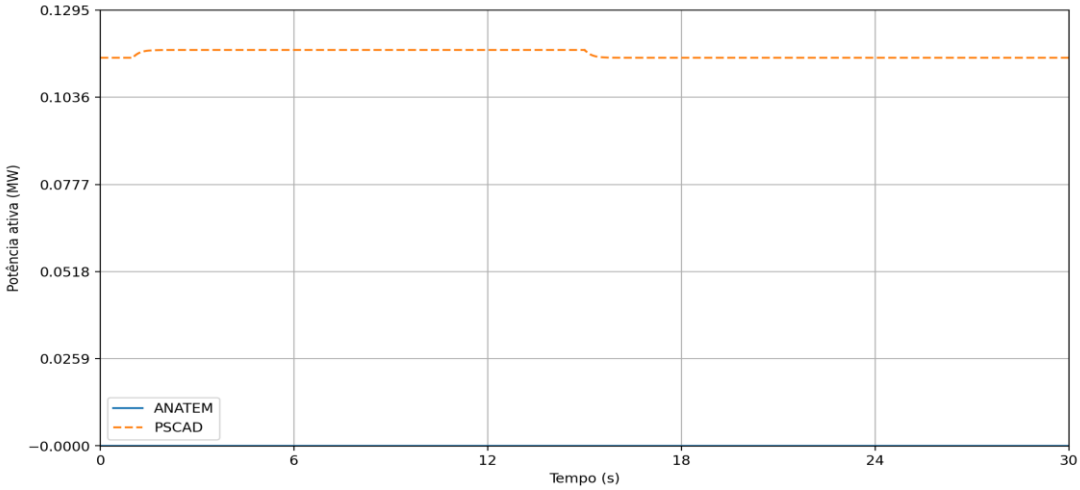

Figura 4-55 - Potência ativa

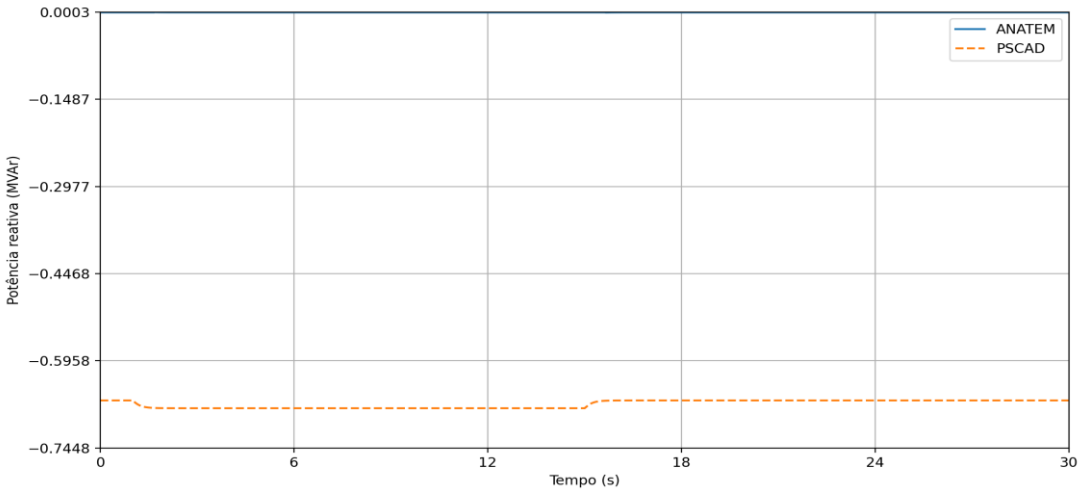

Figura 4-56 - Potência reativa

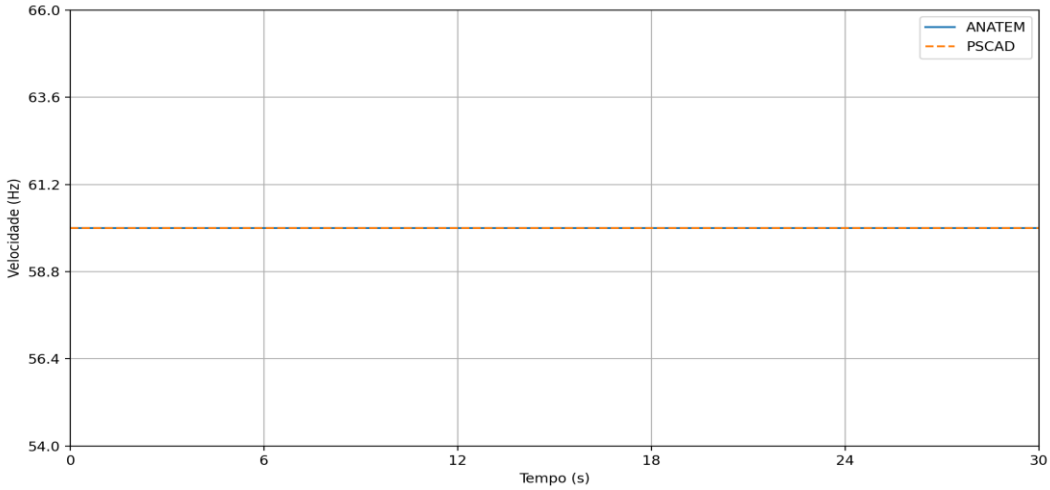

Figura 4-57 - Velocidade da máquina

4.3.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

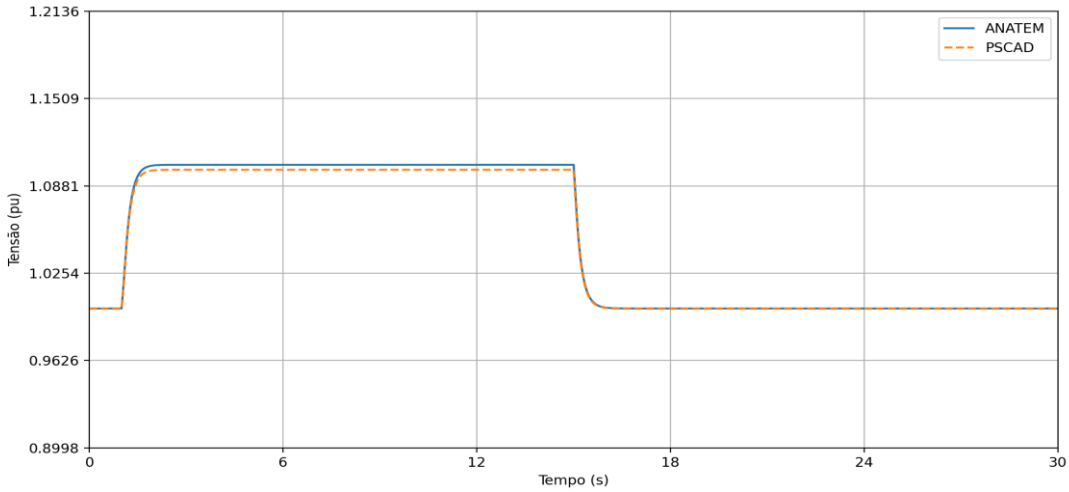

Figura 4-58 - Tensão terminal

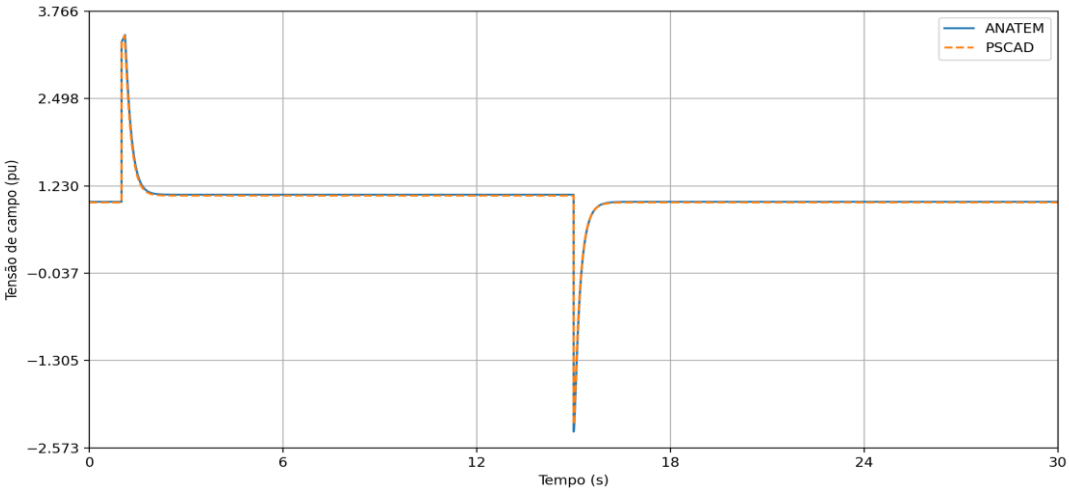

Figura 4-59 - Tensão de campo

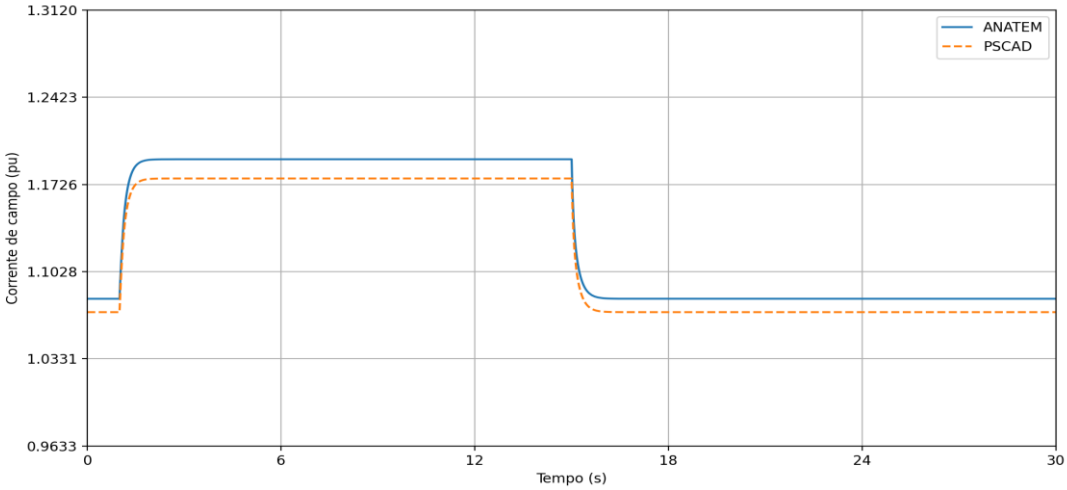

Figura 4-60 - Corrente de campo

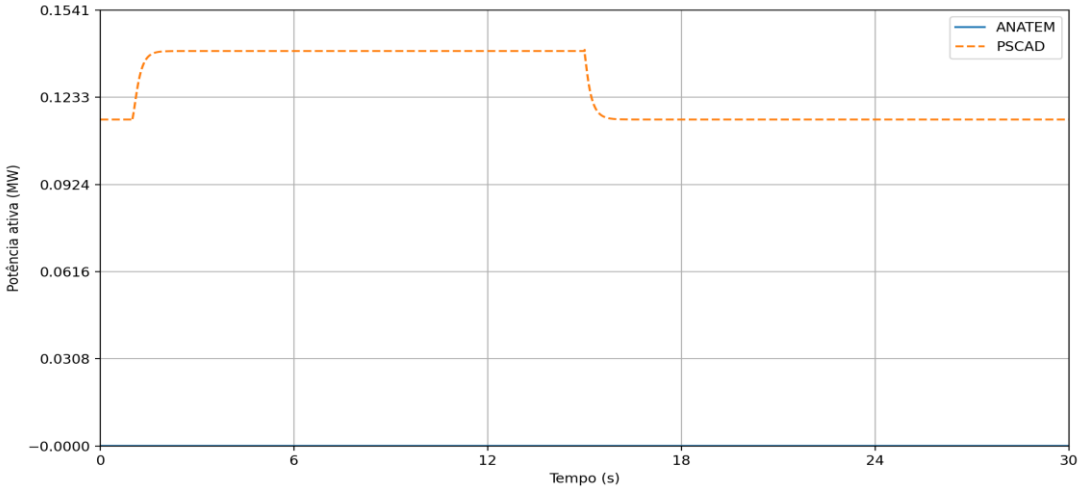

Figura 4-61 - Potência ativa

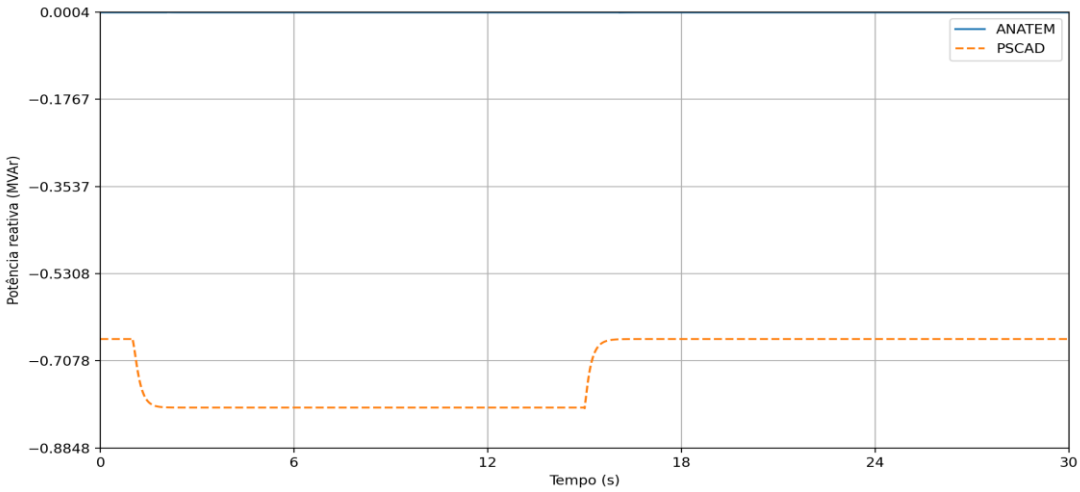

Figura 4-62 - Potência reativa

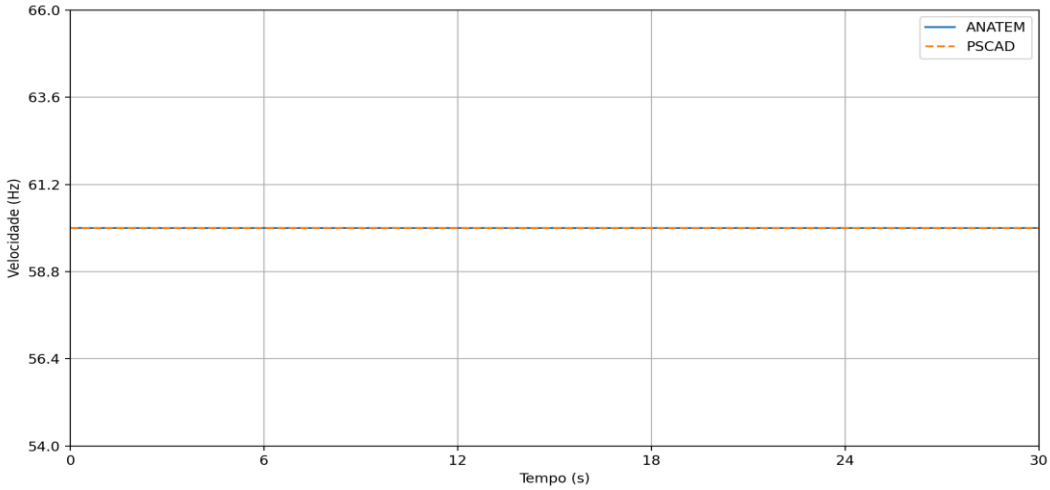

Figura 4-63 - Velocidade da máquina

4.3.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.3.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.3.4.2.

4.3.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

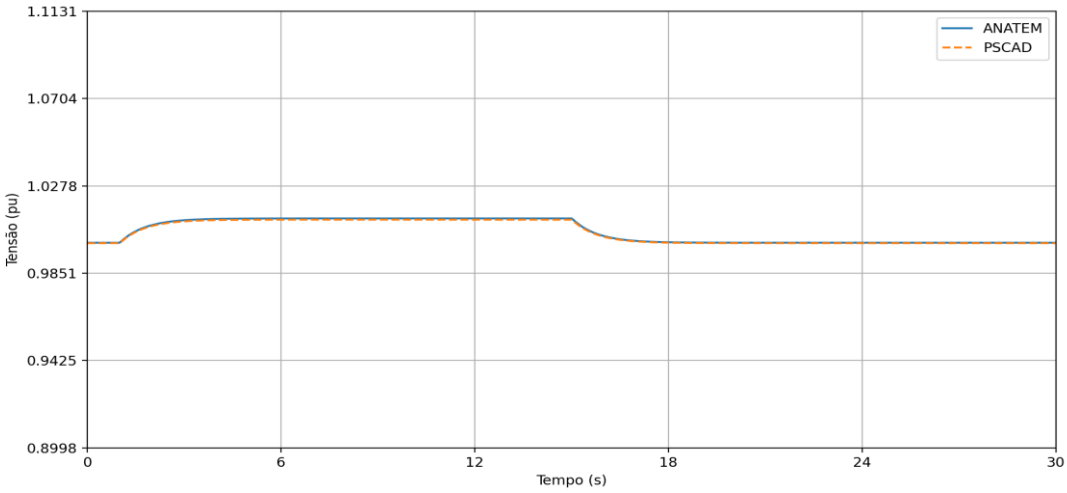

Figura 4-64 - Tensão terminal

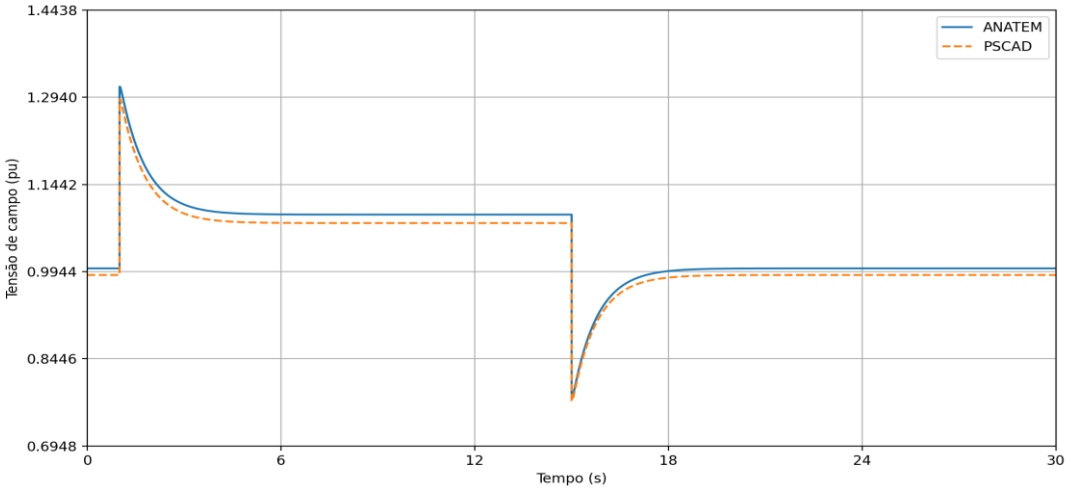

Figura 4-65 - Tensão de campo

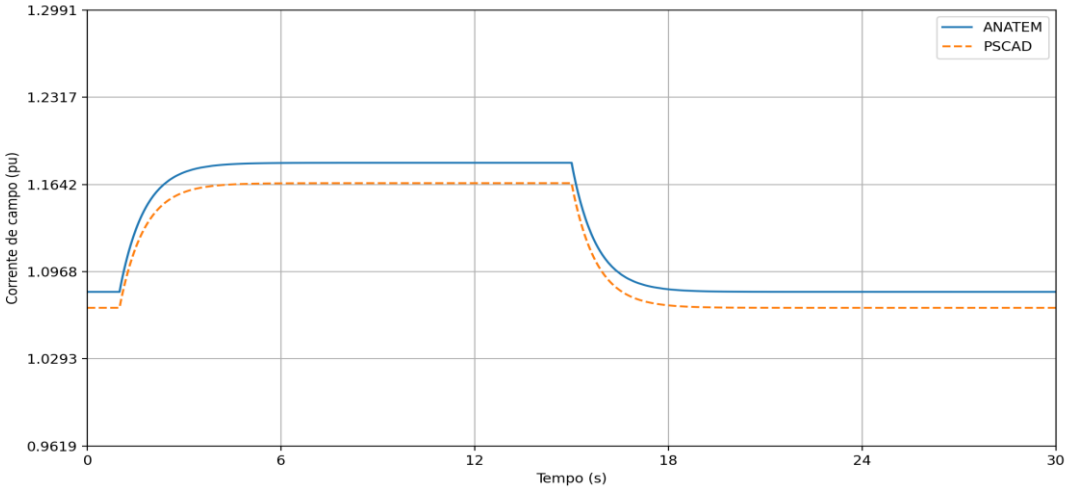

Figura 4-66 - Corrente de campo

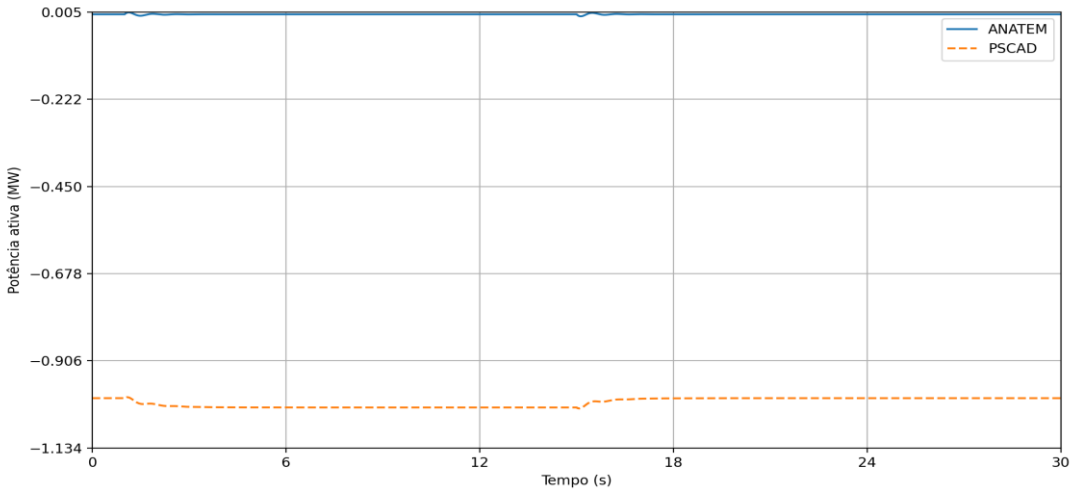

Figura 4-67 - Potência ativa

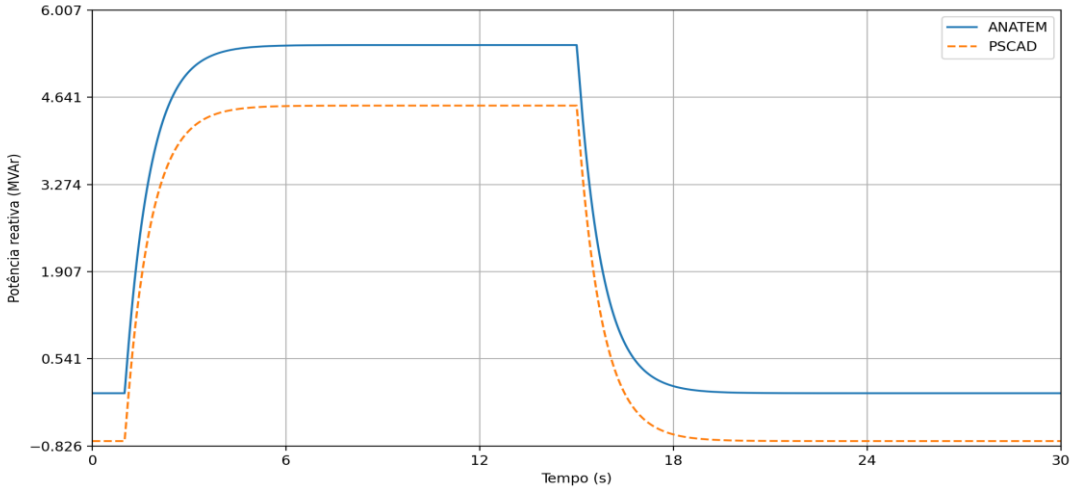

Figura 4-68 - Potência reativa

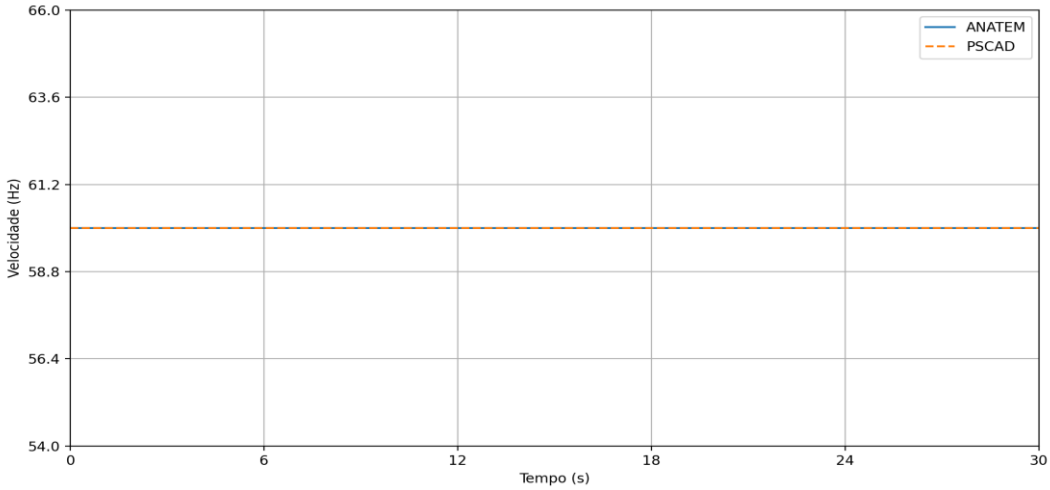

Figura 4-69 - Velocidade da máquina

4.3.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

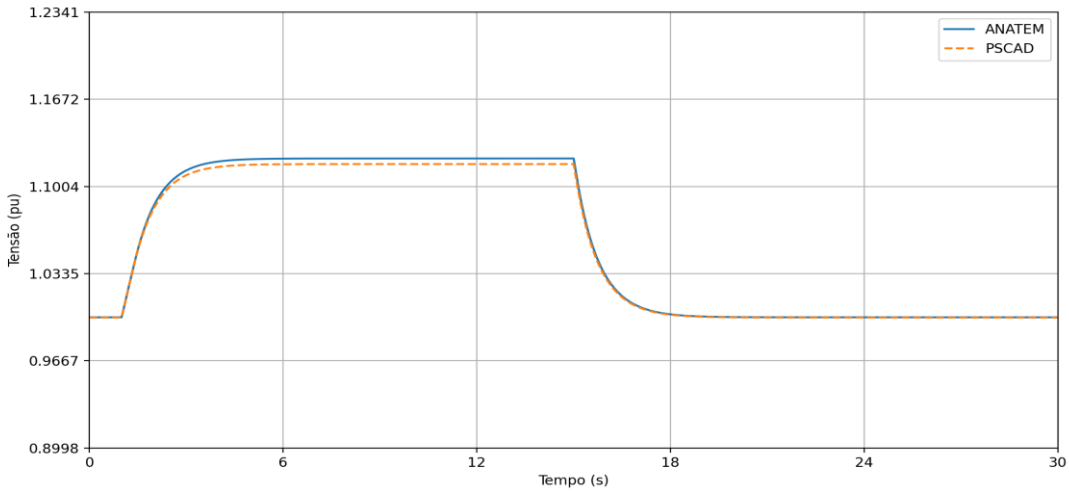

Figura 4-70 - Tensão terminal

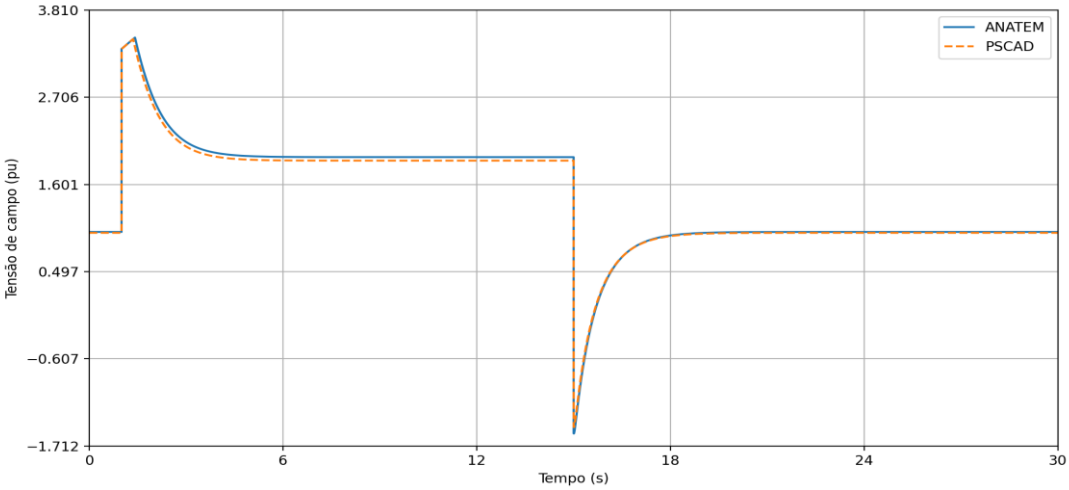

Figura 4-71 - Tensão de campo

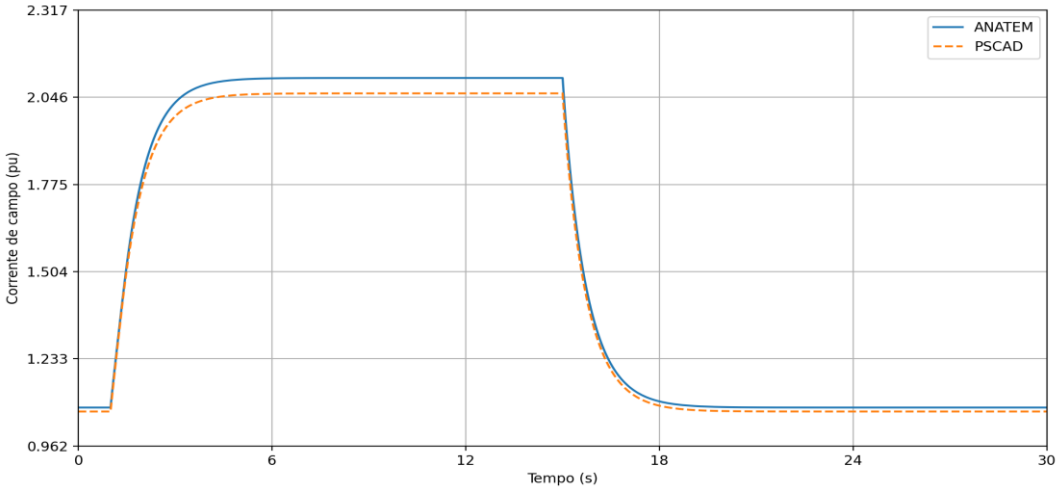

Figura 4-72 - Corrente de campo

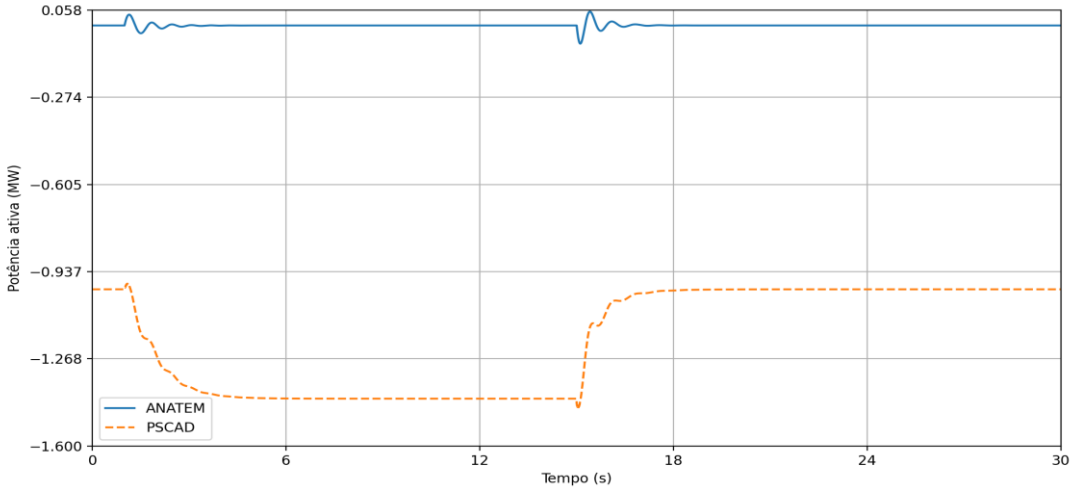

Figura 4-73 - Potência ativa

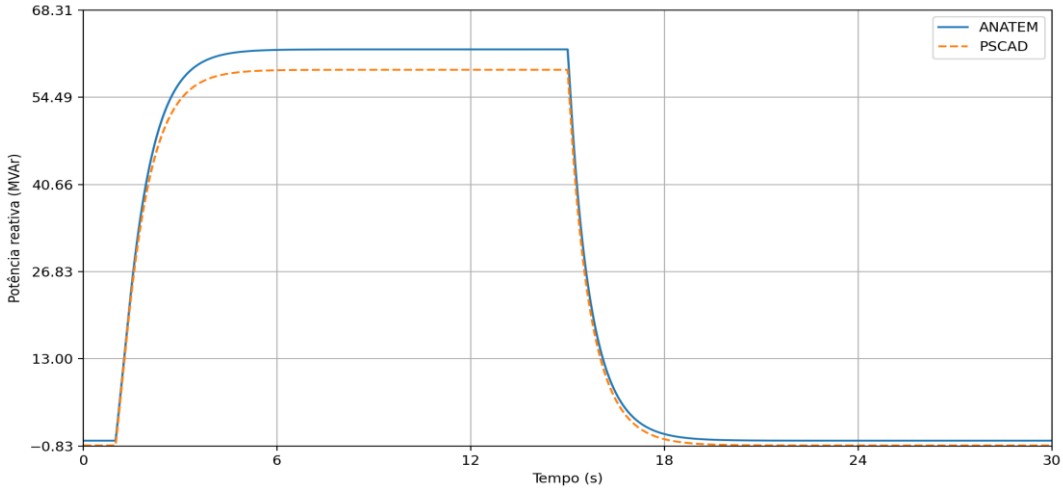

Figura 4-74 - Potência reativa

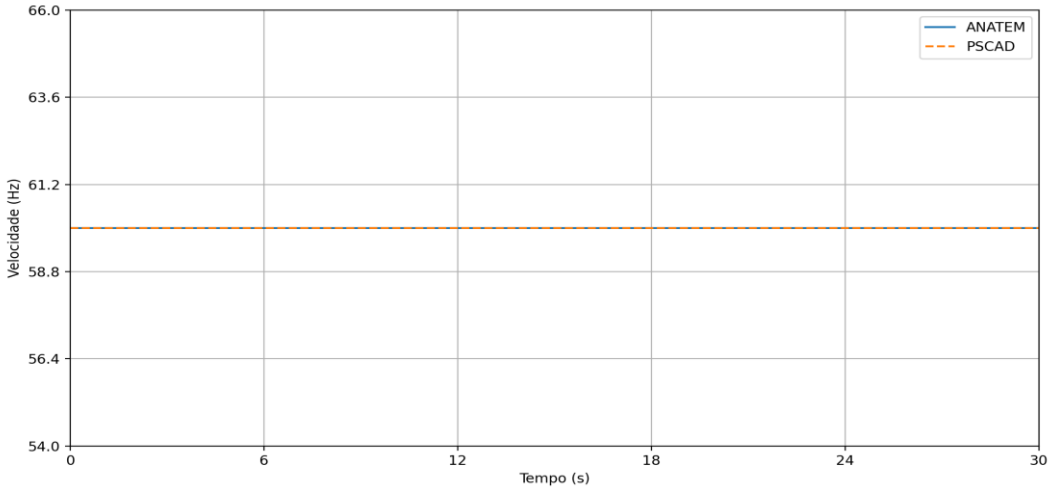

Figura 4-75 - Velocidade da máquina

4.4 UHE TUCURUÍ 1

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Tucuruí 1, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.4.1 Modelo da UHE Tucuruí 1

A Tabela 4-10 - Parâmetros da máquina síncrona apresenta os parâmetros da UHE Tucuruí 1 disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-10 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	79	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	50	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	25	I(KA)	14,643	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	17	H(s)	4,667	
xl(%)	12	D(pu)	0	
T'd(s)	5,5	Ra(pu)	0,003	
		xp(pu)	0,12	Reatância de Potier
T''d(s)	0,08	xd(pu)	0,79	
T''q(s)	0,15	xd_(pu)	0,25	x'd
Ra(%)	0,333	Td0_(s)	5,5	T'd
H(s)	4,667	xd__(pu)	0,17	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,08	T''d
S(MVA)	350	Xq(pu)	0,5	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,17	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,15	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.4.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-11, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Tucuruí 1 estão apresentados na Tabela 4-12. A partir dos parâmetros da Tabela 4-11, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-12. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-76.

Tabela 4-11 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Tucuruí 1	
Ag	**Y1**	0,0142634
Bg	**Y2**	8,899731
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-12 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,814	0,800
1,004	0,950
1,043	0,975
1,085	1,000
1,146	1,033
1,221	1,067
1,306	1,100
1,701	1,200
2,521	1,300

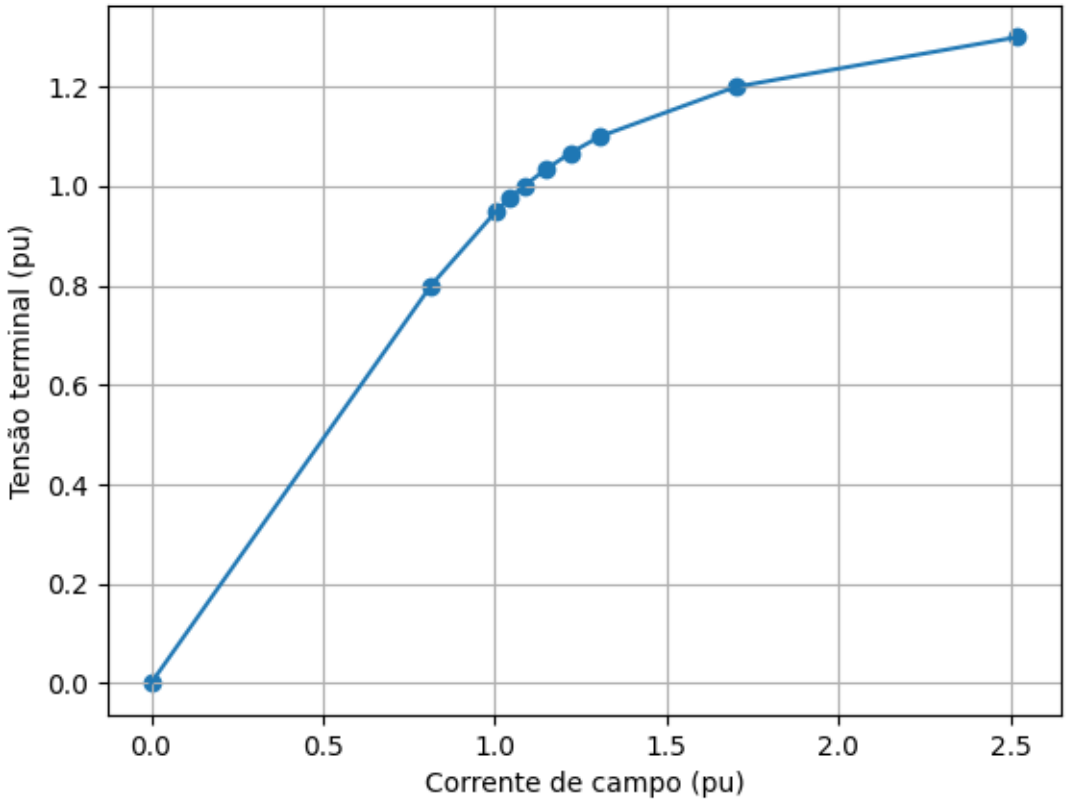

Figura 4-76 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.4.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.4.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.4.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.4.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

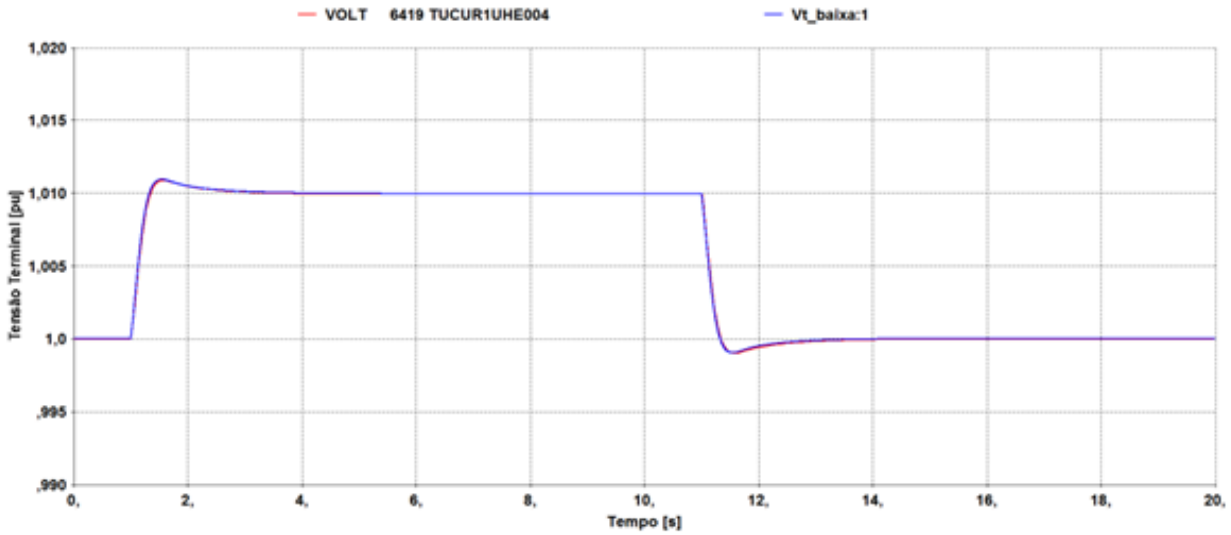

Figura 4-77 - Tensão terminal

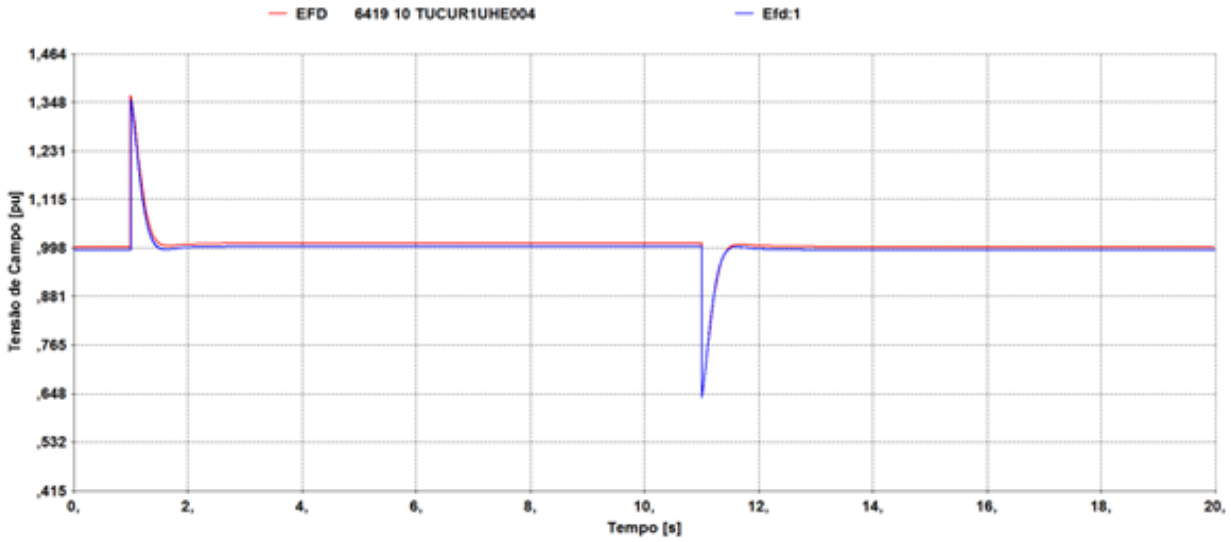

Figura 4-78 - Tensão de campo

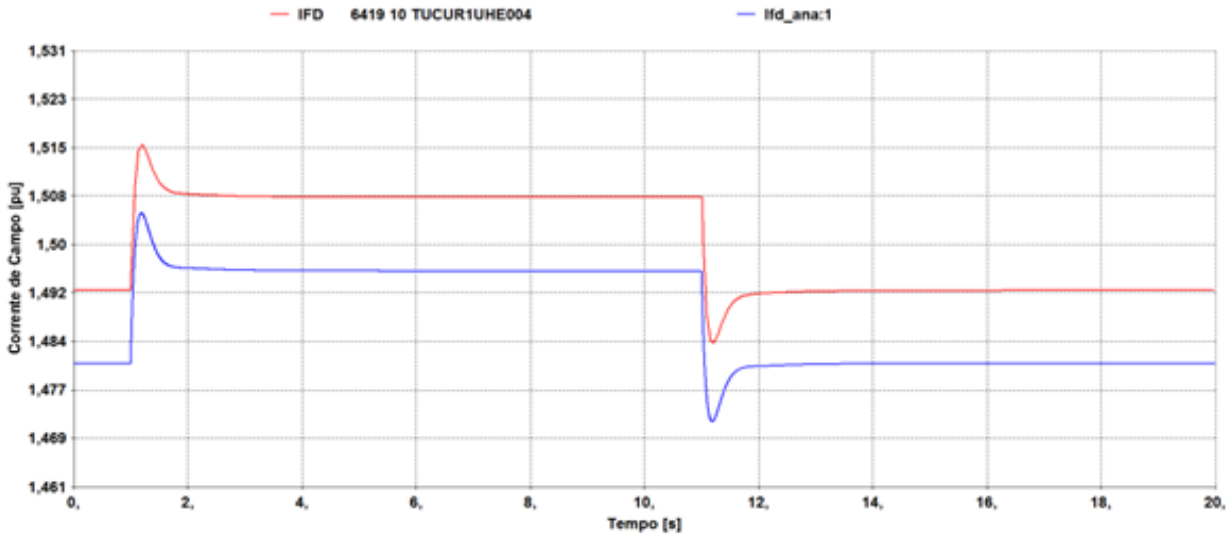

Figura 4-79 - Corrente de campo

4.4.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

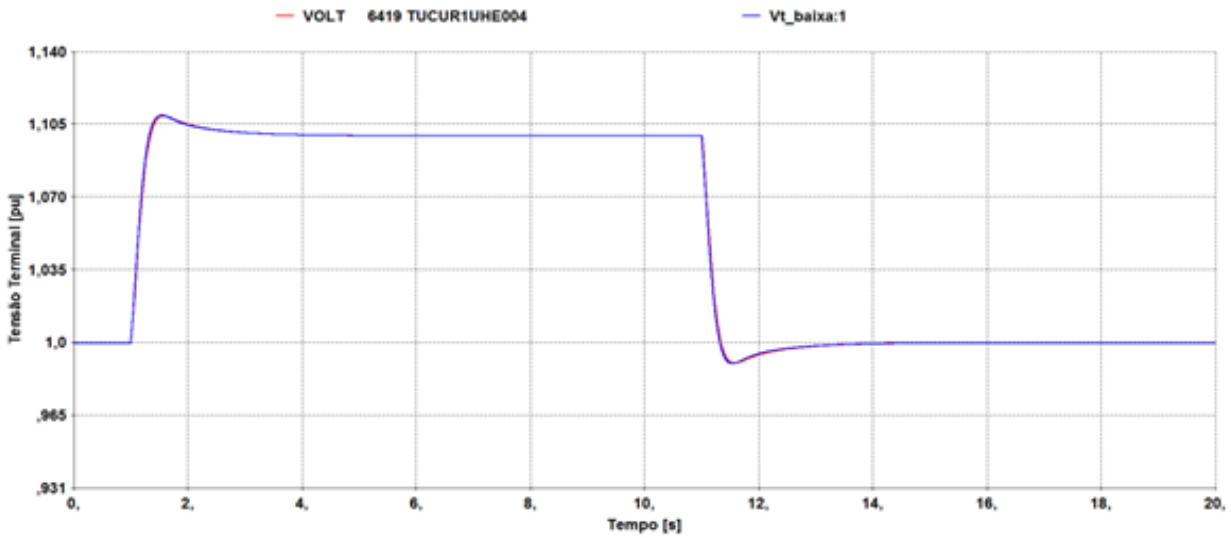

Figura 4-80 - Tensão terminal

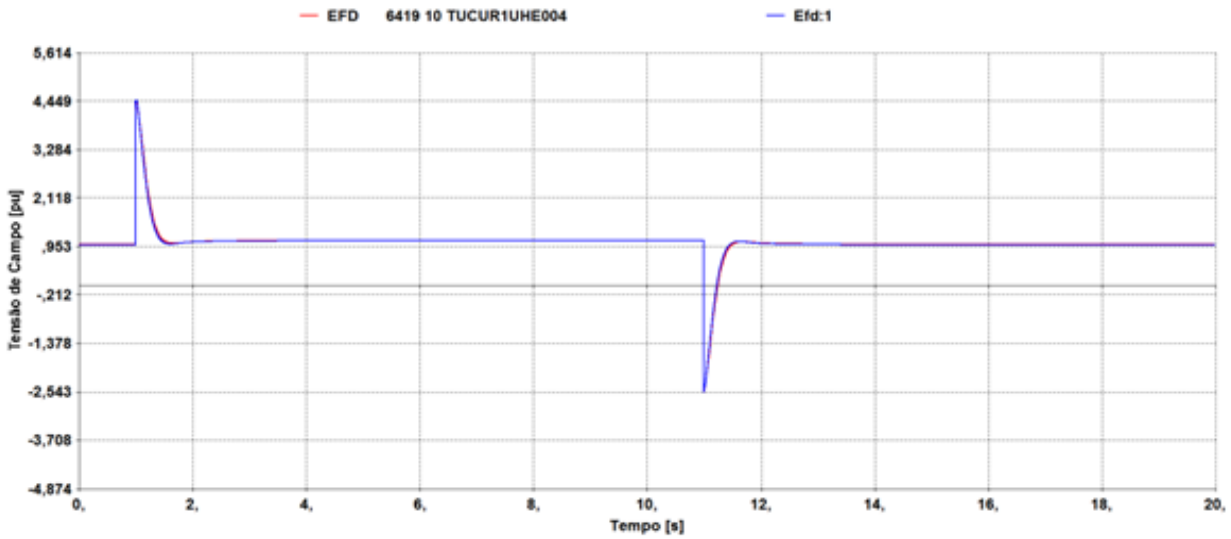

Figura 4-81 - Tensão de campo

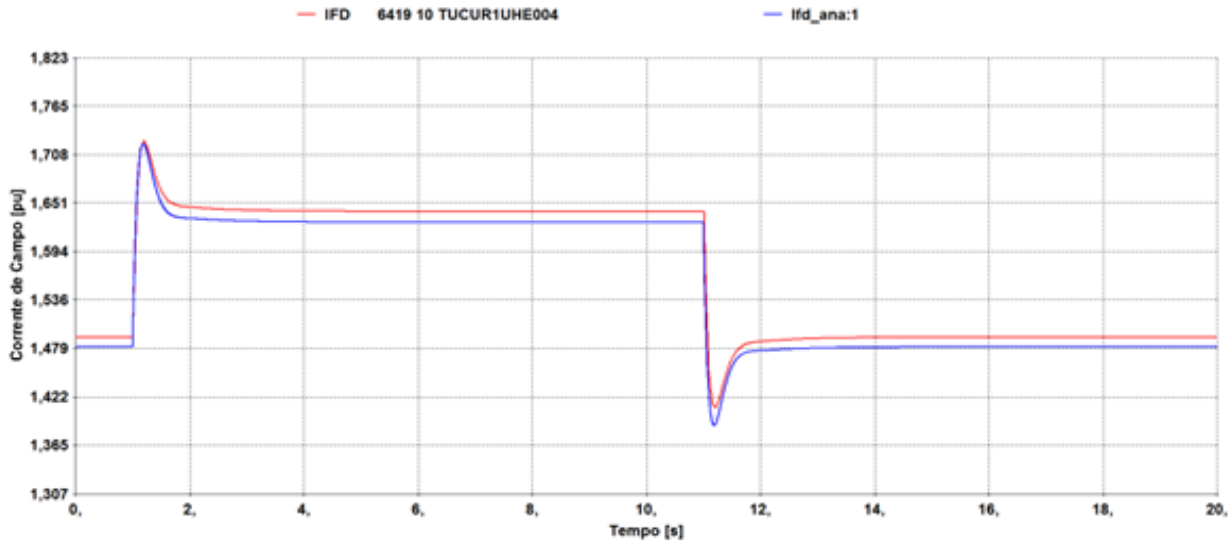

Figura 4-82 - Corrente de campo

4.4.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.4.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.4.4.2.

4.4.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

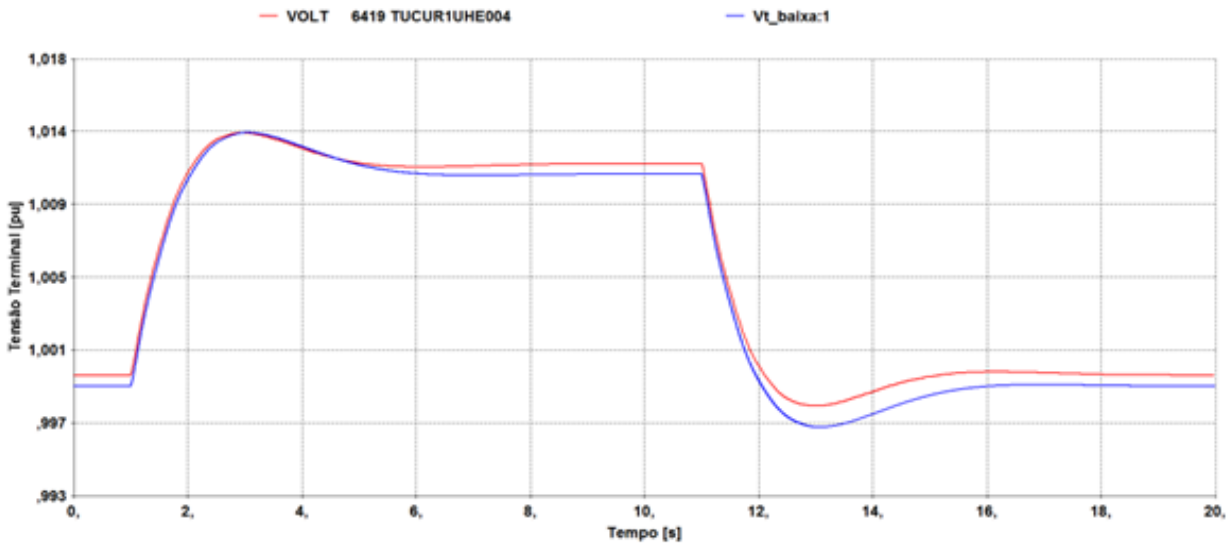

Figura 4-83 - Tensão terminal

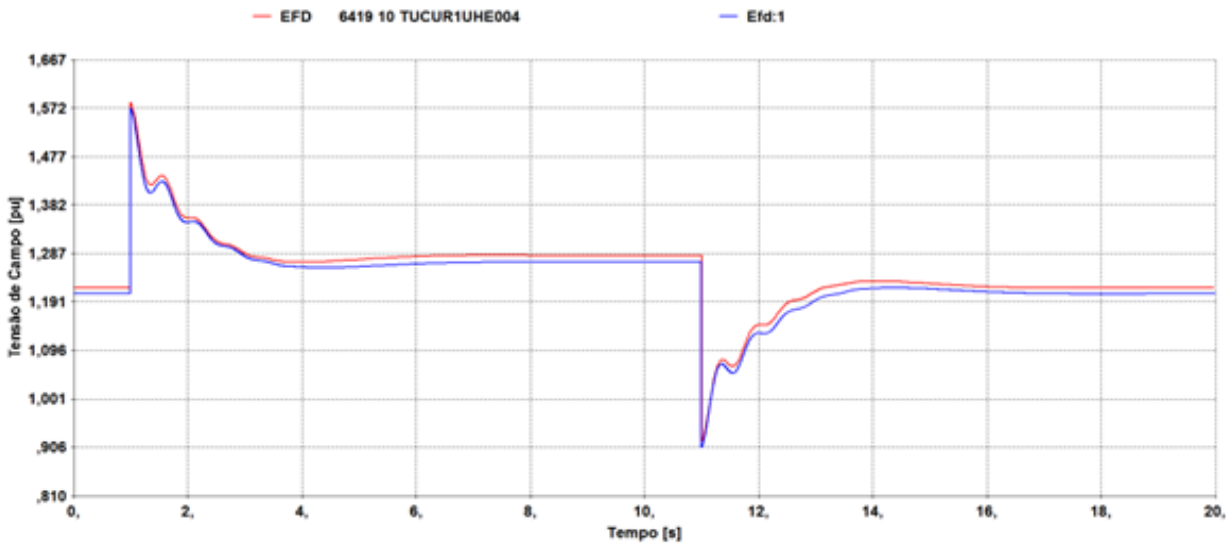

Figura 4-84 - Tensão de campo

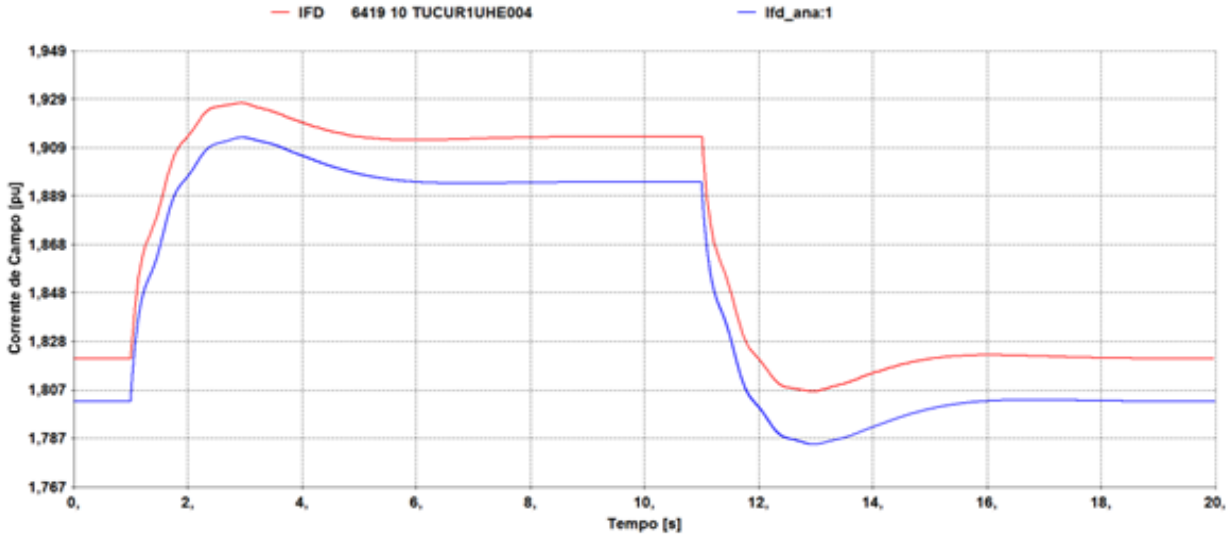

Figura 4-85 - Corrente de campo

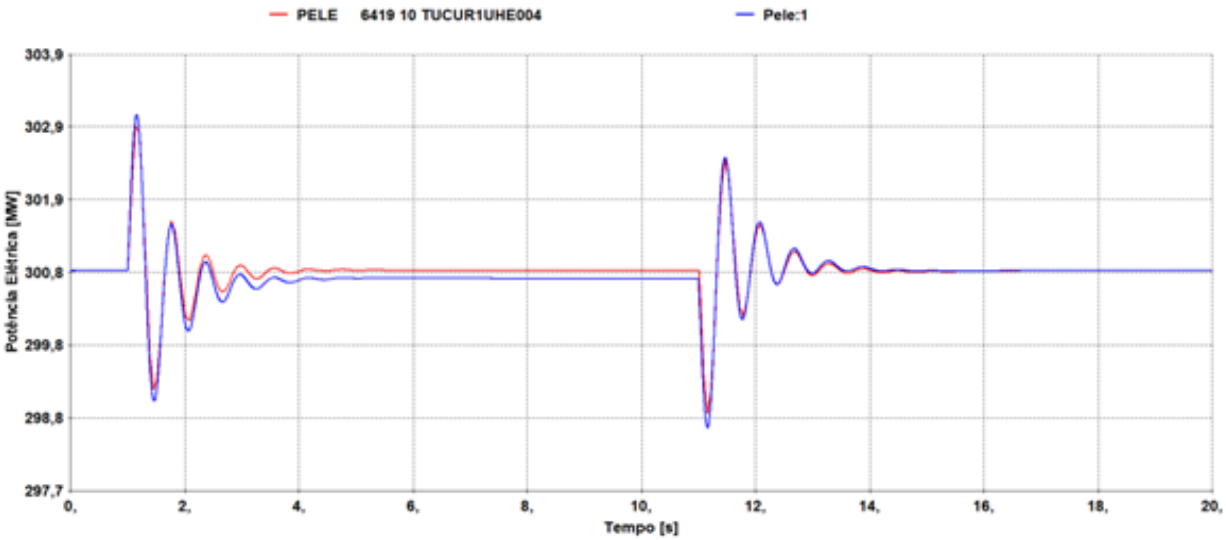

Figura 4-86 - Potência ativa

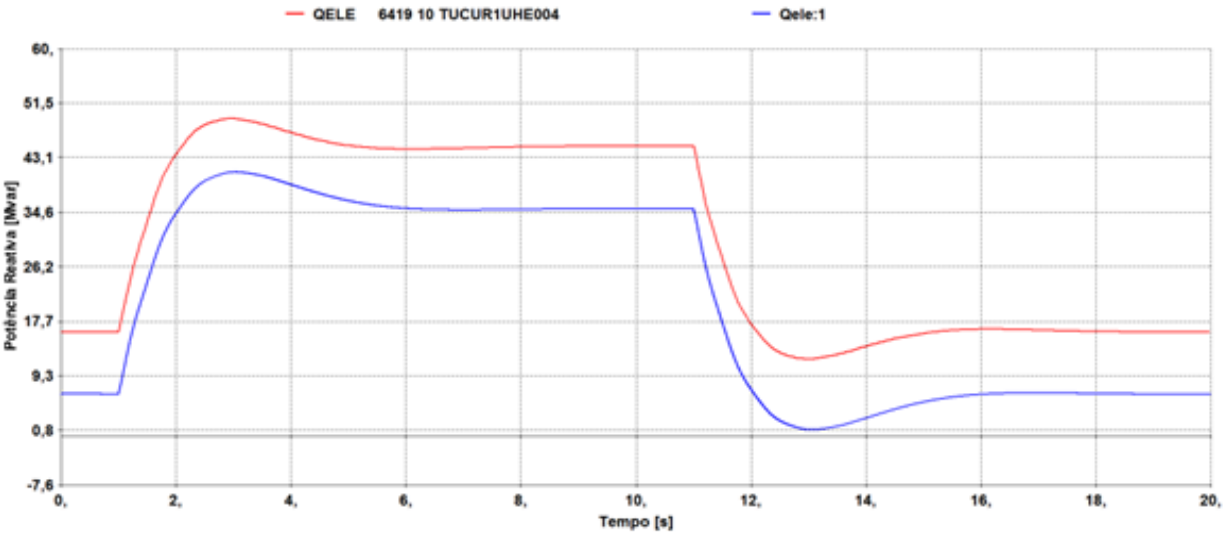

Figura 4-87 - Potência reativa

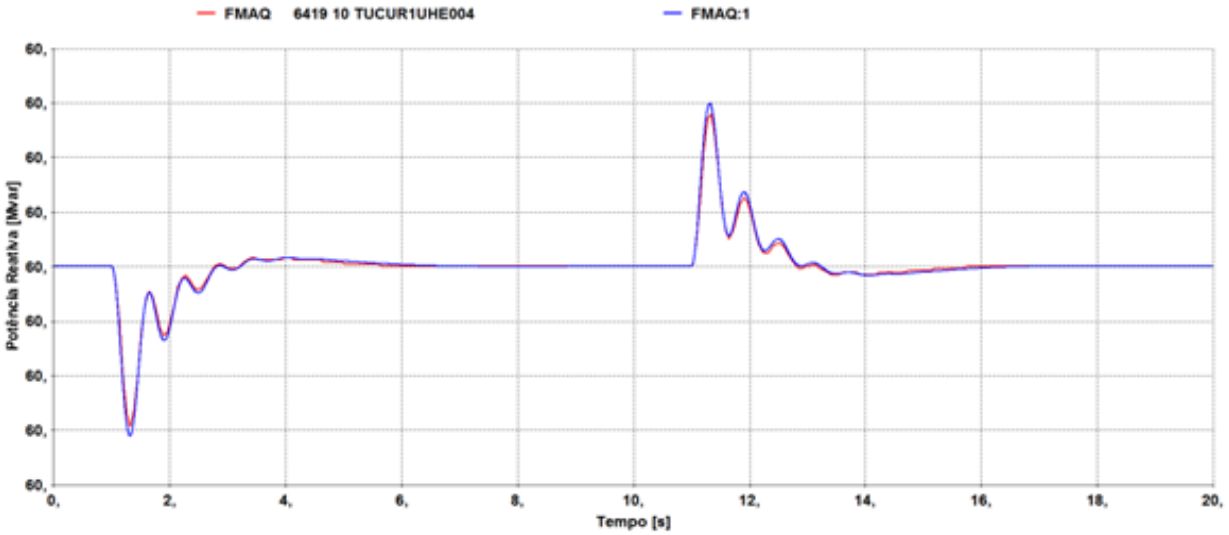

Figura 4-88 - Velocidade da máquina

4.4.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

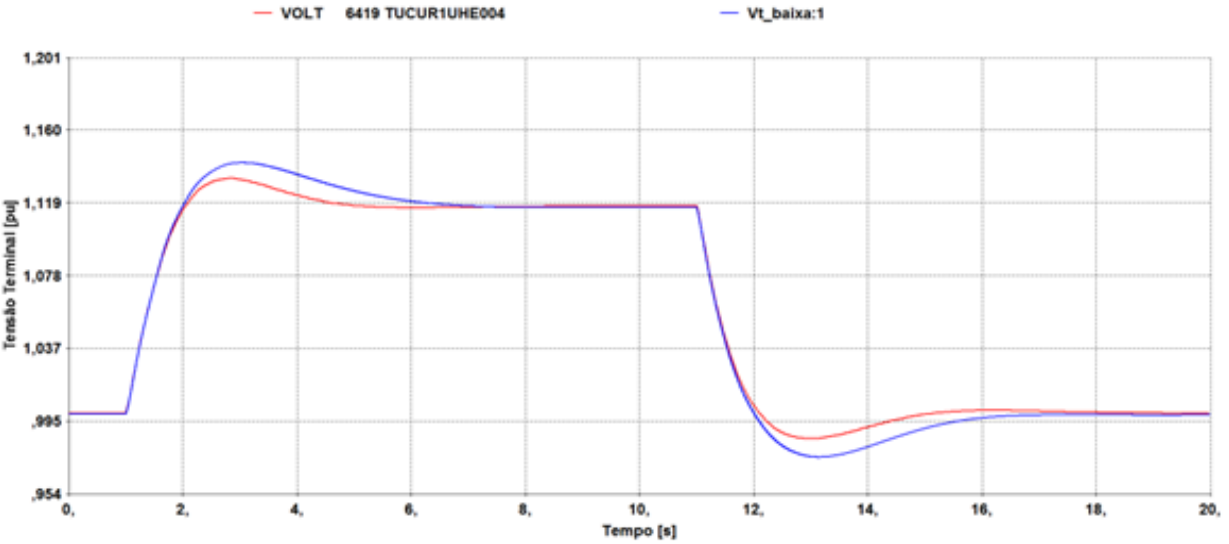

Figura 4-89 - Tensão terminal

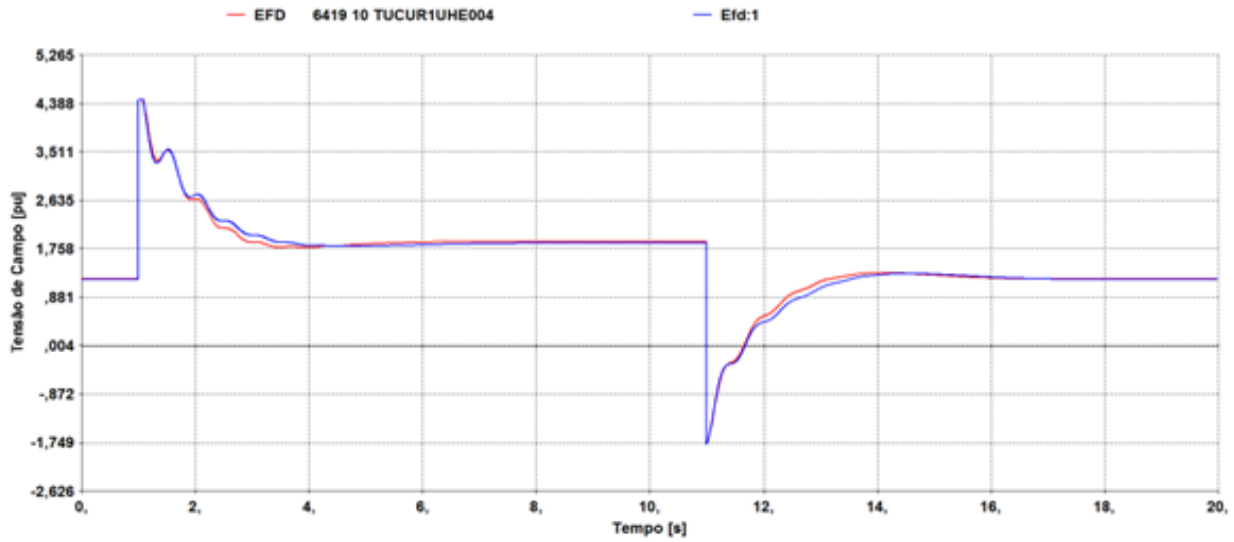

Figura 4-90 - Tensão de campo

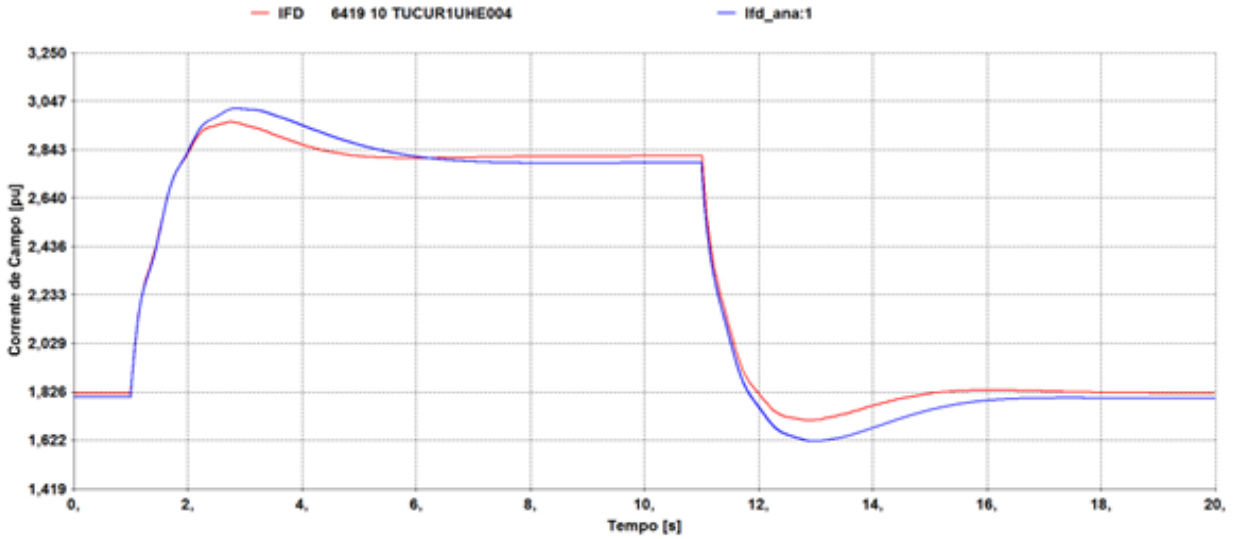

Figura 4-91 - Corrente de campo

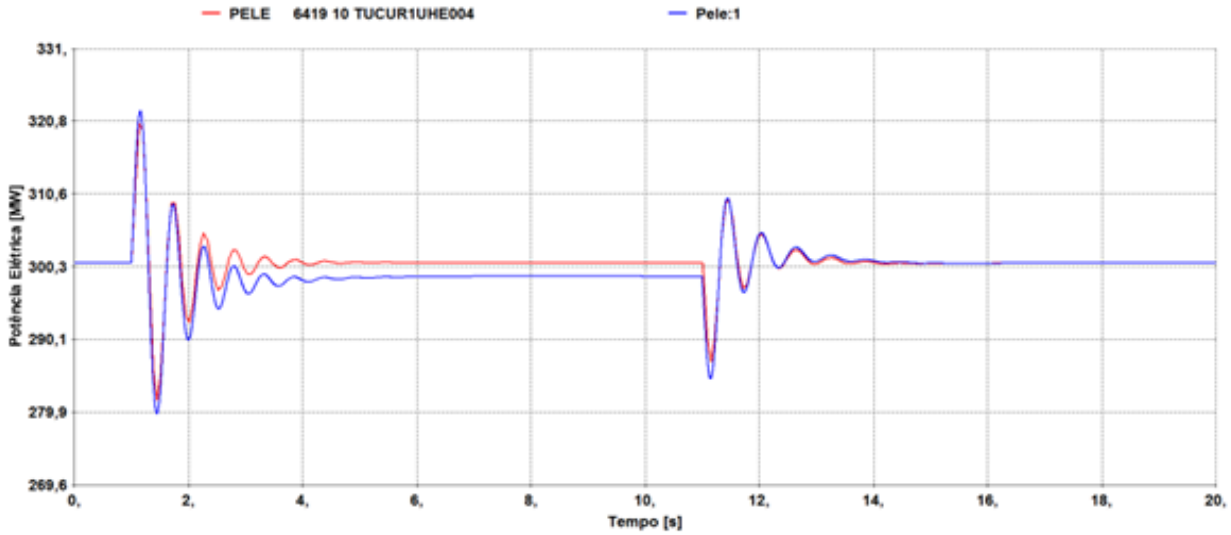

Figura 4-92 - Potência ativa

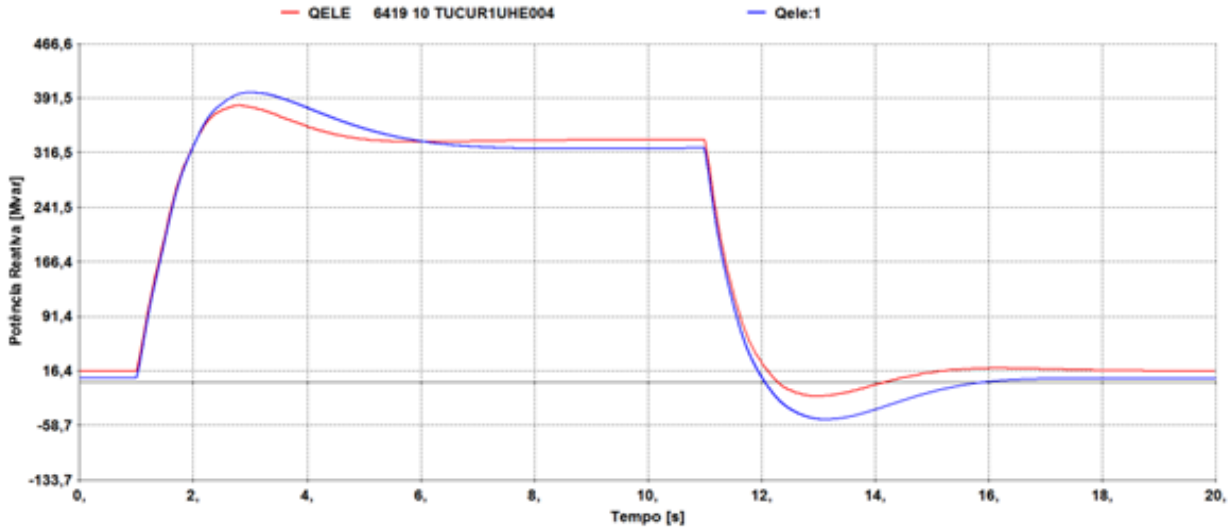

Figura 4-93 - Potência reativa

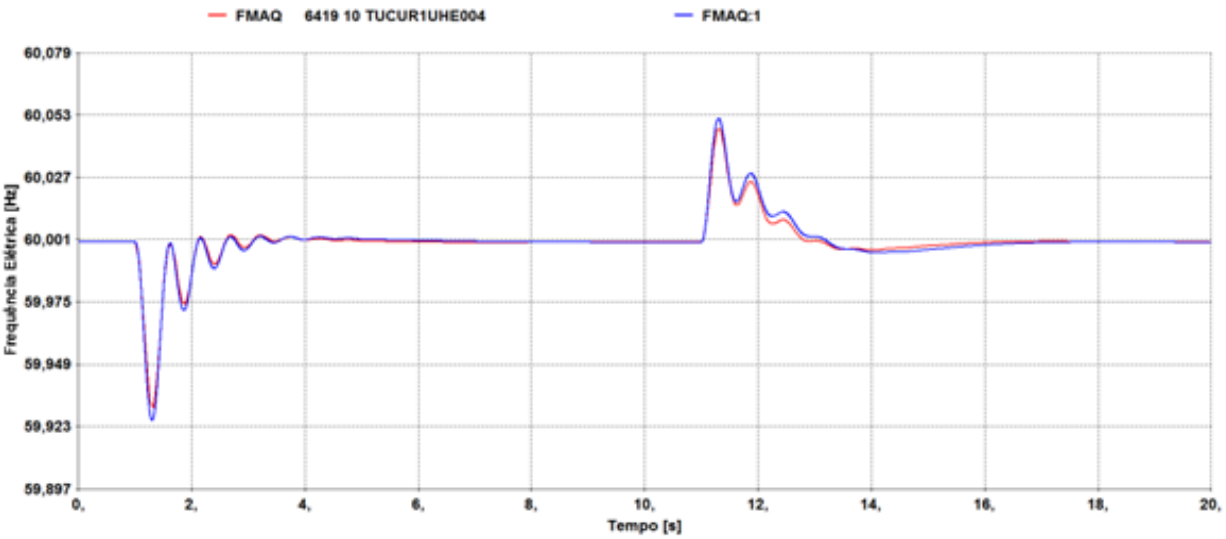

Figura 4-94 - Velocidade da máquina

4.5 UHE TUCURUÍ 2

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Tucuruí 2, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.5.1 Modelo da UHE Tucuruí 2

A Tabela 4-13 apresenta os parâmetros da UHE Tucuruí 2 disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-13 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	96,72	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	70	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	30	I(KA)	16,316	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	20	H(s)	4,2	
xl(%)	15	D(pu)	0	
T'd(s)	5	Ra(pu)	0,003	
		xp(pu)	0,15	Reatância de Potier
T''d(s)	0,1	xd(pu)	0,967	
T''q(s)	0,2	xd_(pu)	0,3	x'd
Ra(%)	0,292	Td0_(s)	5	T'd
H(s)	4,2	xd__(pu)	0,2	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,1	T''d
S(MVA)	390	Xq(pu)	0,7	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,2	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,2	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.5.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-14, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Tucuruí 2 estão apresentados na Tabela 4-15. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-14, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-15. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-95.

Tabela 4-14 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Tucuruí 2	
Ag	**Y1**	0,0255121
Bg	**Y2**	8,09905
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-15 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,826	0,800
1,036	0,950
1,08	0,975
1,129	1,000
1,201	1,033
1,289	1,067
1,39	1,100
1,851	1,200
2,764	1,300

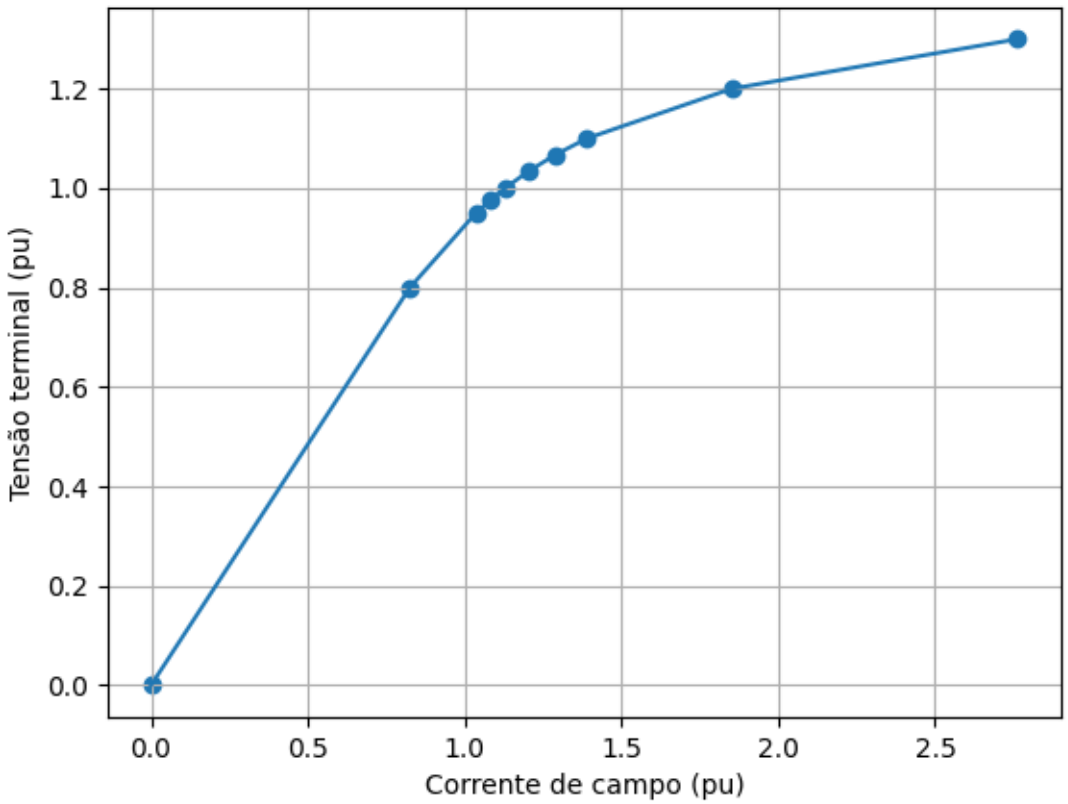

Figura 4-95 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.5.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.5.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.5.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.5.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

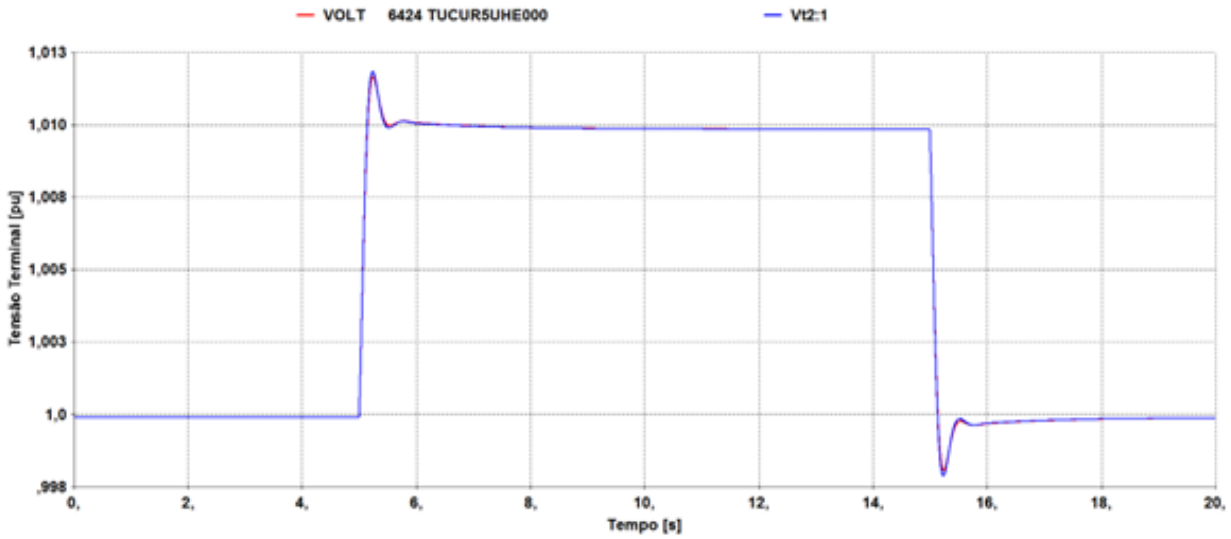

Figura 4-96 - Tensão terminal

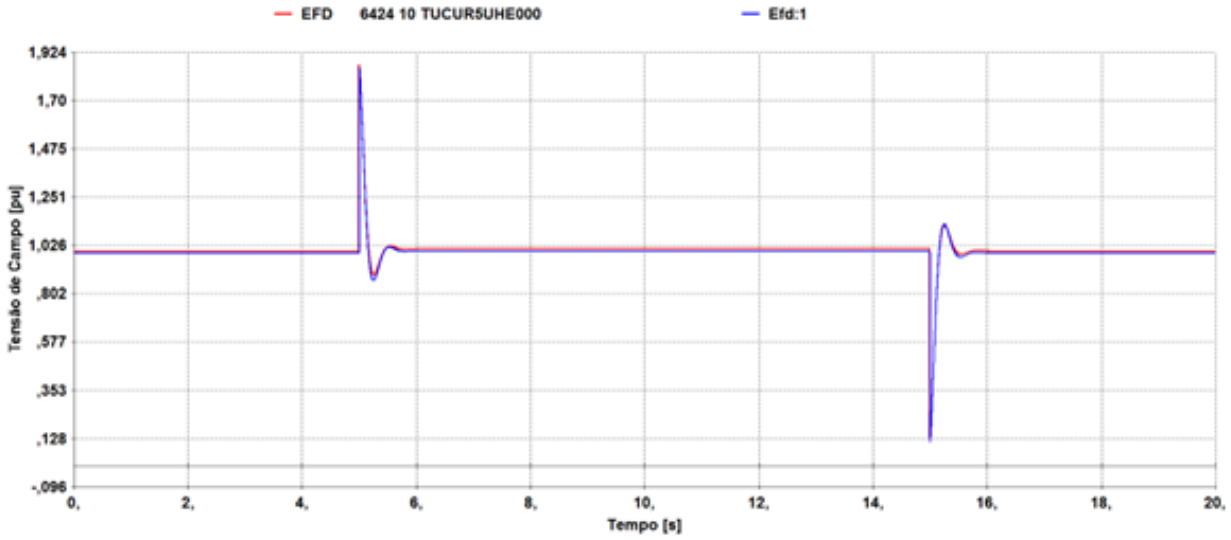

Figura 4-97 - Tensão de campo

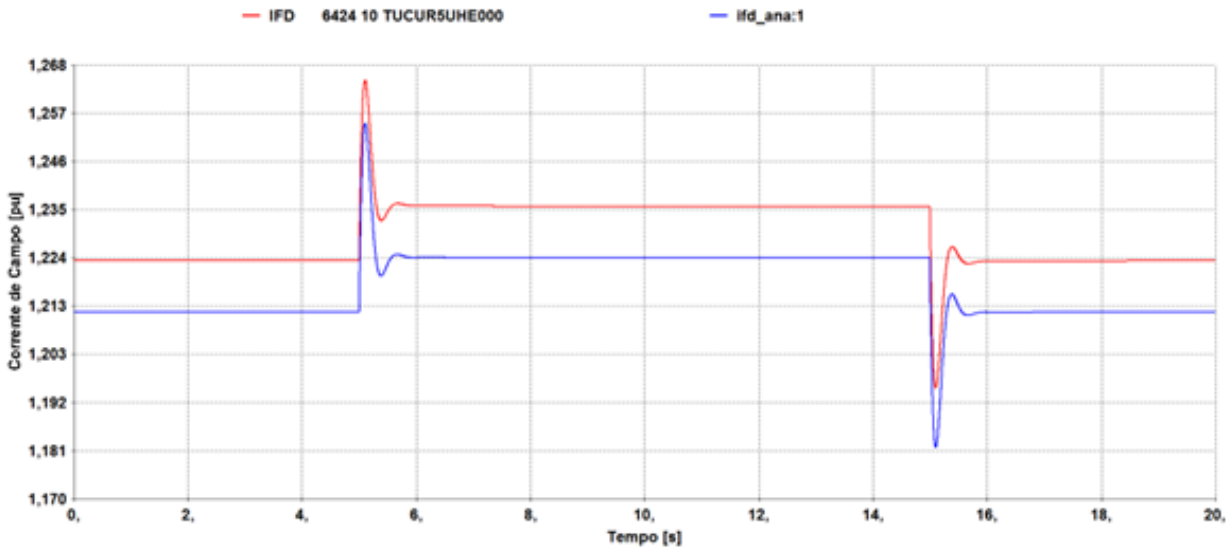

Figura 4-98 - Corrente de campo

4.5.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

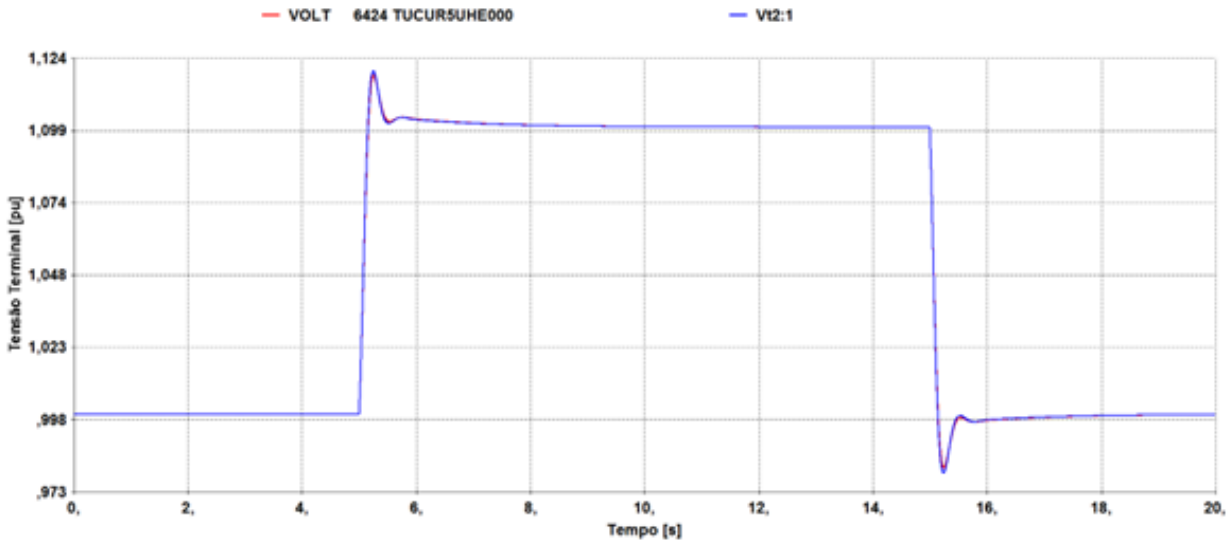

Figura 4-99 - Tensão terminal

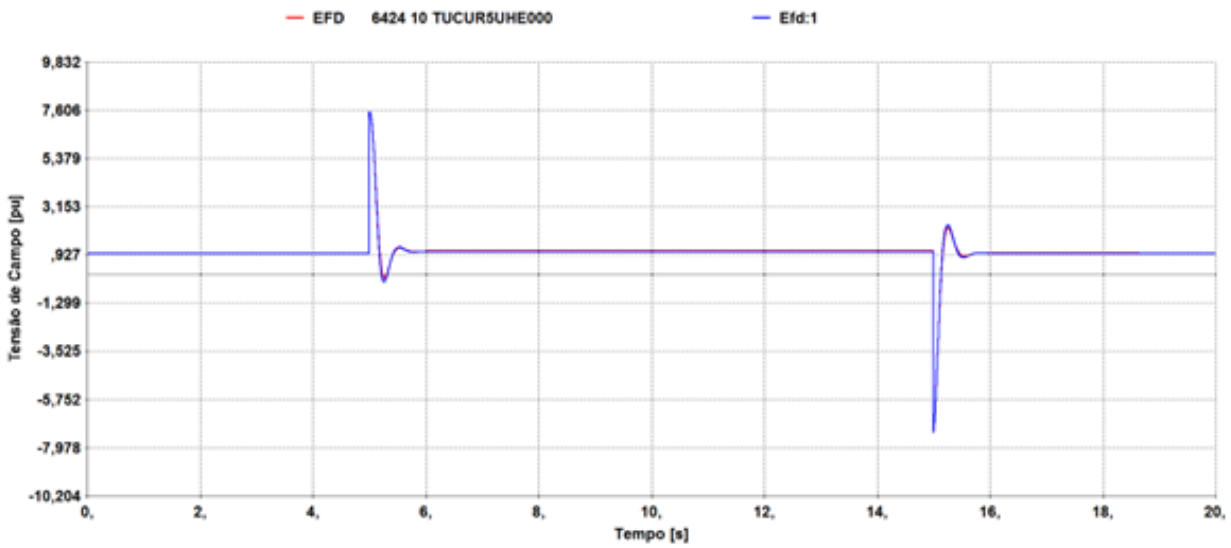

Figura 4-100 - Tensão de campo

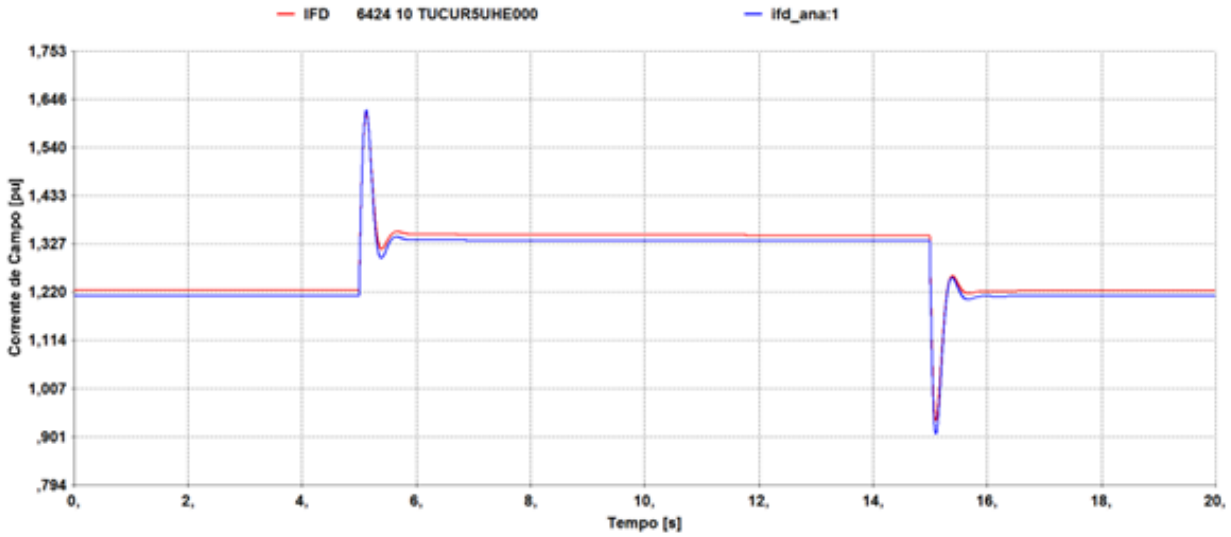

Figura 4-101 - Corrente de campo

4.5.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.5.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.5.4.2.

4.5.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

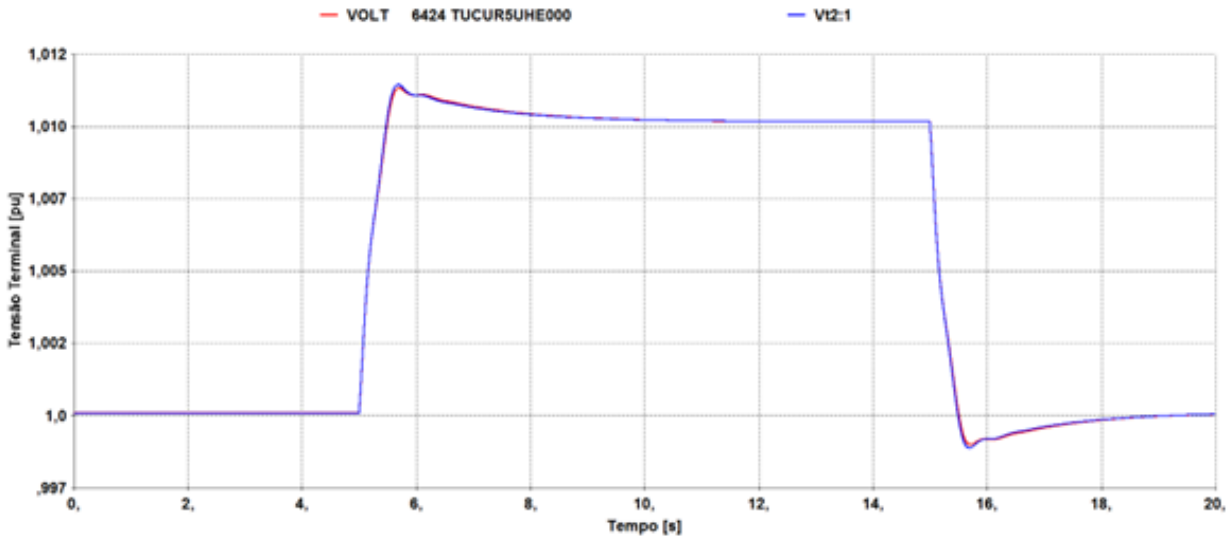

Figura 4-102 - Tensão terminal

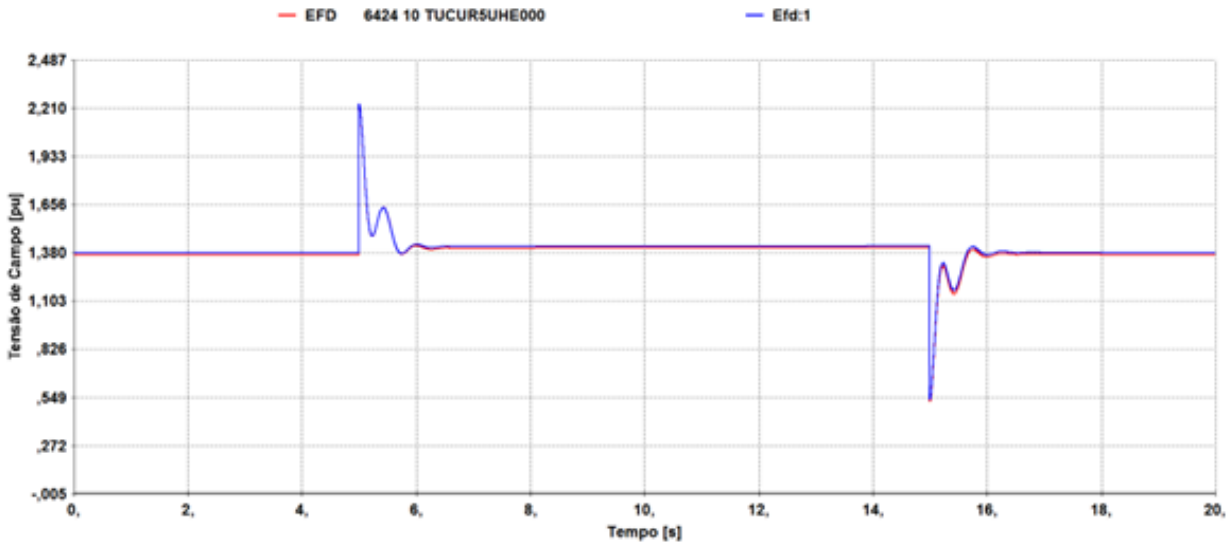

Figura 4-103 - Tensão de campo

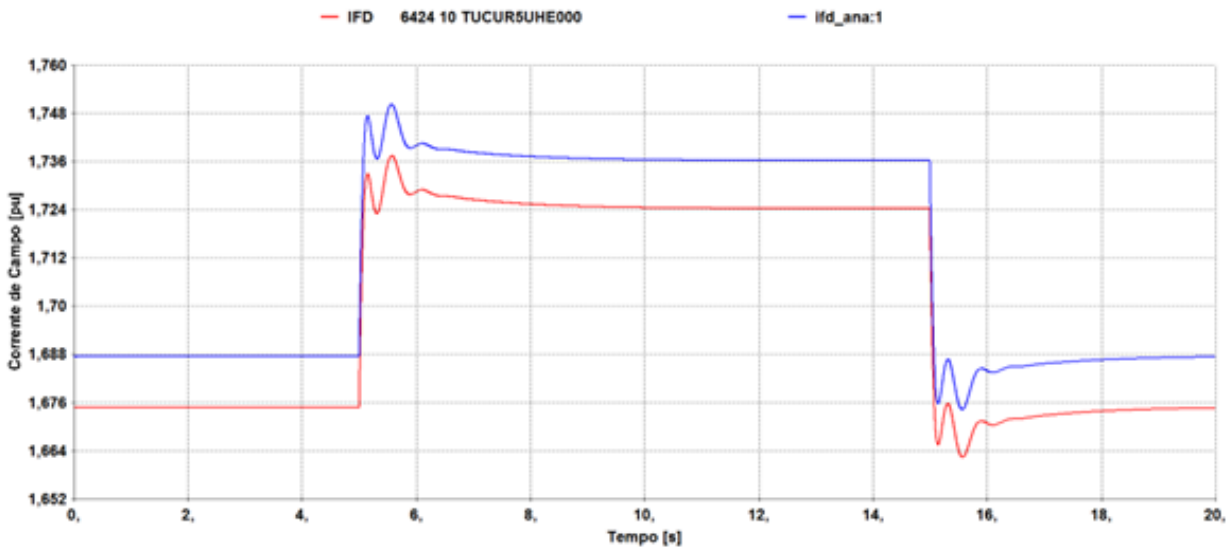

Figura 4-104 - Corrente de campo

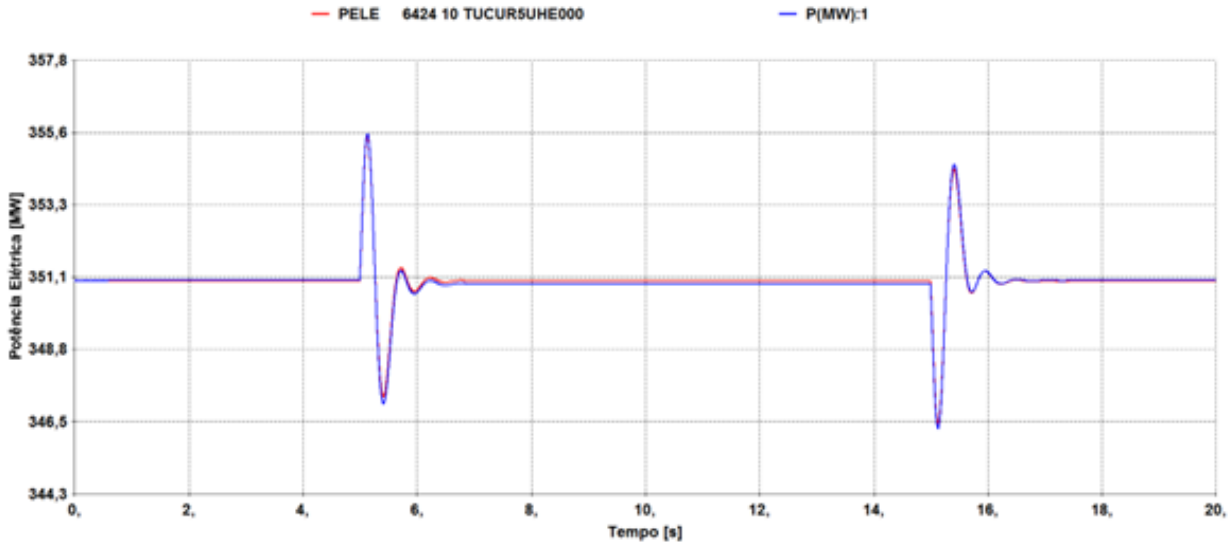

Figura 4-105 - Potência ativa

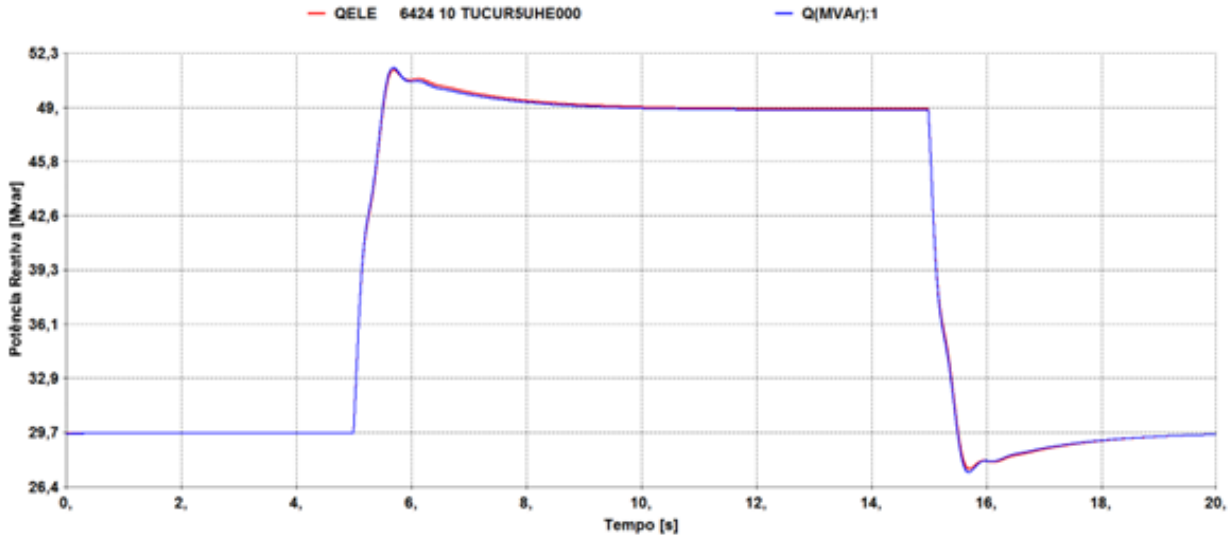

Figura 4-106 - Potência reativa

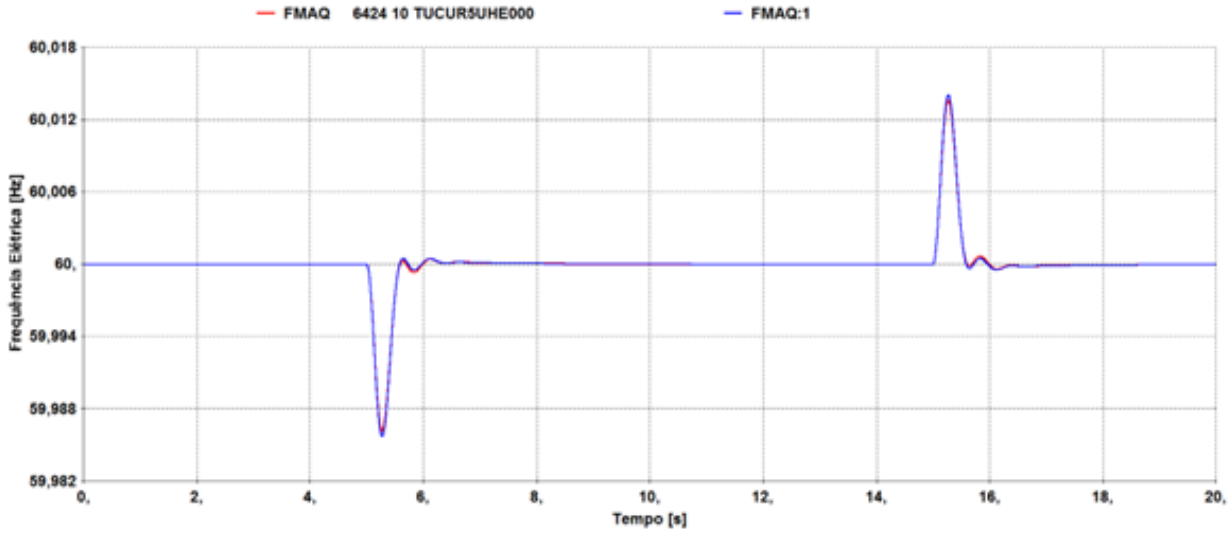

Figura 4-107 - Velocidade da máquina

4.5.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

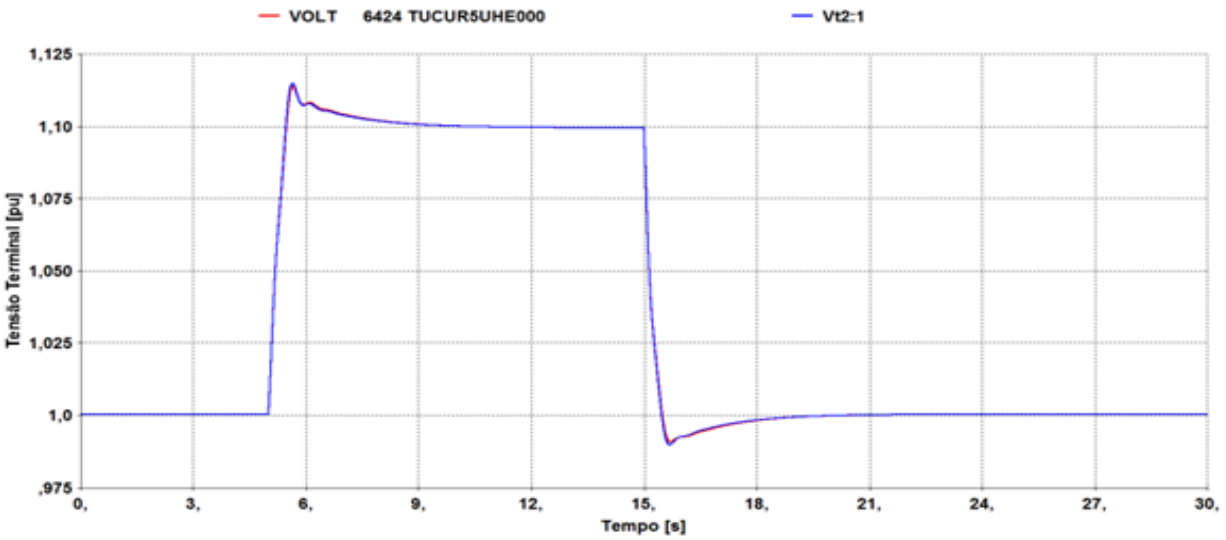

Figura 4-108 - Tensão terminal

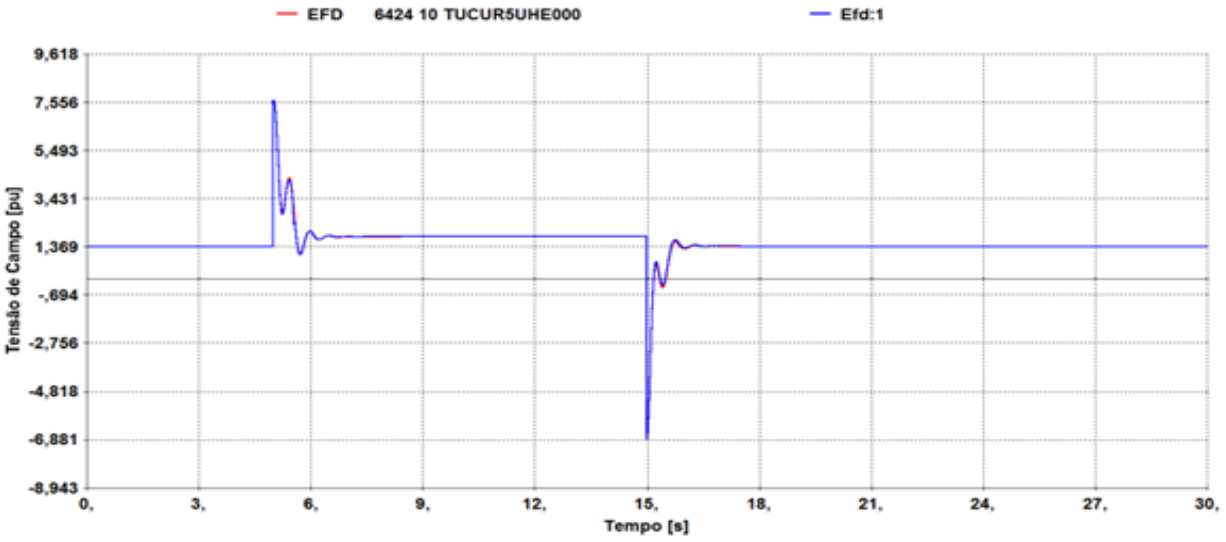

Figura 4-109 - Tensão de campo

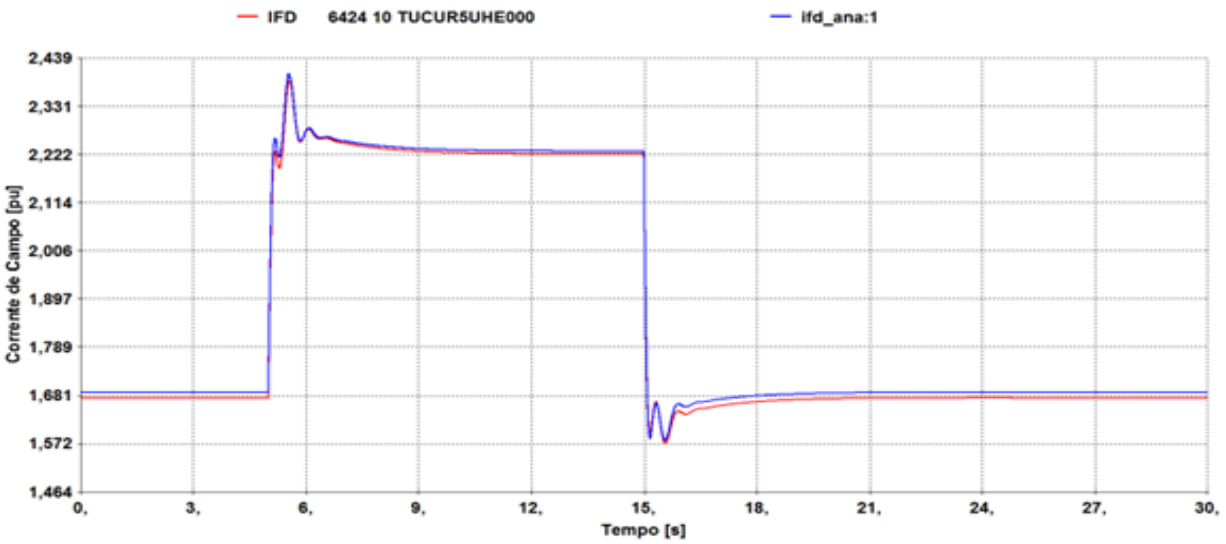

Figura 4-110 - Corrente de campo

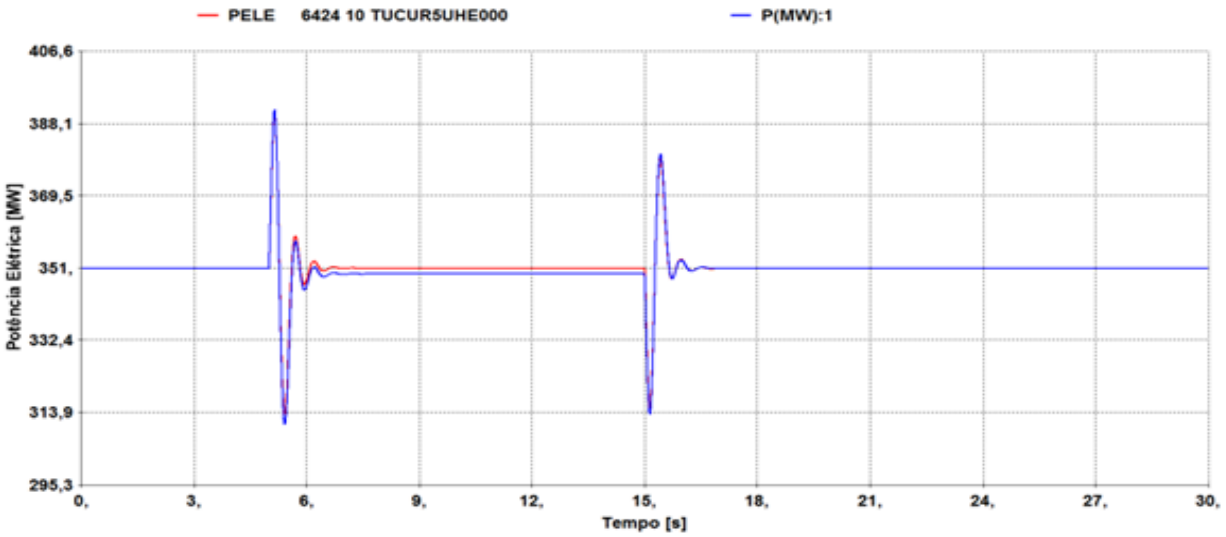

Figura 4-111 - Potência ativa

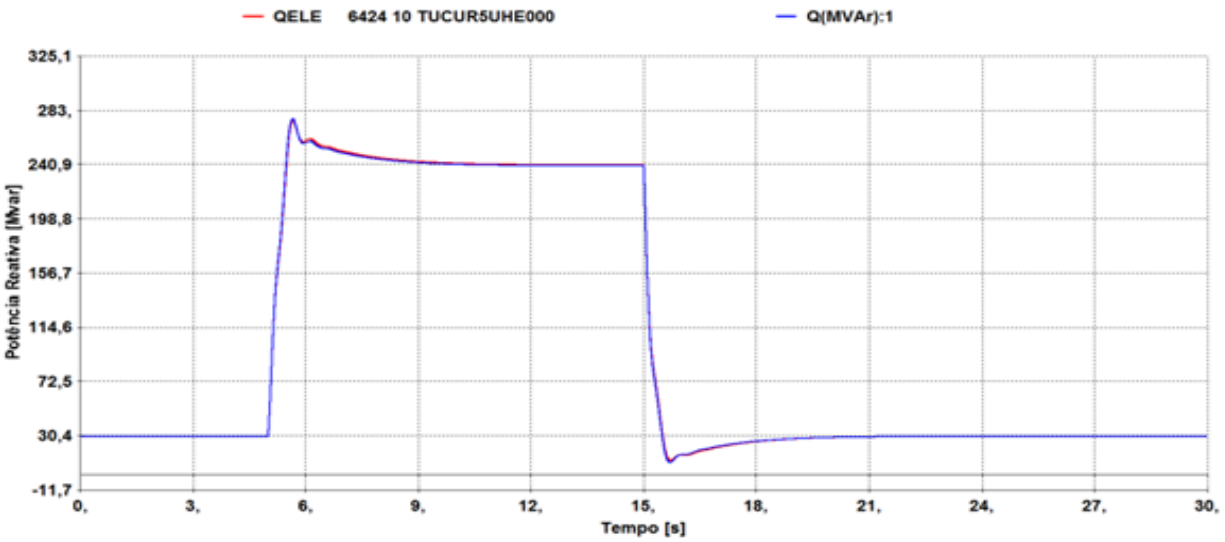

Figura 4-112 - Potência reativa

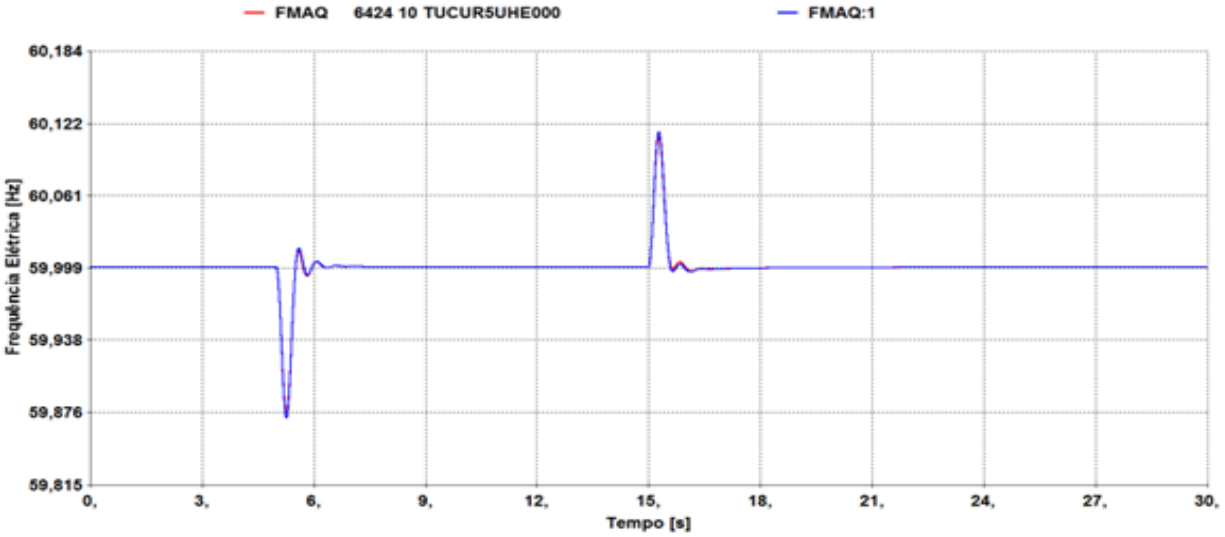

Figura 4-113 - Velocidade da máquina

4.6 UHE ESTREITO

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Estreito, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.6.1 Modelo da UHE Estreito

A Tabela 4-16 apresenta os parâmetros da UHE Estreito disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-16 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	103,5	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	69,6	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	35,3	I(KA)	6,351	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	30,1	H(s)	3,55	
xl(%)	14	D(pu)	0	
T'd(s)	7,5	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,14	Reatância de Potier
T''d(s)	0,07	xd(pu)	1,035	
T''q(s)	0,11	xd_(pu)	0,353	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	7,5	T'd
H(s)	3,55	xd__(pu)	0,301	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,07	T''d
S(MVA)	151,8	Xq(pu)	0,696	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,301	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,11	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.6.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-17, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Estreito estão apresentados na Tabela 4-18. A

partir dos parâmetros da Tabela 4-17, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-18. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-114.

Tabela 4-17 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Estreito	
Ag	**Y1**	0,00608
Bg	**Y2**	8,60332
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-18 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,806	0,800
0,972	0,950
1,002	0,975
1,034	1,000
1,078	1,033
1,127	1,067
1,18	1,100
1,39	1,200
1,749	1,300

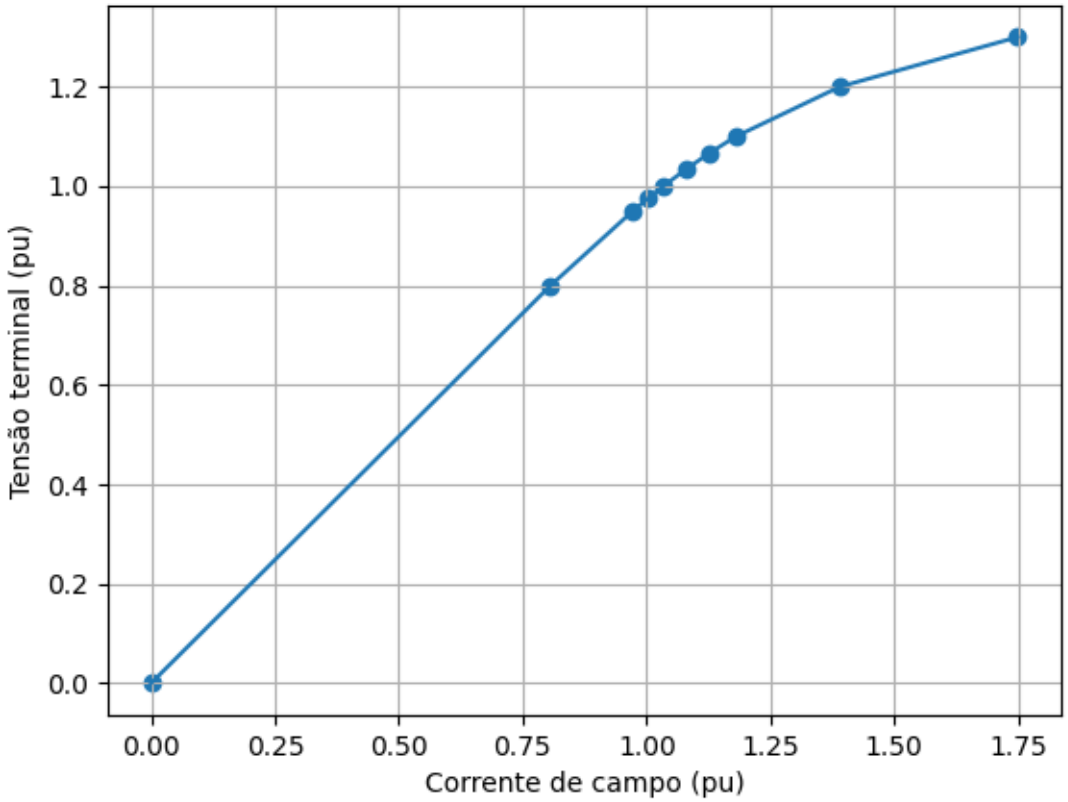

Figura 4-114 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.6.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.6.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.6.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.6.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

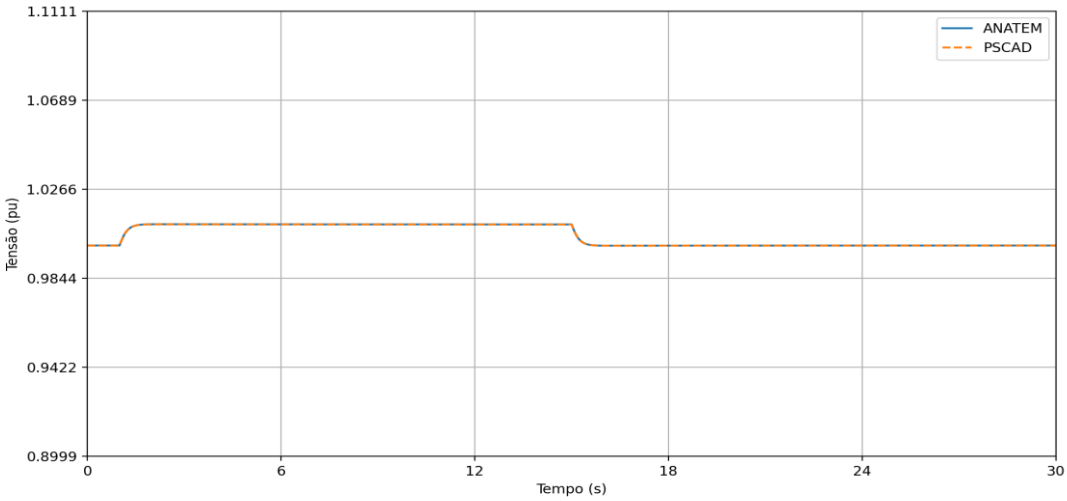

Figura 4-115 - Tensão terminal

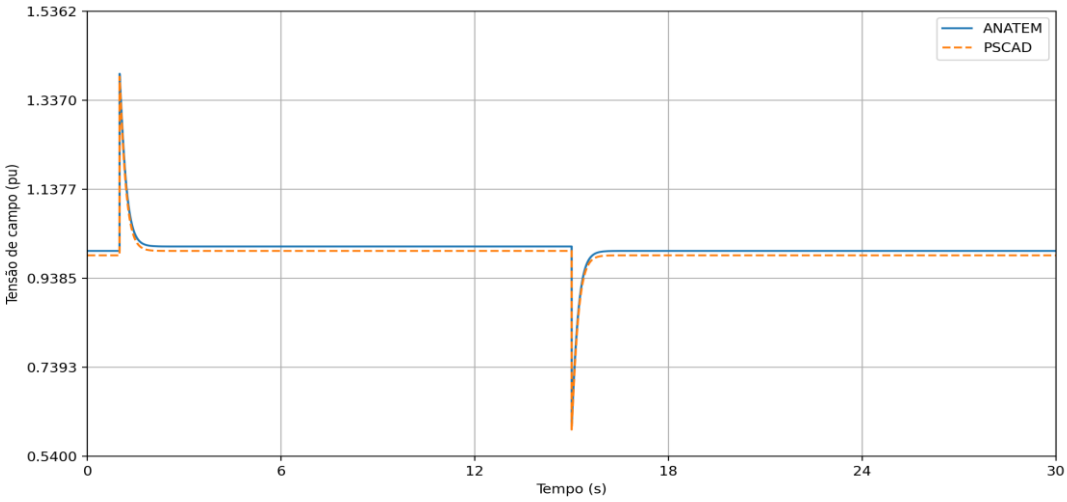

Figura 4-116 - Tensão de campo

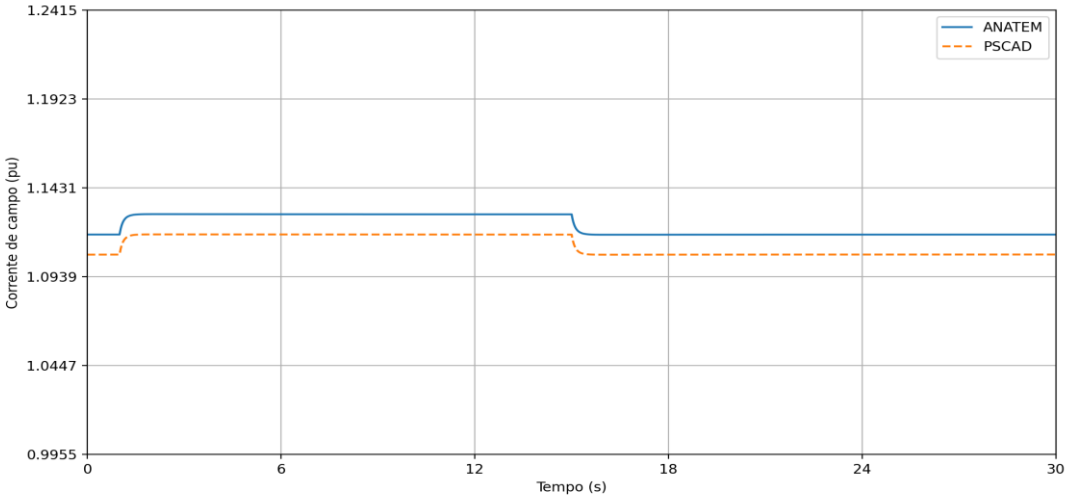

Figura 4-117 - Corrente de campo

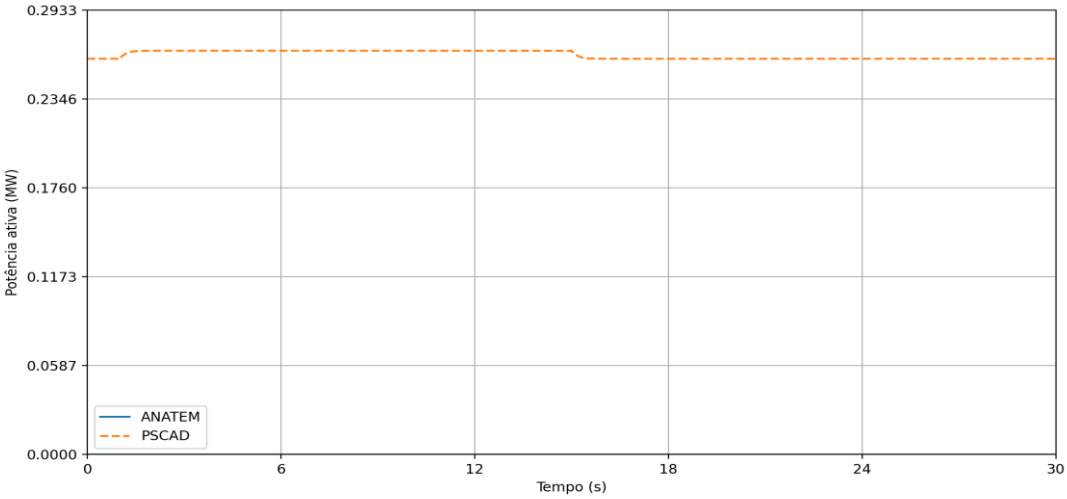

Figura 4-118 - Potência ativa

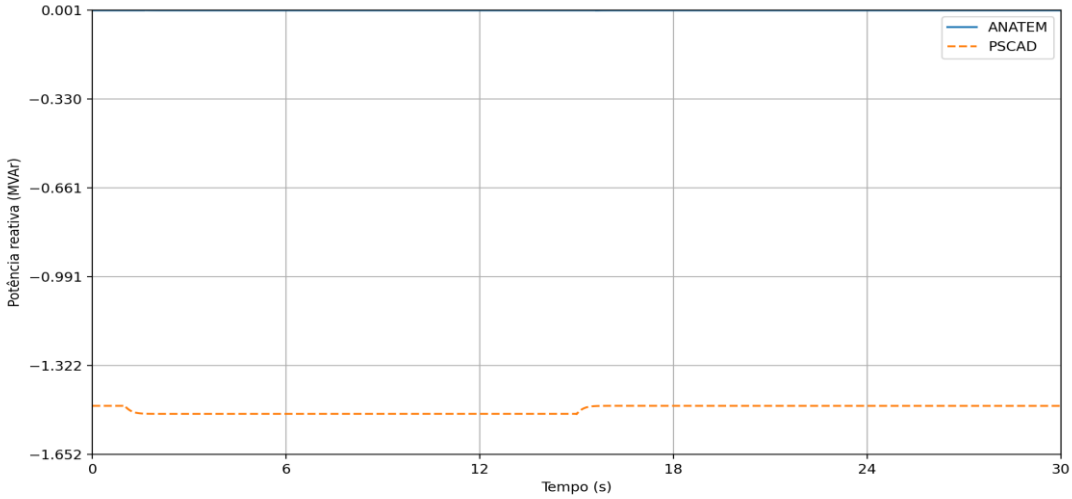

Figura 4-119 - Potência reativa

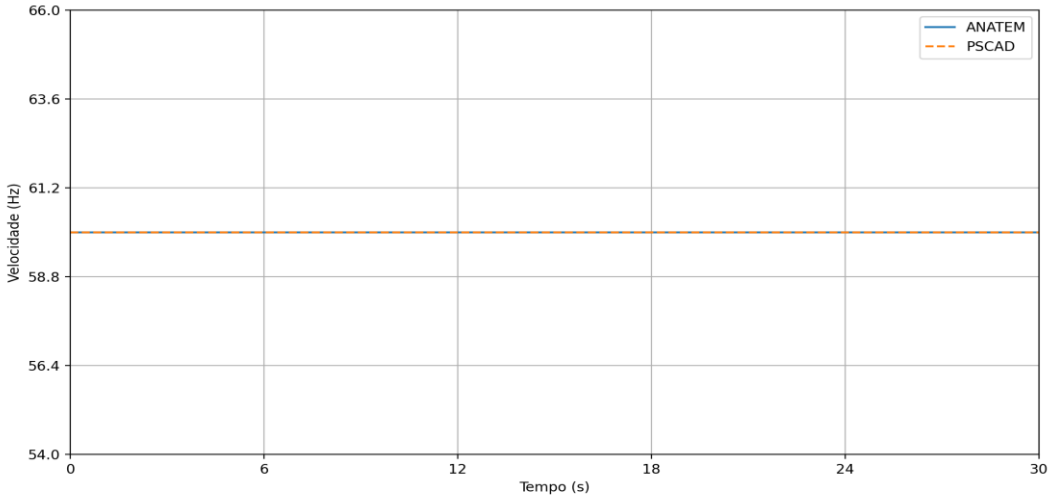

Figura 4-120 - Velocidade da máquina

4.6.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

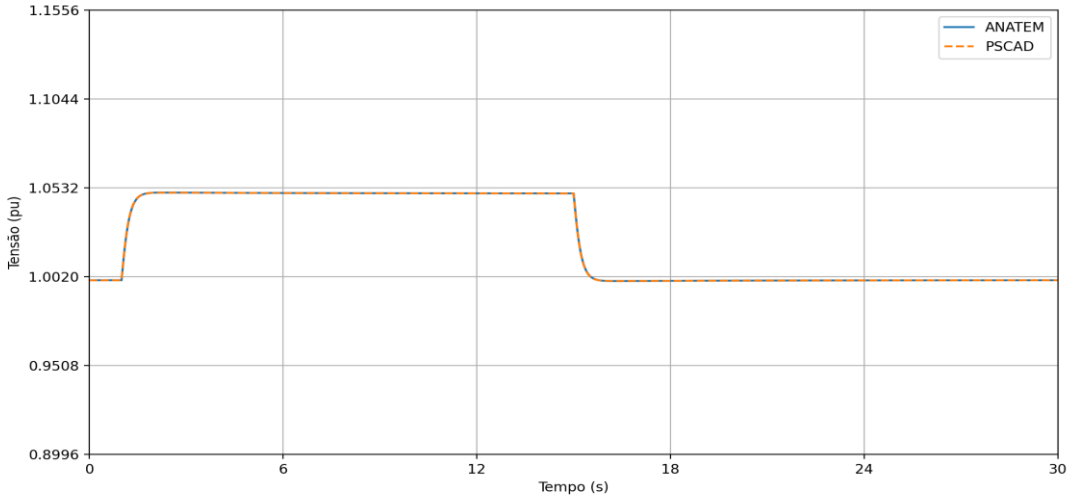

Figura 4-121 - Tensão terminal

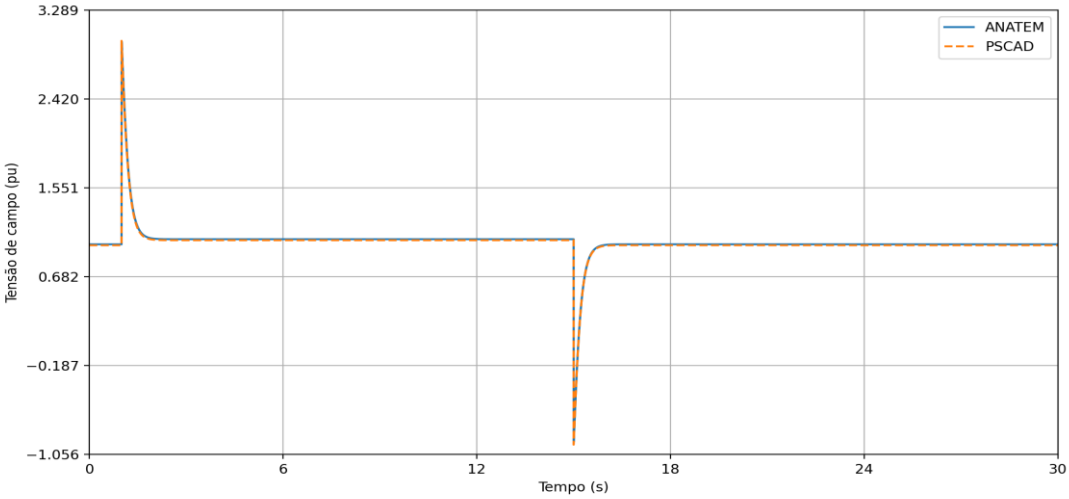

Figura 4-122 - Tensão de campo

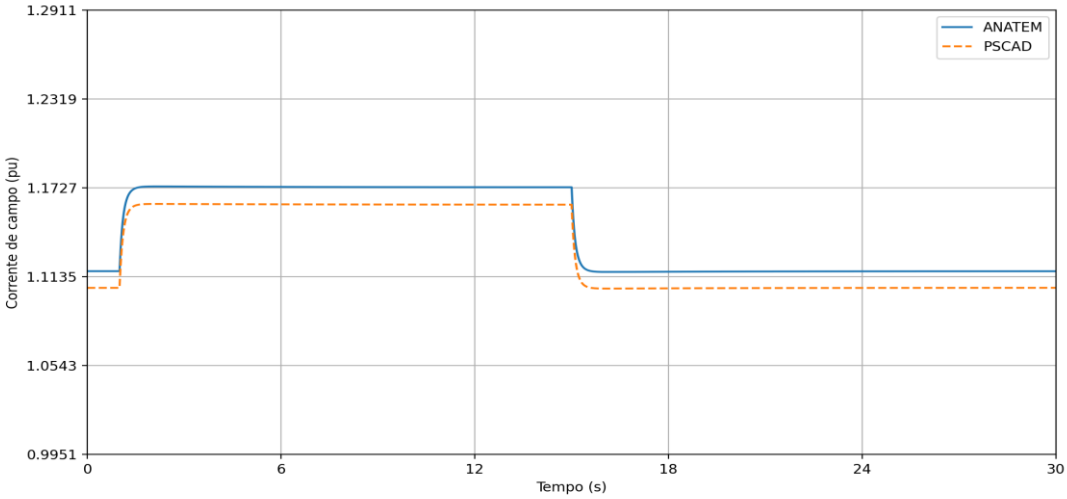

Figura 4-123 - Corrente de campo

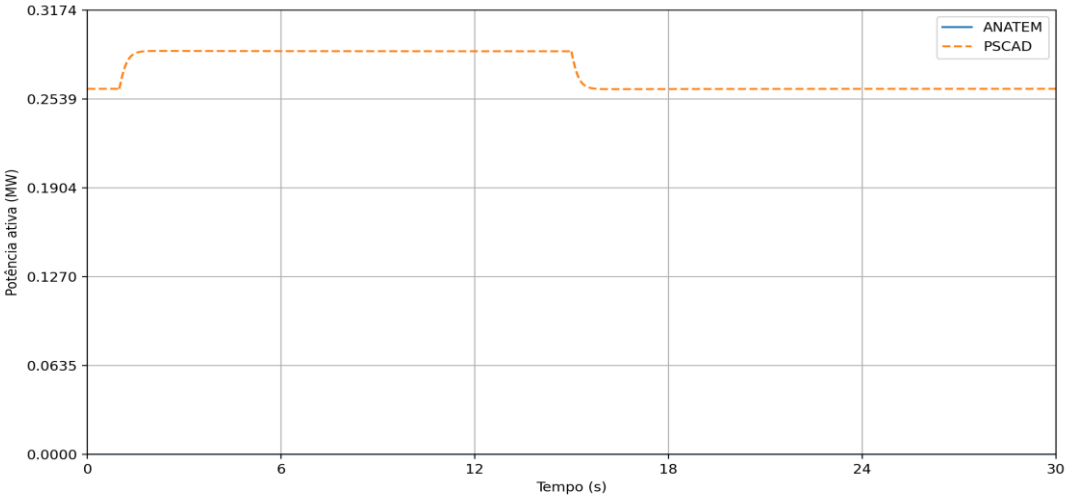

Figura 4-124 - Potência ativa

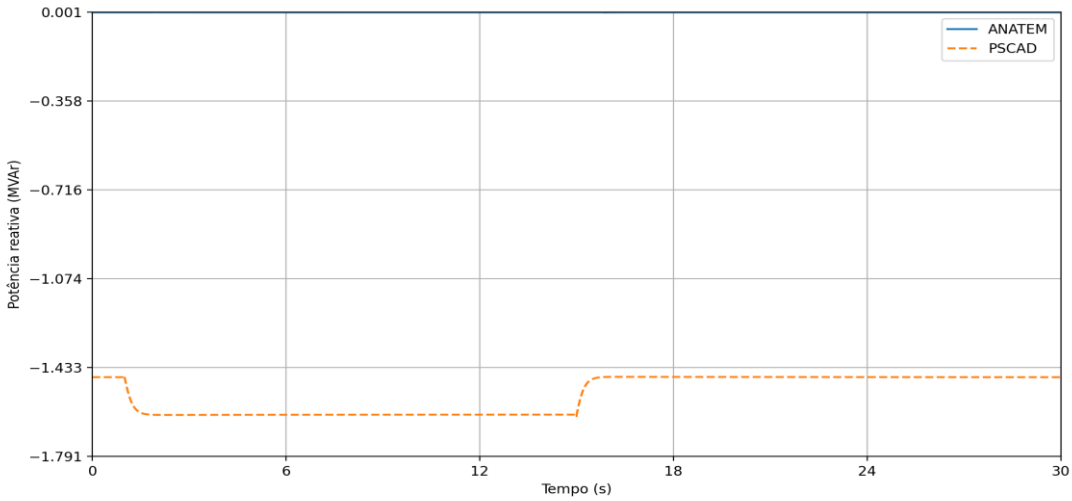

Figura 4-125 - Potência reativa

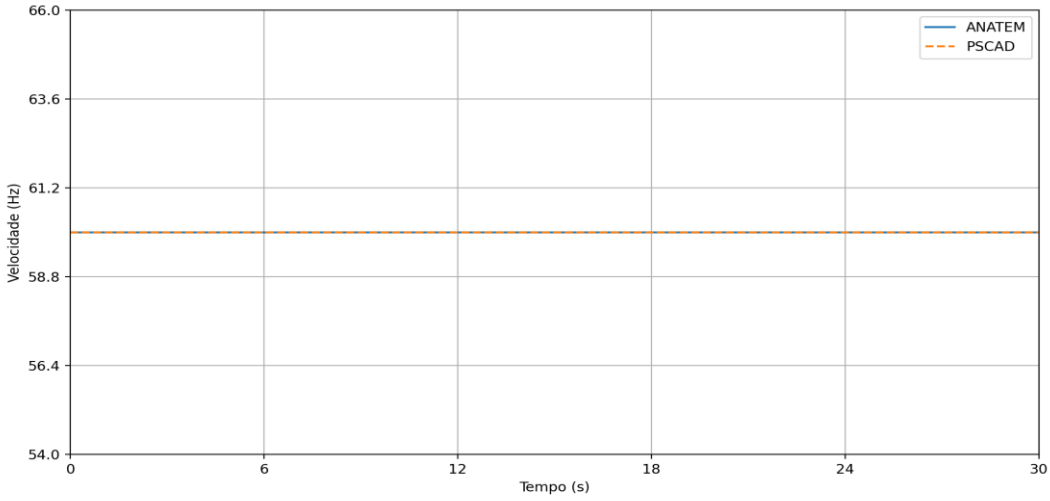

Figura 4-126 - Velocidade da máquina

4.6.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.6.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.6.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.6.4.3.

4.6.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

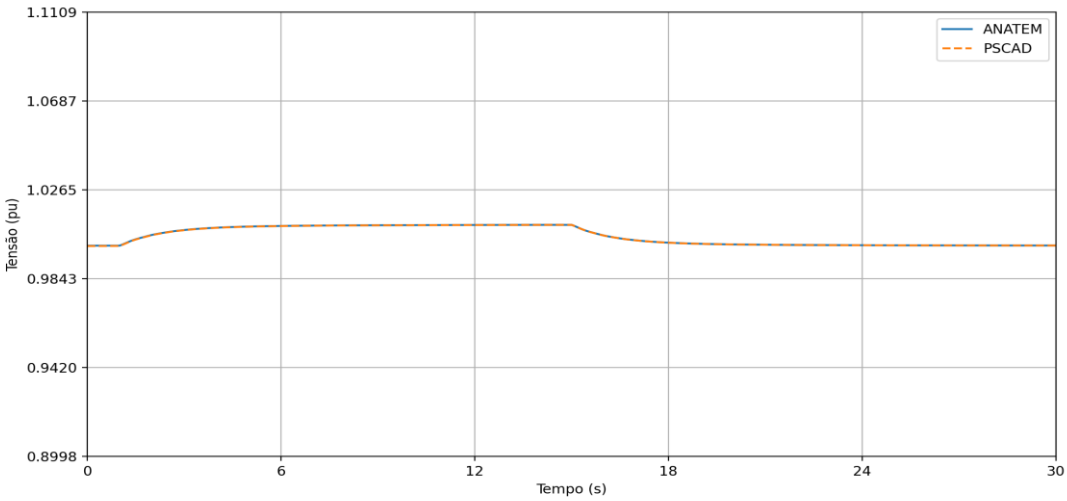

Figura 4-127 - Tensão terminal

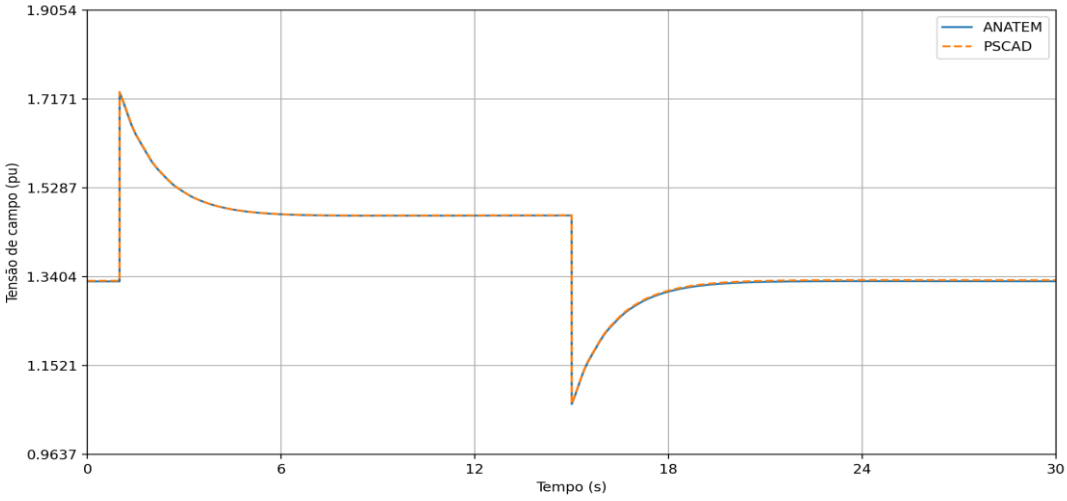

Figura 4-128 - Tensão de campo

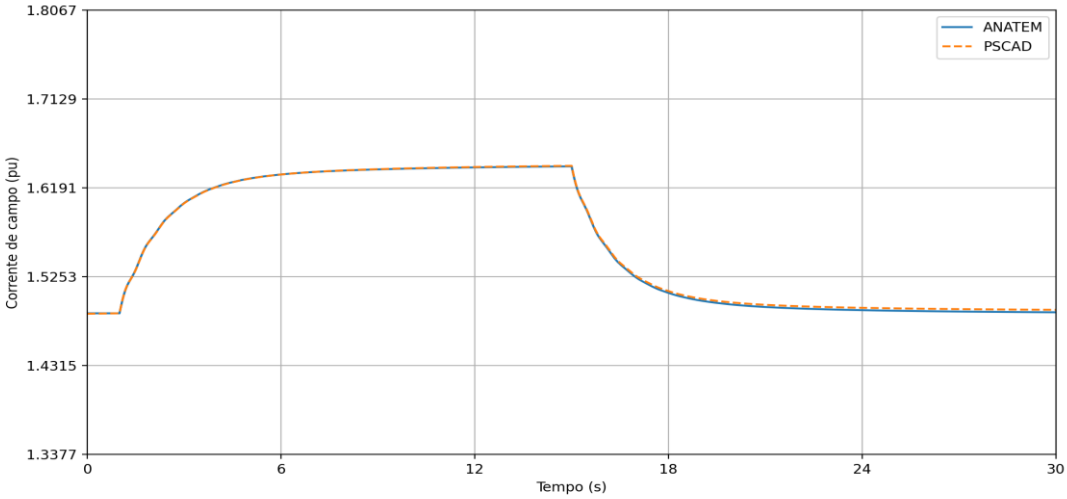

Figura 4-129 - Corrente de campo

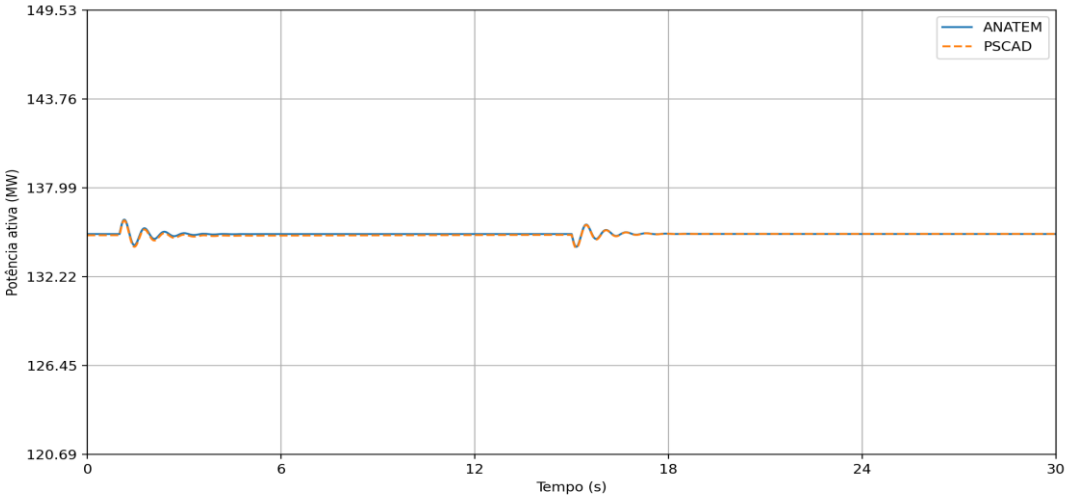

Figura 4-130 - Potência ativa

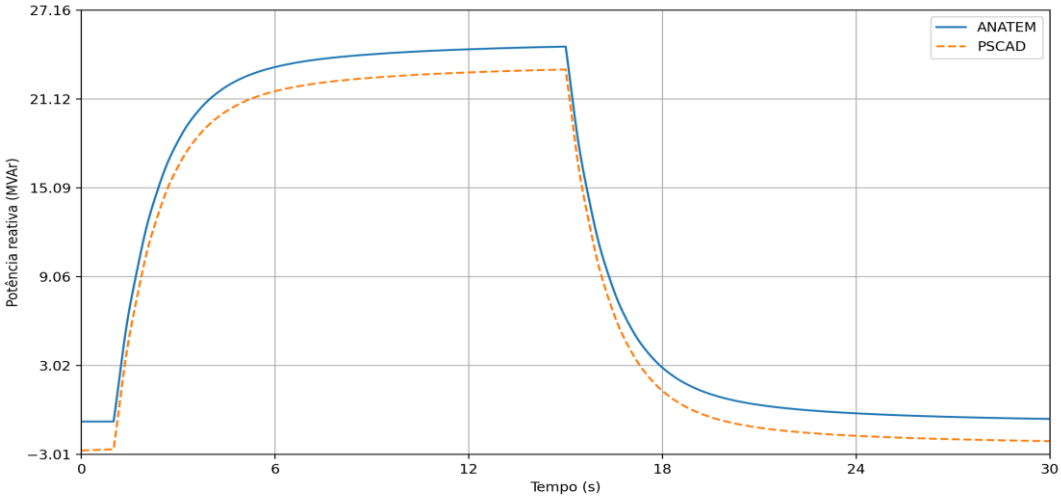

Figura 4-131 - Potência reativa

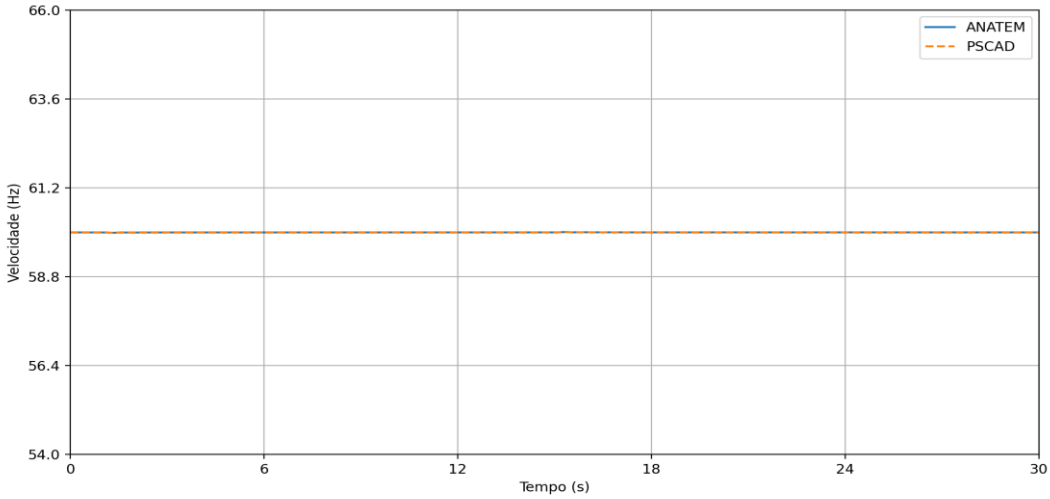

Figura 4-132 - Velocidade da máquina

4.6.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

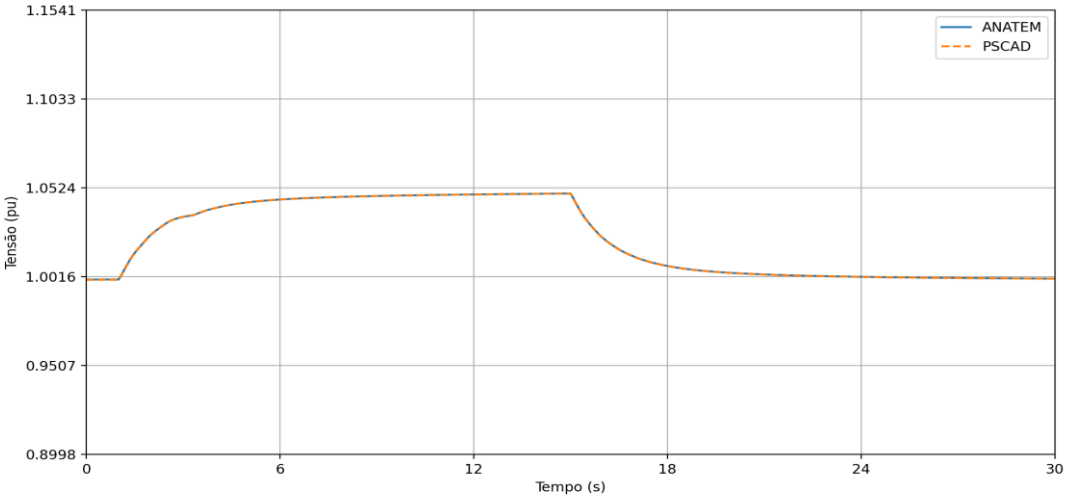

Figura 4-133 - Tensão terminal

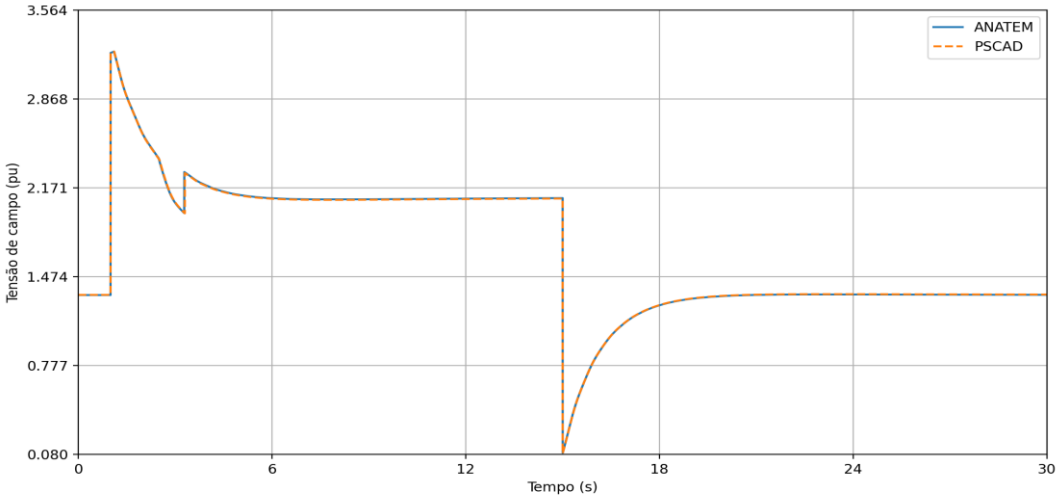

Figura 4-134 - Tensão de campo

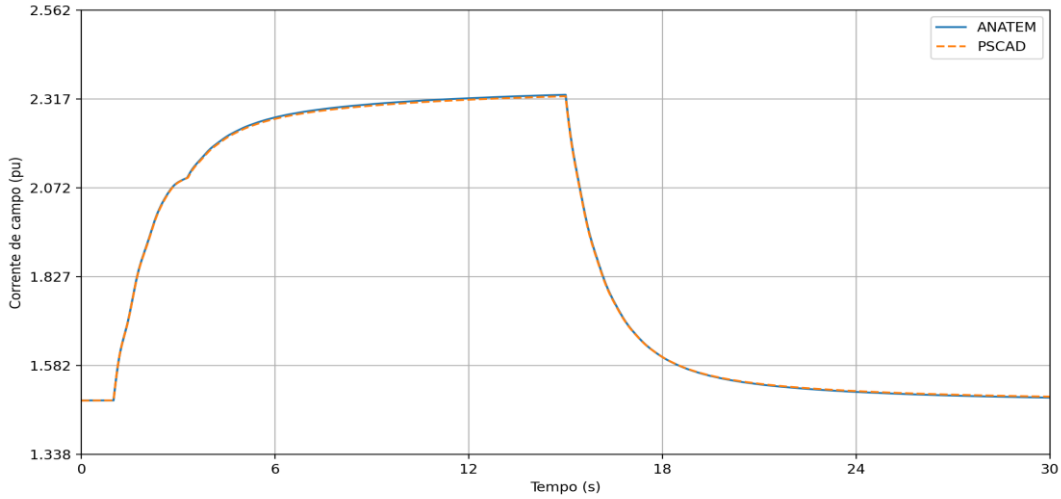

Figura 4-135 - Corrente de campo

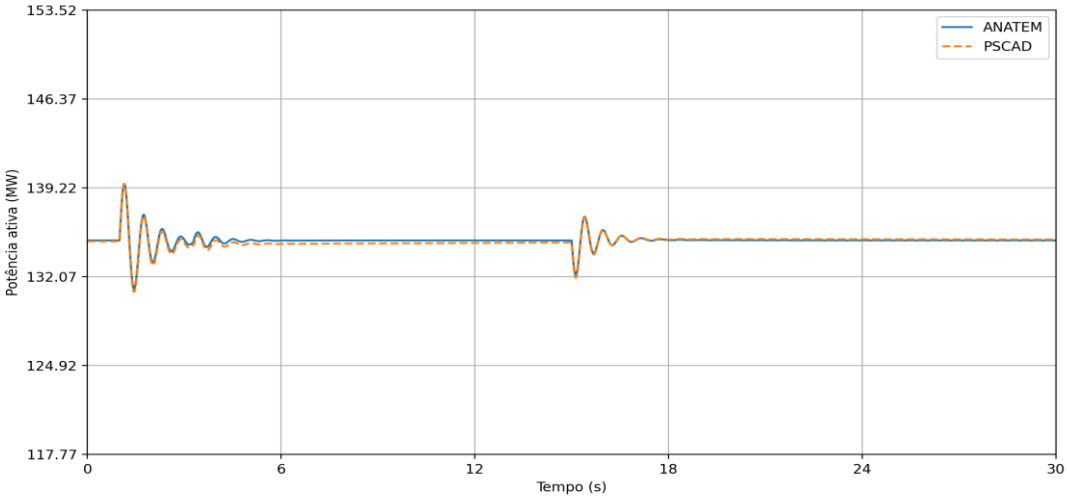

Figura 4-136 - Potência ativa

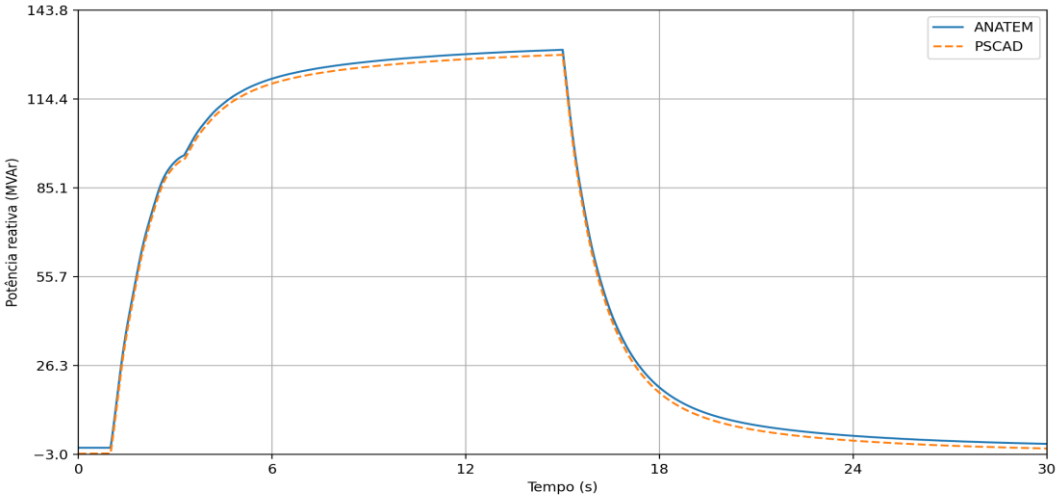

Figura 4-137 - Potência reativa

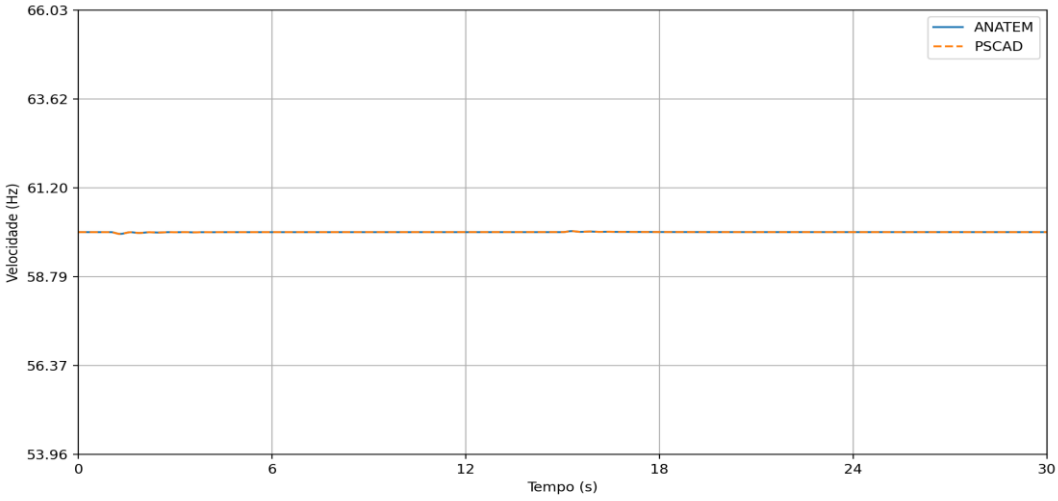

Figura 4-138 - Velocidade da máquina

4.6.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

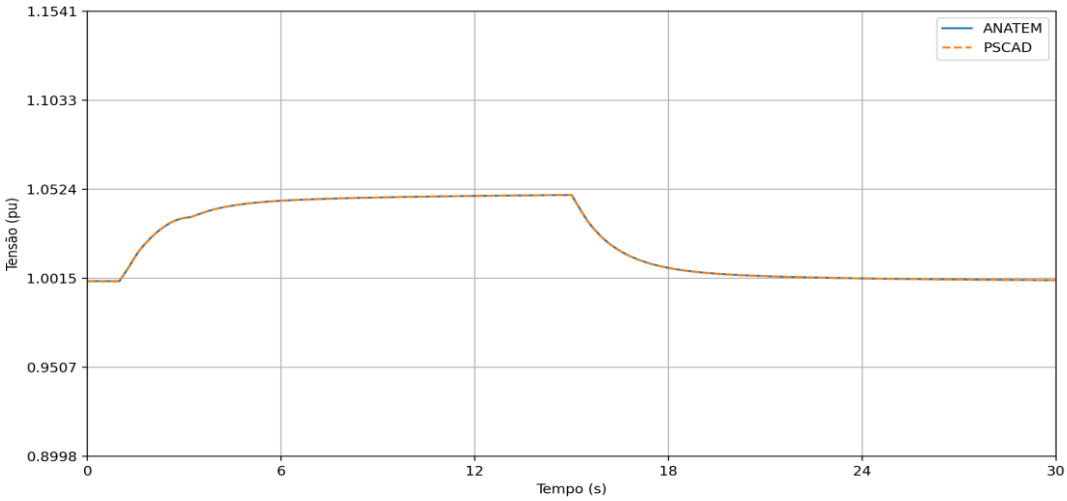

Figura 4-139 - Tensão terminal

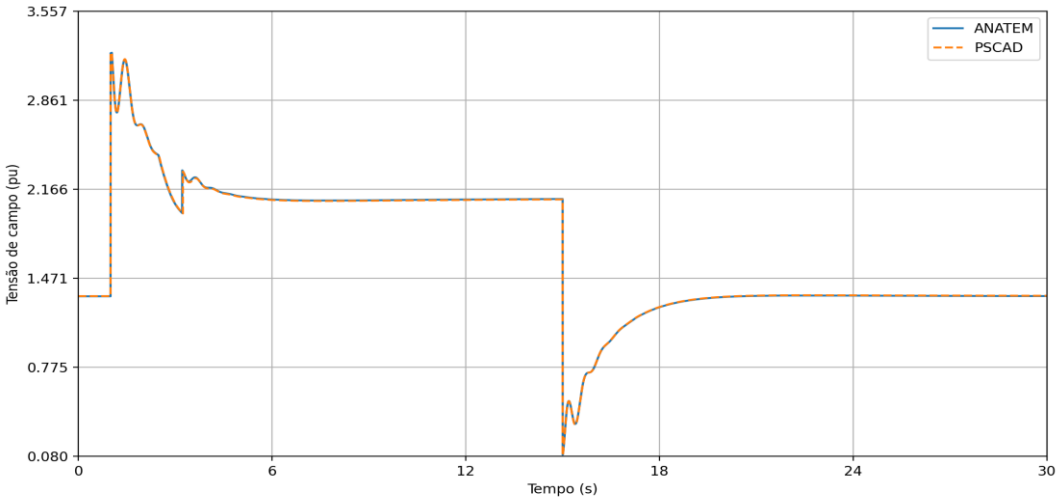

Figura 4-140 - Tensão de campo

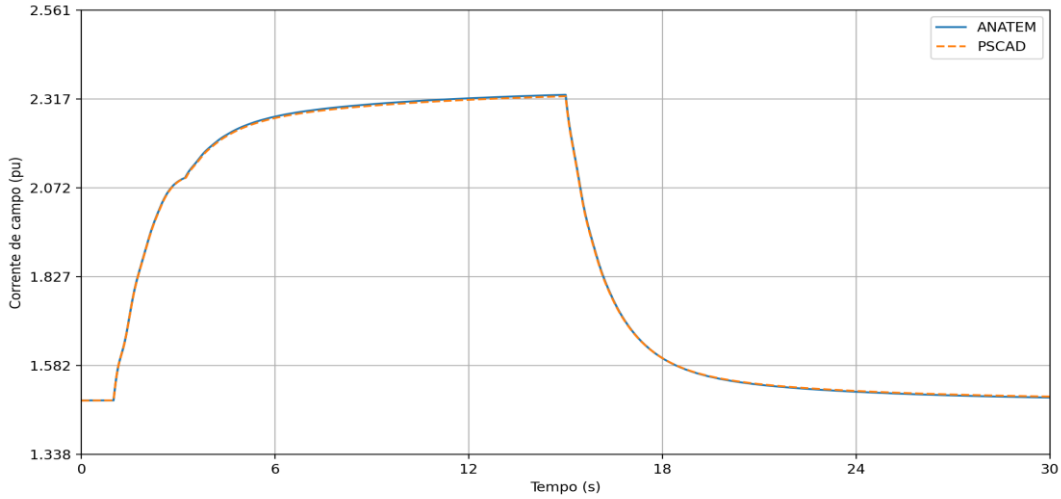

Figura 4-141 - Corrente de campo

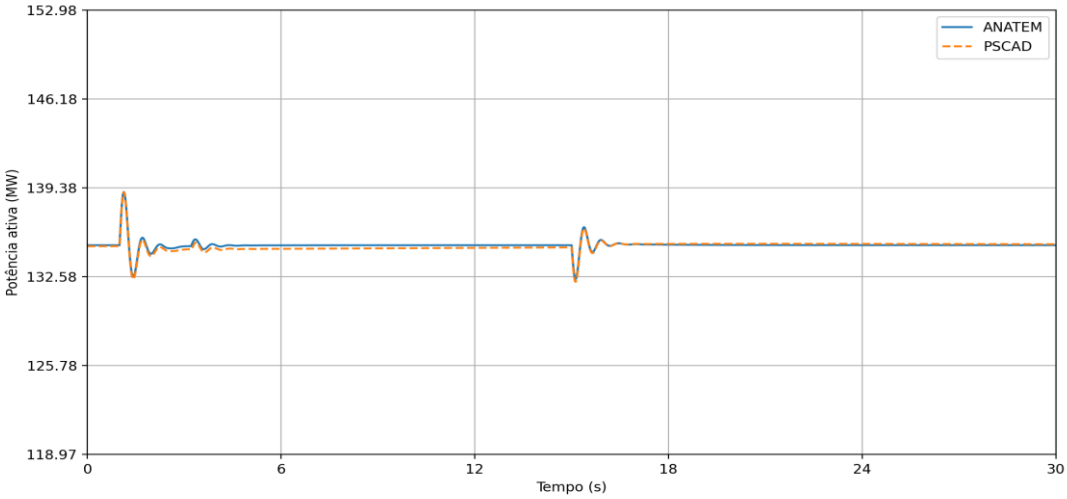

Figura 4-142 - Potência ativa

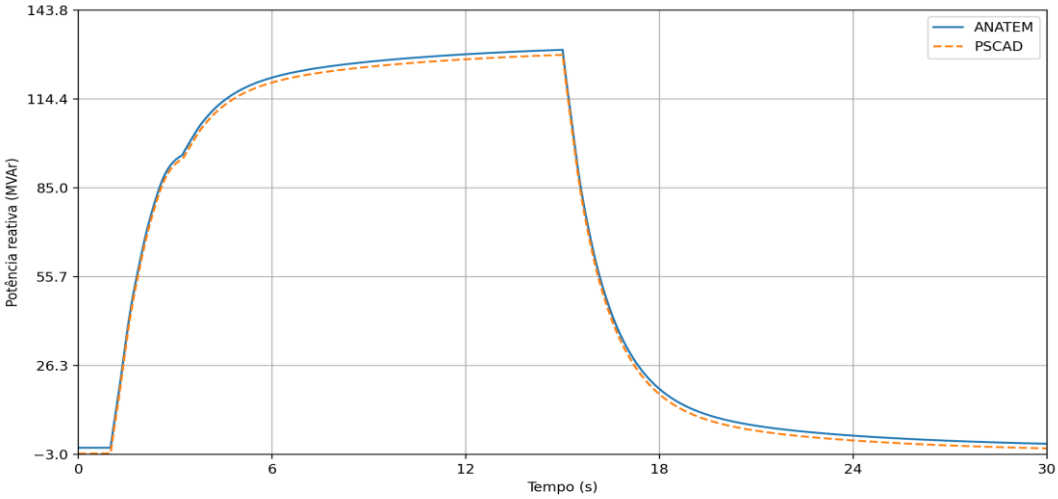

Figura 4-143 - Potência reativa

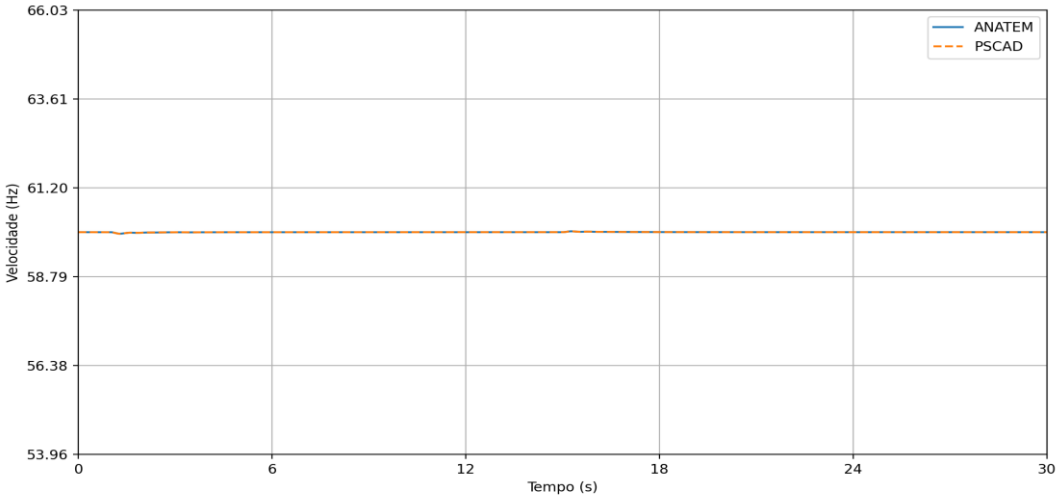

Figura 4-144 - Velocidade da máquina

4.7 CS TERESINA

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Teresina, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.7.1 Modelo do CS Teresina

A Tabela 4-19 apresenta os parâmetros do CS Teresina disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-19 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	120	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	92	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	20	I(KA)	6,276	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	16	H(s)	2,1	
xl(%)	10	D(pu)	0	
T'd(s)	5	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,1	Reatância de Potier
T''d(s)	0,06	xd(pu)	1,2	
T''q(s)	0,21	xd_(pu)	0,2	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	5	T'd
H(s)	2,1	xd__(pu)	0,16	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,06	T''d
S(MVA)	150	Xq(pu)	0,92	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,16	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,21	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.7.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-20, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Teresina estão apresentados na Tabela 4-21. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-20, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-21. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-145.

Tabela 4-20 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Teresina	
Ag	**Y1**	0,0266
Bg	**Y2**	6,2554
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-21 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,827	0,800
1,018	0,950
1,054	0,975
1,093	1,000
1,147	1,033
1,208	1,067
1,274	1,100
1,525	1,200
1,907	1,300

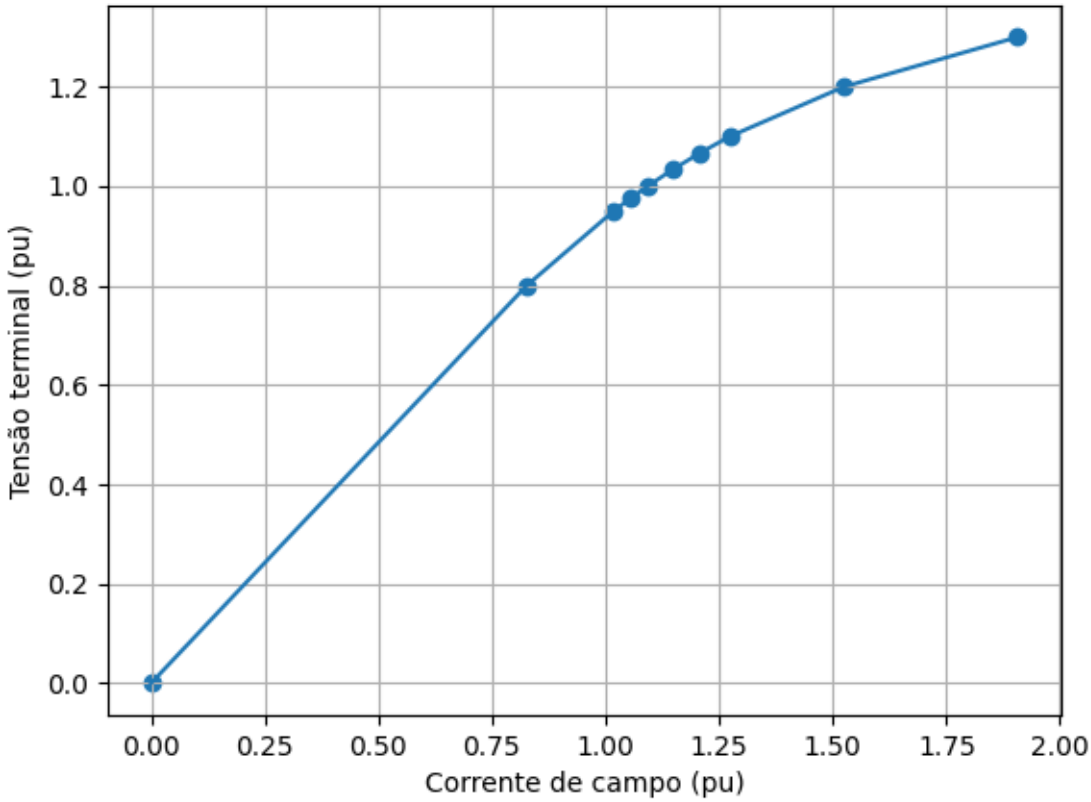

Figura 4-145 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.7.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.7.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.7.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.7.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

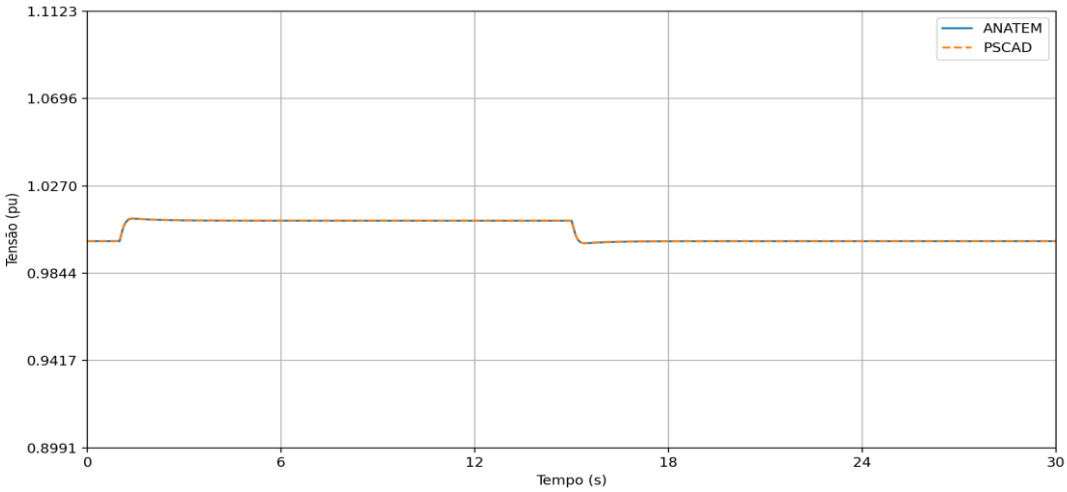

Figura 4-146 - Tensão terminal

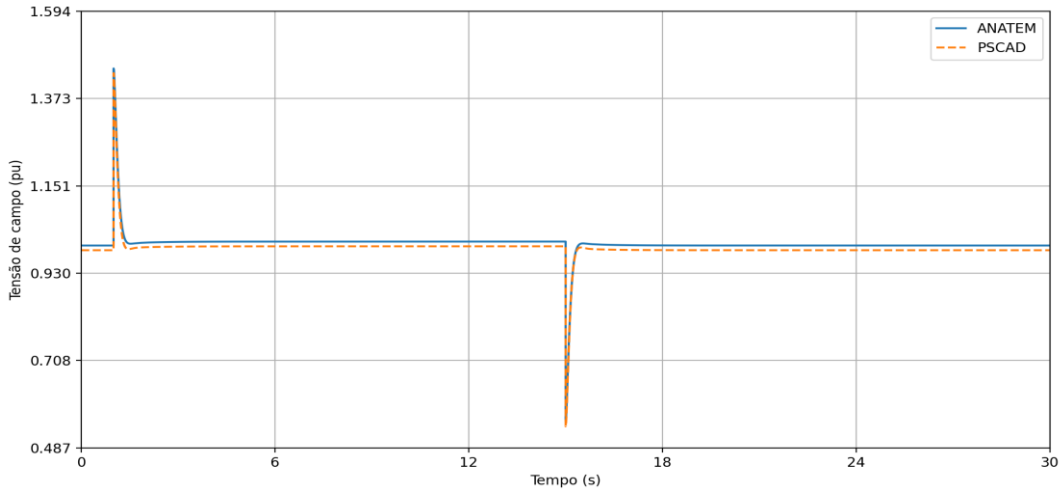

Figura 4-147 - Tensão de campo

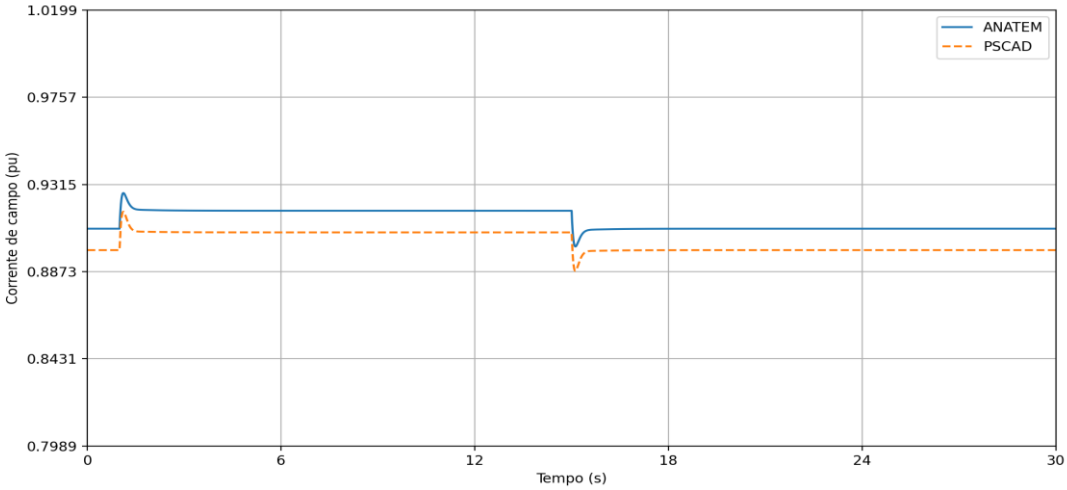

Figura 4-148 - Corrente de campo

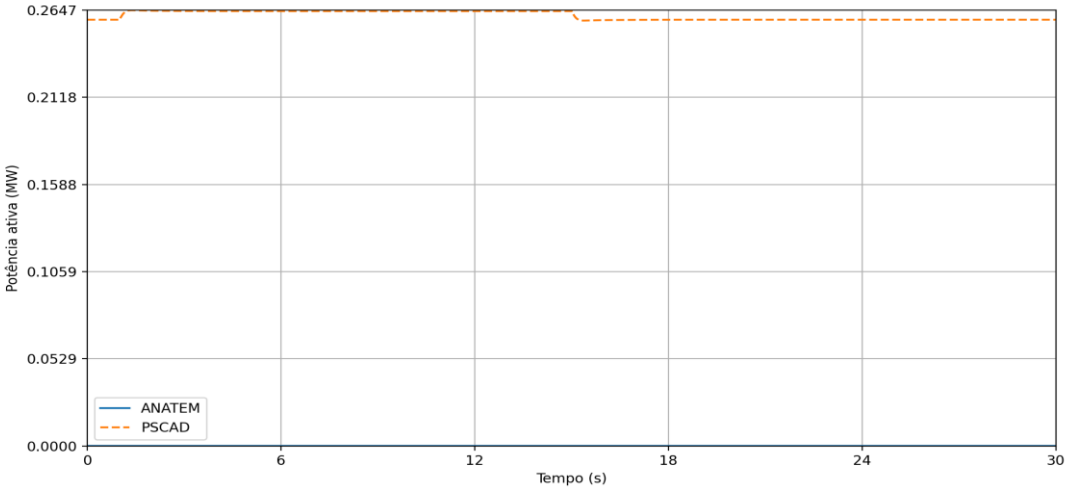

Figura 4-149 - Potência ativa

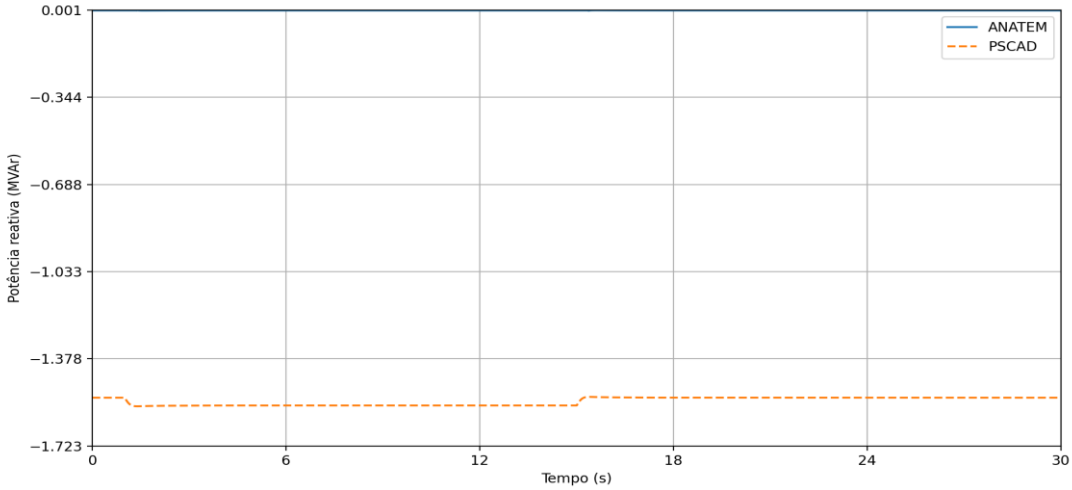

Figura 4-150 - Potência reativa

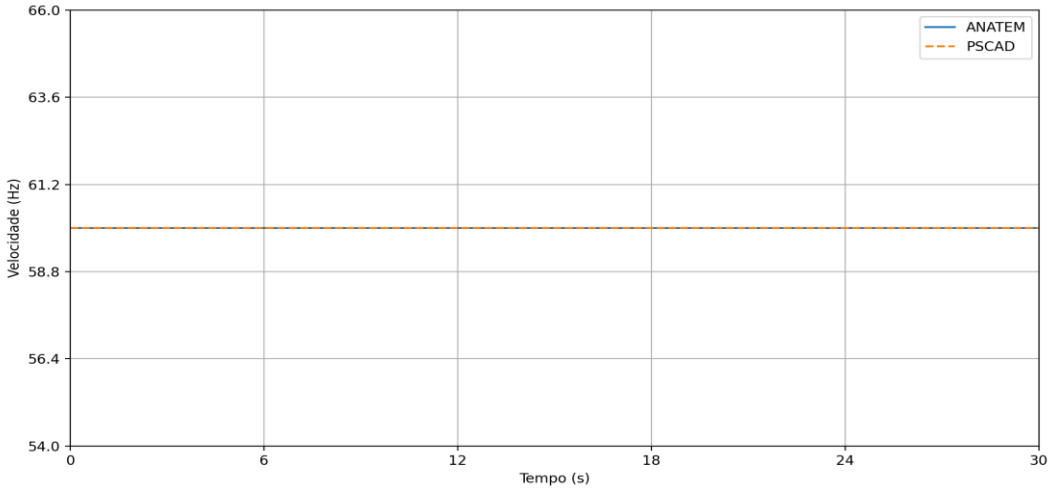

Figura 4-151 - Velocidade da máquina

4.7.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

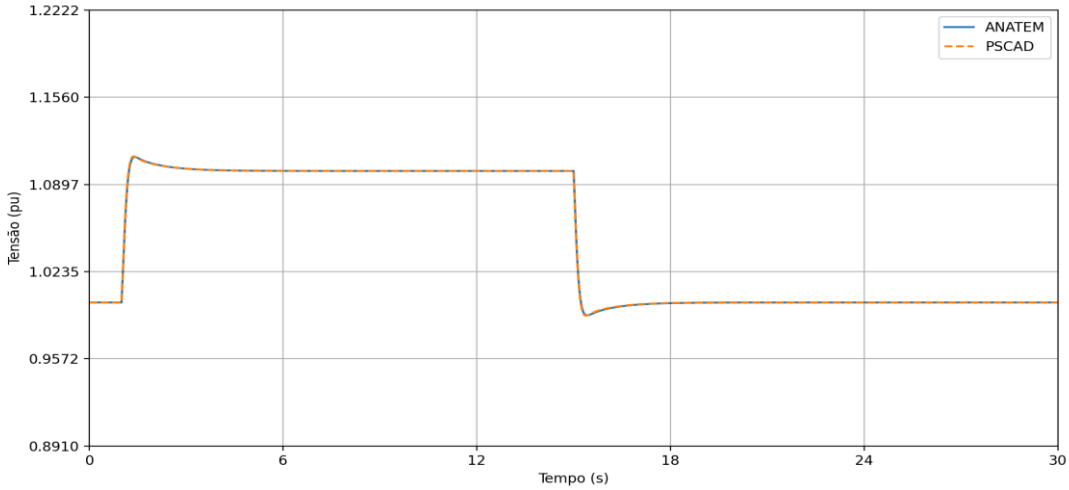

Figura 4-152 - Tensão terminal

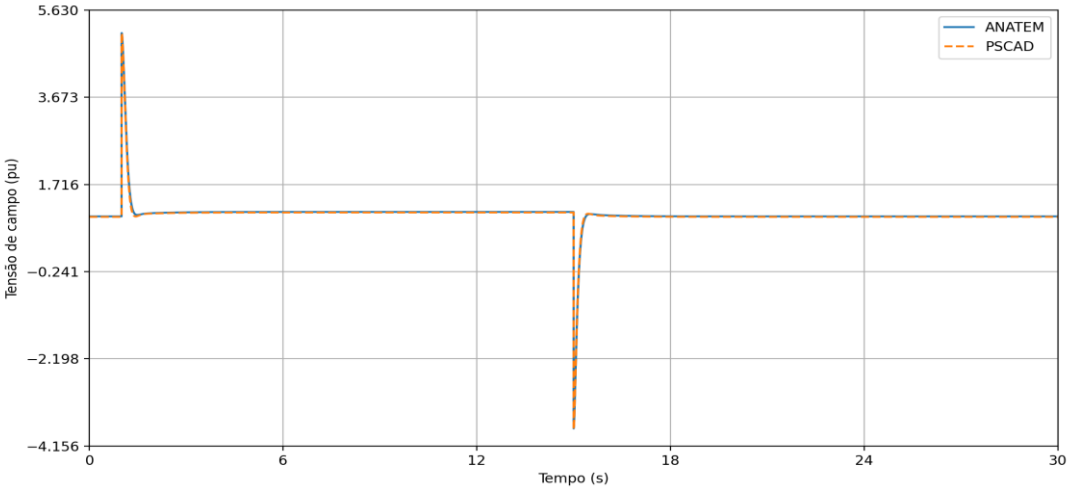

Figura 4-153 - Tensão de campo

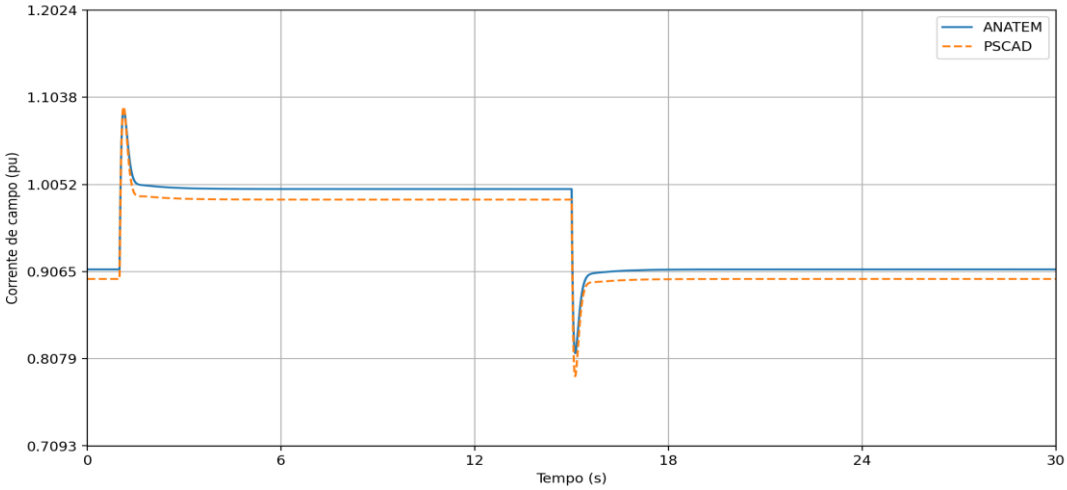

Figura 4-154 - Corrente de campo

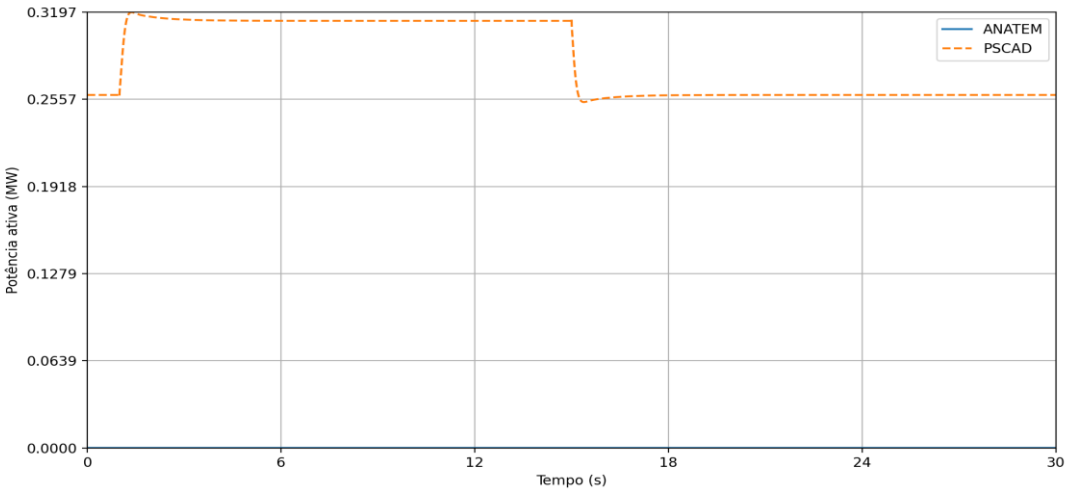

Figura 4-155 - Potência ativa

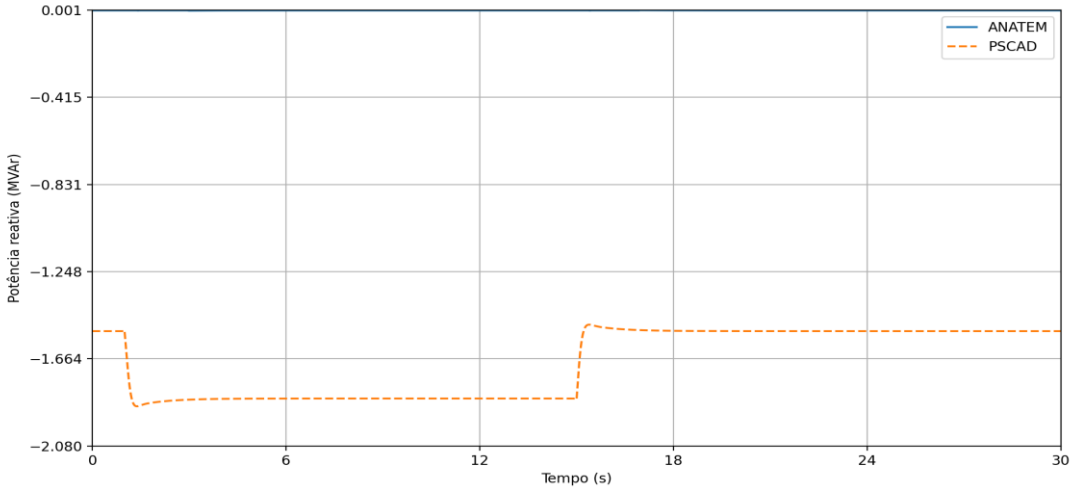

Figura 4-156 - Potência reativa

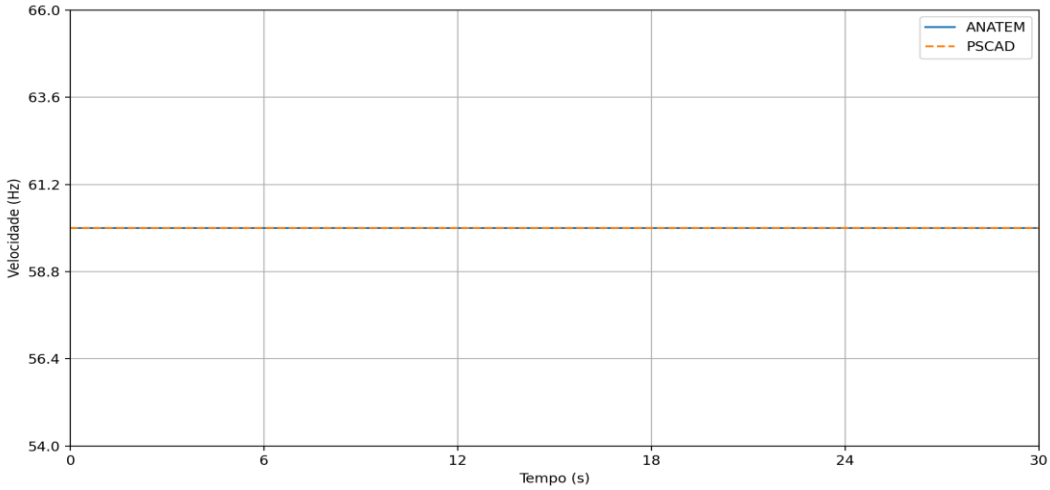

Figura 4-157 - Velocidade da máquina

4.7.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.7.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.7.4.2.

4.7.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

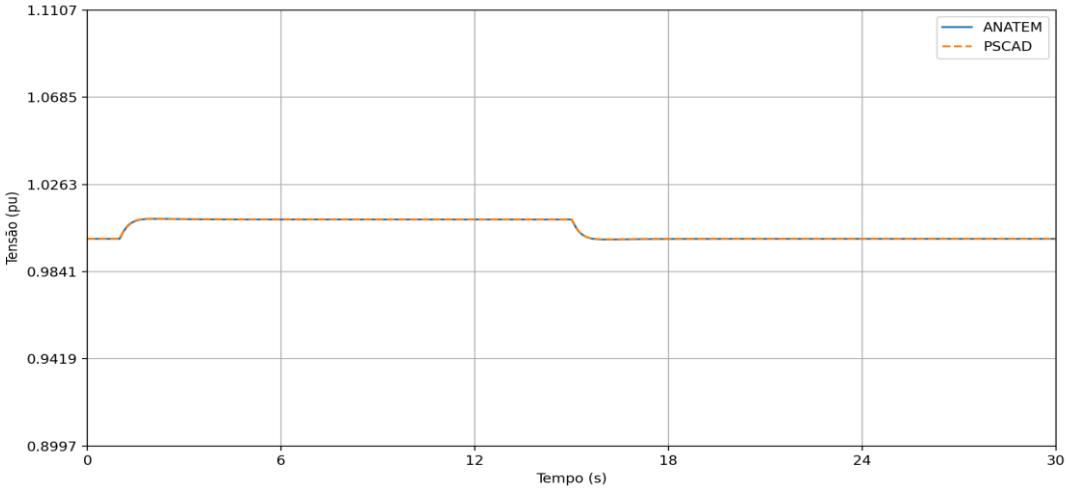

Figura 4-158 - Tensão terminal

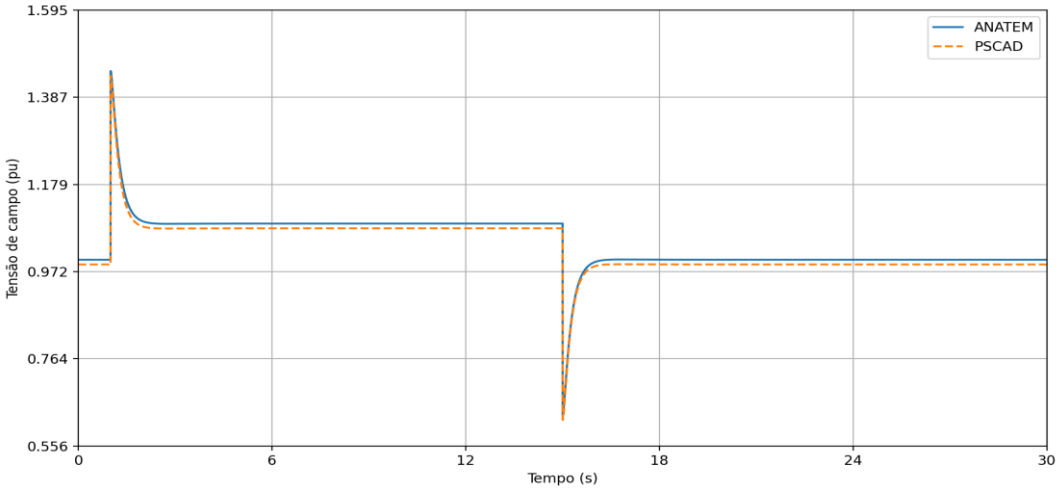

Figura 4-159 - Tensão de campo

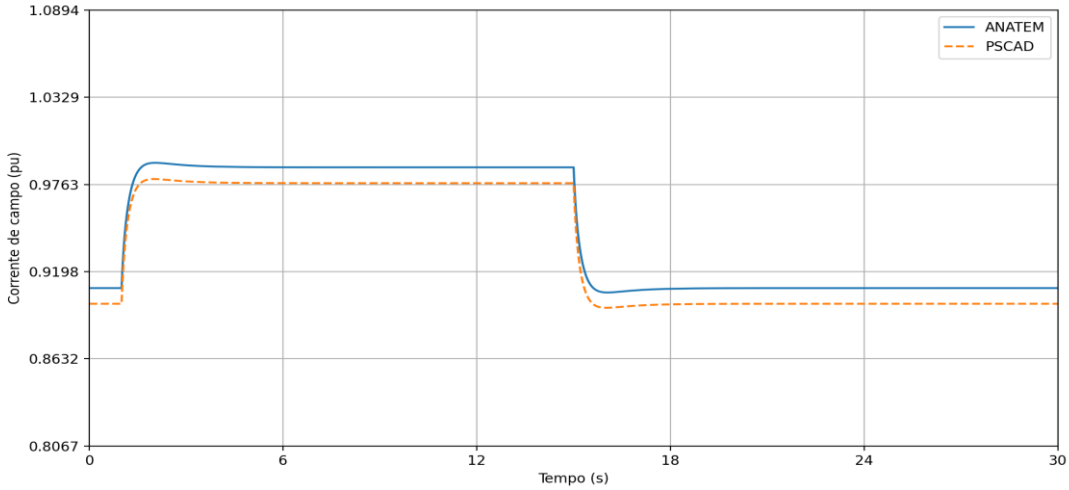

Figura 4-160 - Corrente de campo

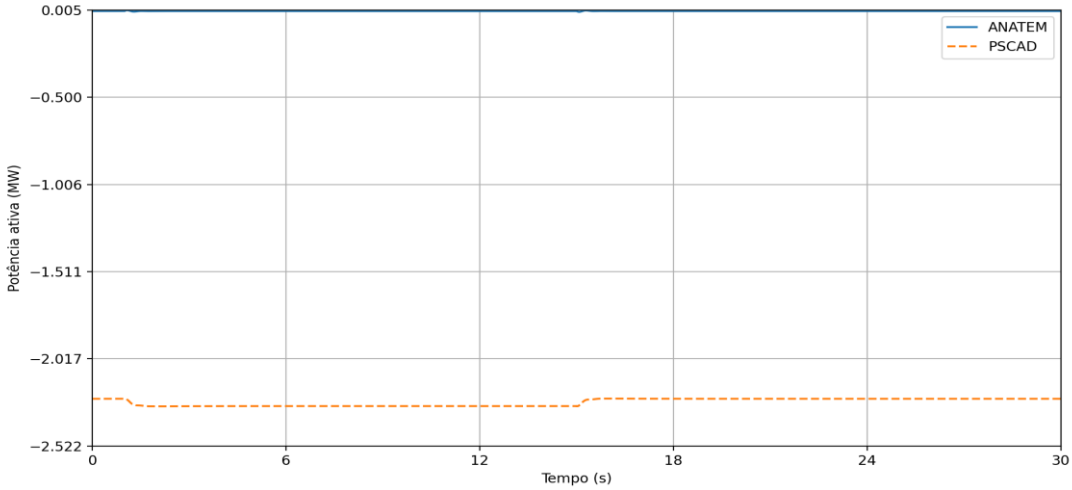

Figura 4-161 - Potência ativa

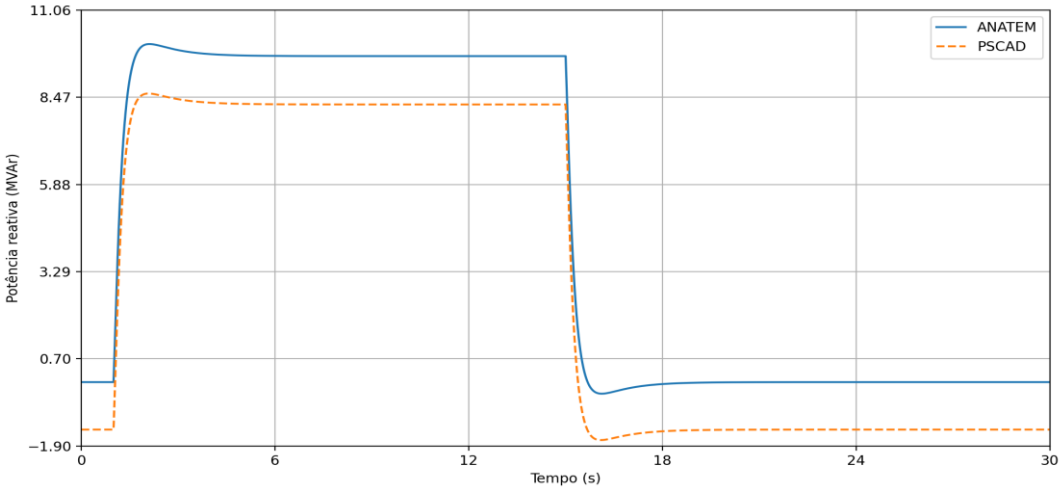

Figura 4-162 - Potência reativa

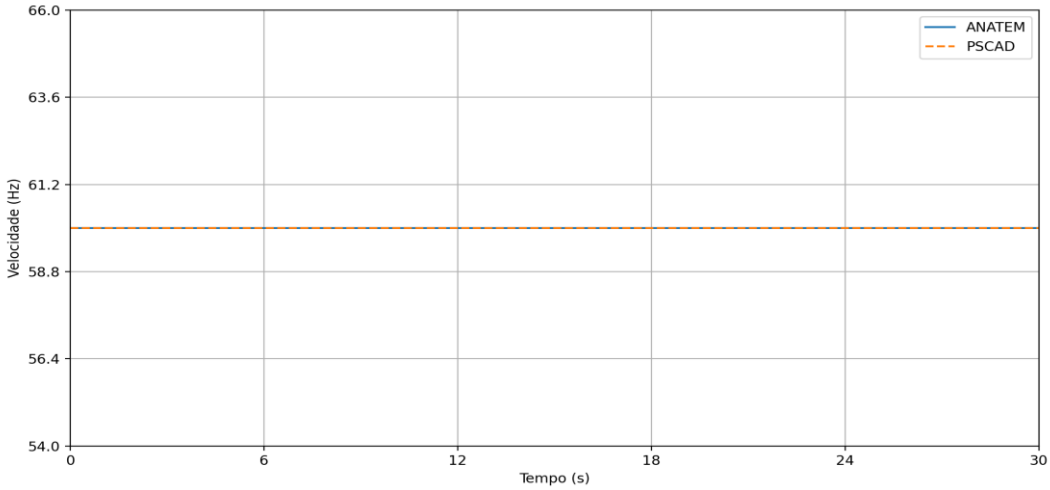

Figura 4-163 - Velocidade da máquina

4.7.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

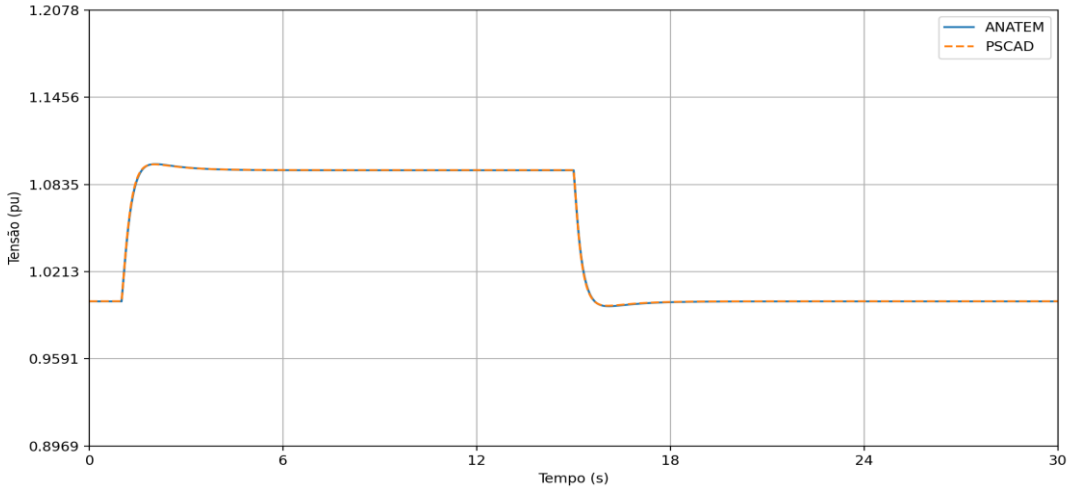

Figura 4-164 - Tensão terminal

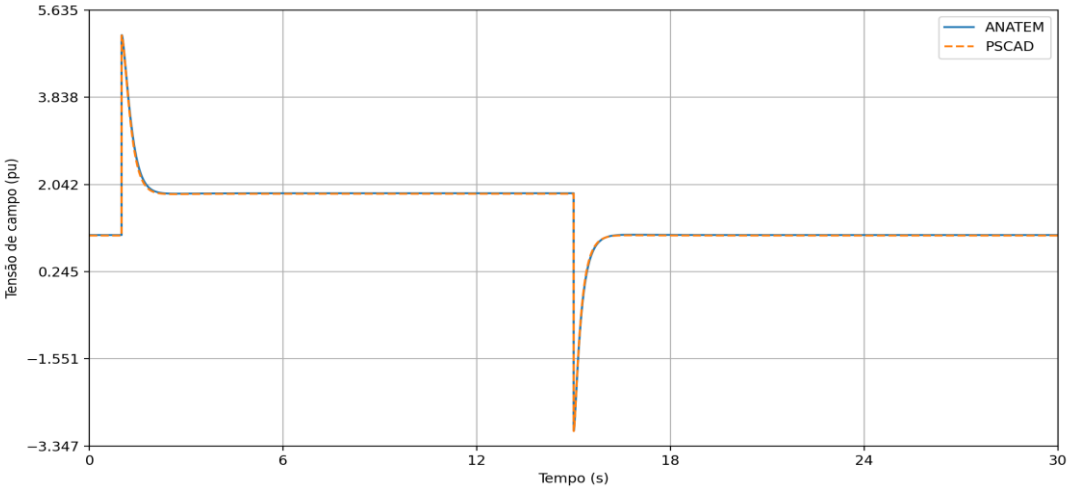

Figura 4-165 - Tensão de campo

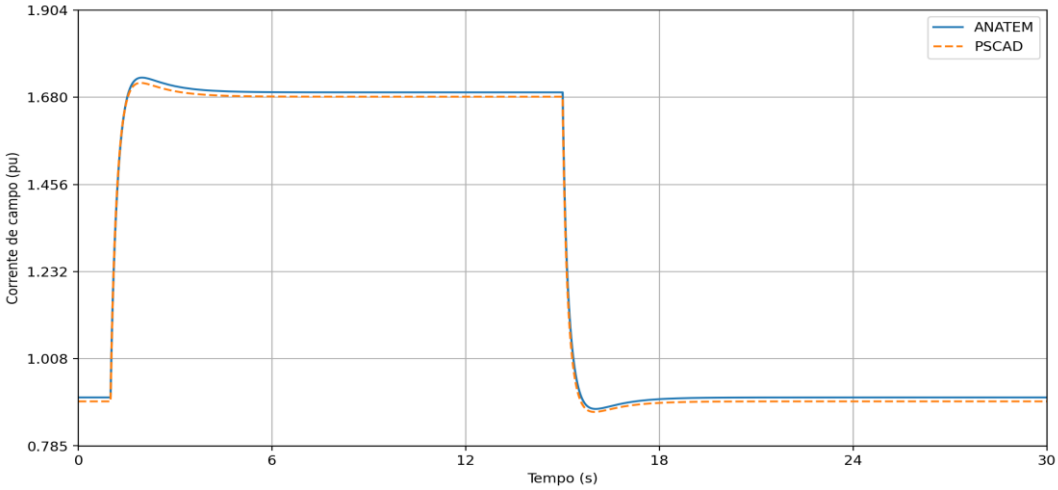

Figura 4-166 - Corrente de campo

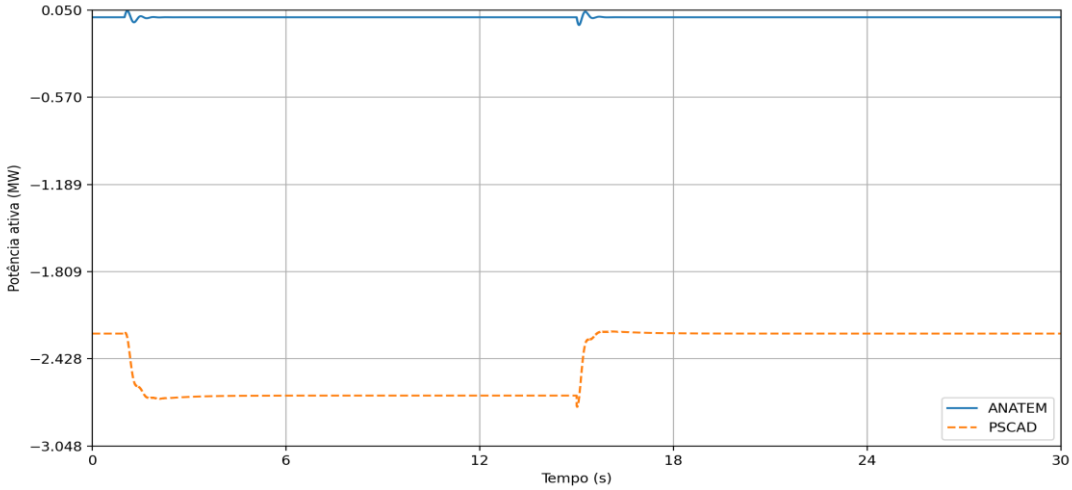

Figura 4-167 - Potência ativa

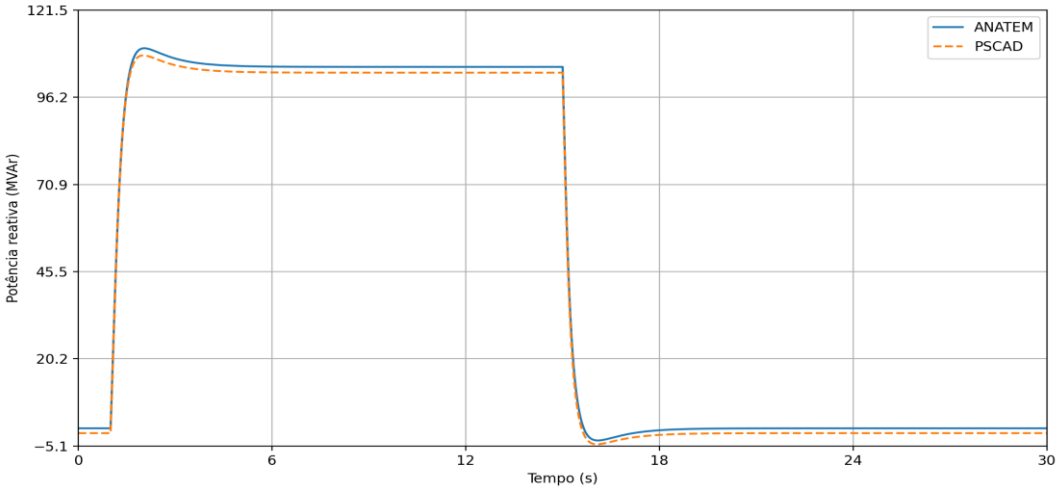

Figura 4-168 - Potência reativa

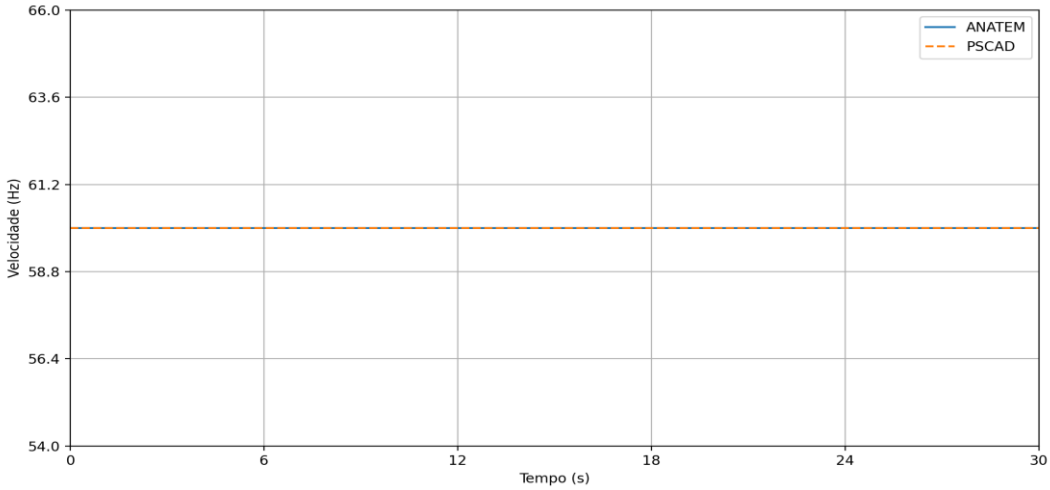

Figura 4-169 - Velocidade da máquina

4.8 UHE EMBORCAÇÃO

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Emborcação, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.8.1 Modelo da UHE Emborcação

A Tabela 4-22 apresenta os parâmetros da UHE Emborcação disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-22 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	92,89	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	68,99	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	31,99	I(KA)	13,12	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	25,59	H(s)	4,722	
xl(%)	13,99	D(pu)	0	
T'd(s)	5	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,14	Reatância de Potier
T''d(s)	0,065	xd(pu)	0,929	
T''q(s)	0,085	xd_(pu)	0,32	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	5	T'd
H(s)	4,722	xd__(pu)	0,256	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,065	T''d
S(MVA)	313,6	Xq(pu)	0,69	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,256	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,085	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.8.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-23, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Emborcação estão apresentados na Tabela

4-24. A partir dos parâmetros da Tabela 4-23, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-24. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-170.

Tabela 4-23 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Emborcação	
Ag	**Y1**	0,02
Bg	**Y2**	7,5
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-24 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,82	0,800
1,012	0,950
1,049	0,975
1,09	1,000
1,148	1,033
1,215	1,067
1,29	1,100
1,602	1,200
2,15	1,300

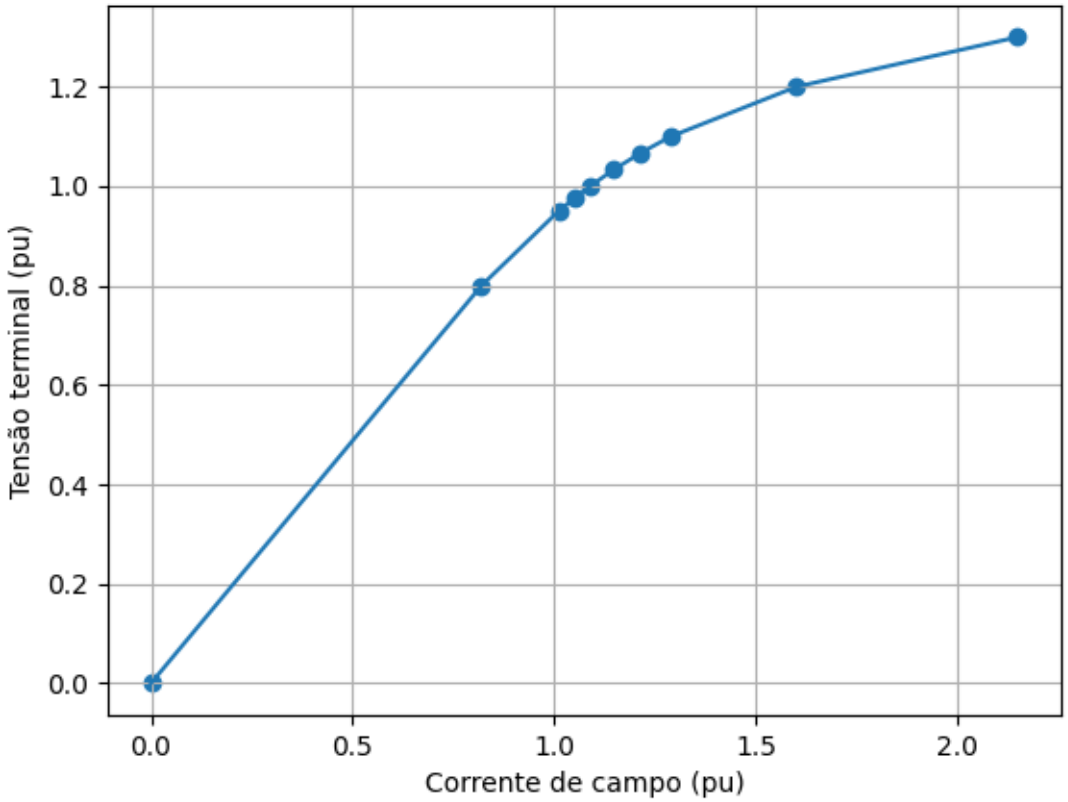

Figura 4-170 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.8.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.8.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.8.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.8.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

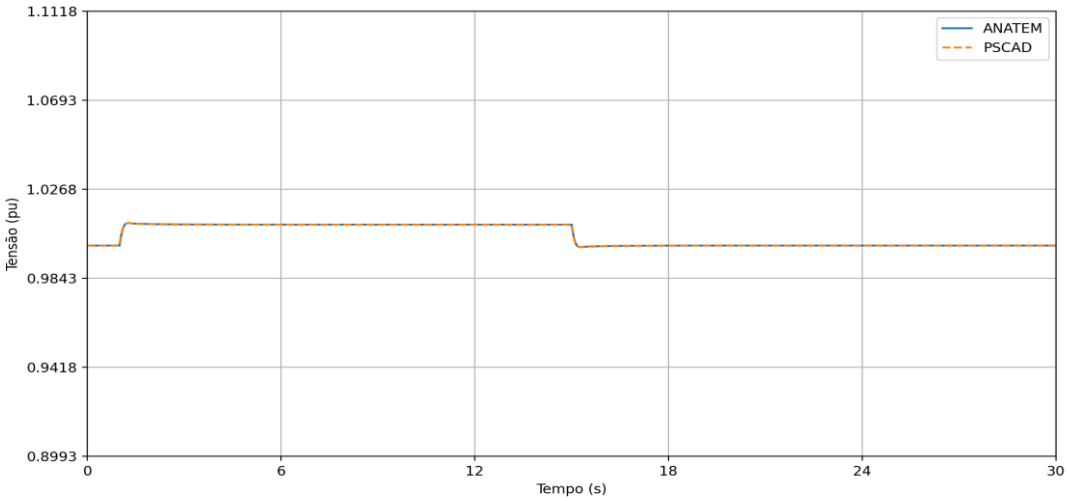

Figura 4-171 - Tensão terminal

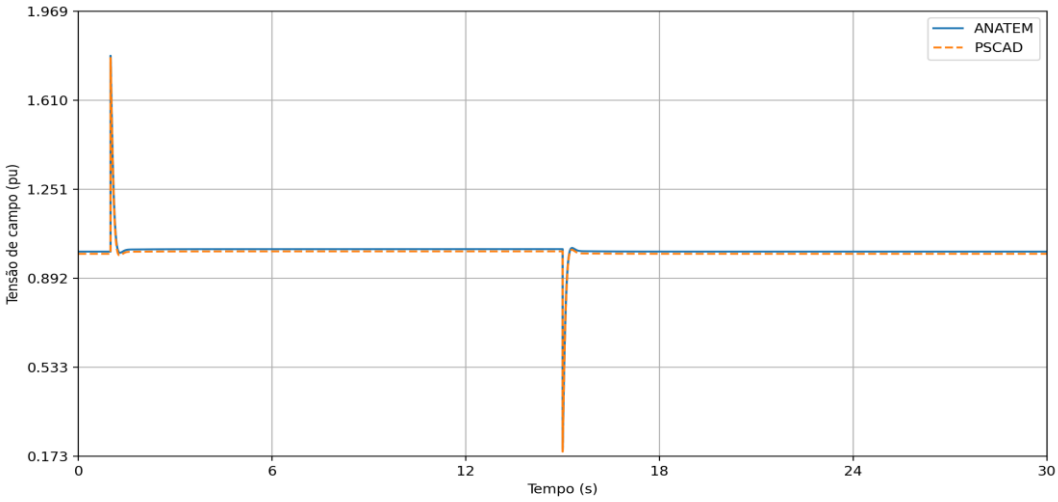

Figura 4-172 - Tensão de campo

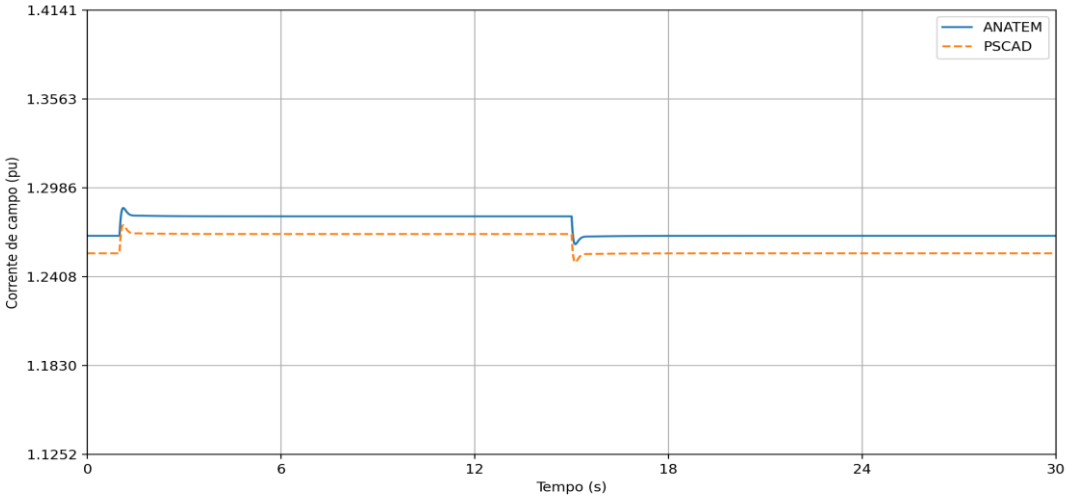

Figura 4-173 - Corrente de campo

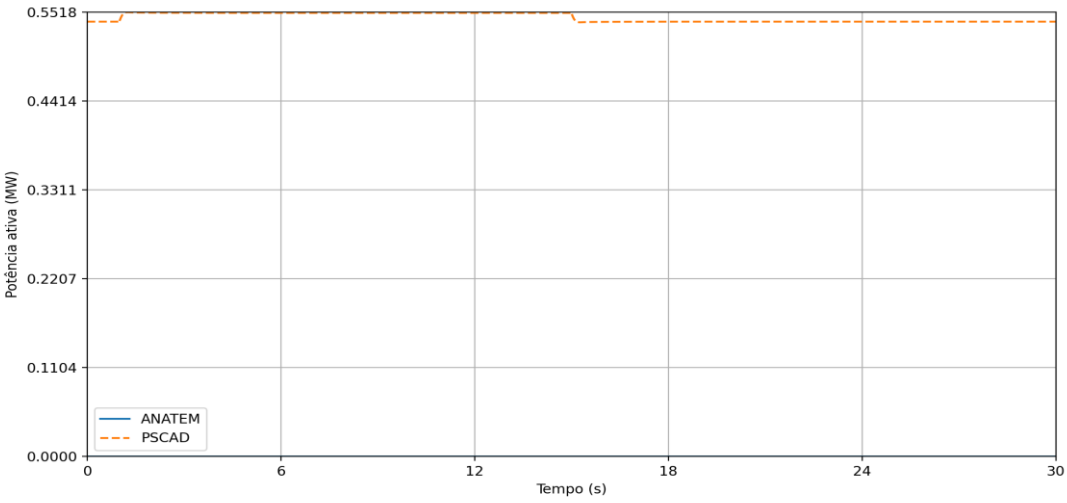

Figura 4-174 - Potência ativa

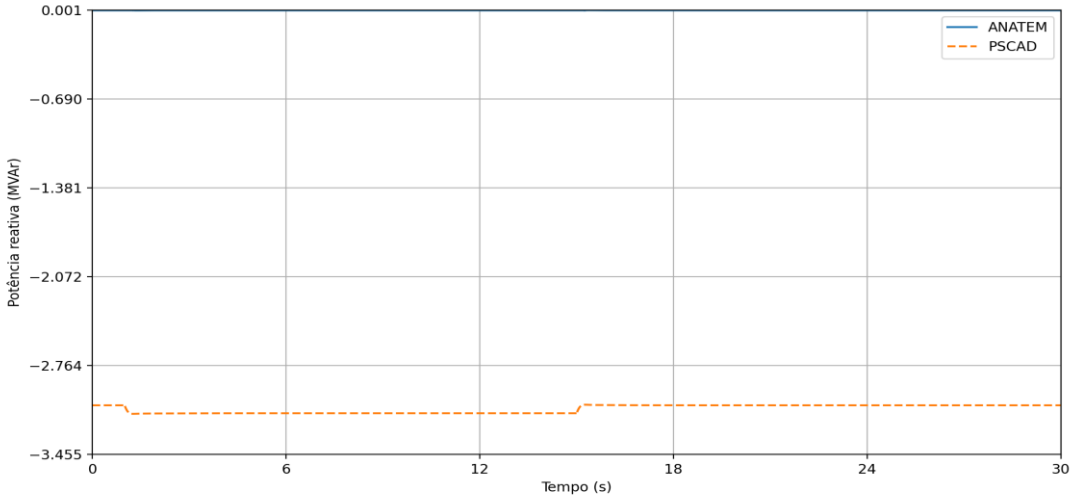

Figura 4-175 - Potência reativa

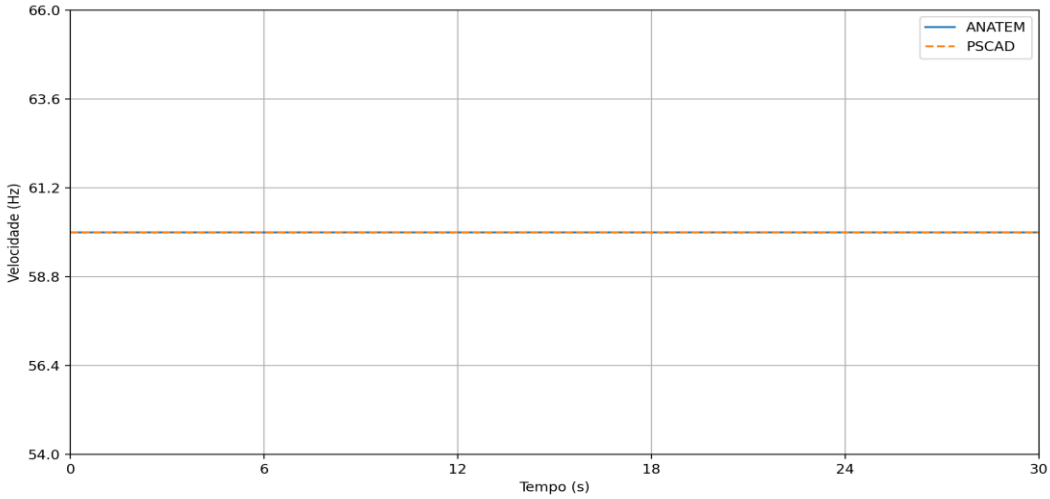

Figura 4-176 - Velocidade da máquina

4.8.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

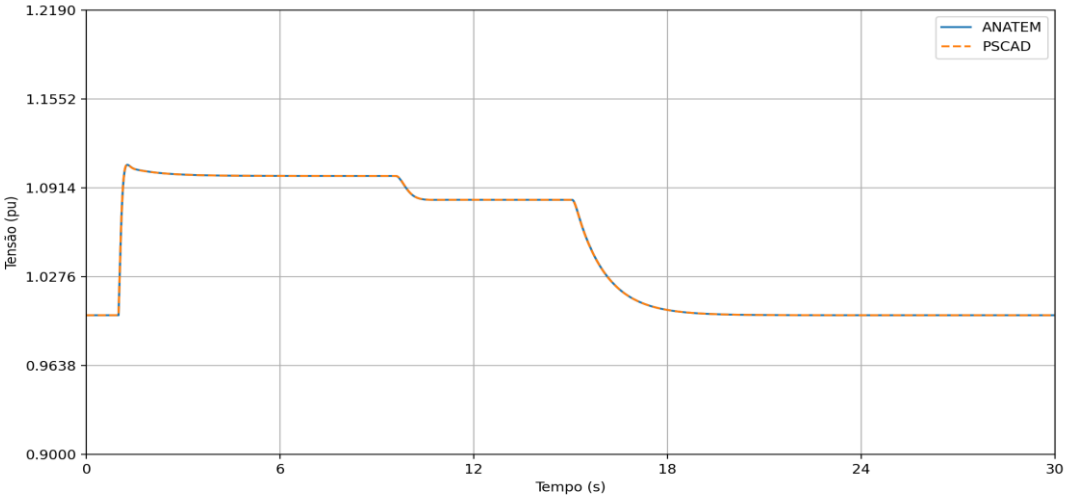

Figura 4-177 - Tensão terminal

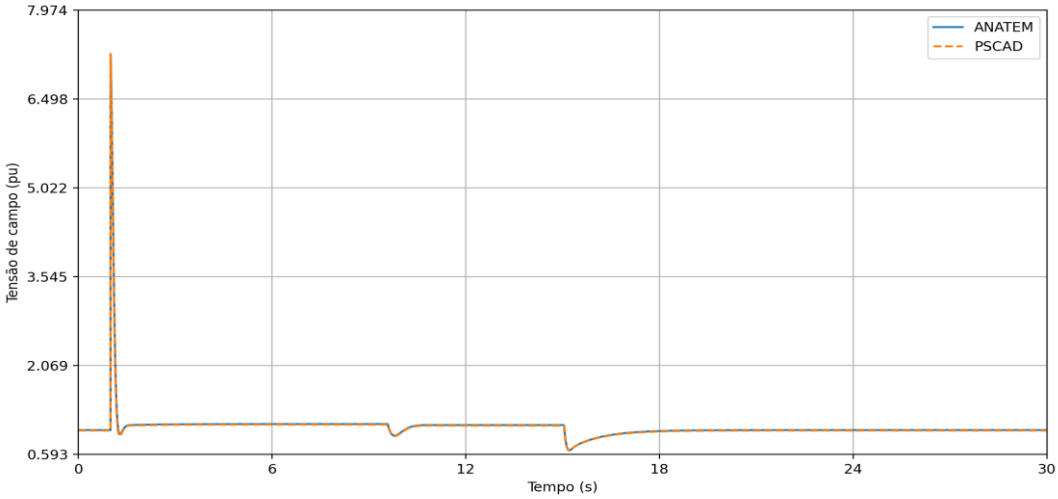

Figura 4-178 - Tensão de campo

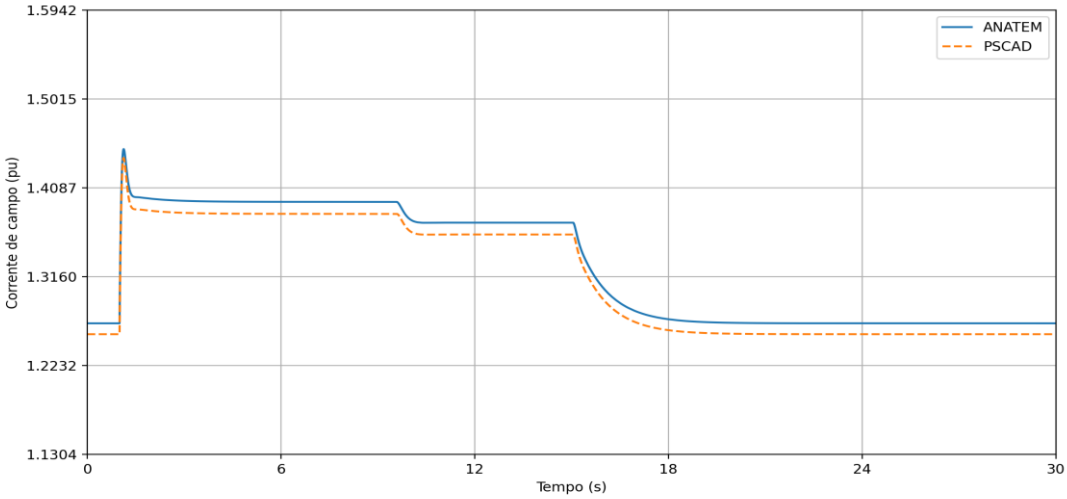

Figura 4-179 - Corrente de campo

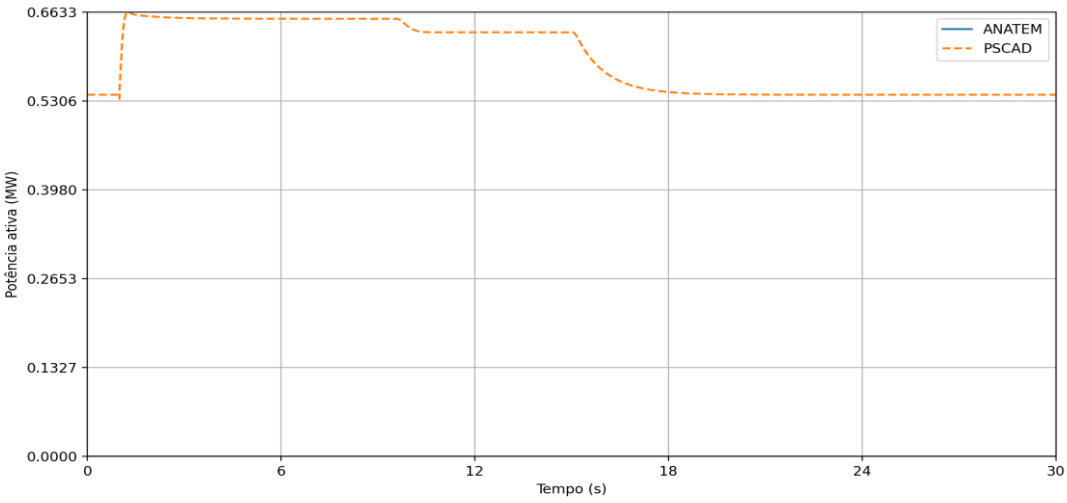

Figura 4-180 - Potência ativa

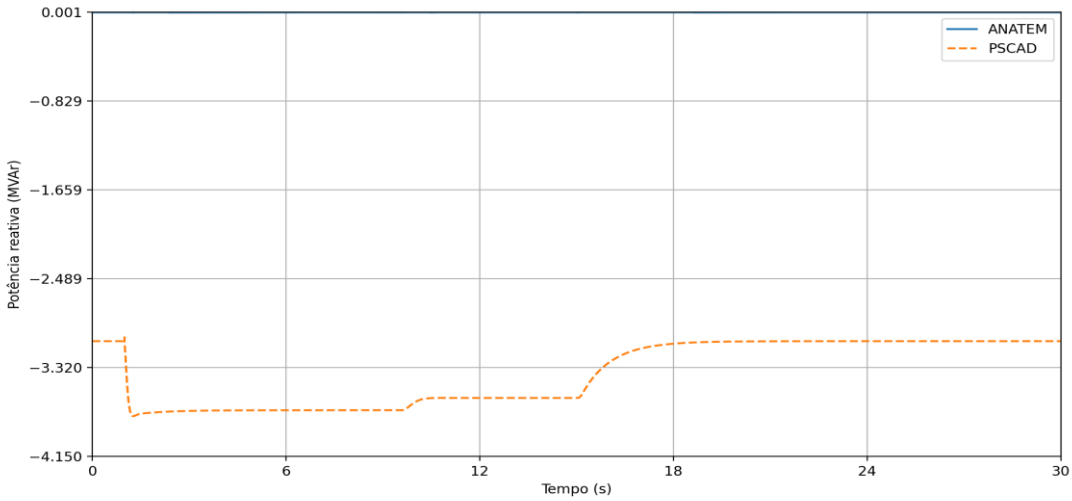

Figura 4-181 - Potência reativa

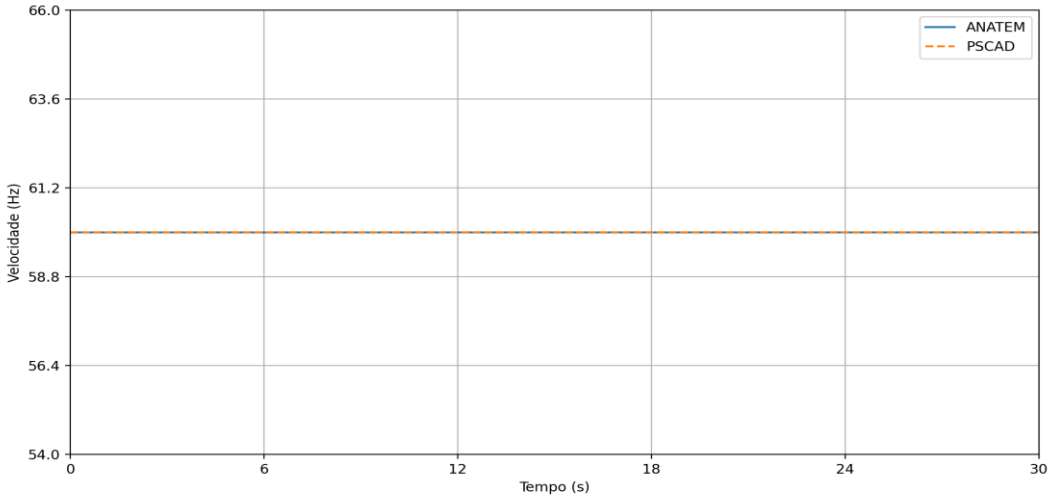

Figura 4-182 - Velocidade da máquina

4.8.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.8.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear

do regulador apresentada na Seção 4.8.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.8.4.3.

4.8.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

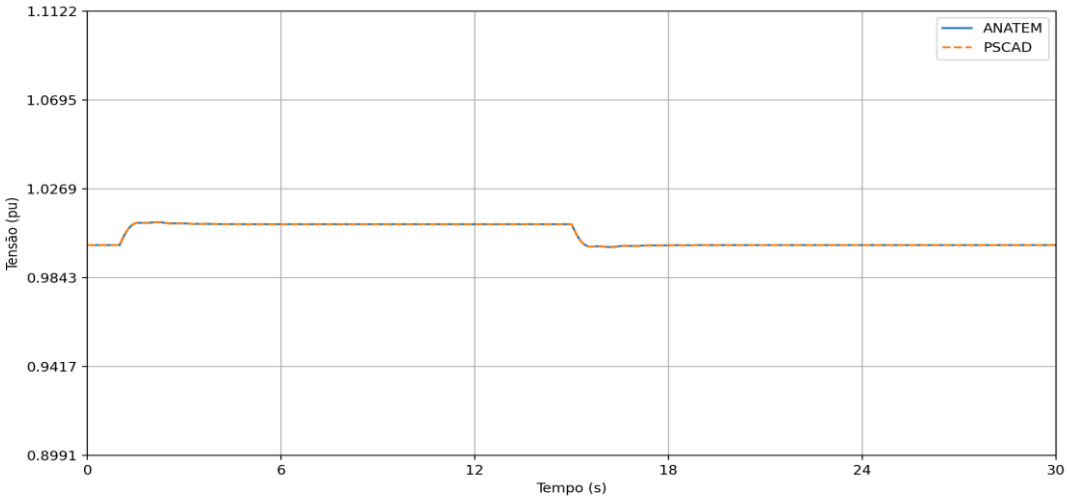

Figura 4-183 - Tensão terminal

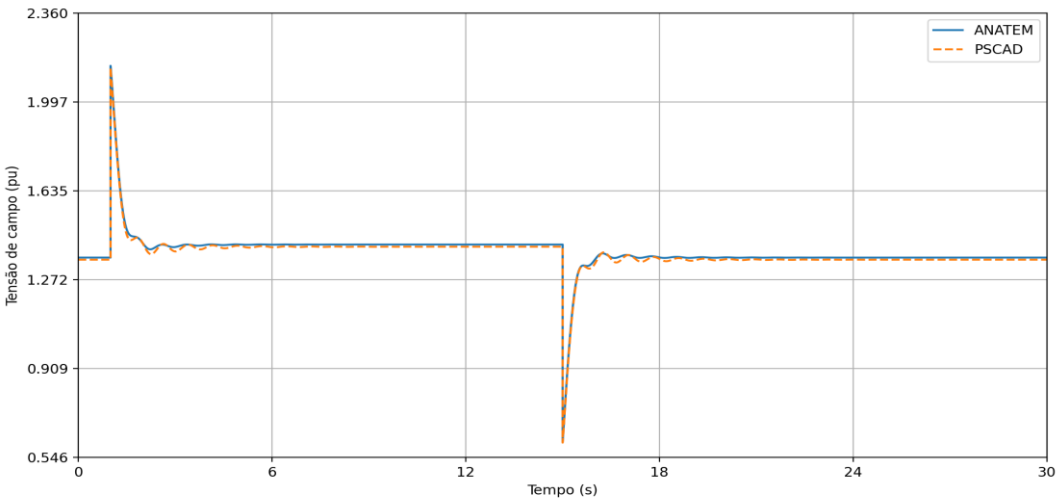

Figura 4-184 - Tensão de campo

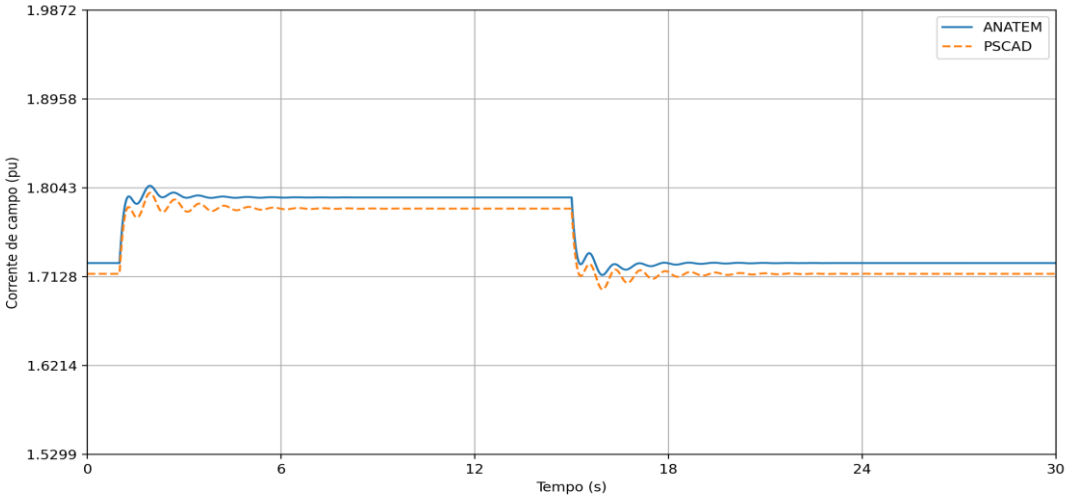

Figura 4-185 - Corrente de campo

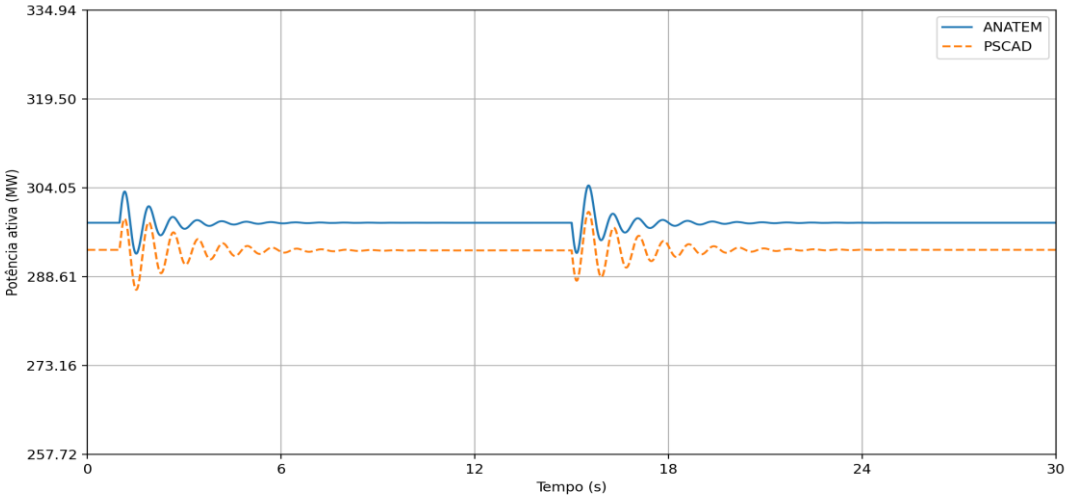

Figura 4-186 - Potência ativa

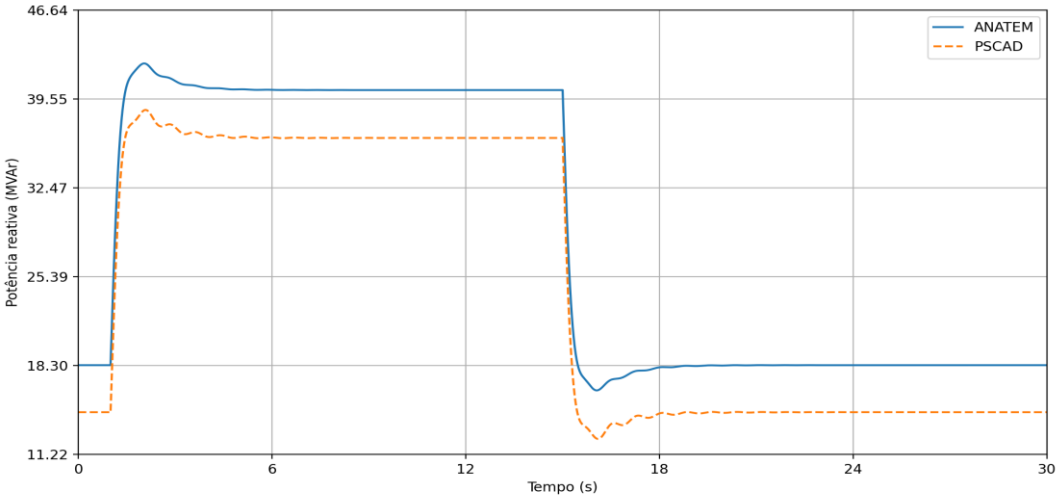

Figura 4-187 - Potência reativa

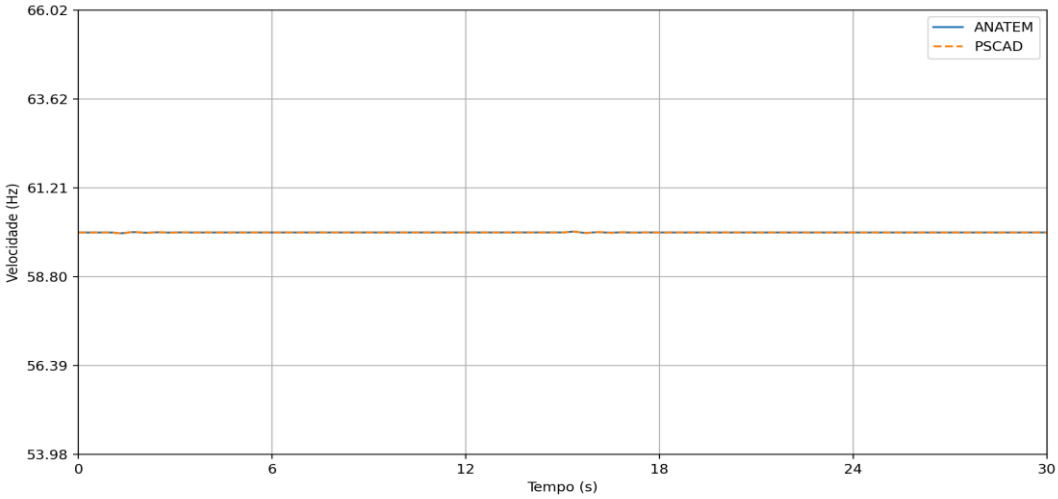

Figura 4-188 - Velocidade da máquina

4.8.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

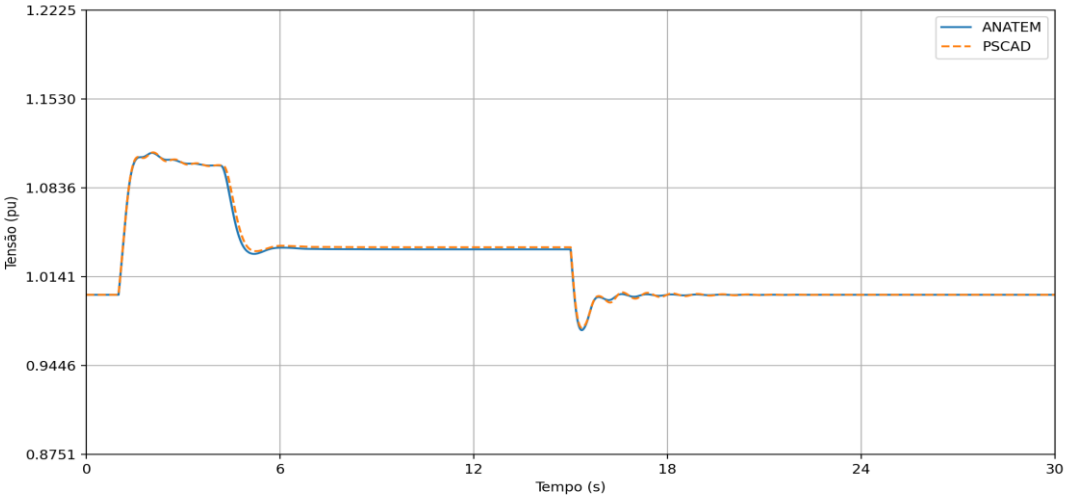

Figura 4-189 - Tensão terminal

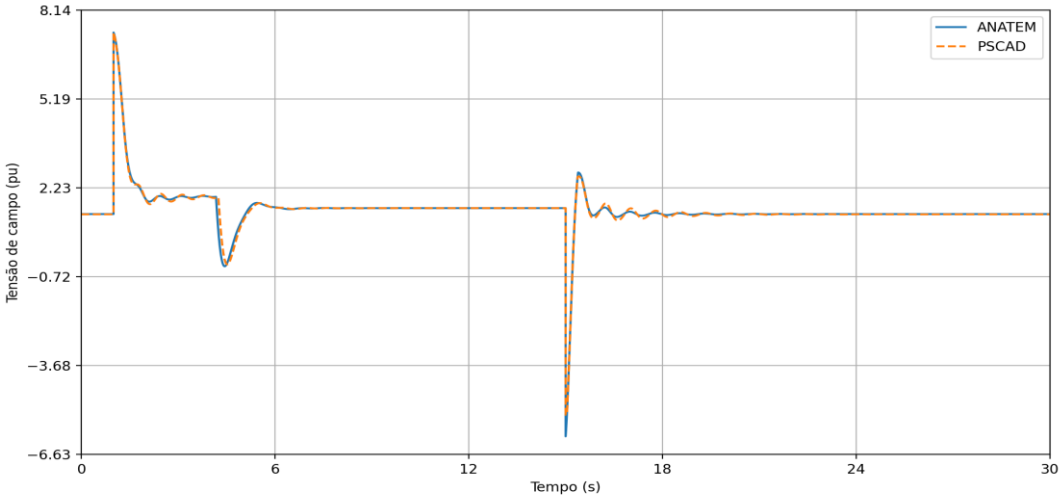

Figura 4-190 - Tensão de campo

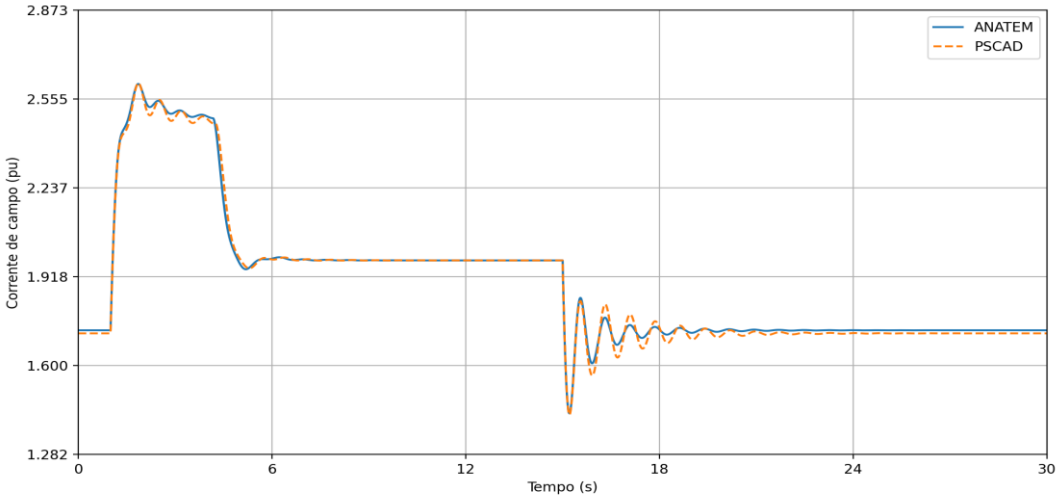

Figura 4-191 - Corrente de campo

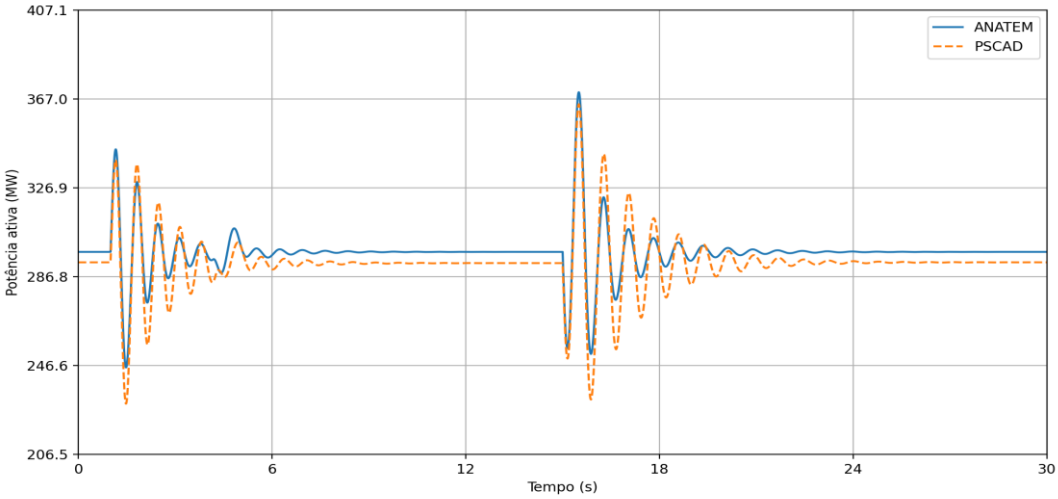

Figura 4-192 - Potência ativa

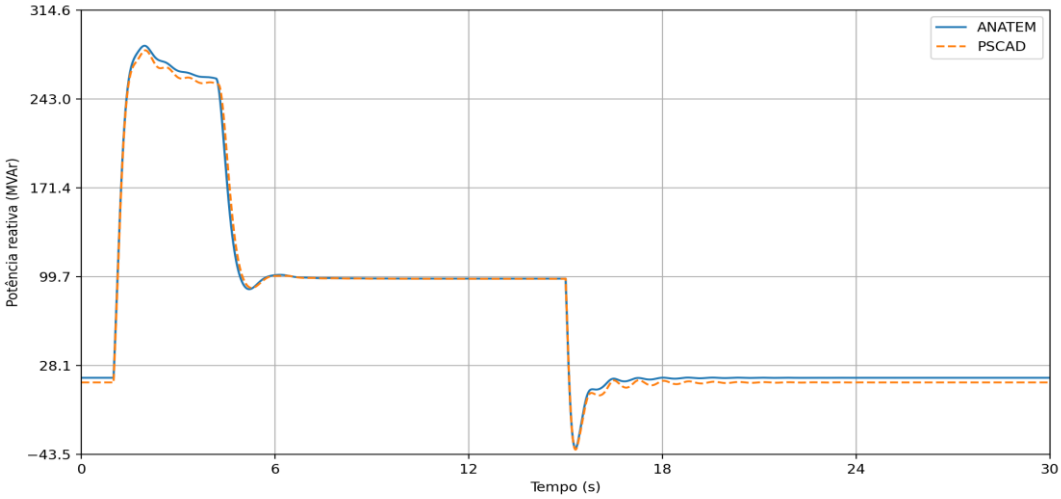

Figura 4-193 - Potência reativa

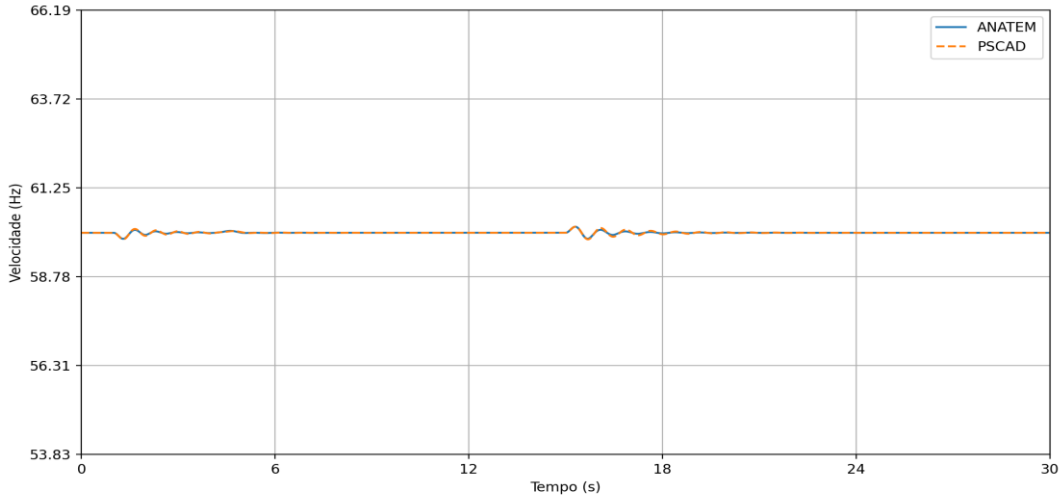

Figura 4-194 - Velocidade da máquina

4.8.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

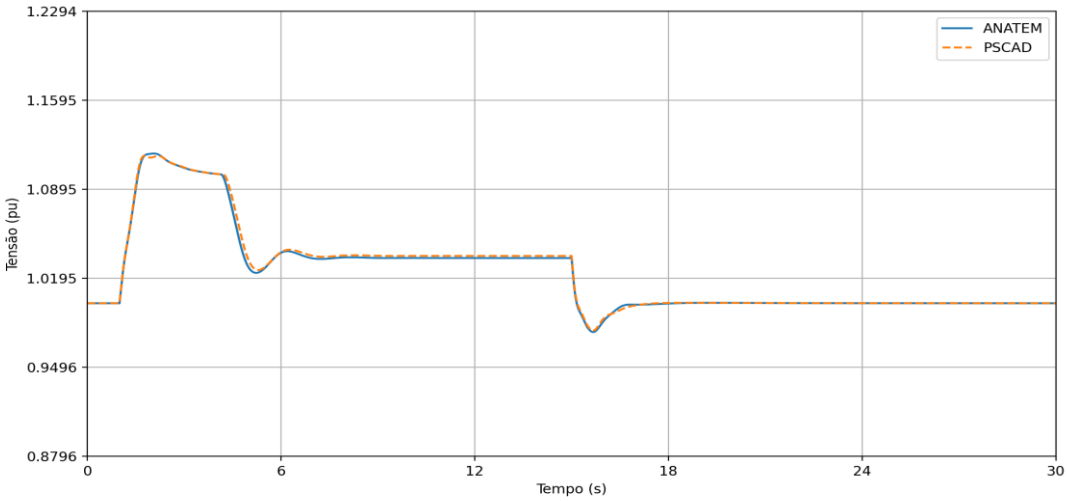

Figura 4-195 - Tensão terminal

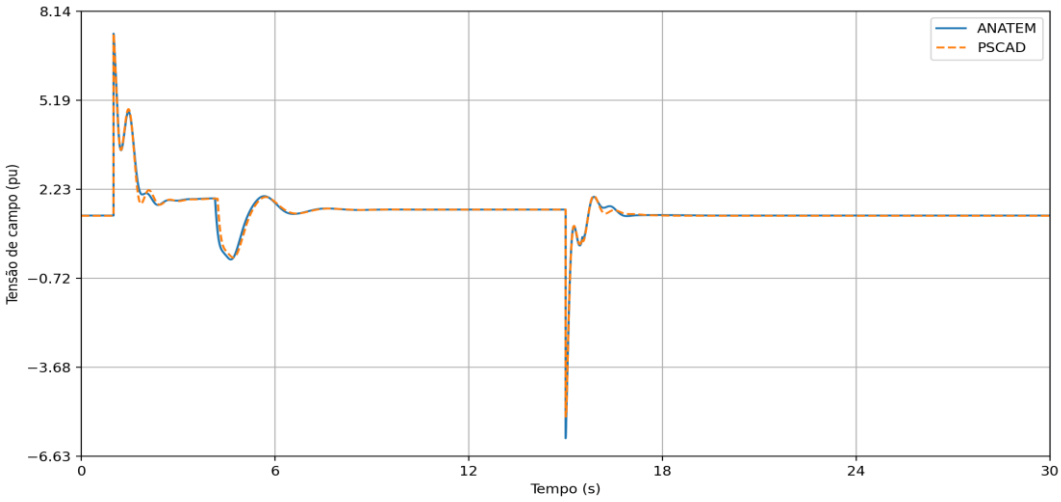

Figura 4-196 - Tensão de campo

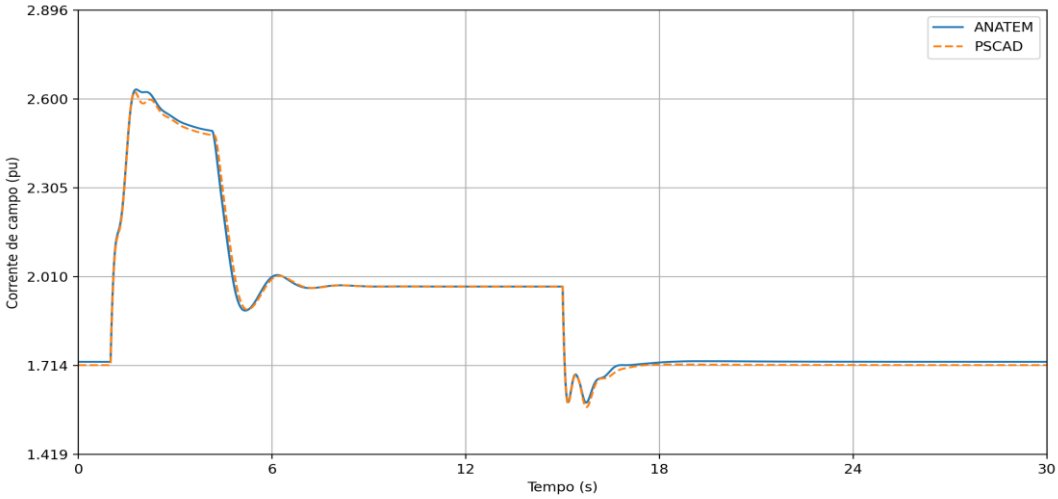

Figura 4-197 - Corrente de campo

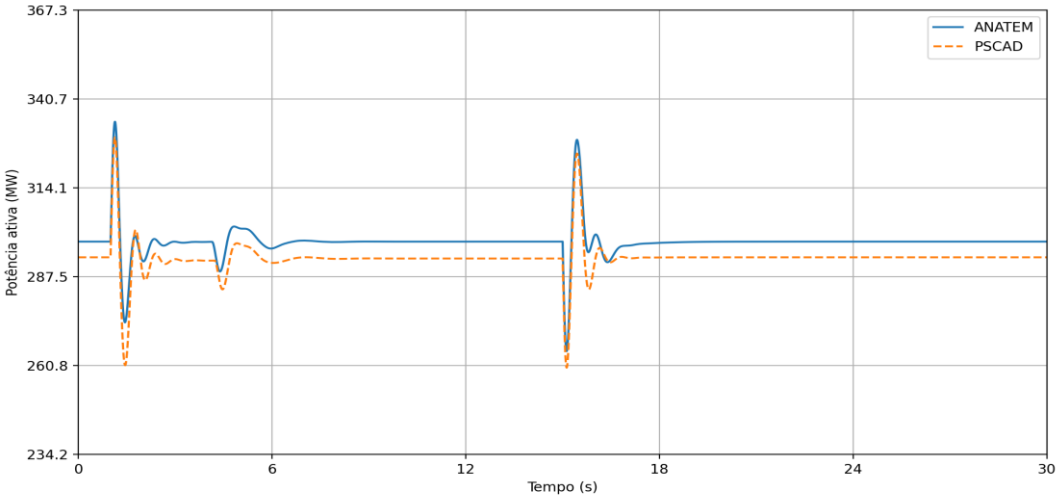

Figura 4-198 - Potência ativa

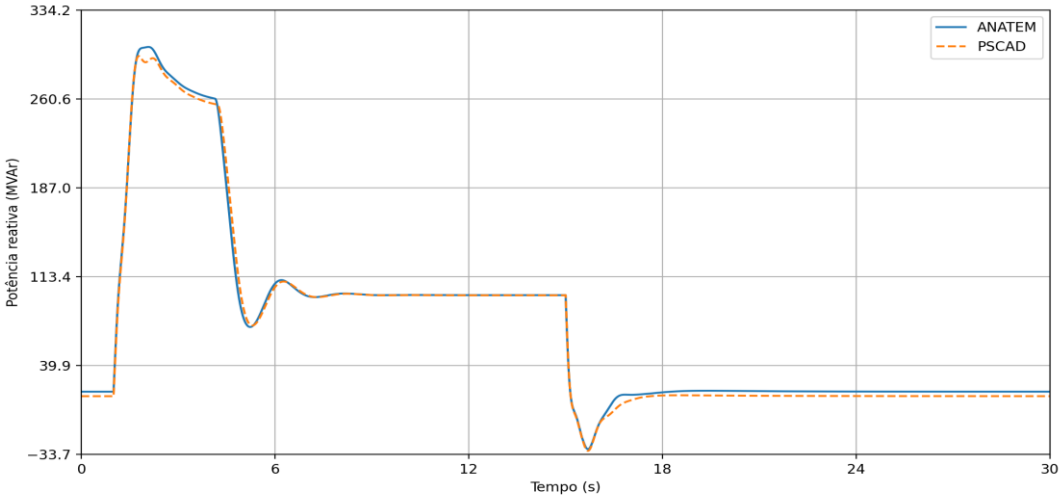

Figura 4-199 - Potência reativa

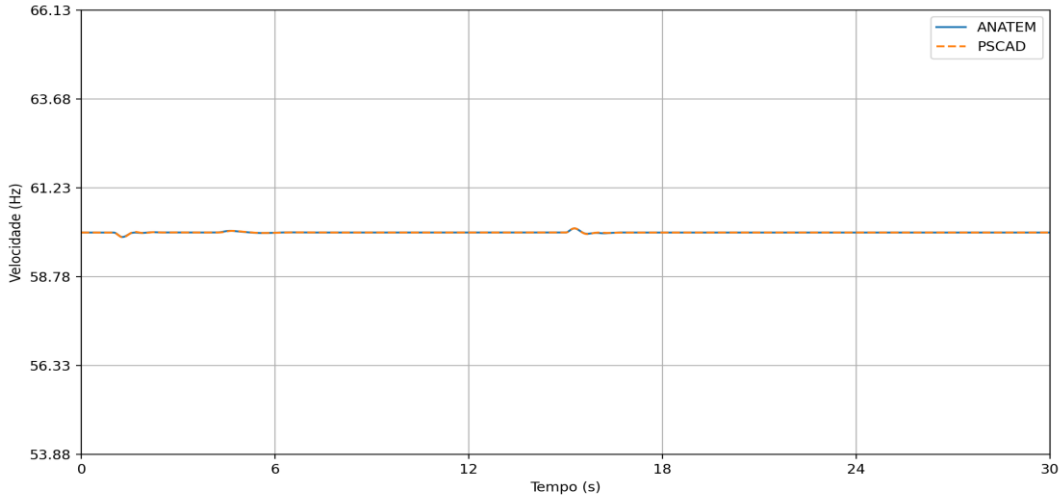

Figura 4-200 - Velocidade da máquina

4.9 UHE JAGUARA

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Jaguara, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.9.1 Modelo da UHE Jaguara

A Tabela 4-25 apresenta os parâmetros da UHE Jaguará disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-25 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	97,5	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	57,99	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	27,8	I(KA)	4,686	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	14	H(s)	4,244	
xl(%)	12,4	D(pu)	0	
T'd(s)	4,6	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,124	Reatância de Potier
T''d(s)	0,06	xd(pu)	0,975	
T''q(s)	0,107	xd_(pu)	0,278	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	4,6	T'd
H(s)	4,244	xd__(pu)	0,14	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,06	T''d
S(MVA)	112	Xq(pu)	0,58	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,14	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,107	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.9.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-26, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Jaguara estão apresentados na Tabela 4-27. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-26, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-27. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-201.

Tabela 4-26 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Jaguara	
Ag	**Y1**	0,05
Bg	**Y2**	5,91
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-27 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,85	0,800
1,071	0,950
1,116	0,975
1,163	1,000
1,231	1,033
1,309	1,067
1,394	1,100
1,732	1,200
2,26	1,300

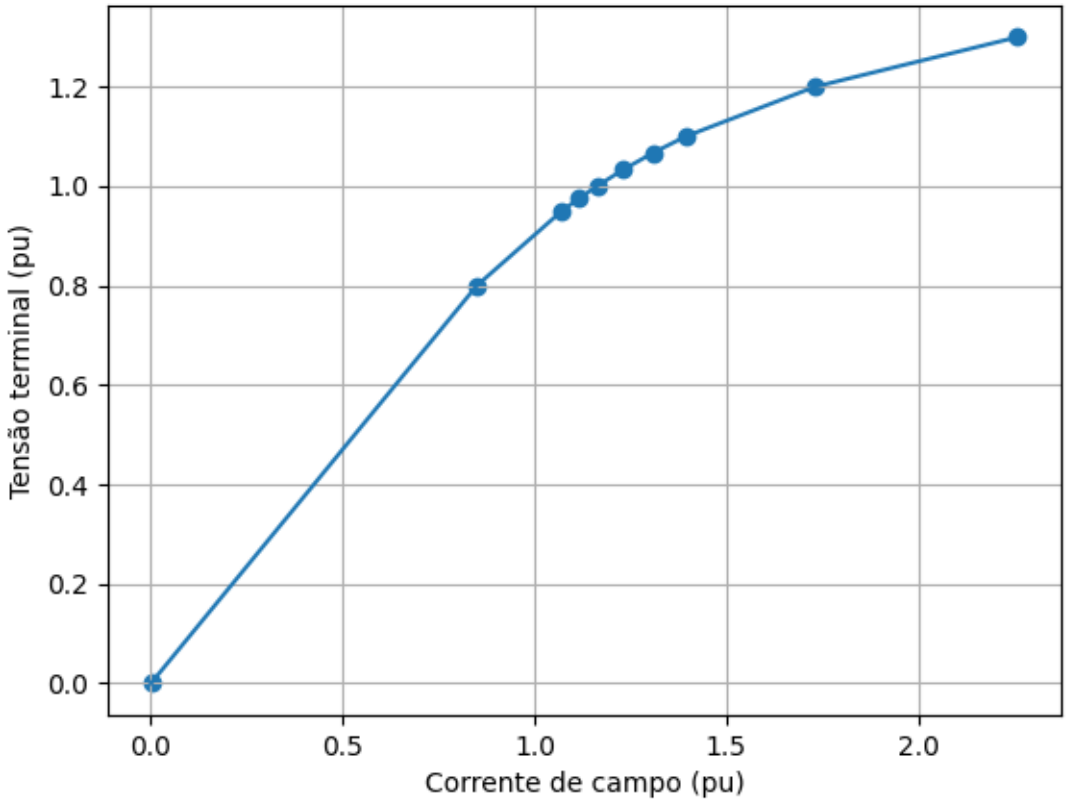

Figura 4-201 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.9.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.9.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.9.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.9.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

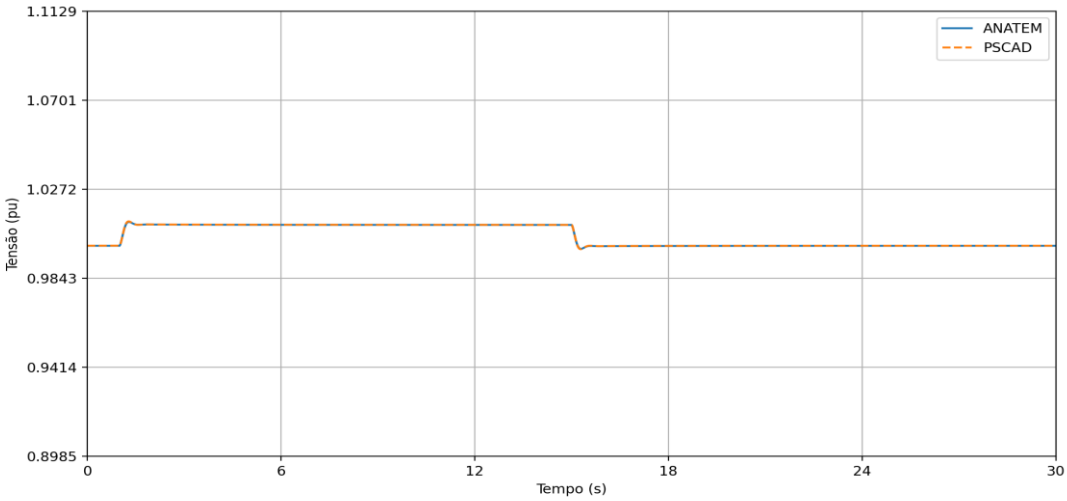

Figura 4-202 - Tensão terminal

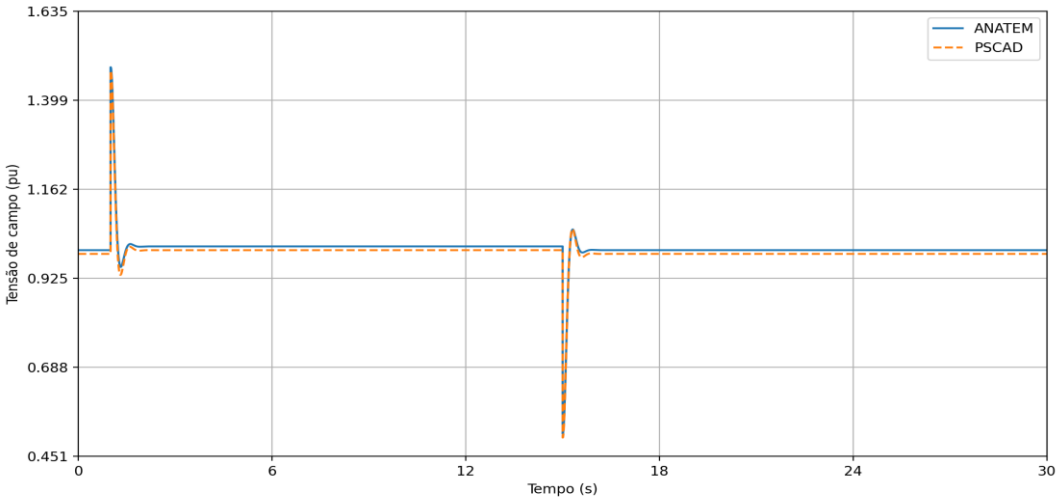

Figura 4-203 - Tensão de campo

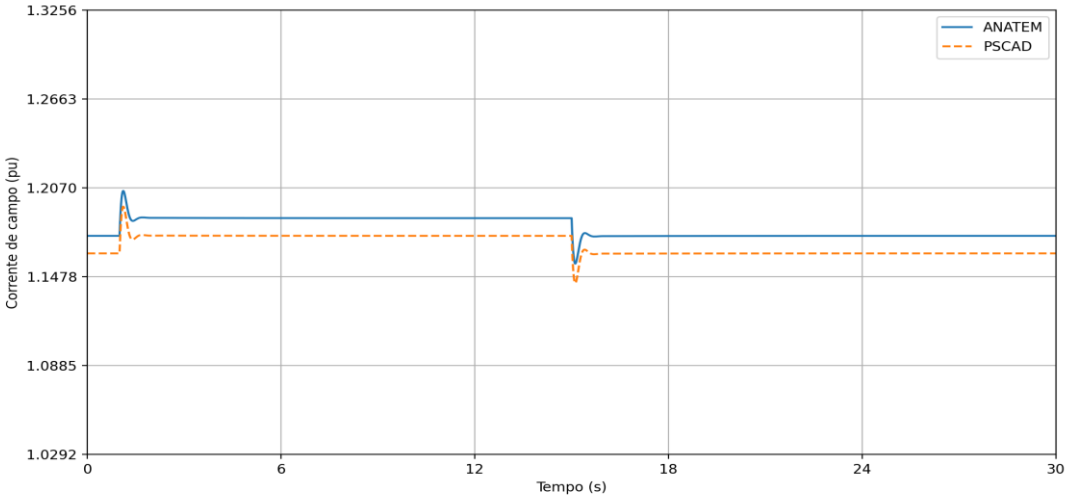

Figura 4-204 - Corrente de campo

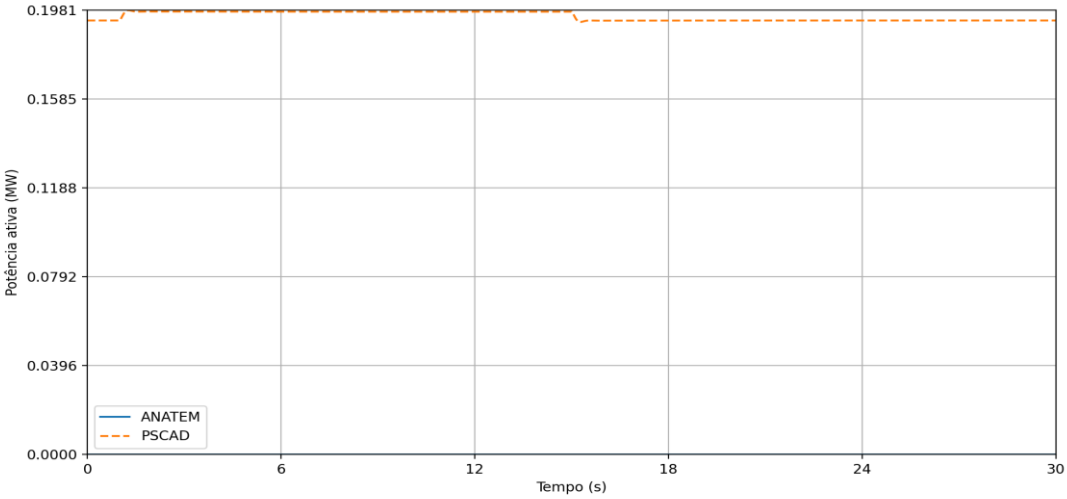

Figura 4-205 - Potência ativa

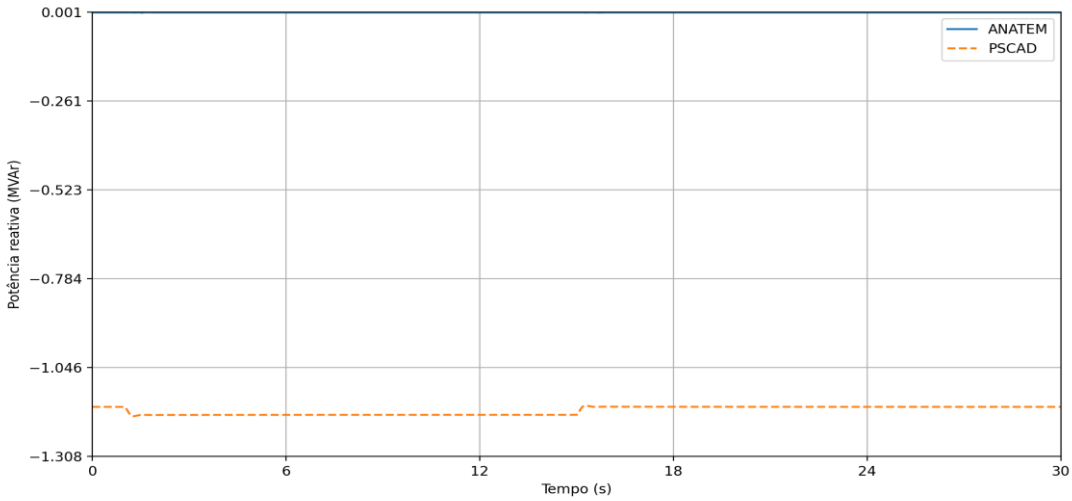

Figura 4-206 - Potência reativa

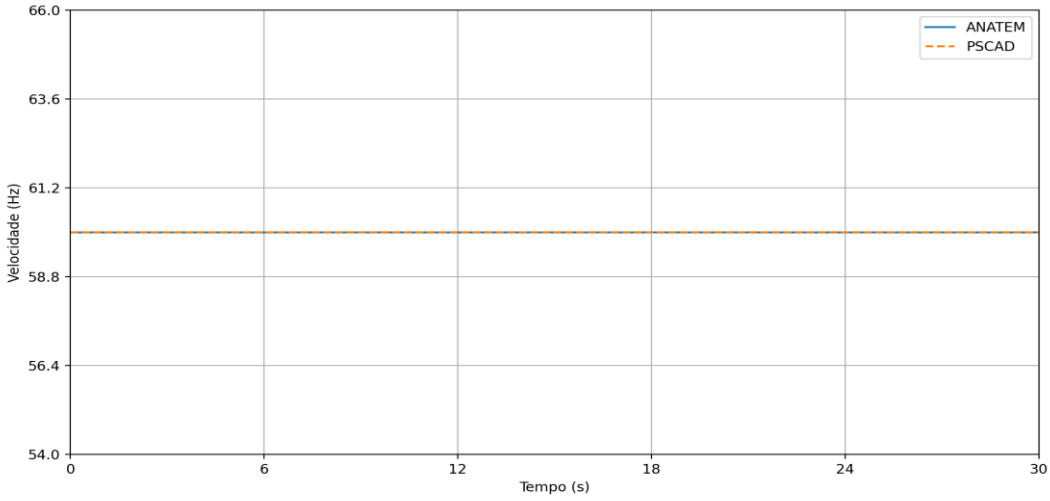

Figura 4-207 - Velocidade da máquina

4.9.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

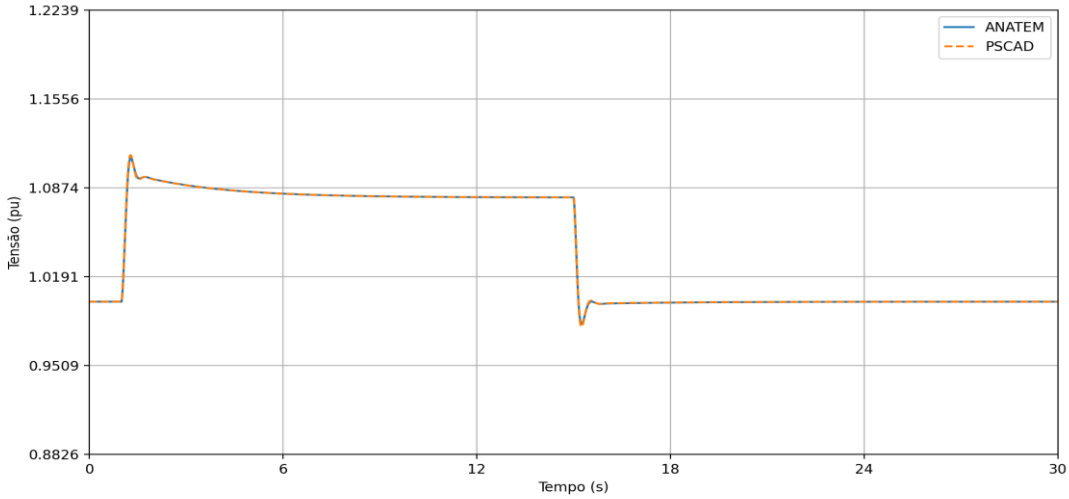

Figura 4-208 - Tensão terminal

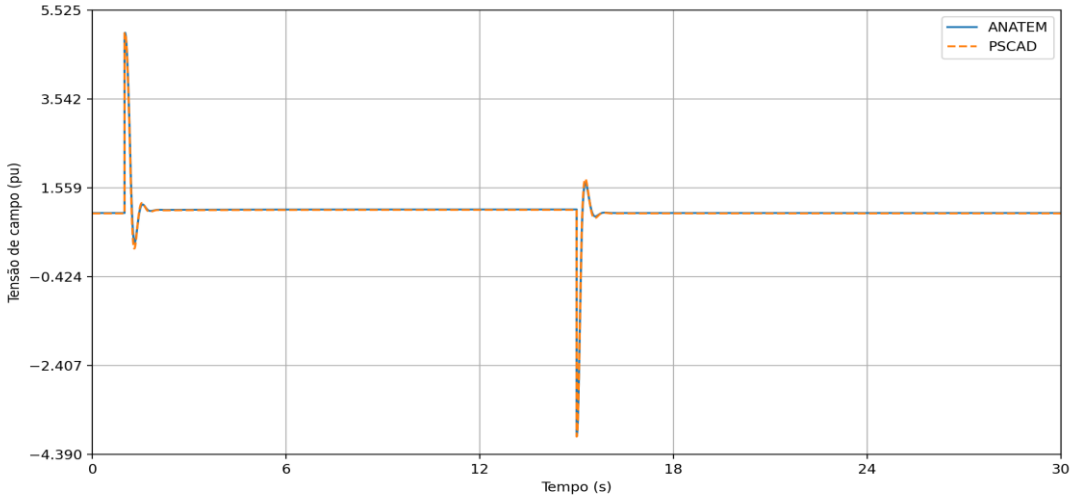

Figura 4-209 - Tensão de campo

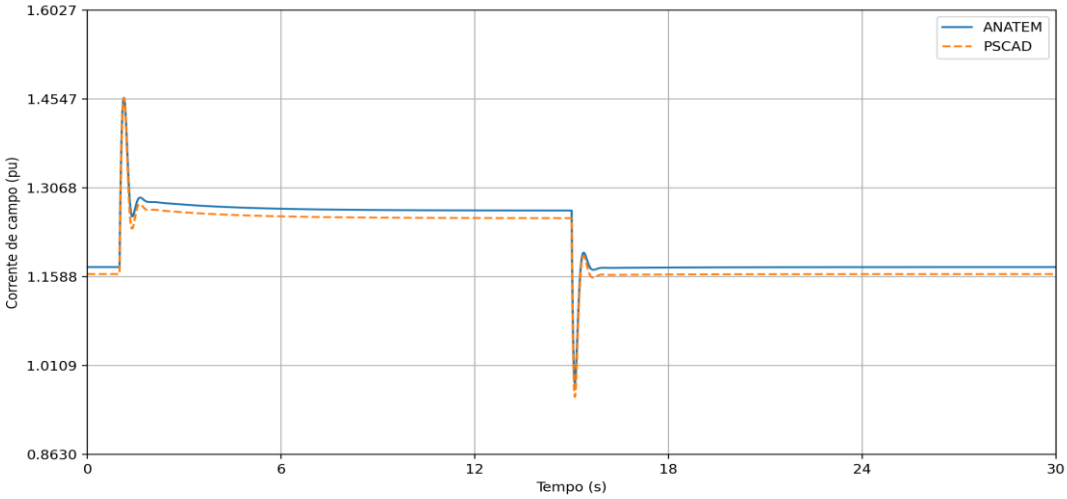

Figura 4-210 - Corrente de campo

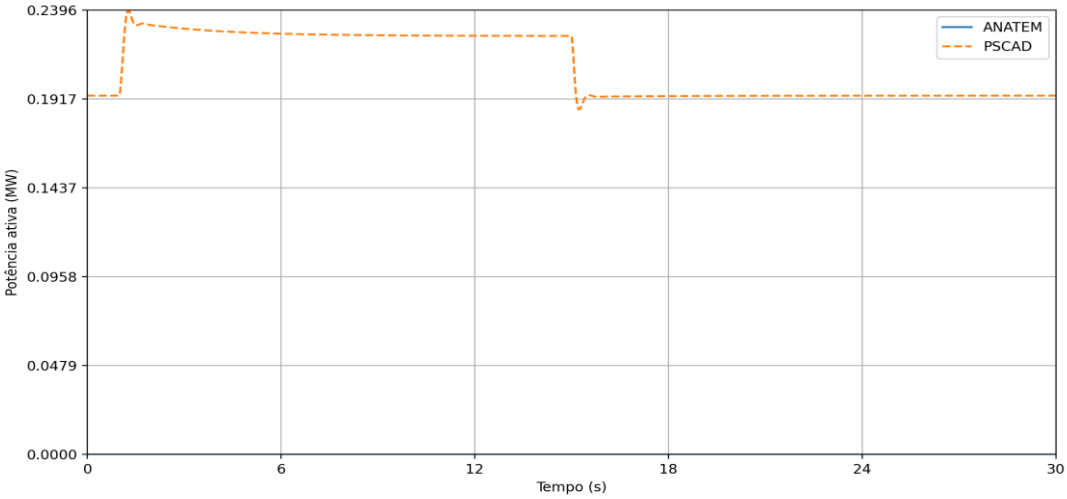

Figura 4-211 - Potência ativa

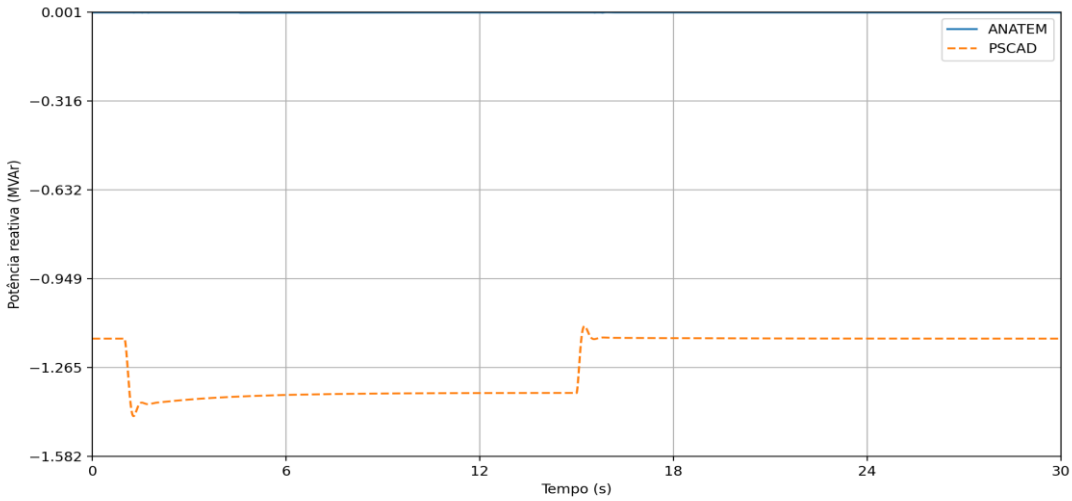

Figura 4-212 - Potência reativa

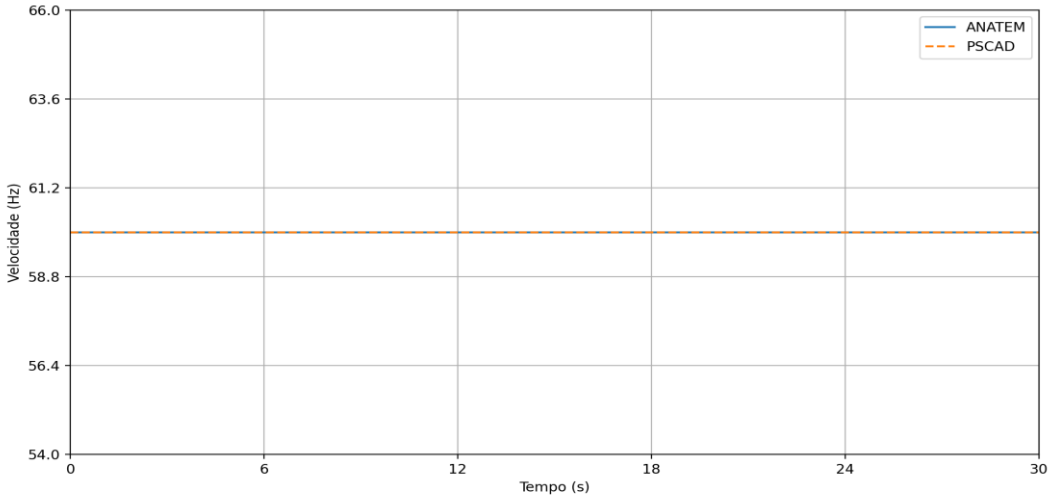

Figura 4-213 - Velocidade da máquina

4.9.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.9.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.9.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.9.4.3.

4.9.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

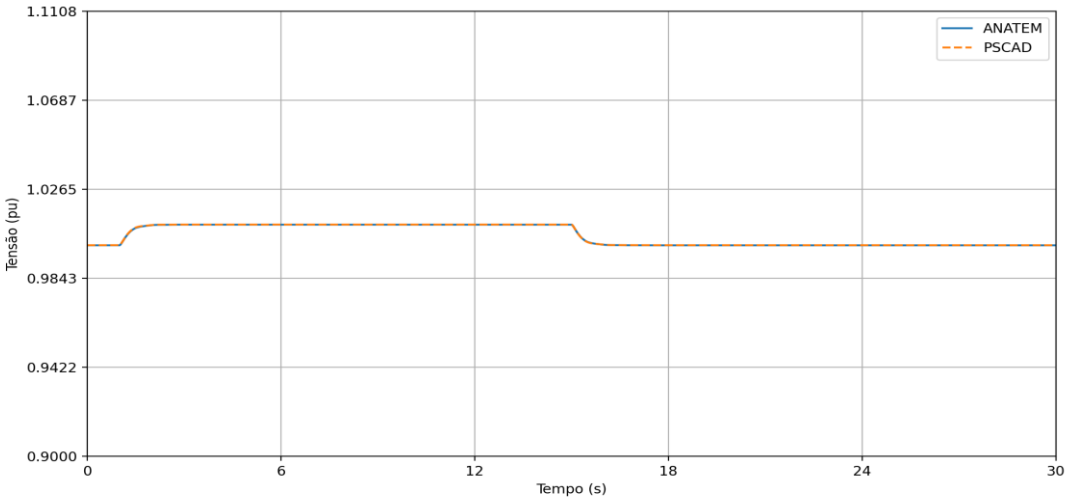

Figura 4-214 - Tensão terminal

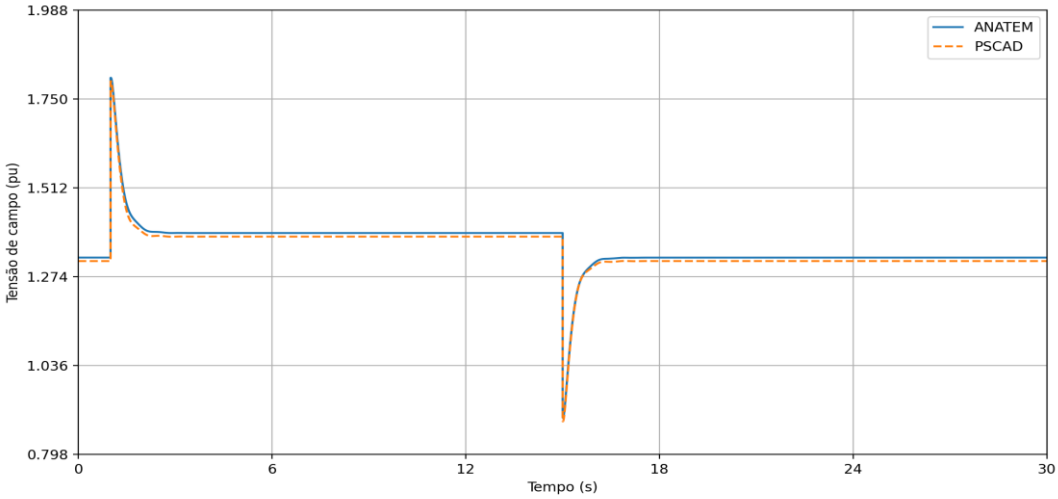

Figura 4-215 - Tensão de campo

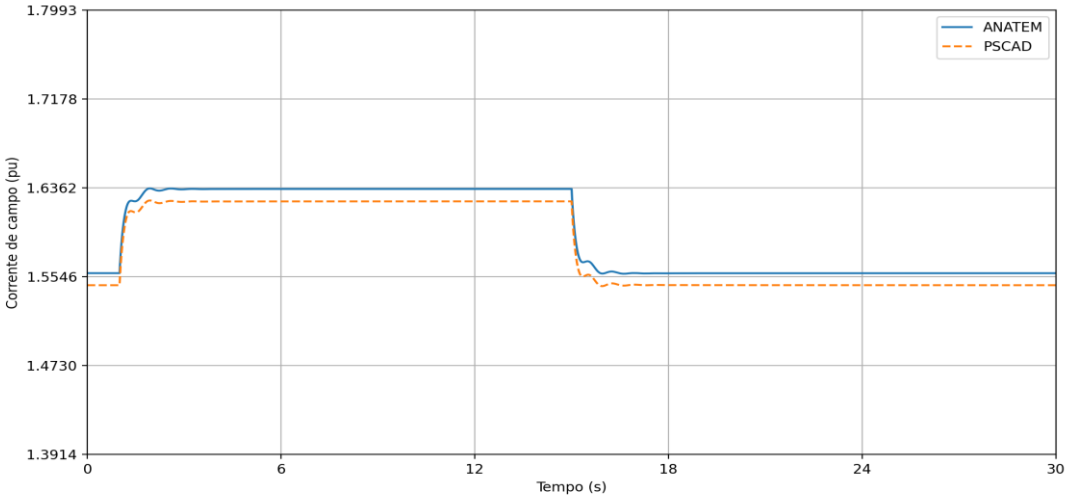

Figura 4-216 - Corrente de campo

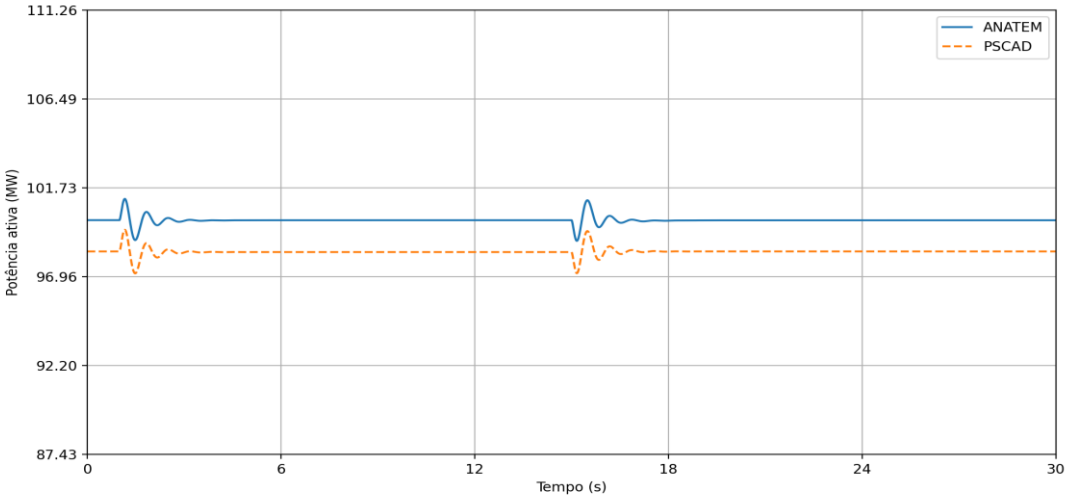

Figura 4-217 - Potência ativa

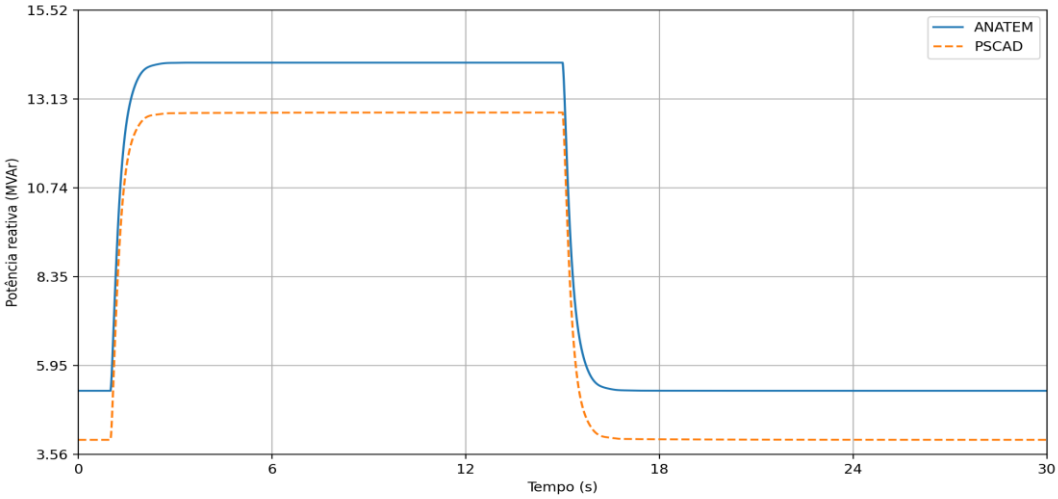

Figura 4-218 - Potência reativa

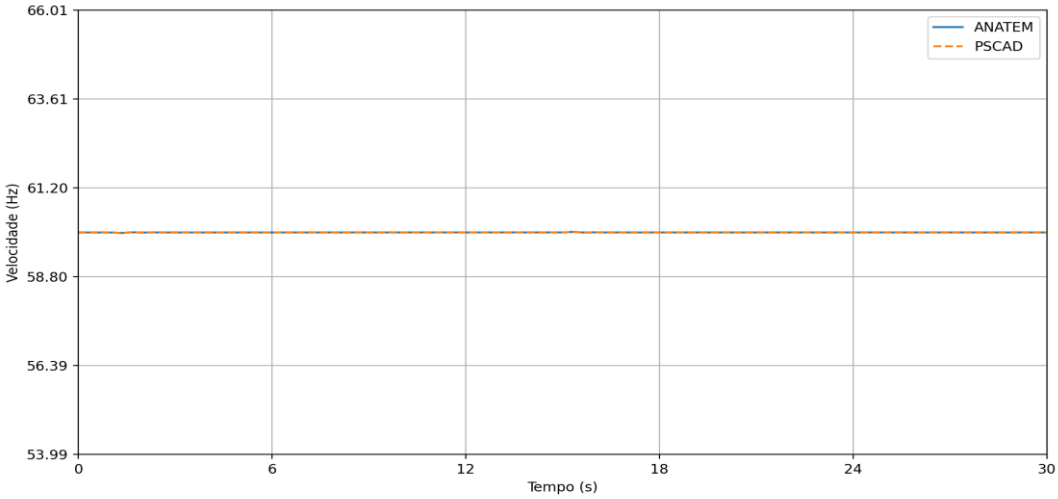

Figura 4-219 - Velocidade da máquina

4.9.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

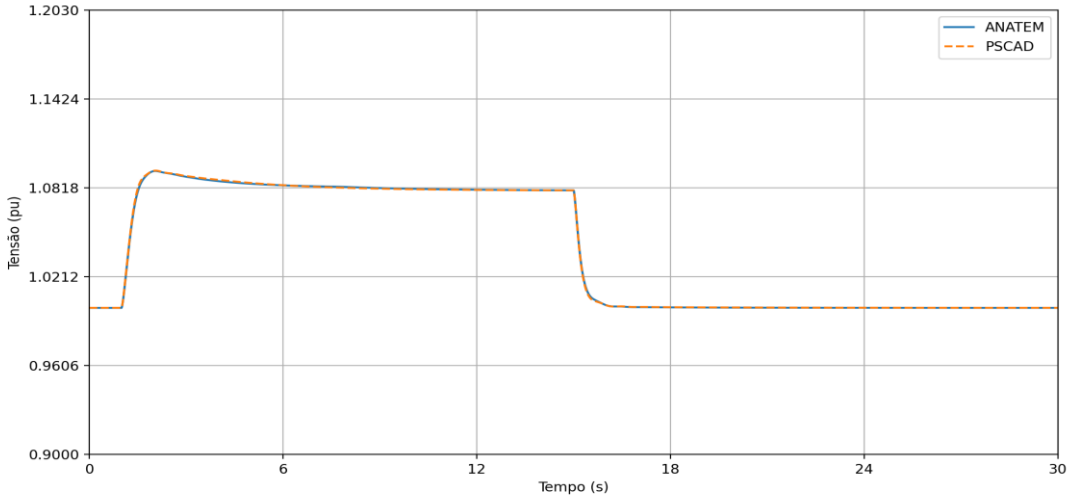

Figura 4-220 - Tensão terminal

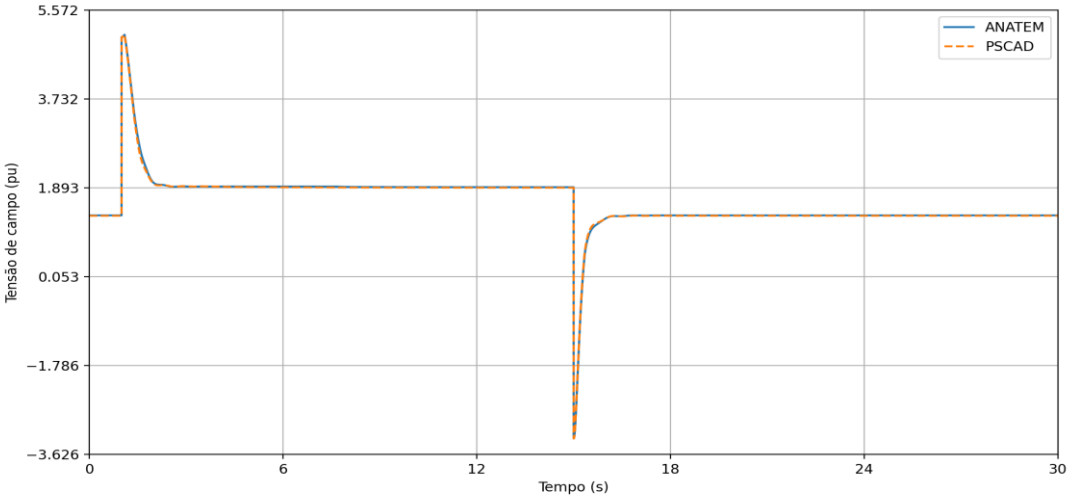

Figura 4-221 - Tensão de campo

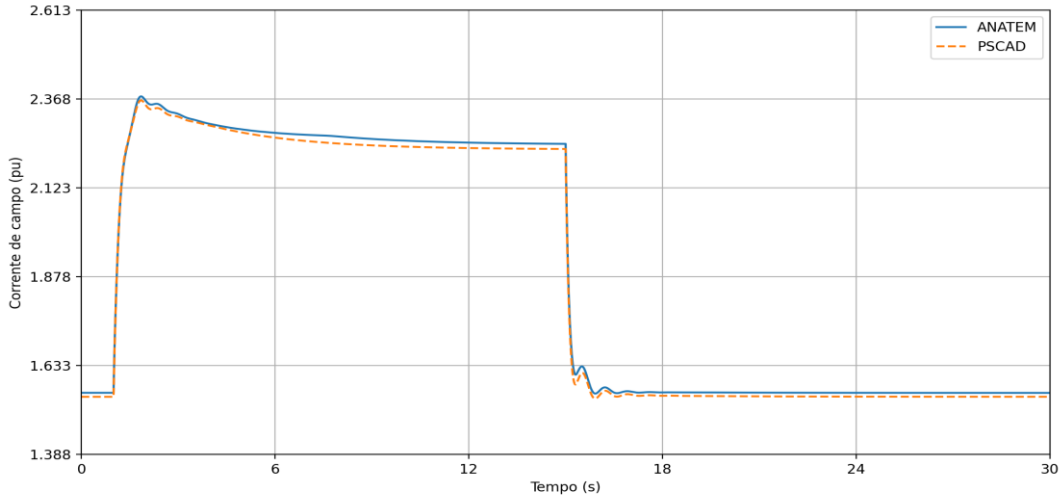

Figura 4-222 - Corrente de campo

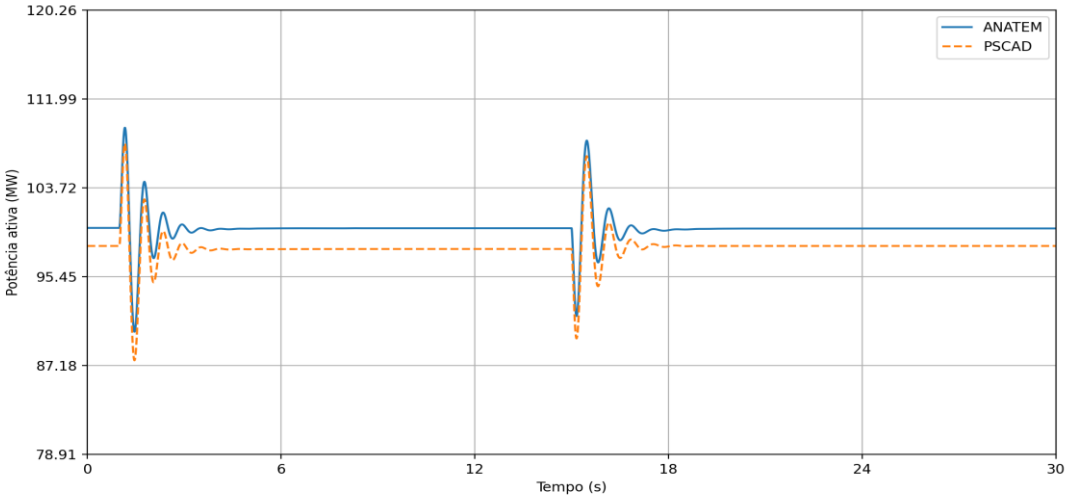

Figura 4-223 - Potência ativa

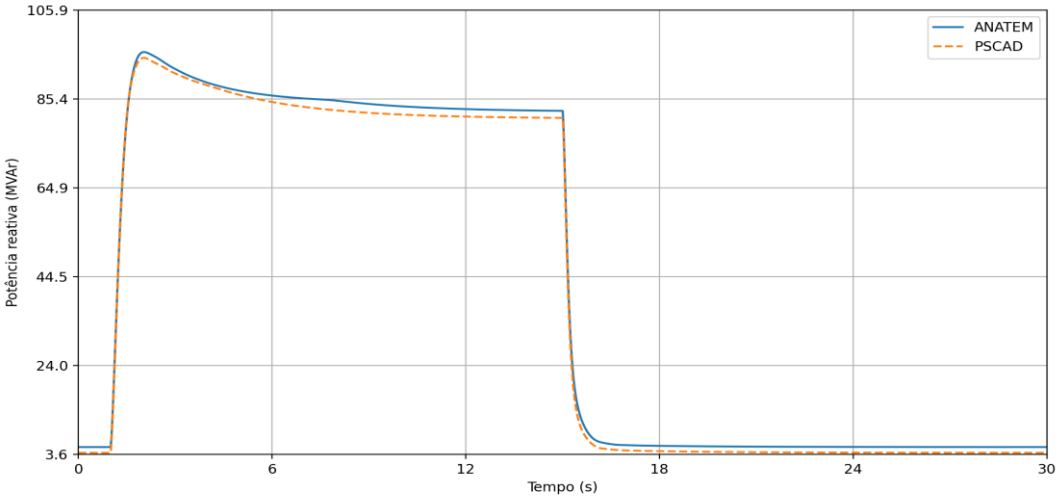

Figura 4-224 - Potência reativa

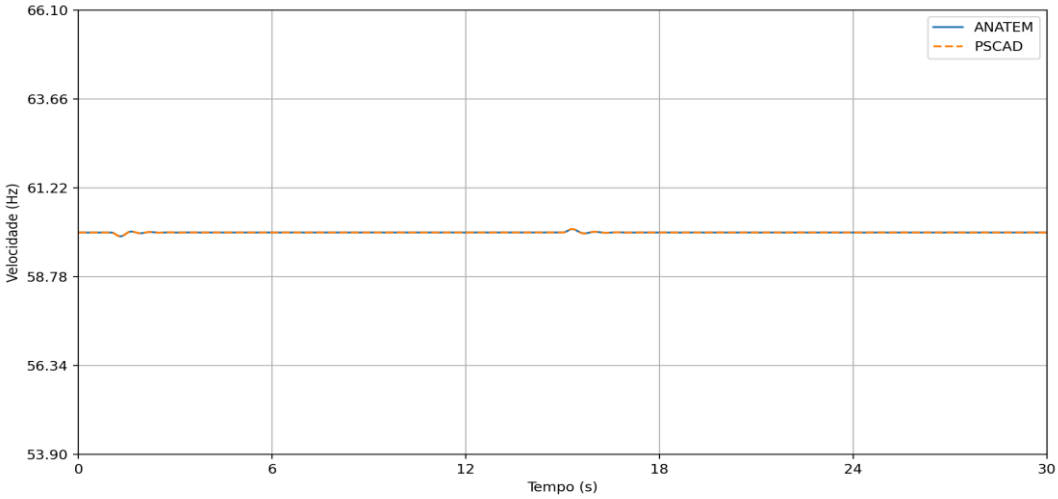

Figura 4-225 - Velocidade da máquina

4.9.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

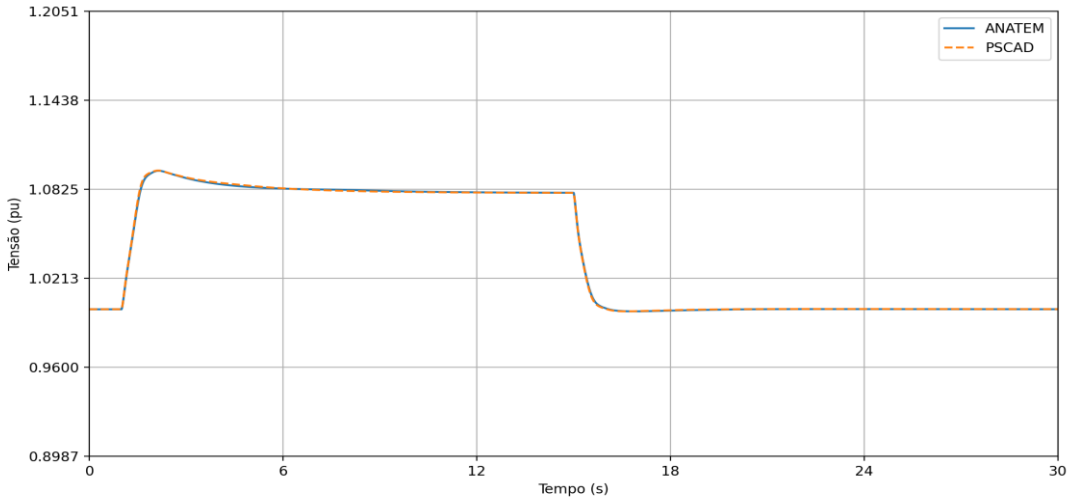

Figura 4-226 - Tensão terminal

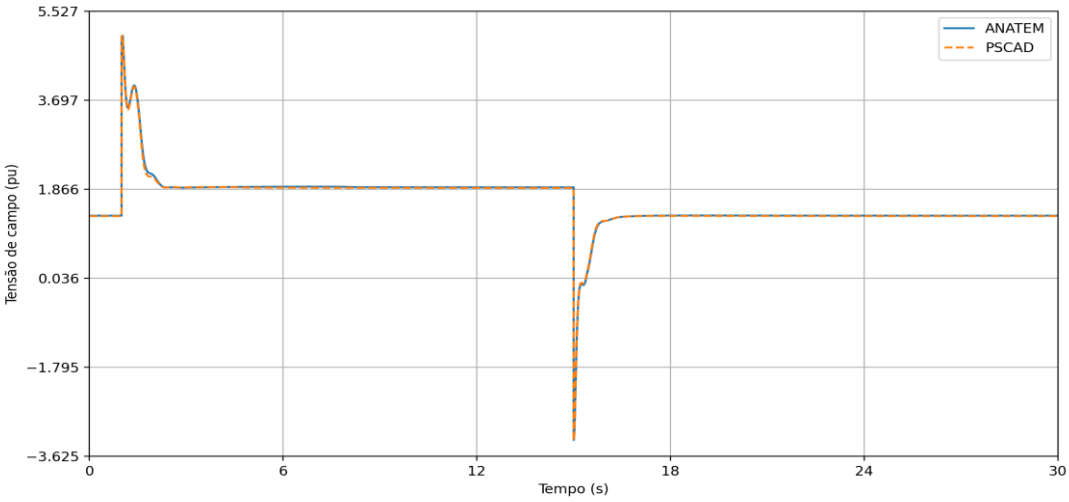

Figura 4-227 - Tensão de campo

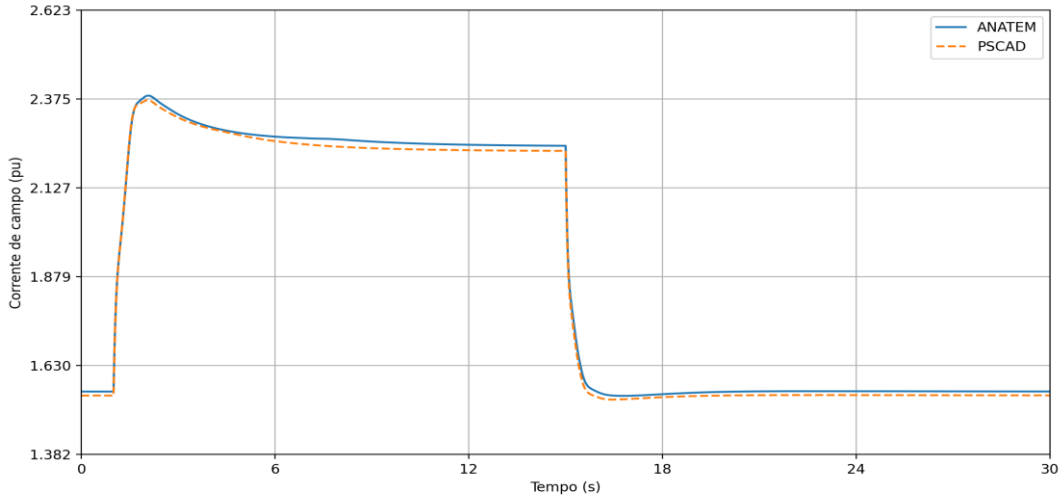

Figura 4-228 - Corrente de campo

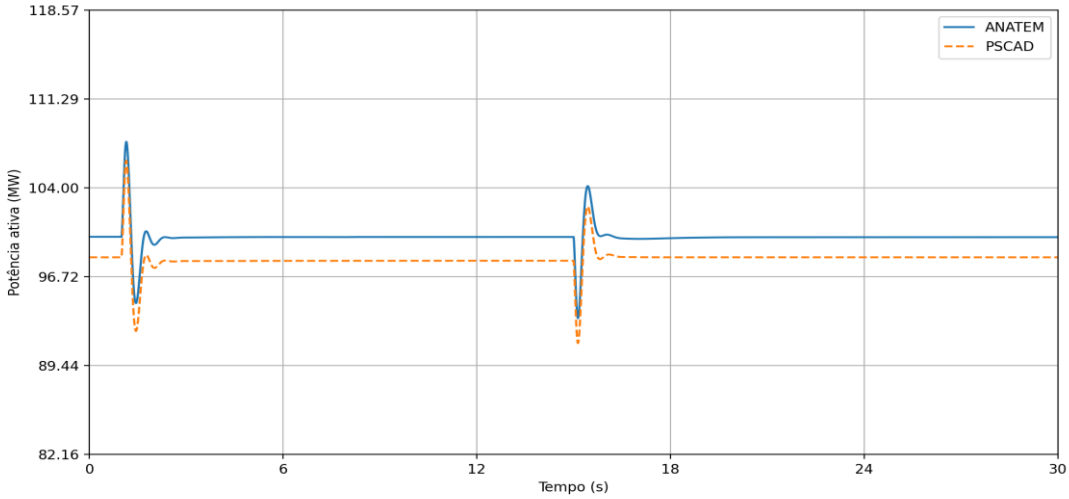

Figura 4-229 - Potência ativa

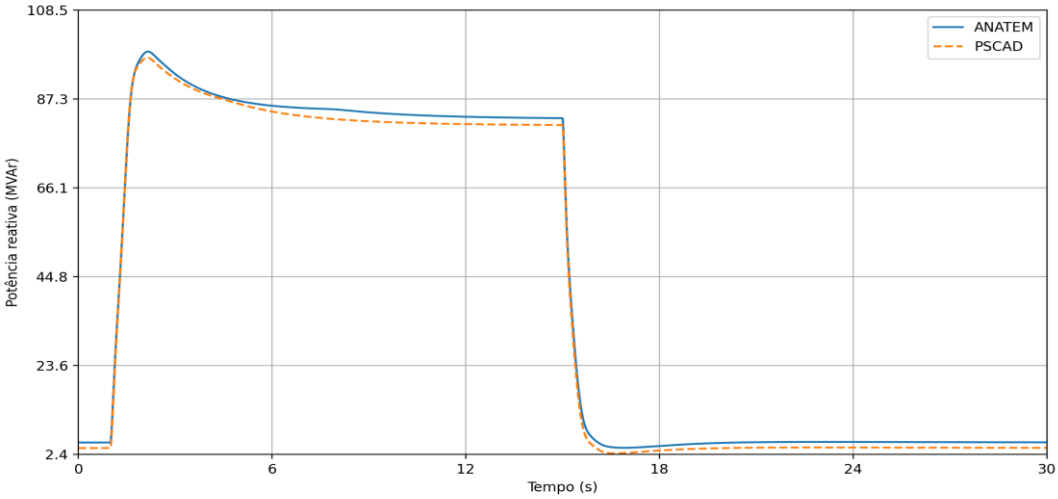

Figura 4-230 - Potência reativa

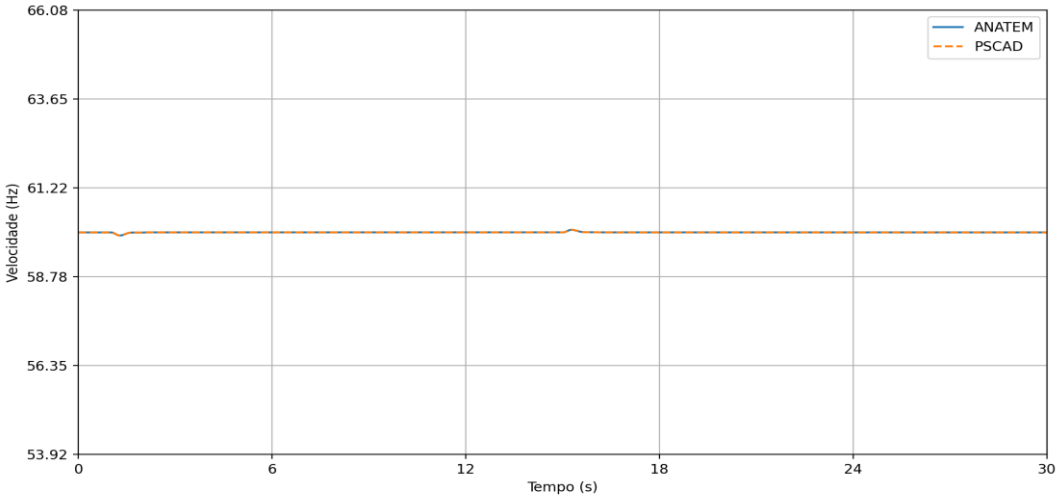

Figura 4-231 - Velocidade da máquina

4.10 UHE NOVA PONTE

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Nova Ponte, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.10.1 Modelo da UHE Nova Ponte

A Tabela 4-28 apresenta os parâmetros da UHE Nova Ponte disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-28 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	100	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	69	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	30	I(KA)	7,489	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	20	H(s)	4,91	
xl(%)	14	D(pu)	0	
T'd(s)	5,7	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,14	Reatância de Potier
T''d(s)	0,06	xd(pu)	1	
T''q(s)	0,16	xd_(pu)	0,3	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	5,7	T'd
H(s)	4,91	xd__(pu)	0,2	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,06	T''d
S(MVA)	179	Xq(pu)	0,69	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,2	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,16	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.10.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-29, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Nova Ponte estão apresentados na Tabela 4-30. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-29, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-30. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-232.

Tabela 4-29 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Nova Ponte	
Ag	**Y1**	0,0248
Bg	**Y2**	6,6089
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-30 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,825	0,800
1,017	0,950
1,054	0,975
1,093	1,000
1,149	1,033
1,212	1,067
1,28	1,100
1,549	1,200
1,975	1,300

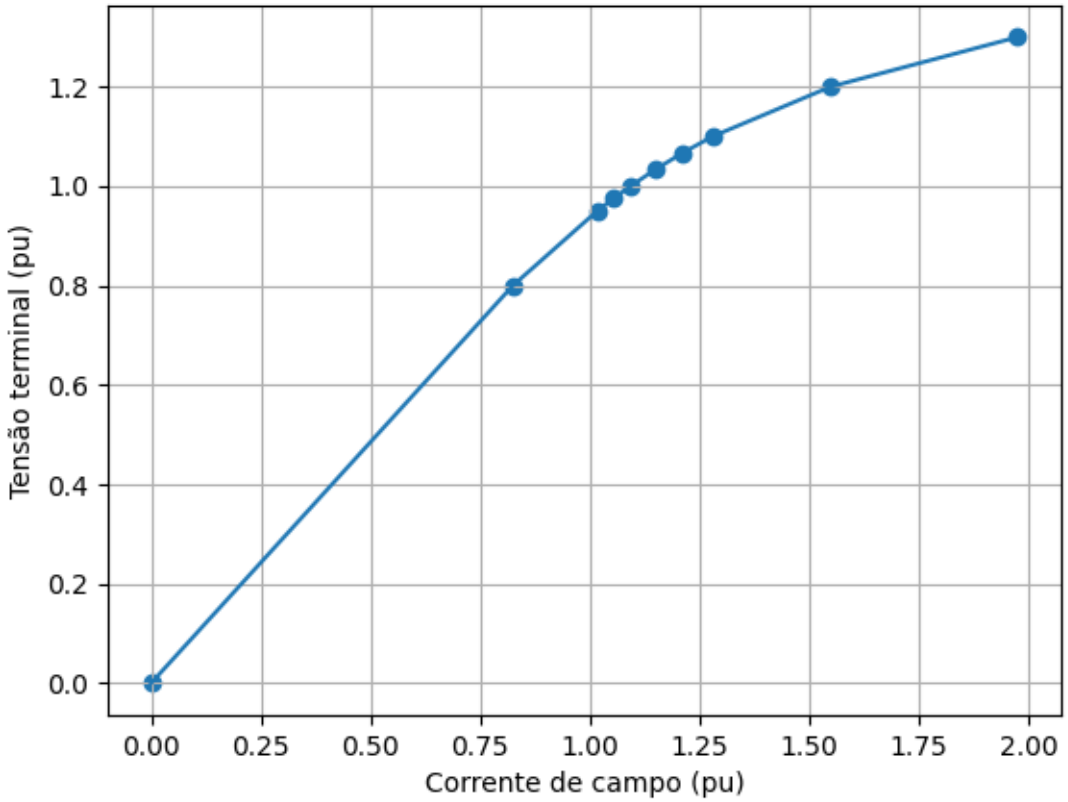

Figura 4-232 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.10.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.10.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.10.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.10.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

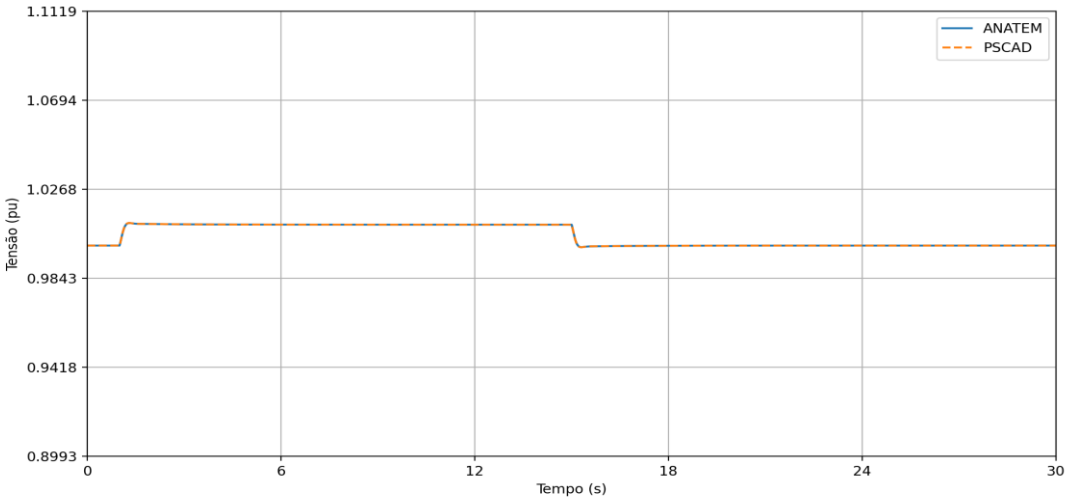

Figura 4-233 - Tensão terminal

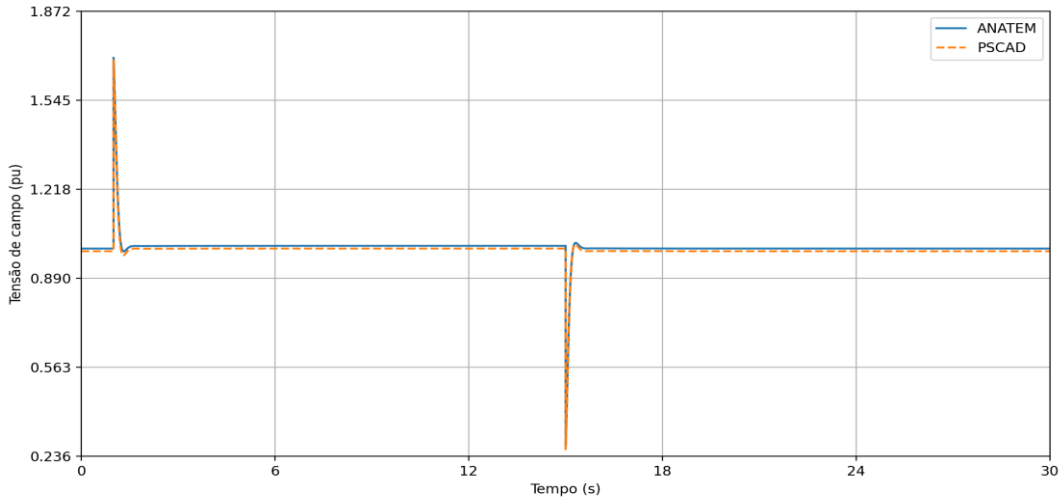

Figura 4-234 - Tensão de campo

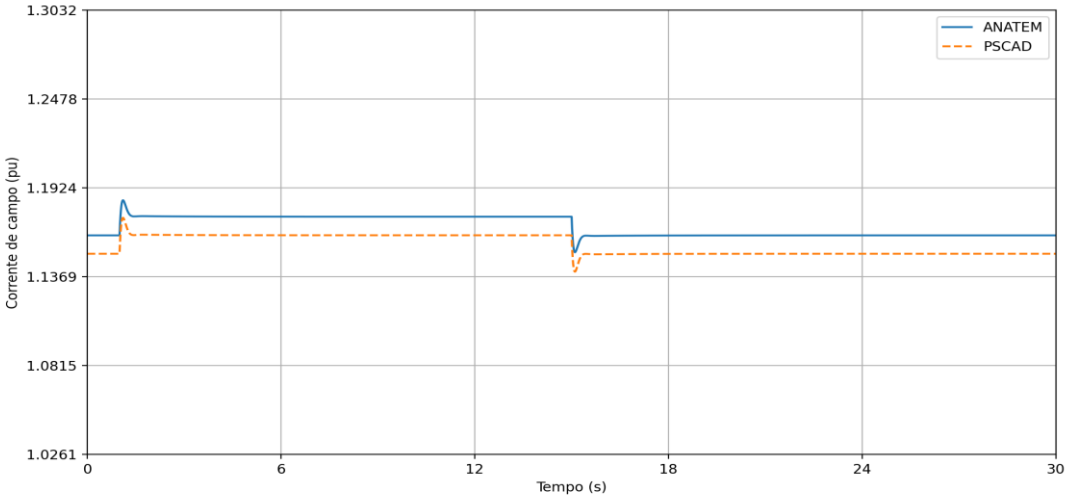

Figura 4-235 - Corrente de campo

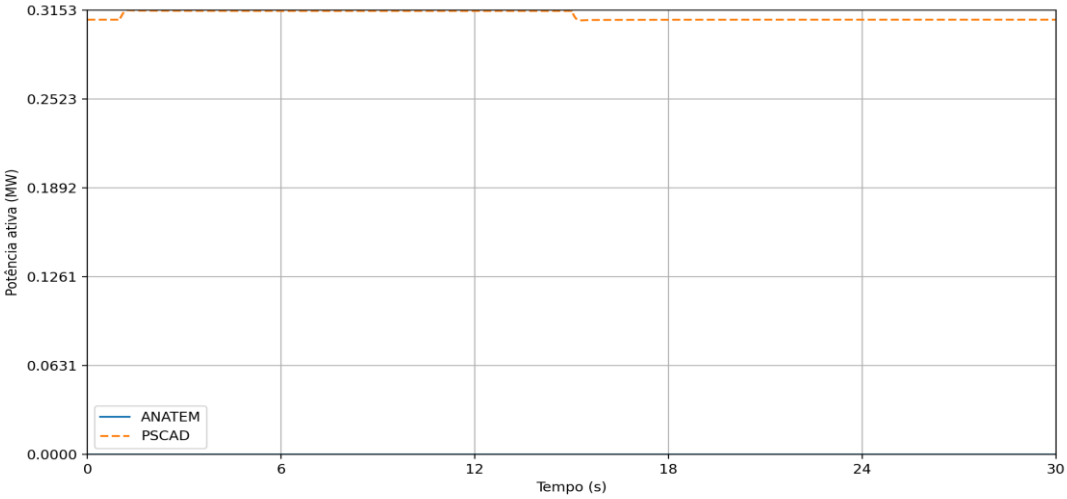

Figura 4-236 - Potência ativa

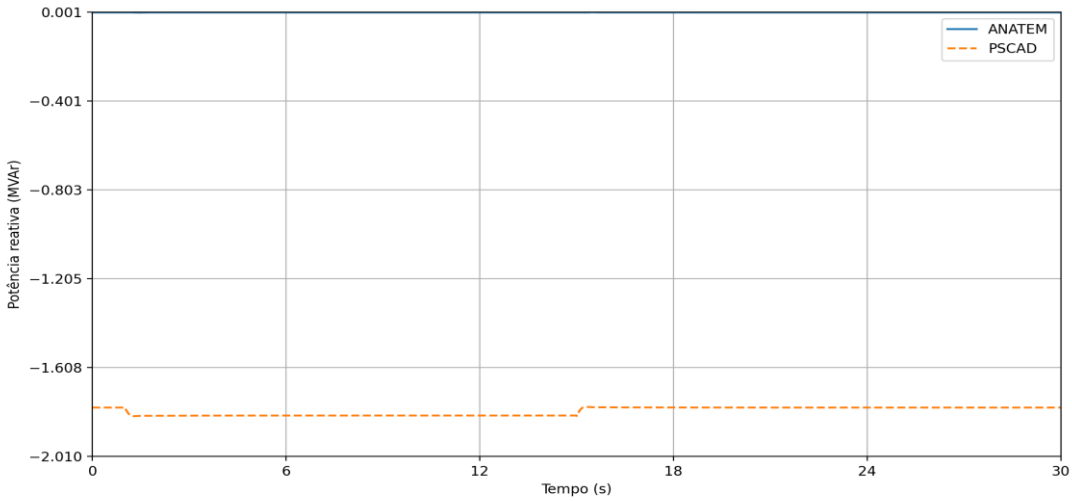

Figura 4-237 - Potência reativa

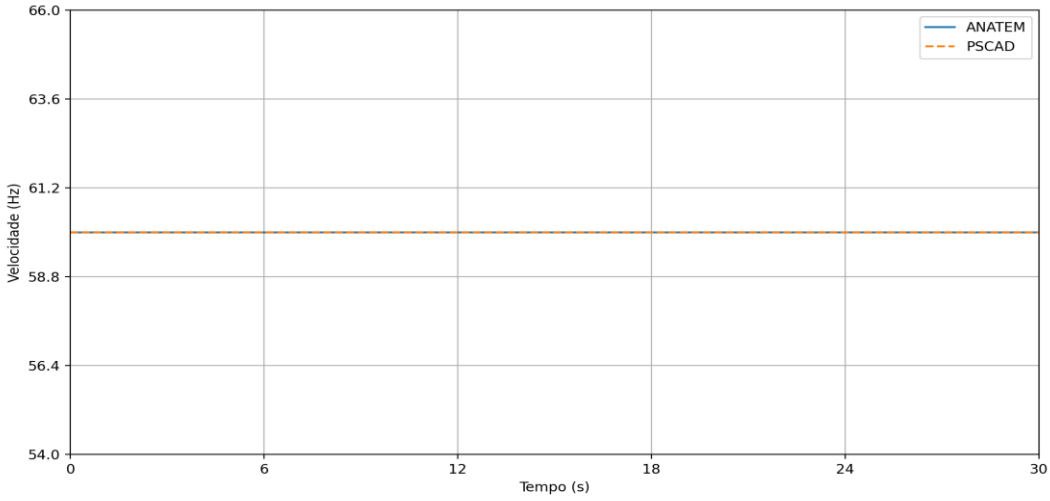

Figura 4-238 - Velocidade da máquina

4.10.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

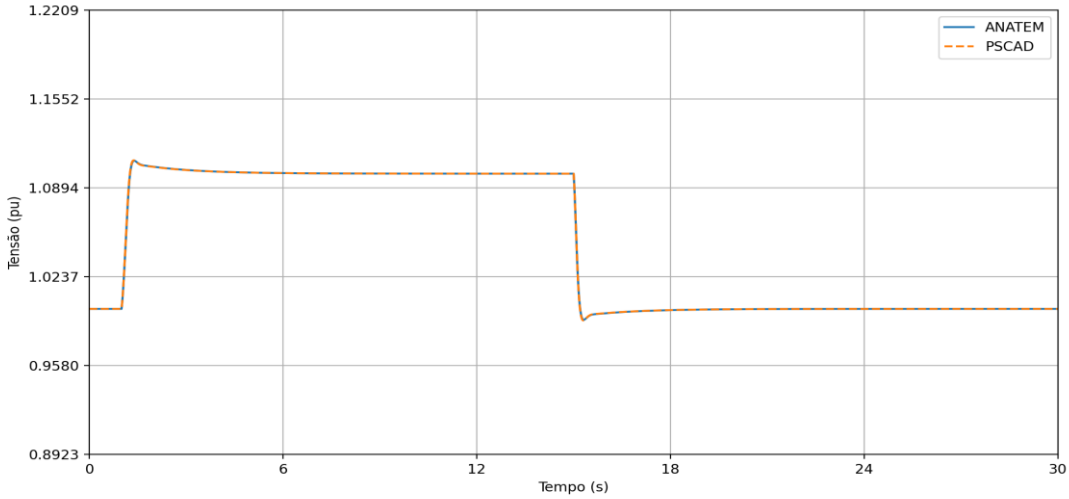

Figura 4-239 - Tensão terminal

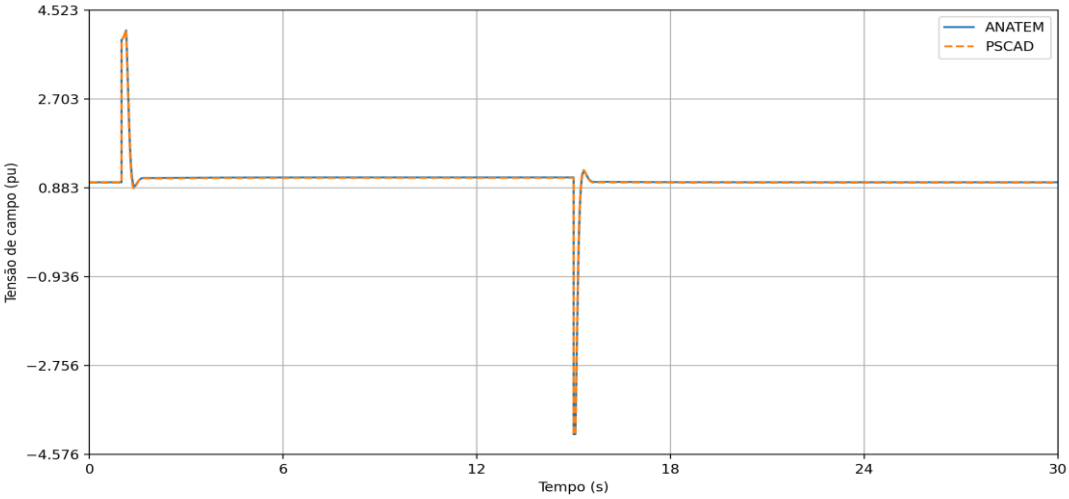

Figura 4-240 - Tensão de campo

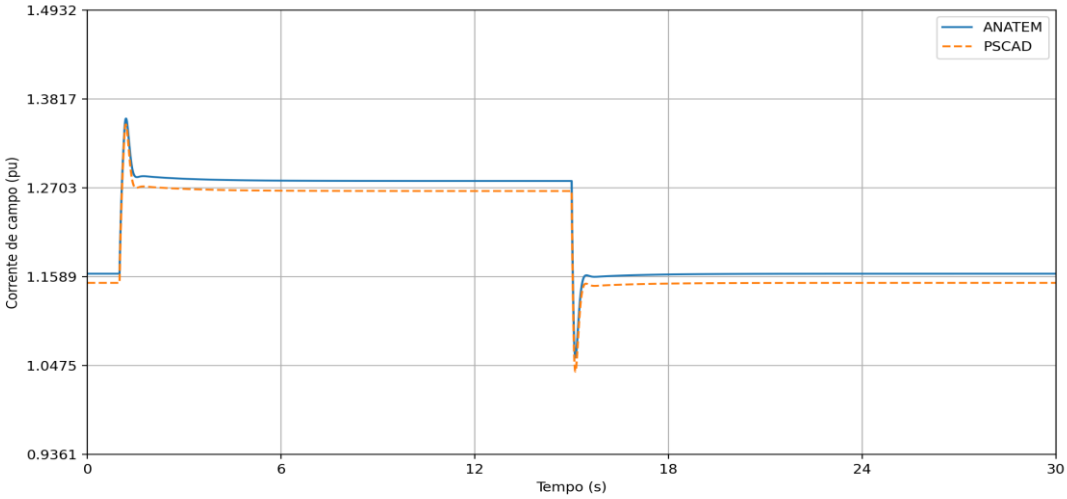

Figura 4-241 - Corrente de campo

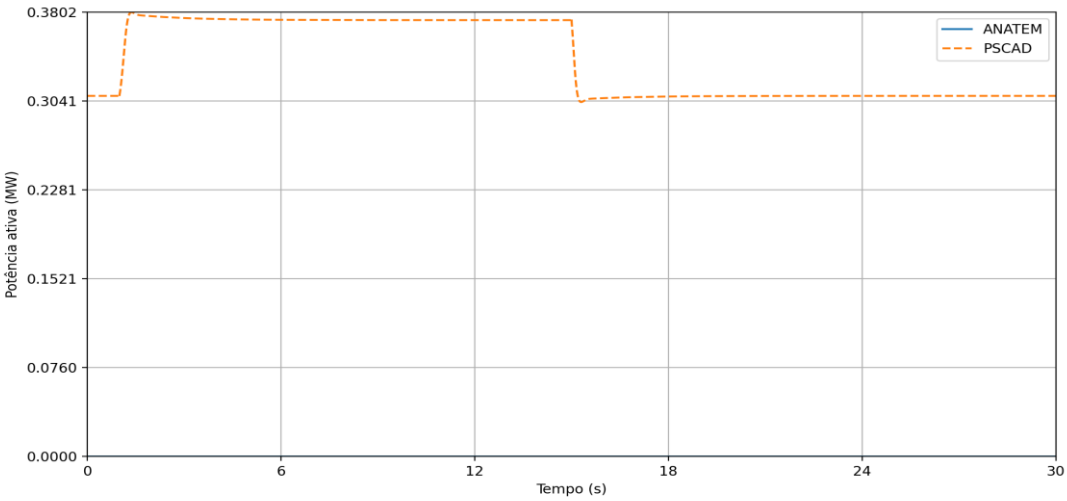

Figura 4-242 - Potência ativa

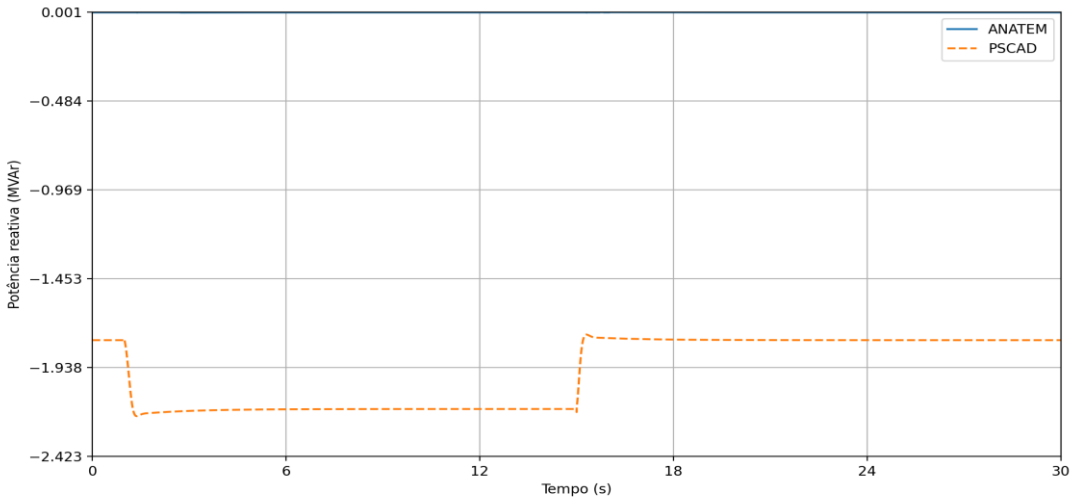

Figura 4-243 - Potência reativa

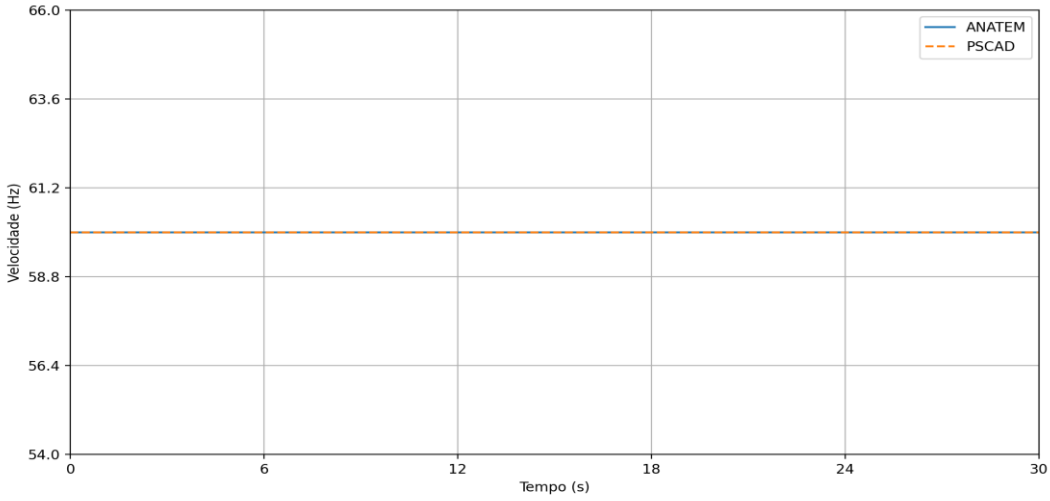

Figura 4-244 - Velocidade da máquina

4.10.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.10.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.10.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.10.4.3.

4.10.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

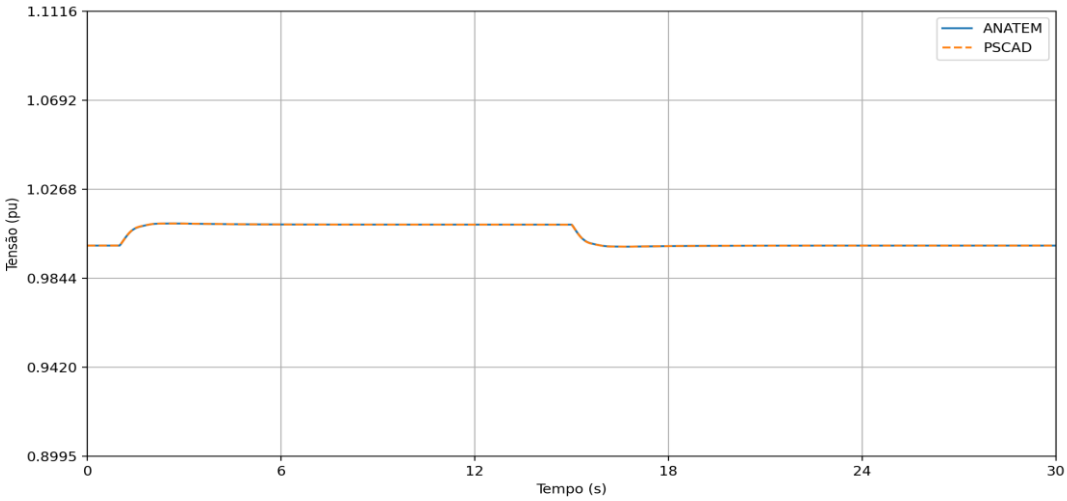

Figura 4-245 - Tensão terminal

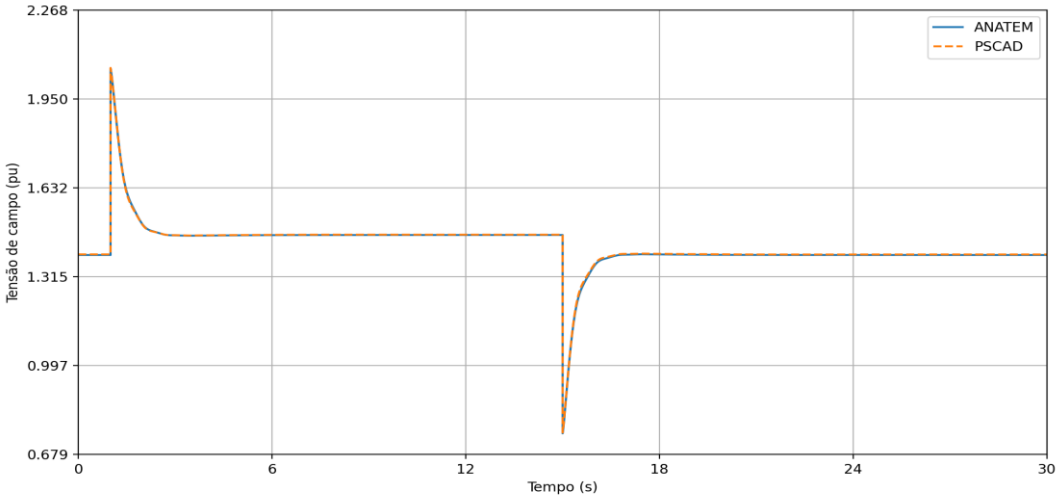

Figura 4-246 - Tensão de campo

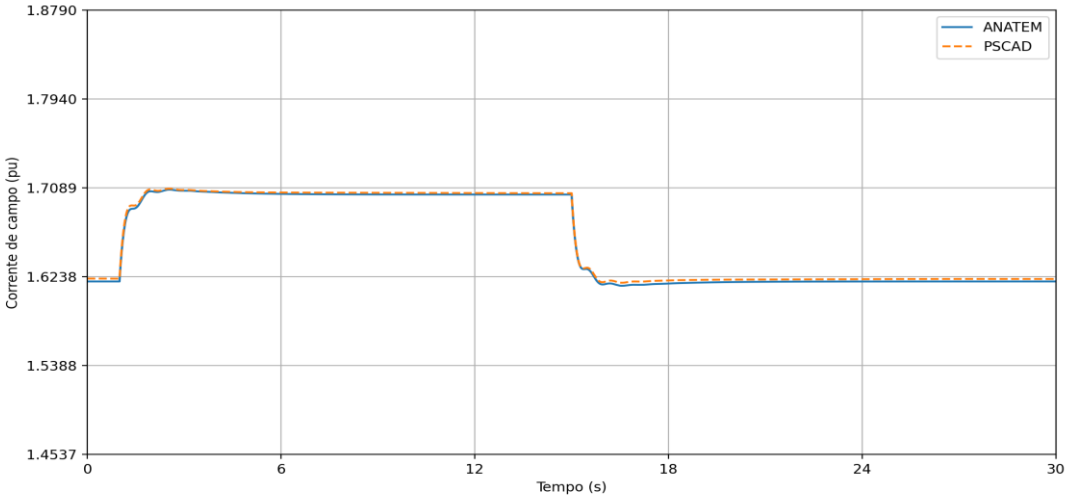

Figura 4-247 - Corrente de campo

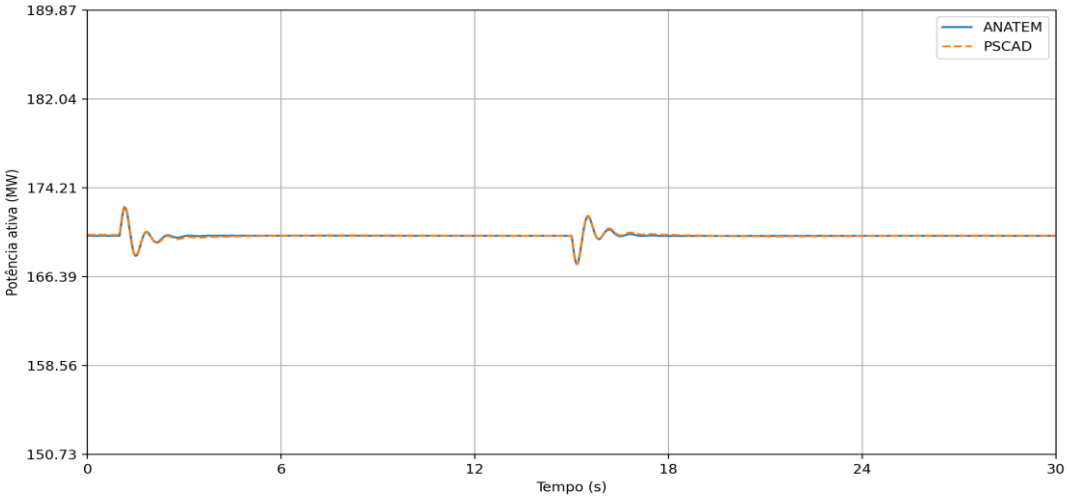

Figura 4-248 - Potência ativa

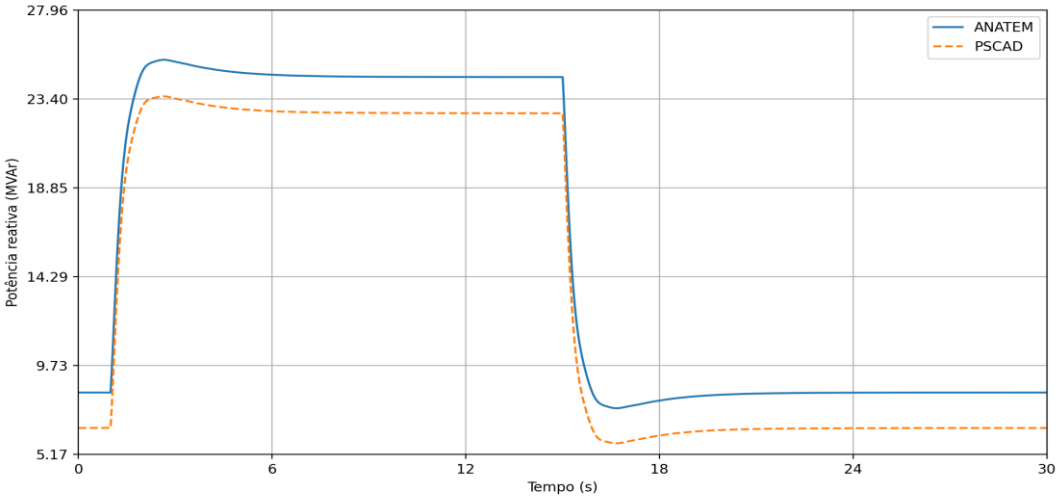

Figura 4-249 - Potência reativa

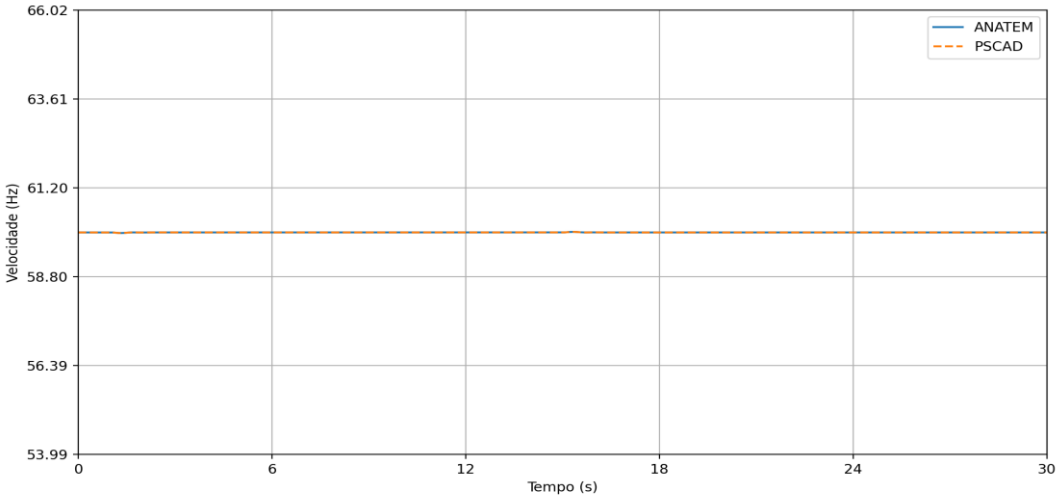

Figura 4-250 - Velocidade da máquina

4.10.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

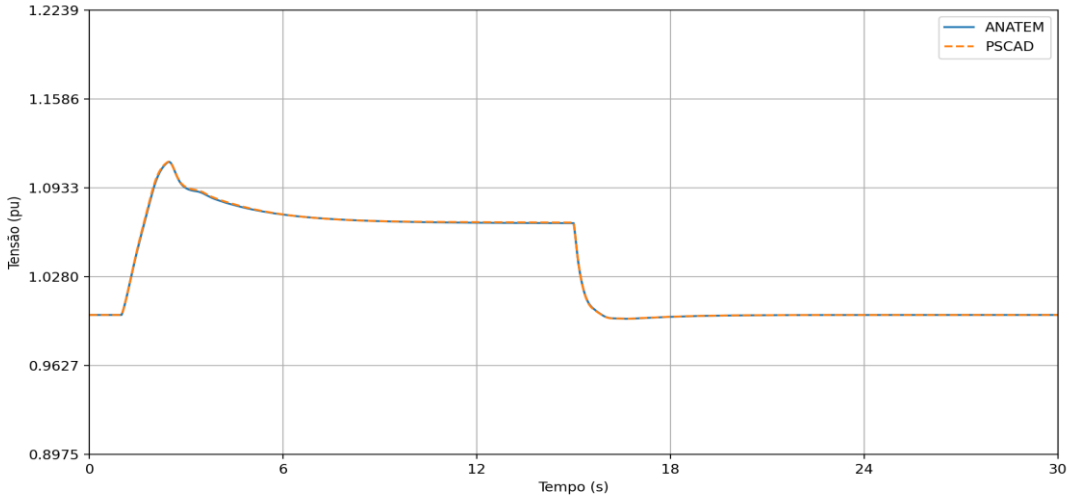

Figura 4-251 - Tensão terminal

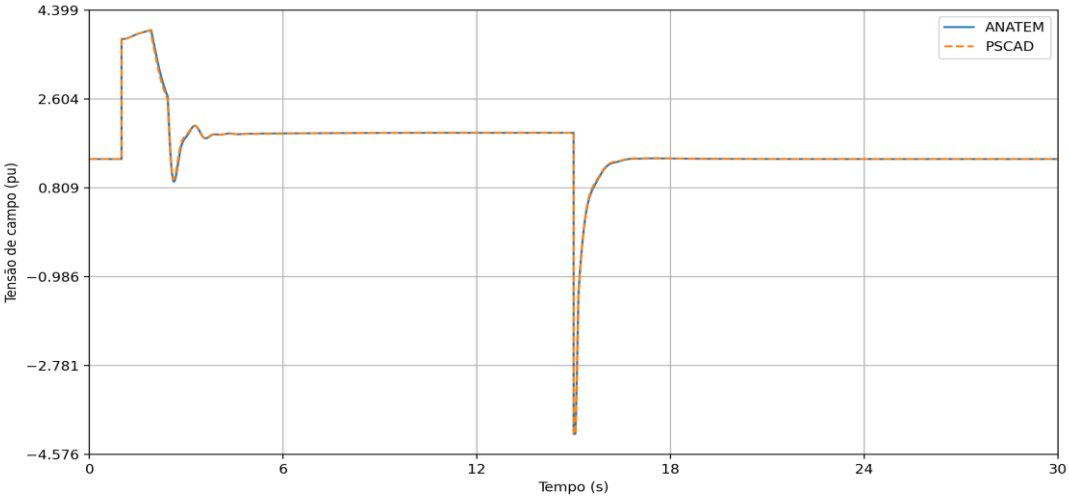

Figura 4-252 - Tensão de campo

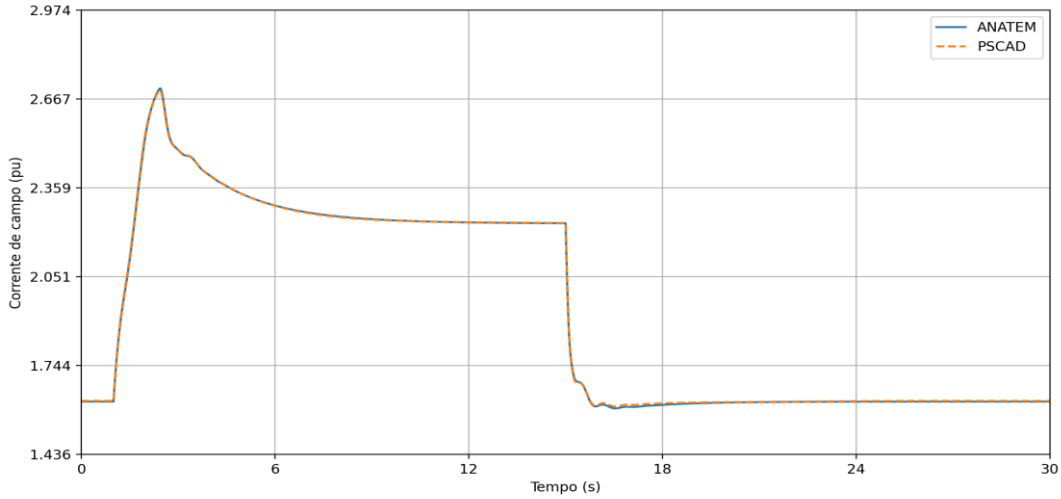

Figura 4-253 - Corrente de campo

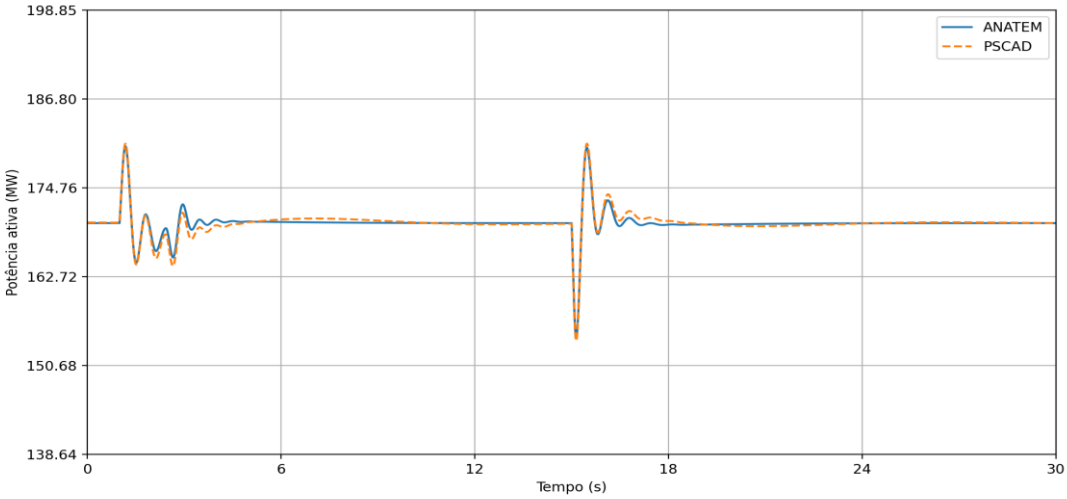

Figura 4-254 - Potência ativa

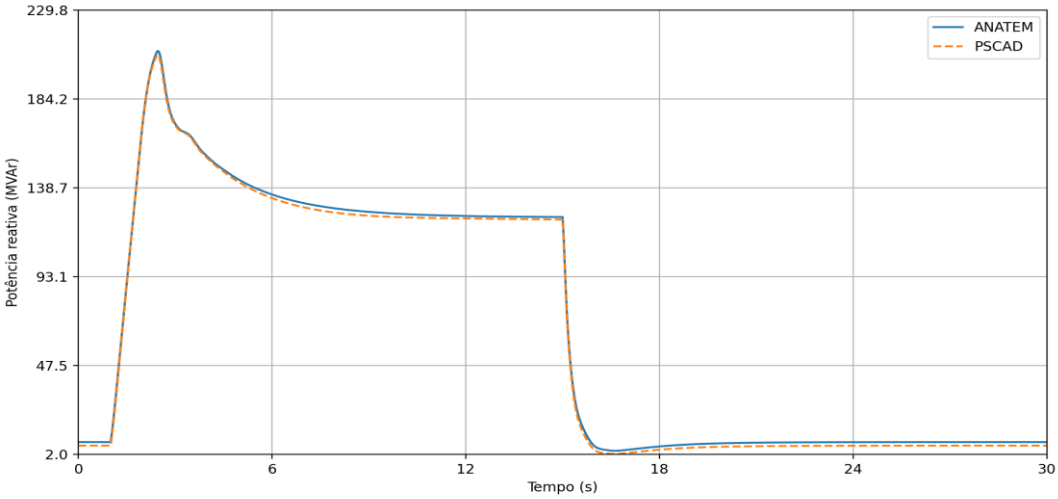

Figura 4-255 - Potência reativa

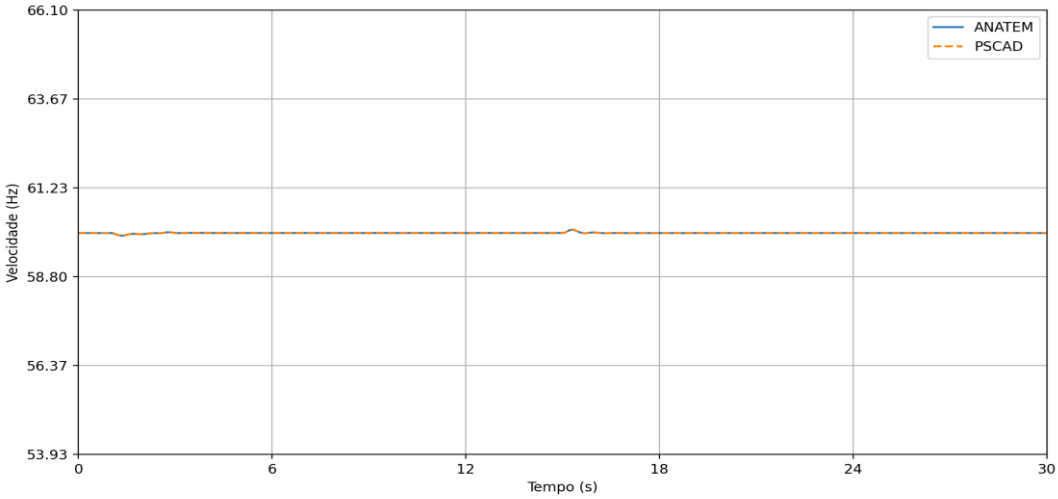

Figura 4-256 - Velocidade da máquina

4.10.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

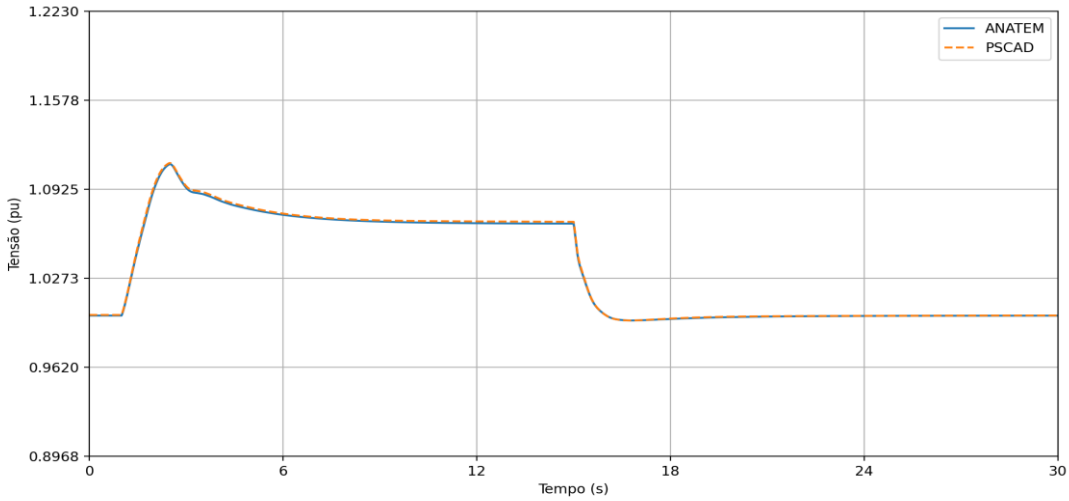

Figura 4-257 - Tensão terminal

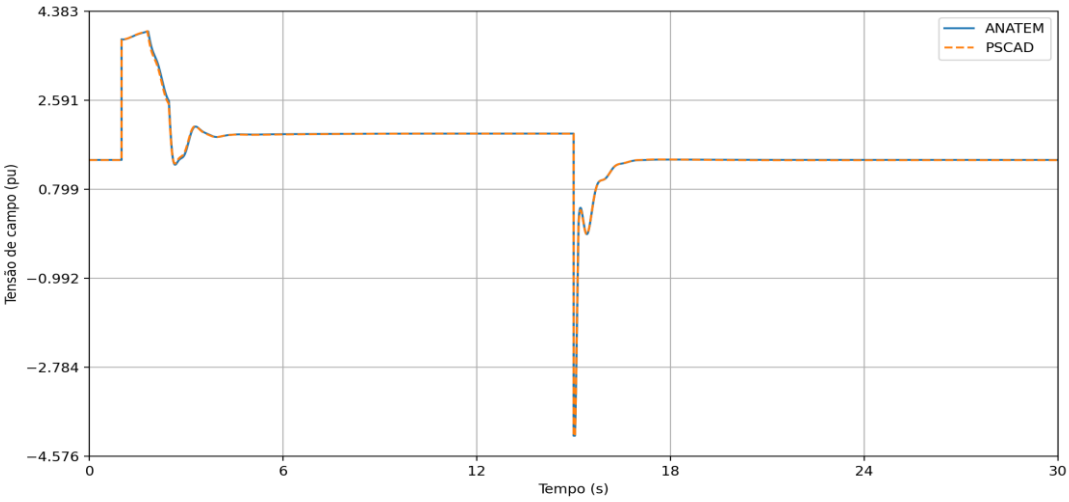

Figura 4-258 - Tensão de campo

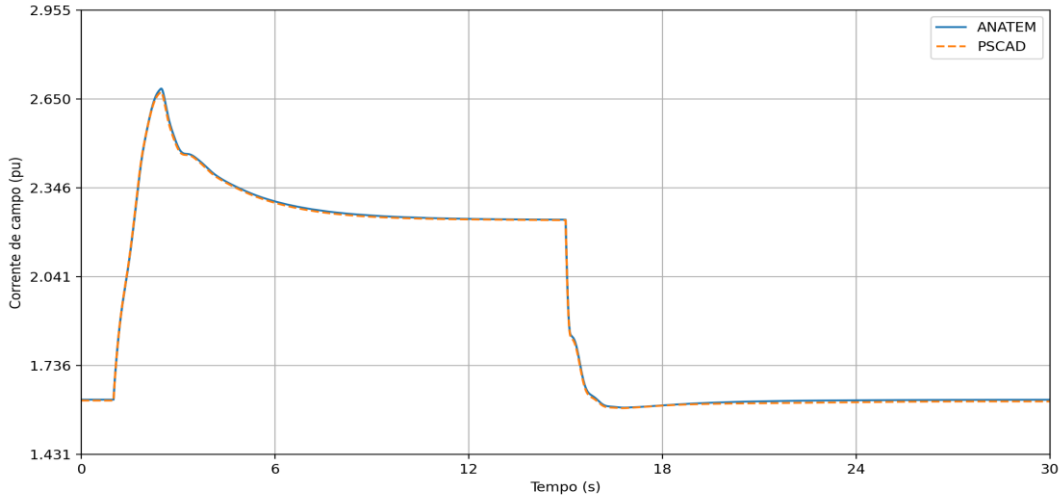

Figura 4-259 - Corrente de campo

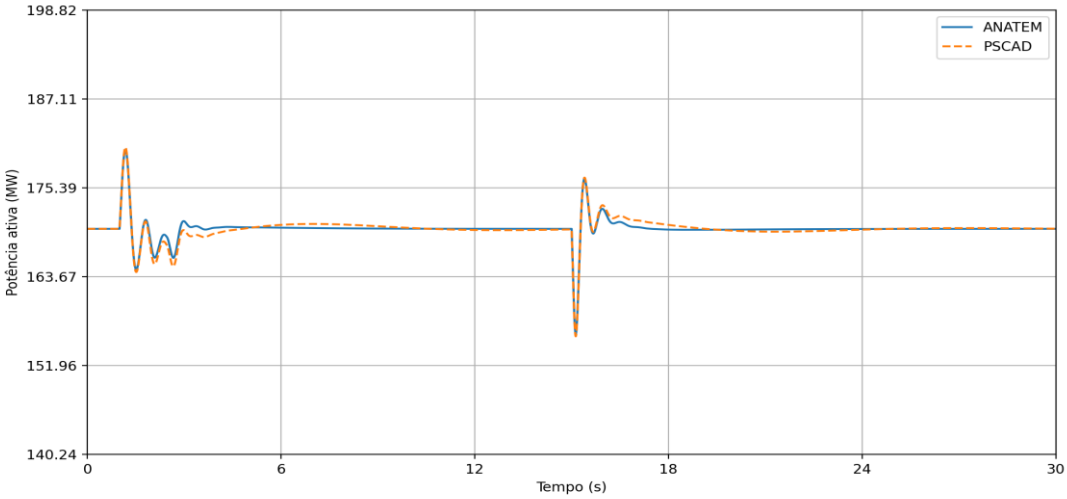

Figura 4-260 - Potência ativa

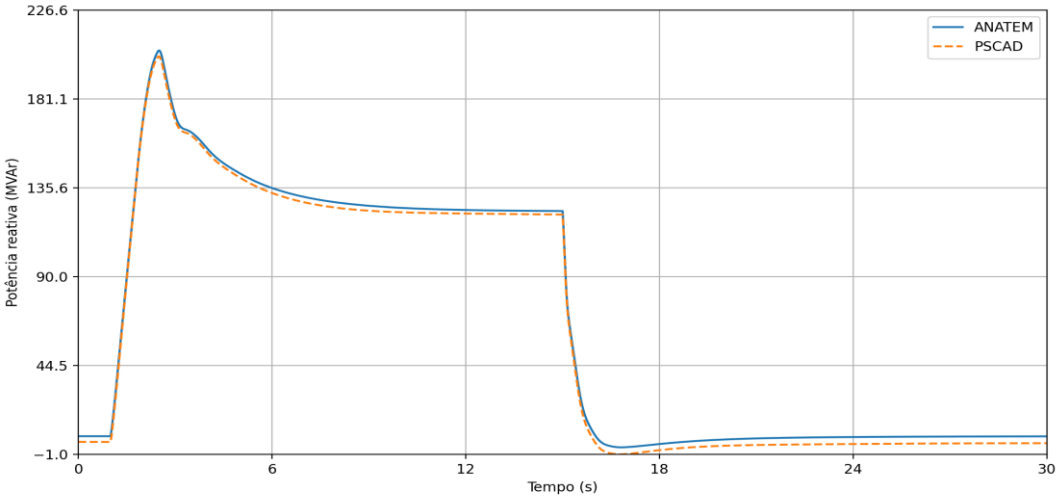

Figura 4-261 - Potência reativa

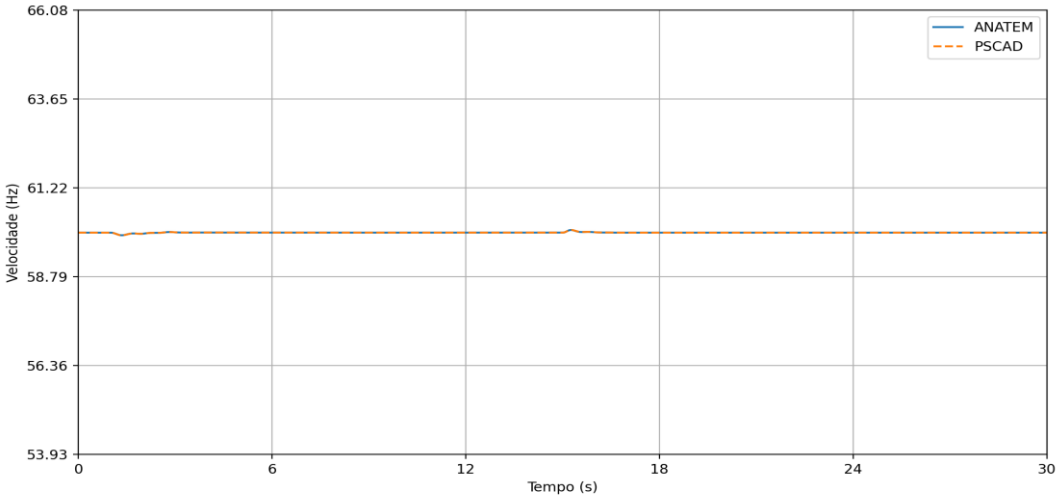

Figura 4-262 - Velocidade da máquina

4.11 UHE VOLTA GRANDE

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Volta Grande, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.11.1 Modelo da UHE Volta Grande

A Tabela 4-31 apresenta os parâmetros da UHE Volta Grande disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-31 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	107	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	68,9	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	32	I(KA)	4,184	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	22,7	H(s)	5,6	
xl(%)	15,3	D(pu)	0	
T'd(s)	3,26	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,153	Reatância de Potier
T''d(s)	0,03	xd(pu)	1,07	
T''q(s)	0,065	xd_(pu)	0,32	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	3,26	T'd
H(s)	5,6	xd__(pu)	0,227	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,03	T''d
S(MVA)	100	Xq(pu)	0,689	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,227	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,065	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.11.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-32, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Volta Grande estão apresentados na Tabela

4-33. A partir dos parâmetros da Tabela 4-32, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-33. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-263.

Tabela 4-32 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Volta Grande	
Ag	**Y1**	0,058
Bg	**Y2**	6,922
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-33 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,858	0,800
1,114	0,950
1,17	0,975
1,232	1,000
1,324	1,033
1,435	1,067
1,563	1,100
2,124	1,200
3,147	1,300

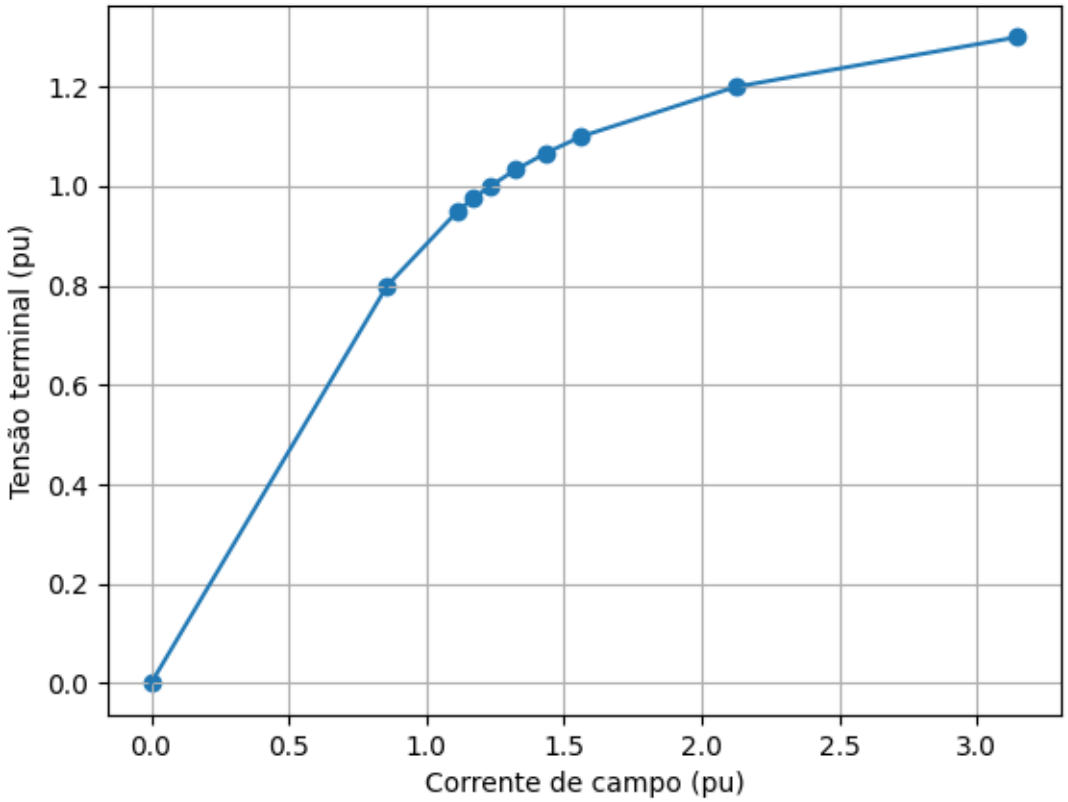

Figura 4-263 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.11.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.11.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.11.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.11.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

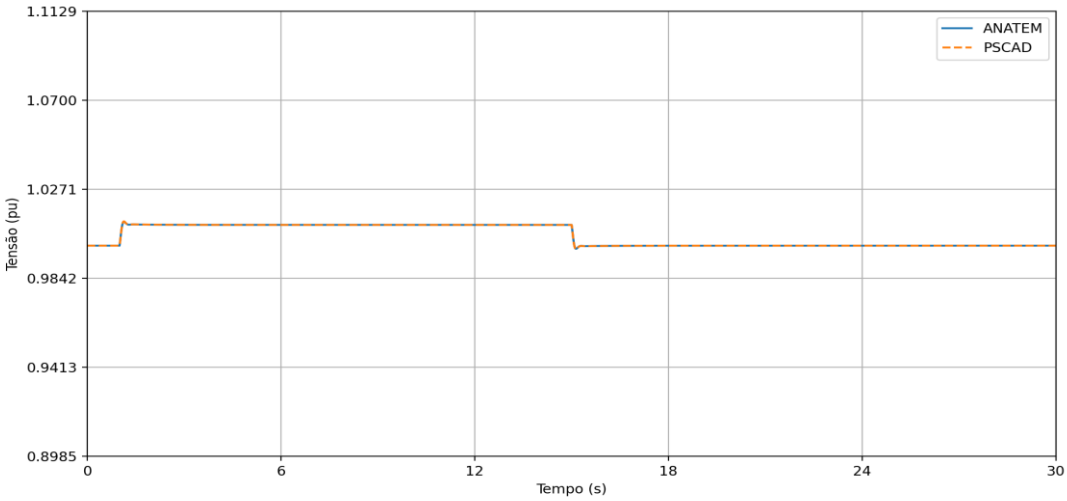

Figura 4-264 - Tensão terminal

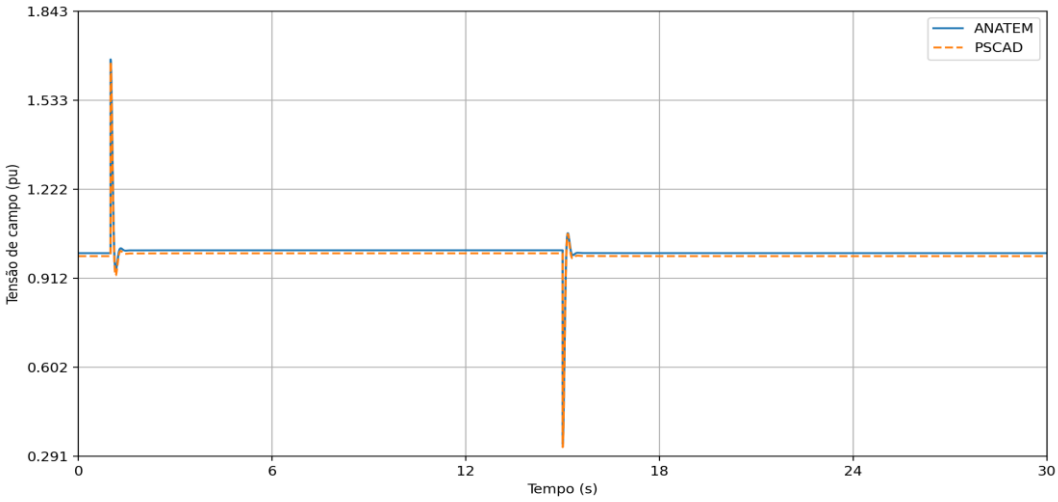

Figura 4-265 - Tensão de campo

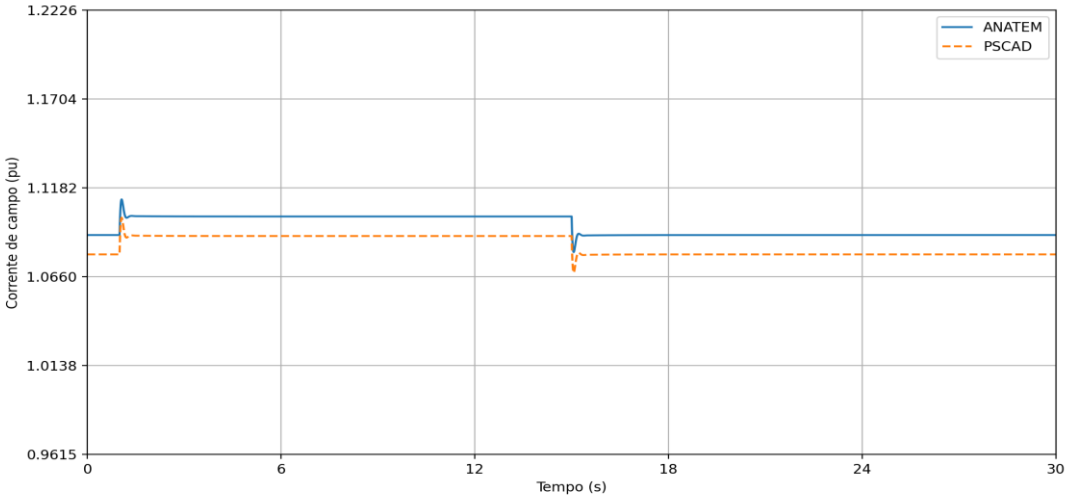

Figura 4-266 - Corrente de campo

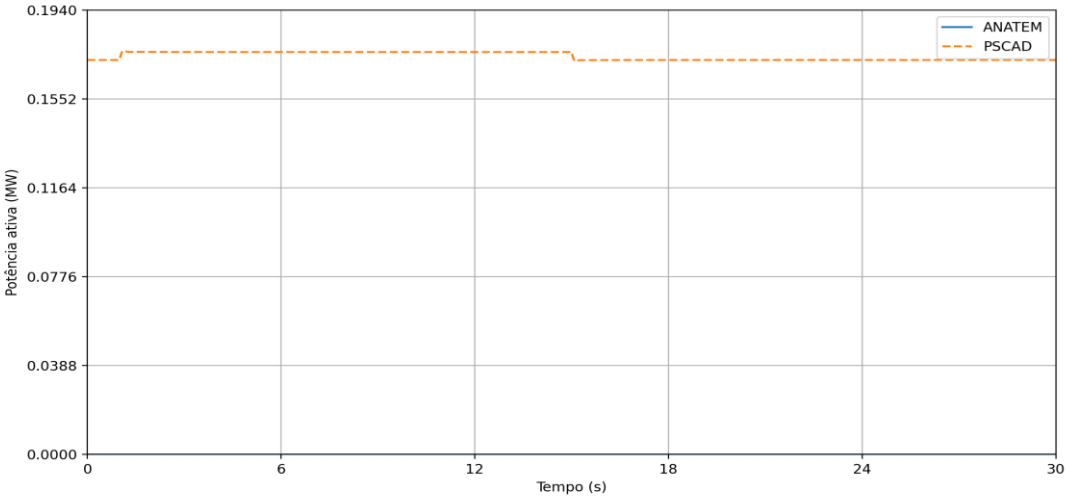

Figura 4-267 - Potência ativa

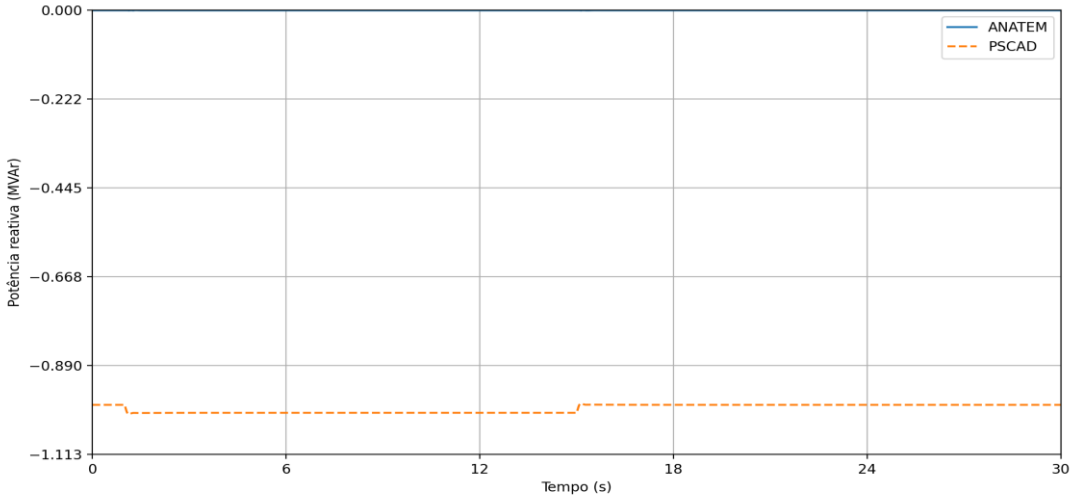

Figura 4-268 - Potência reativa

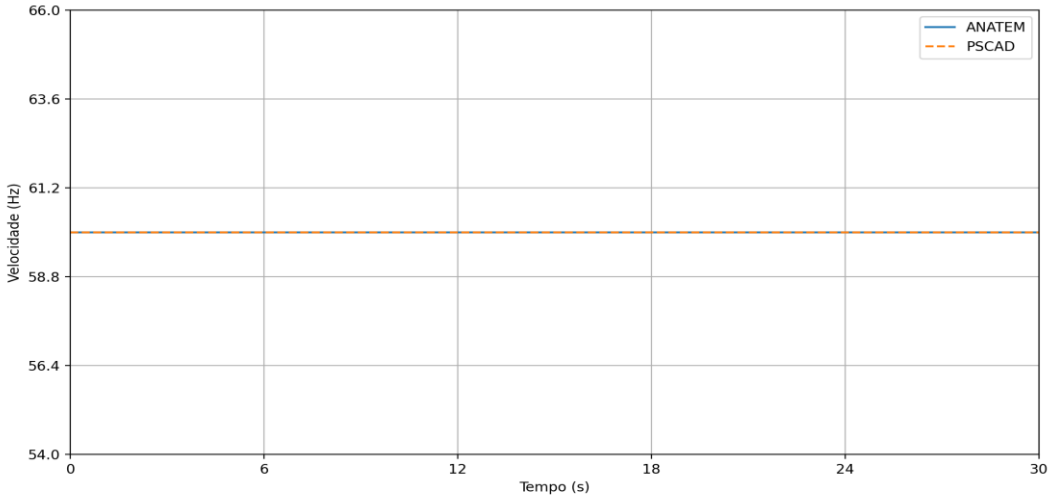

Figura 4-269 - Velocidade da máquina

4.11.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

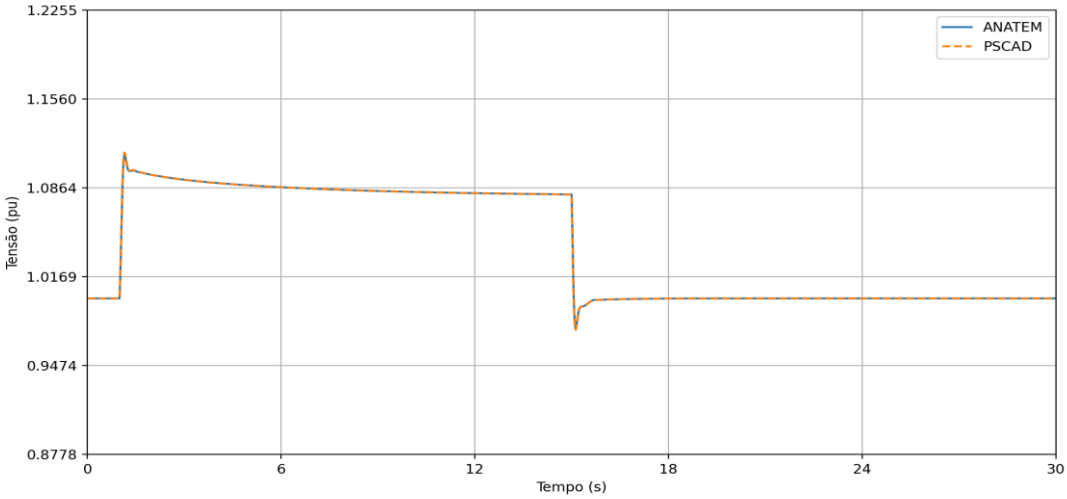

Figura 4-270 - Tensão terminal

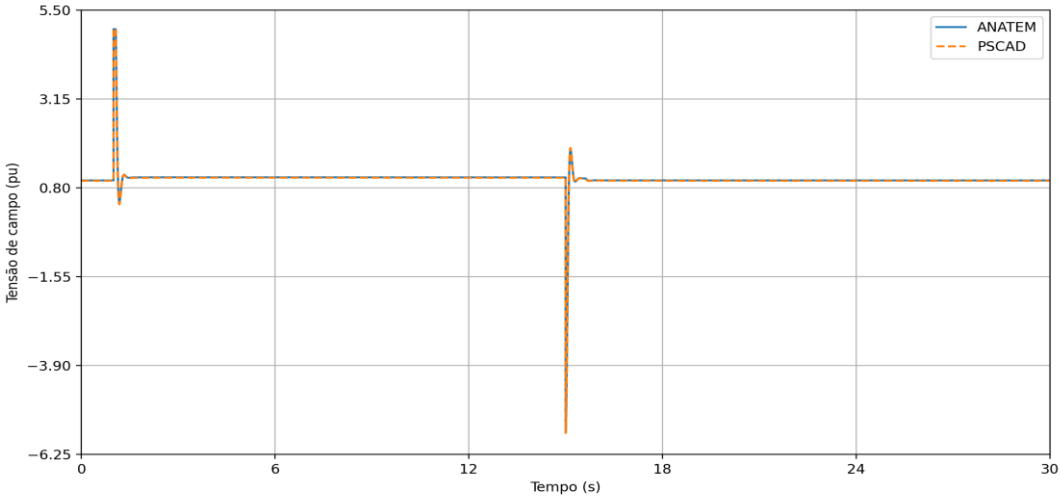

Figura 4-271 - Tensão de campo

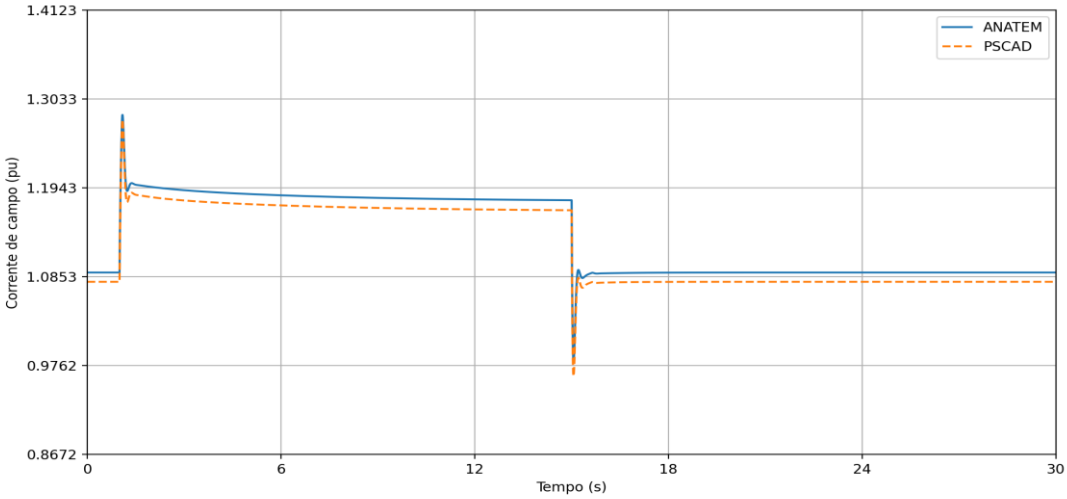

Figura 4-272 - Corrente de campo

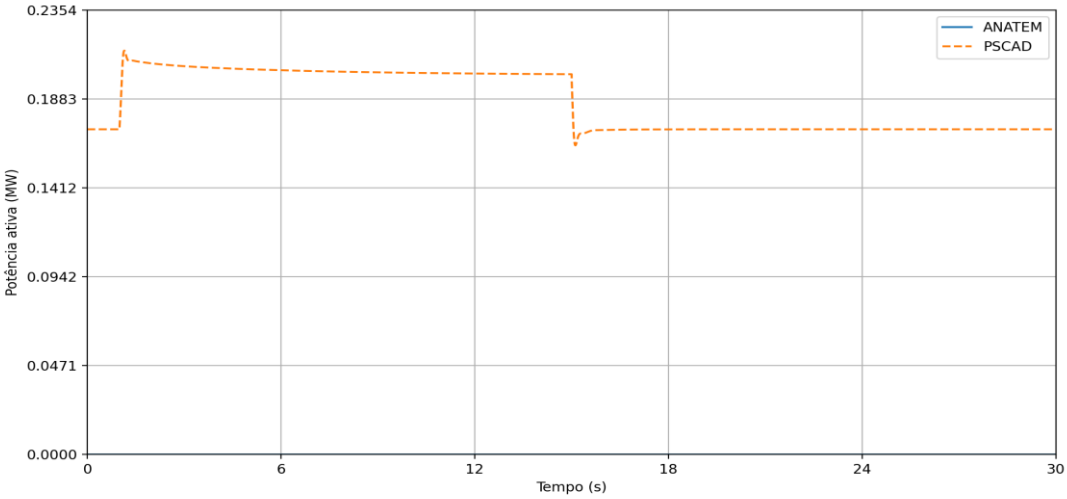

Figura 4-273 - Potência ativa

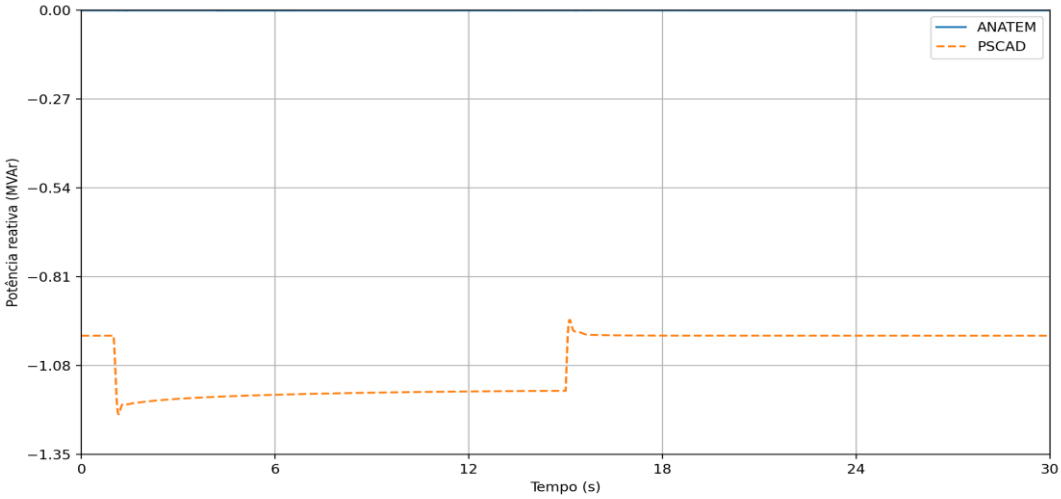

Figura 4-274 - Potência reativa

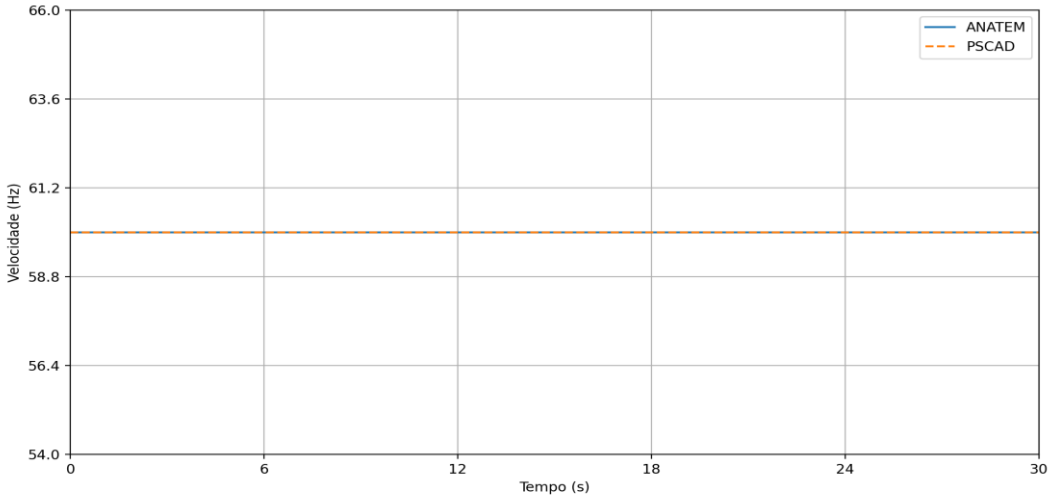

Figura 4-275 - Velocidade da máquina

4.11.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.11.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.11.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.11.4.3.

4.11.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

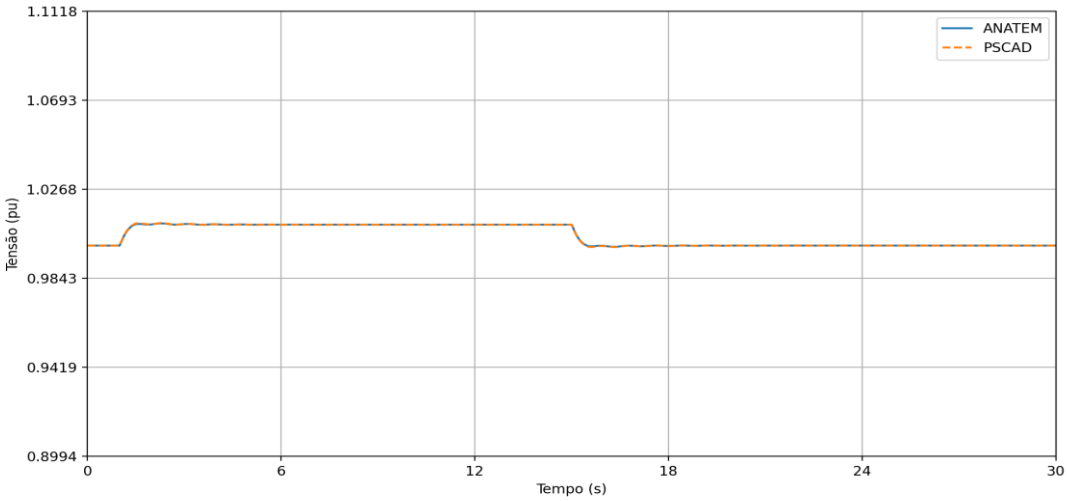

Figura 4-276 - Tensão terminal

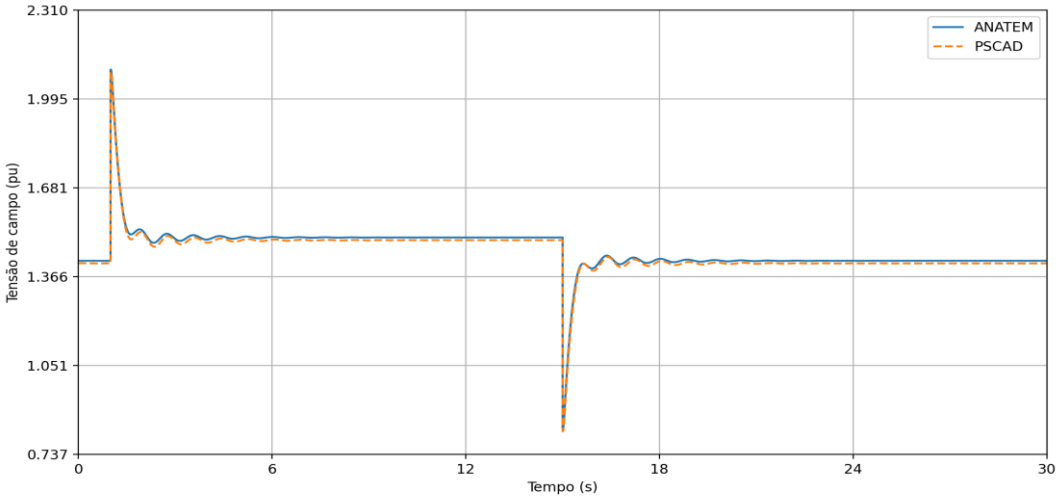

Figura 4-277 - Tensão de campo

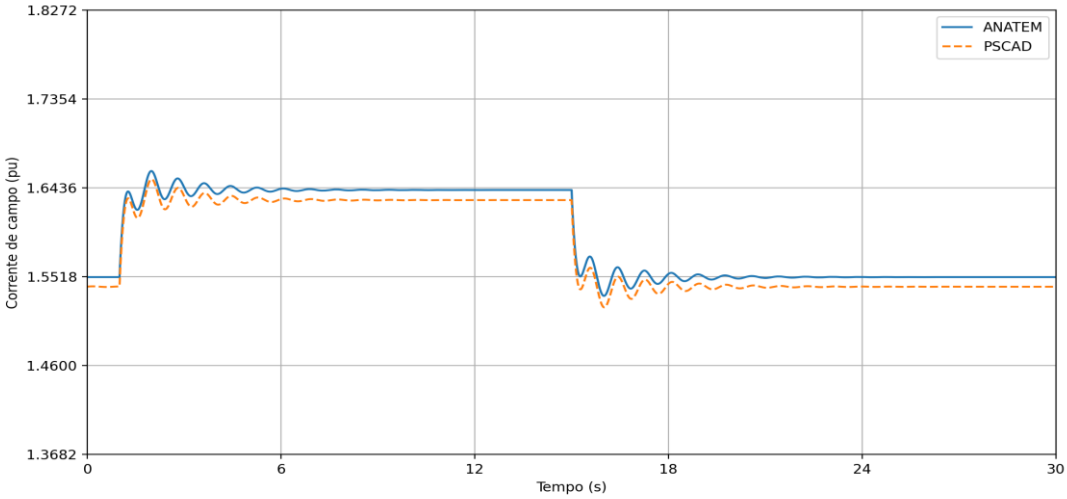

Figura 4-278 - Corrente de campo

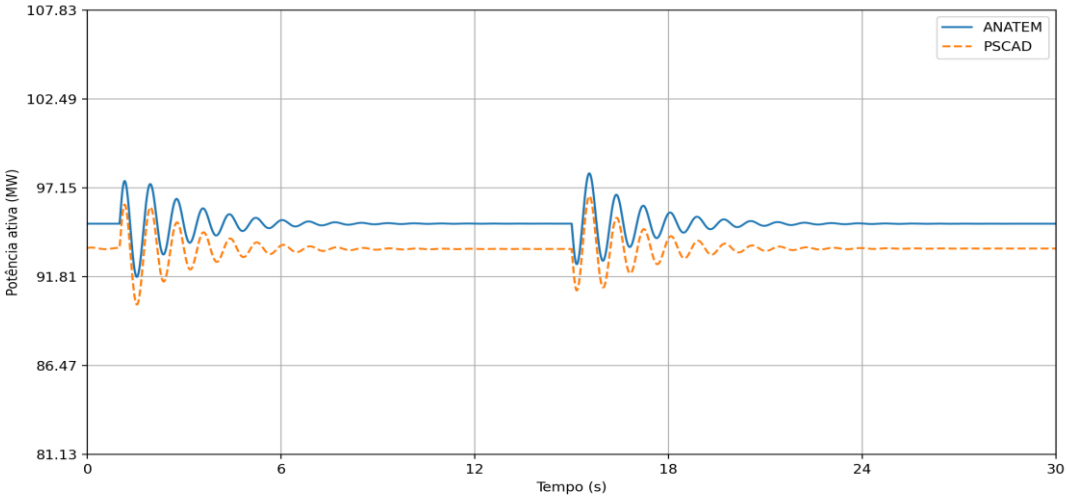

Figura 4-279 - Potência ativa

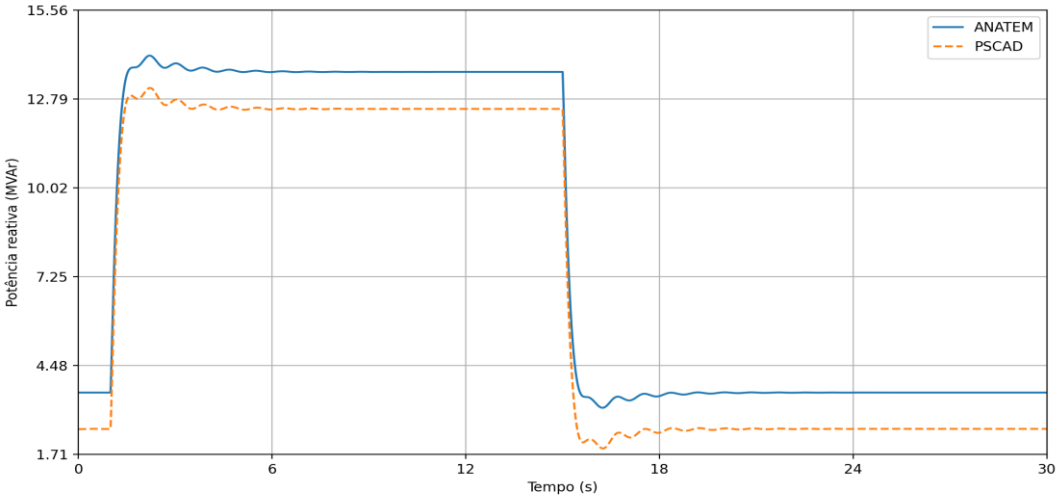

Figura 4-280 - Potência reativa

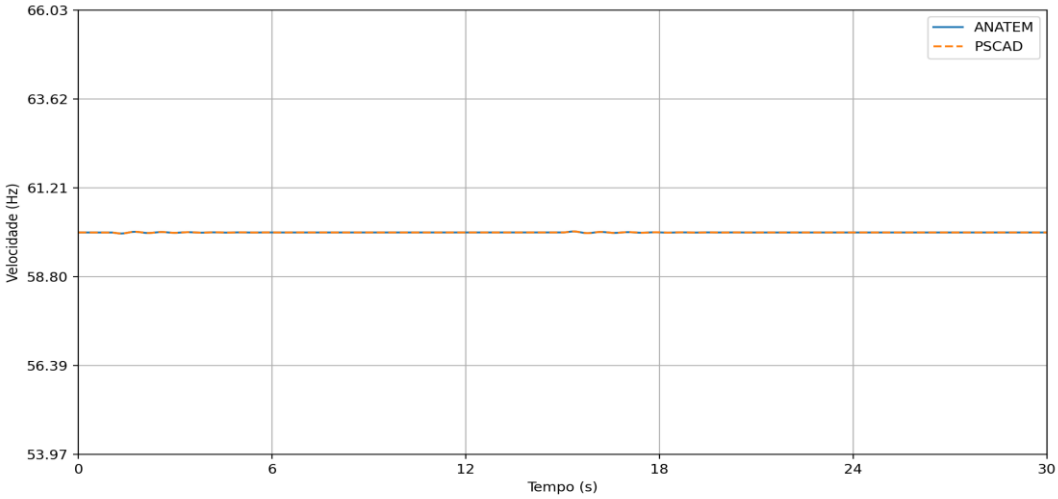

Figura 4-281 - Velocidade da máquina

4.11.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

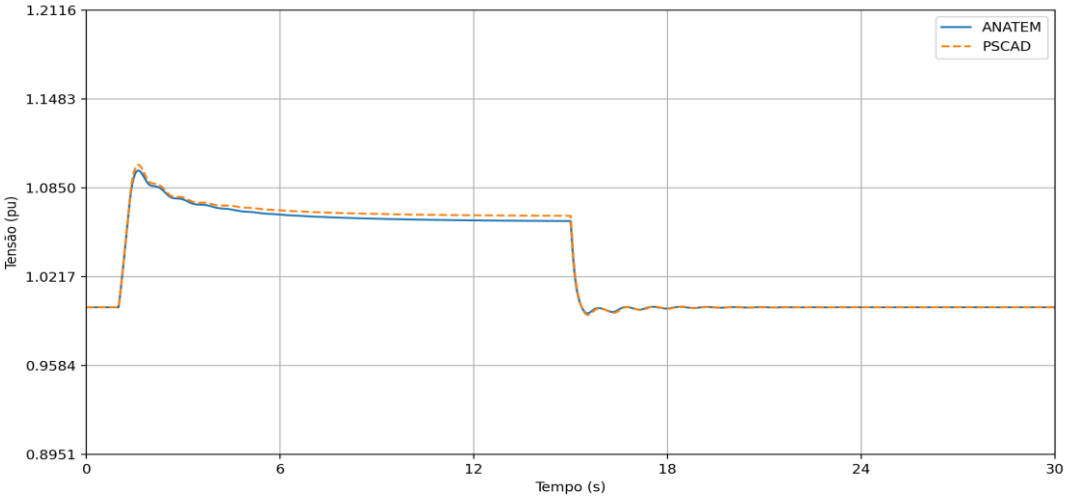

Figura 4-282 - Tensão terminal

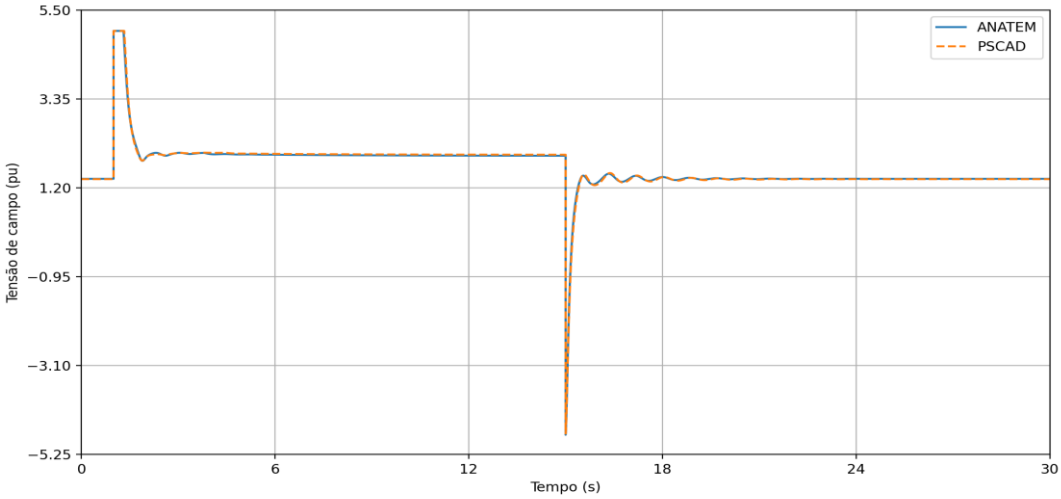

Figura 4-283 - Tensão de campo

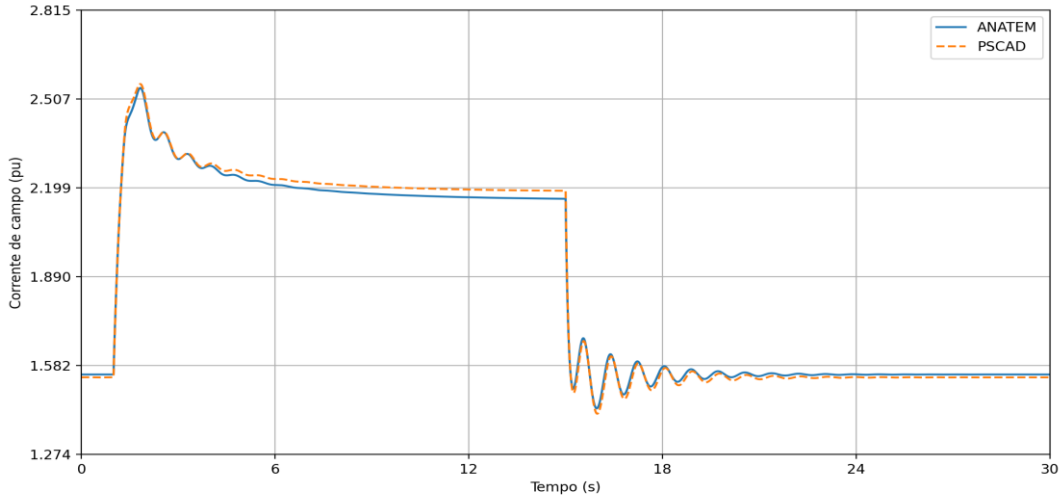

Figura 4-284 - Corrente de campo

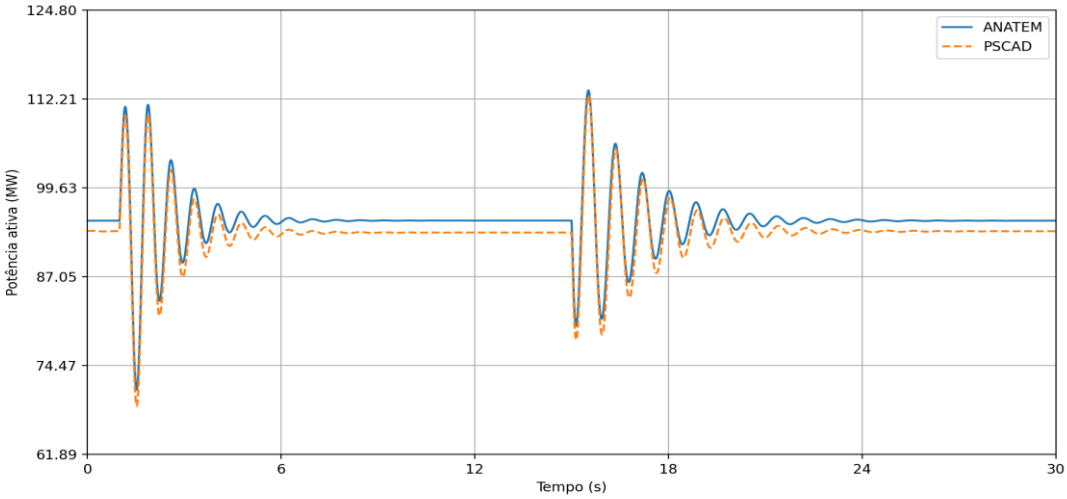

Figura 4-285 - Potência ativa

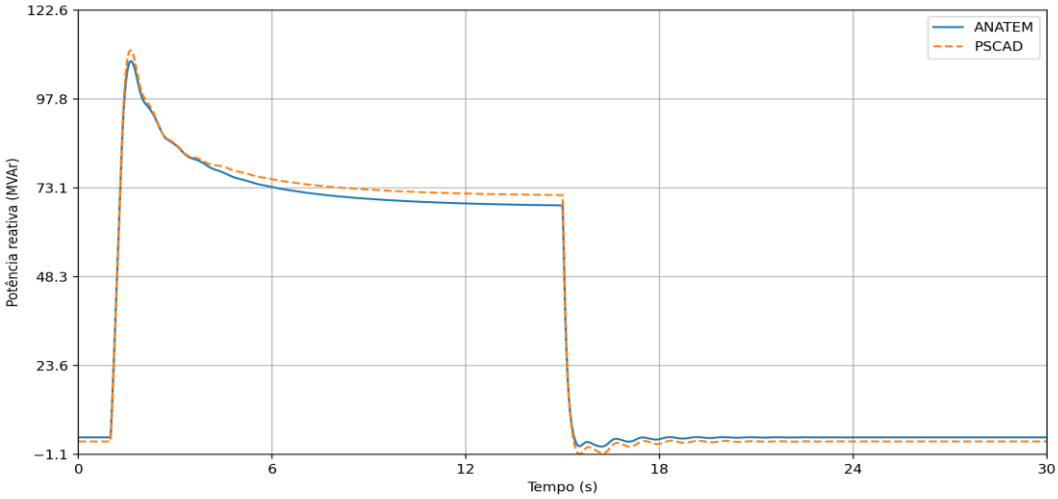

Figura 4-286 - Potência reativa

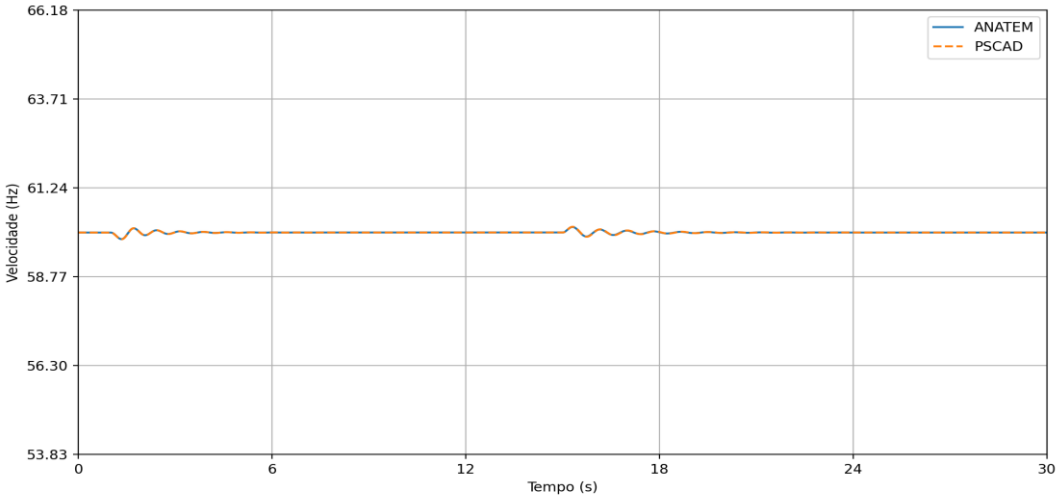

Figura 4-287 - Velocidade da máquina

4.11.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

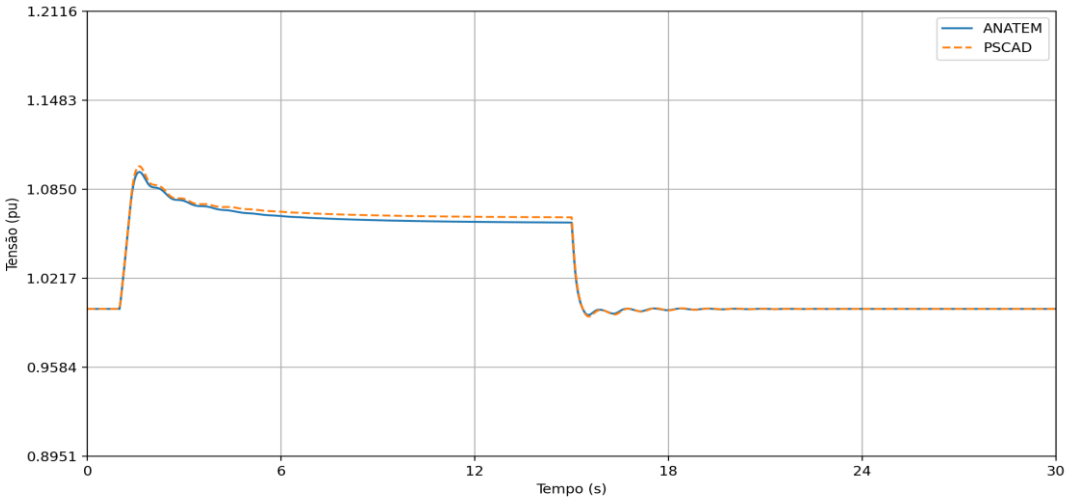

Figura 4-288 - Tensão terminal

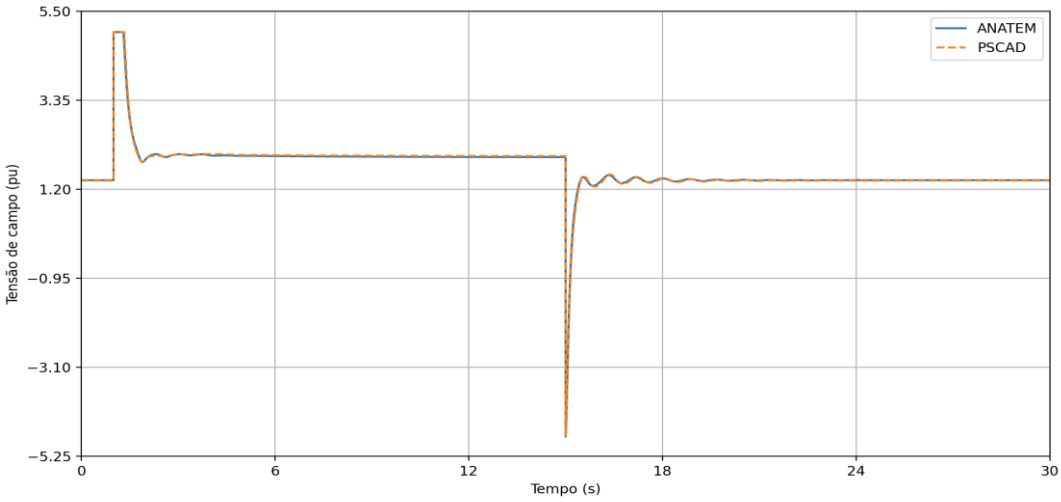

Figura 4-289 - Tensão de campo

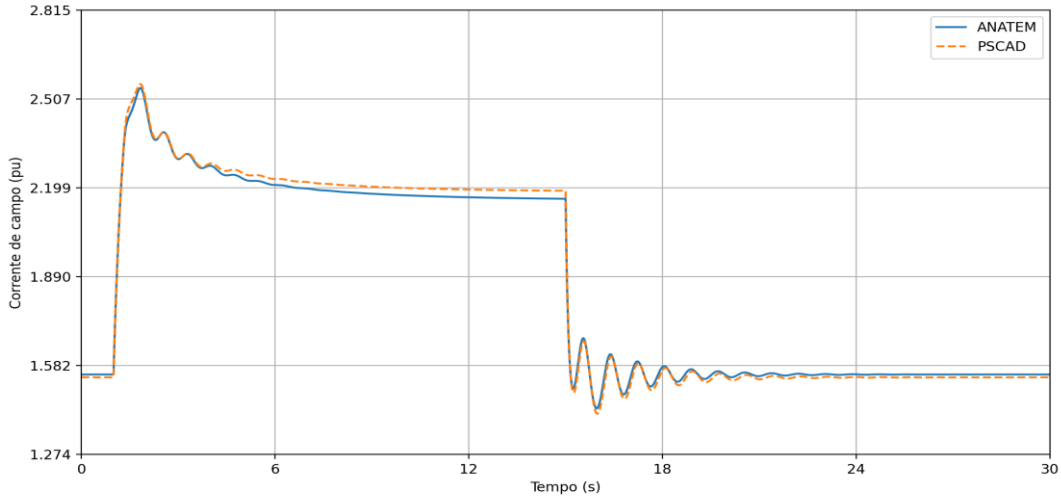

Figura 4-290 - Corrente de campo

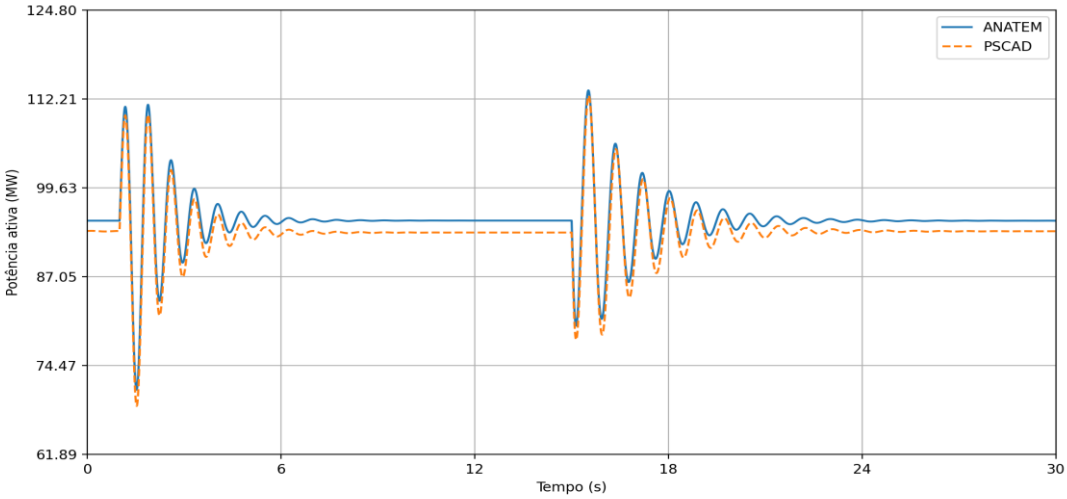

Figura 4-291 - Potência ativa

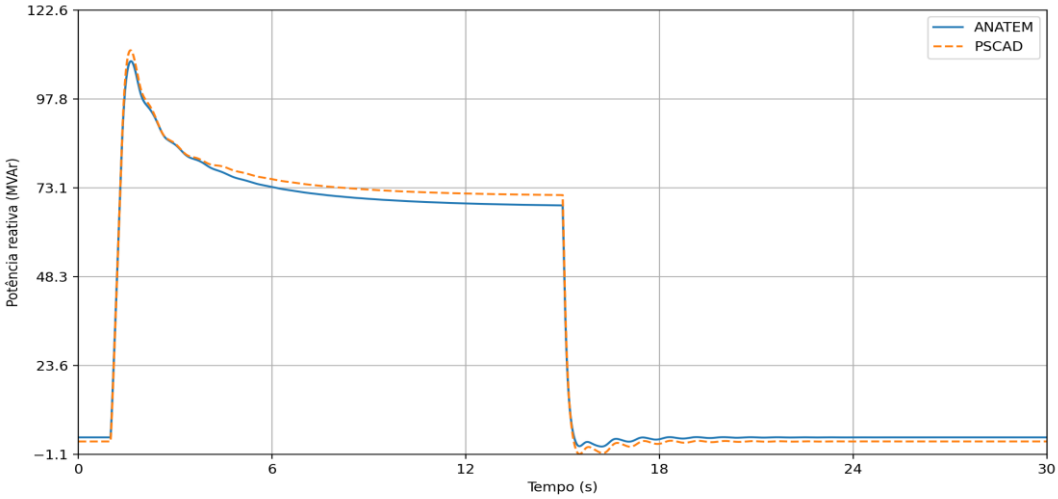

Figura 4-292 - Potência reativa

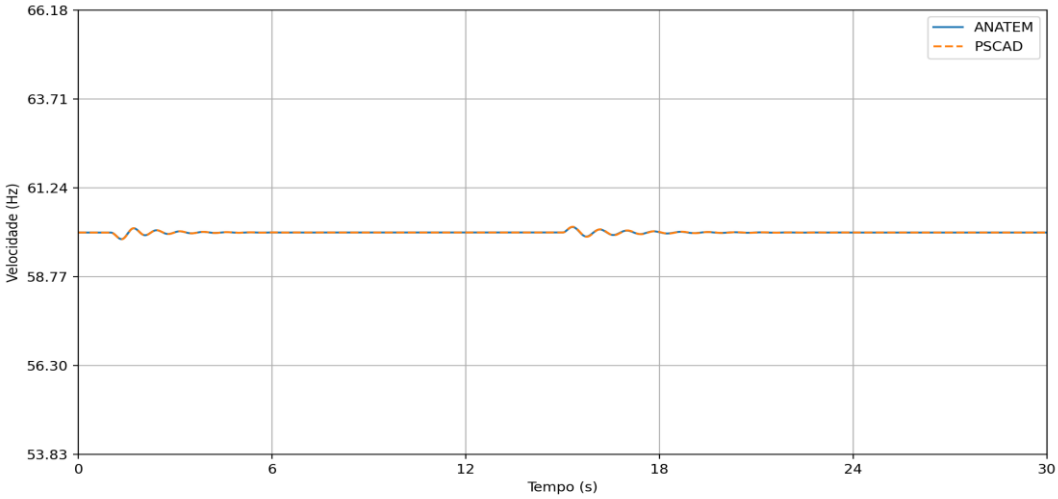

Figura 4-293 - Velocidade da máquina

4.12 UNE ANGRA I

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UNE Angra I, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão e velocidade, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.12.1 Modelo da UNE Angra I

A Tabela 4-34 apresenta os parâmetros da UNE Angra I disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-34 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	172	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	167,9	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	48,8	I(KA)	31,796	
x'q (%)	80	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	33,7	H(s)	3,859	
xl(%)	26,6	D(pu)	0	
T'd(s)	5,3	Ra(pu)	0	
T'q(s)	0,625	xp(pu)	0,266	Reatância de Potier
T''d(s)	0,048	xd(pu)	1,72	
T''q(s)	0,066	xd_(pu)	0,488	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	5,3	T'd
H(s)	3,859	xd__(pu)	0,337	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,048	T''d
S(MVA)	760	Xq(pu)	1,679	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,8	x'q
		Tq0_(s)	0,625	T'q
		xq__(pu)	0,337	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,066	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.12.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-35, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UNE Angra I estão apresentados na Tabela 4-36. A

partir dos parâmetros da Tabela 4-35, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-36. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-294.

Tabela 4-35 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UNE Angra I	
Ag	**Y1**	0,016
Bg	**Y2**	10,5
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-36 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,816	0,800
1,027	0,950
1,075	0,975
1,131	1,000
1,218	1,033
1,331	1,067
1,473	1,100
2,267	1,200
4,349	1,300

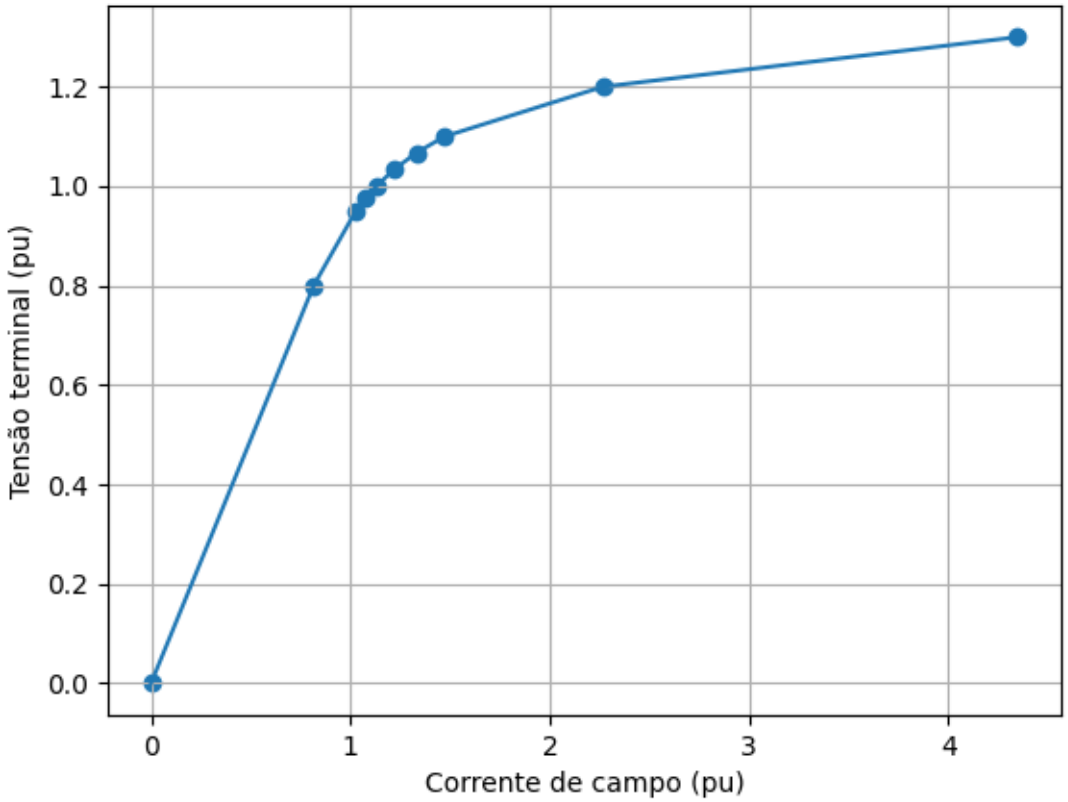

Figura 4-294 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.12.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.12.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.12.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.12.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

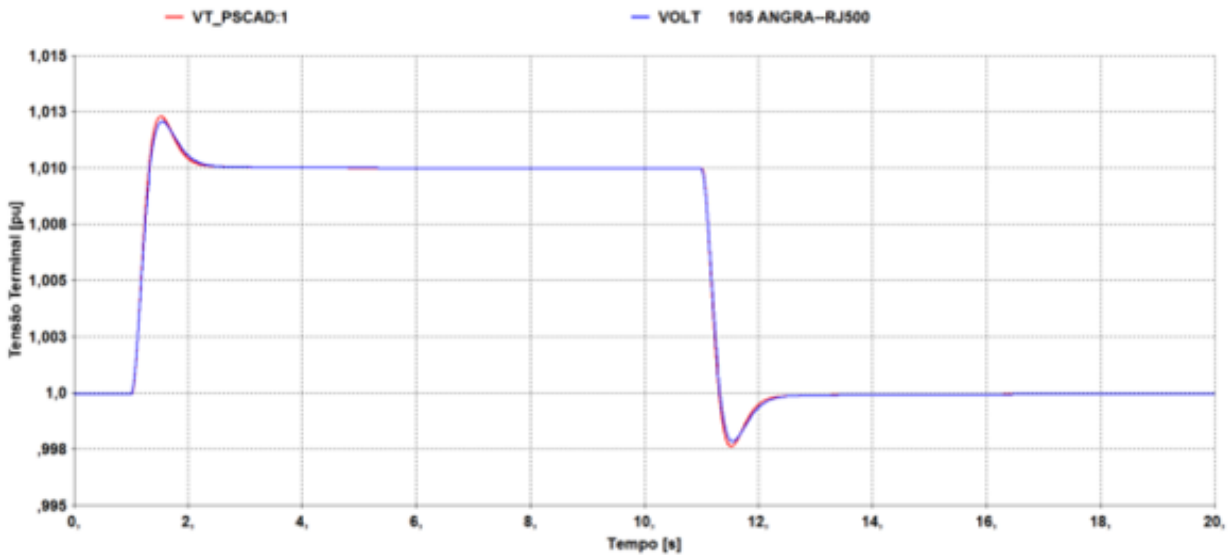

Figura 4-295 - Tensão terminal

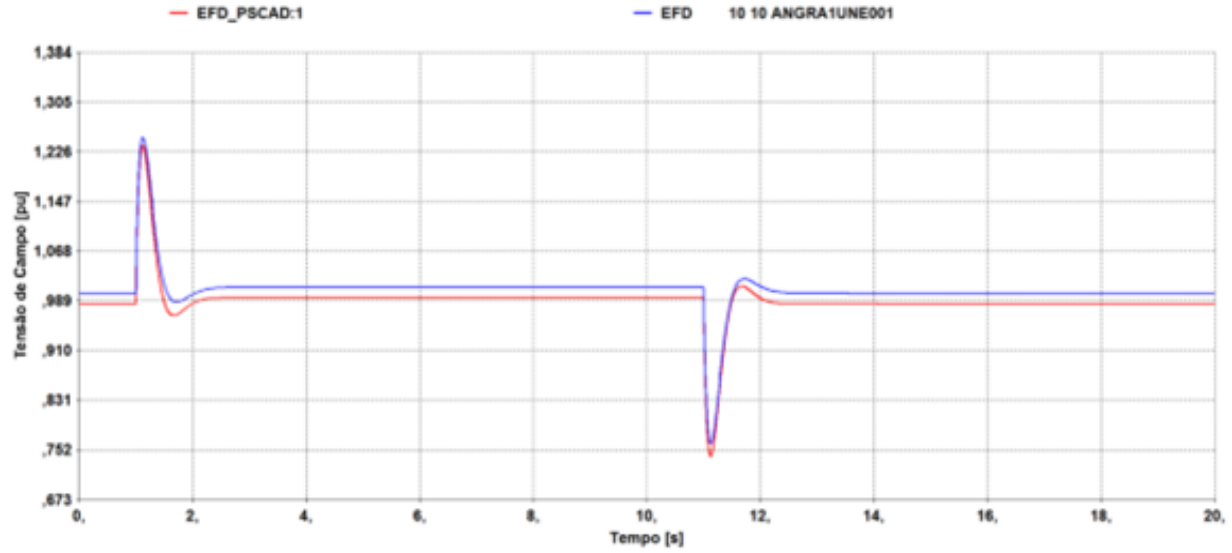

Figura 4-296 - Tensão de campo

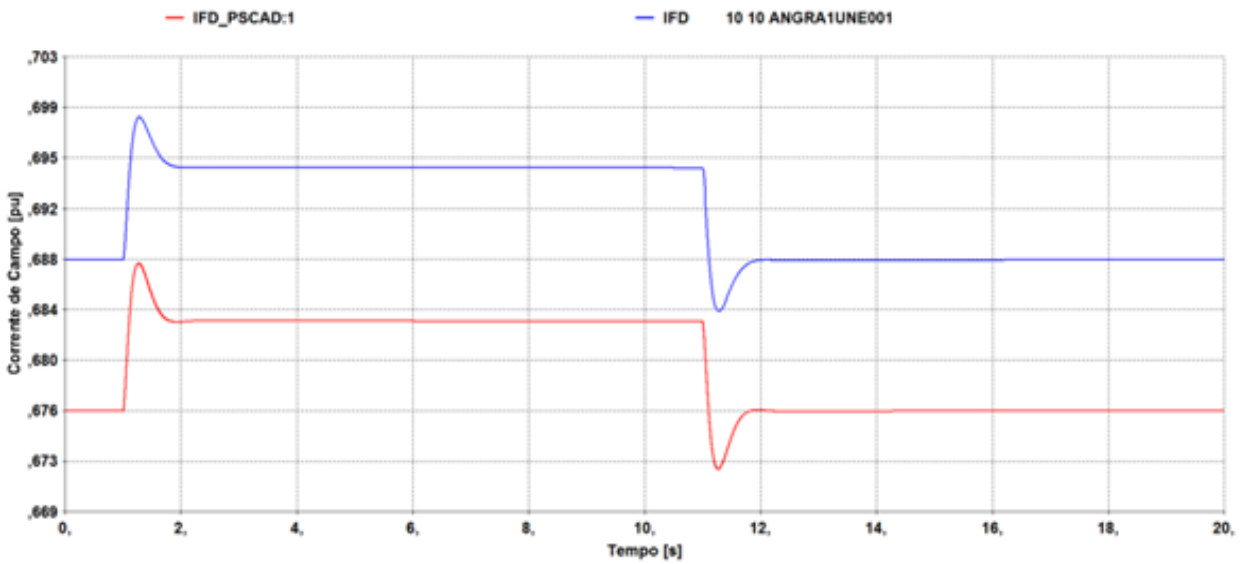

Figura 4-297 - Corrente de campo

4.12.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

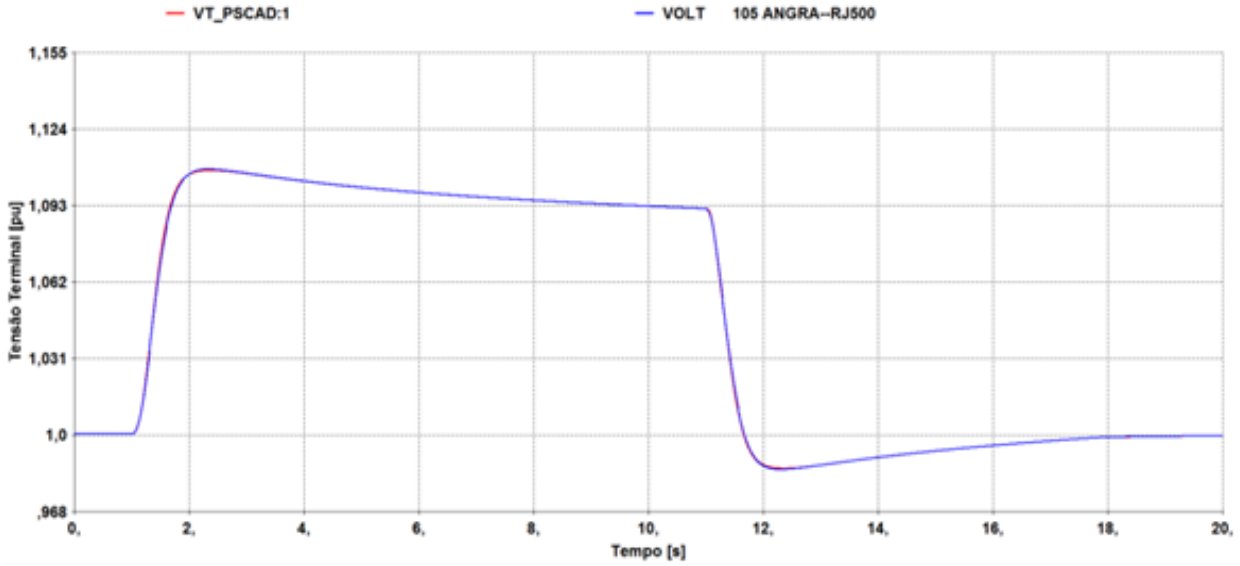

Figura 4-298 - Tensão terminal

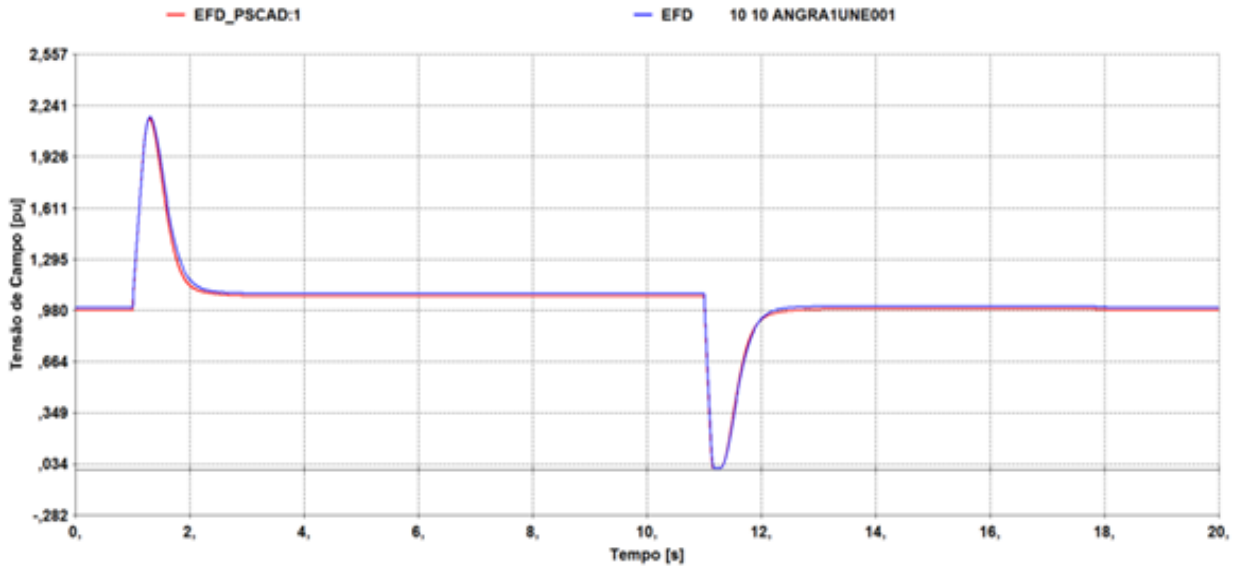

Figura 4-299 - Tensão de campo

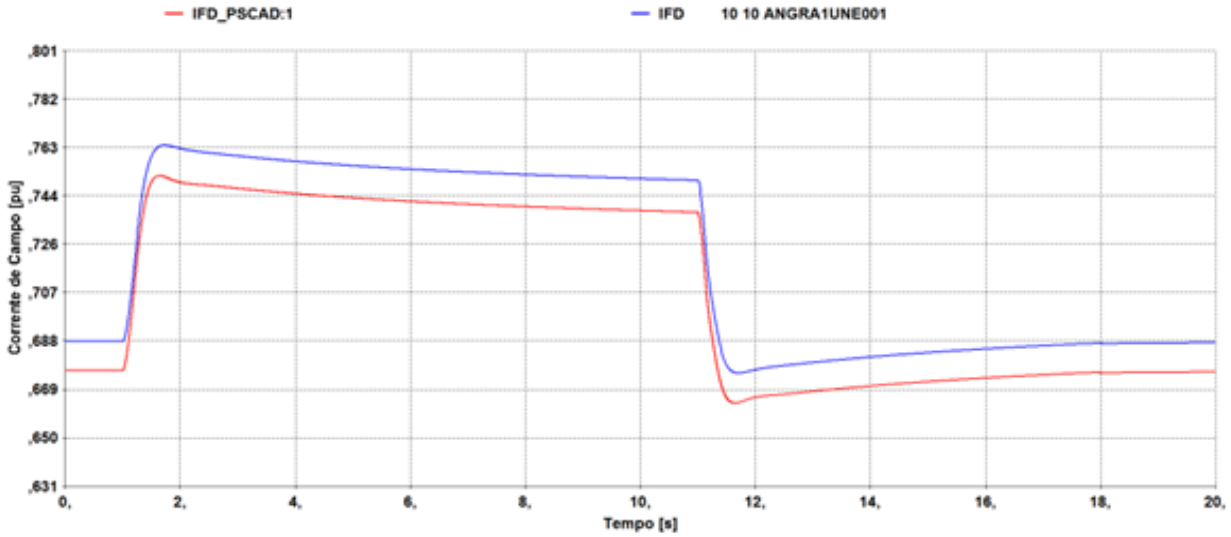

Figura 4-300 - Corrente de campo

4.12.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.12.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.12.4.2.

4.12.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

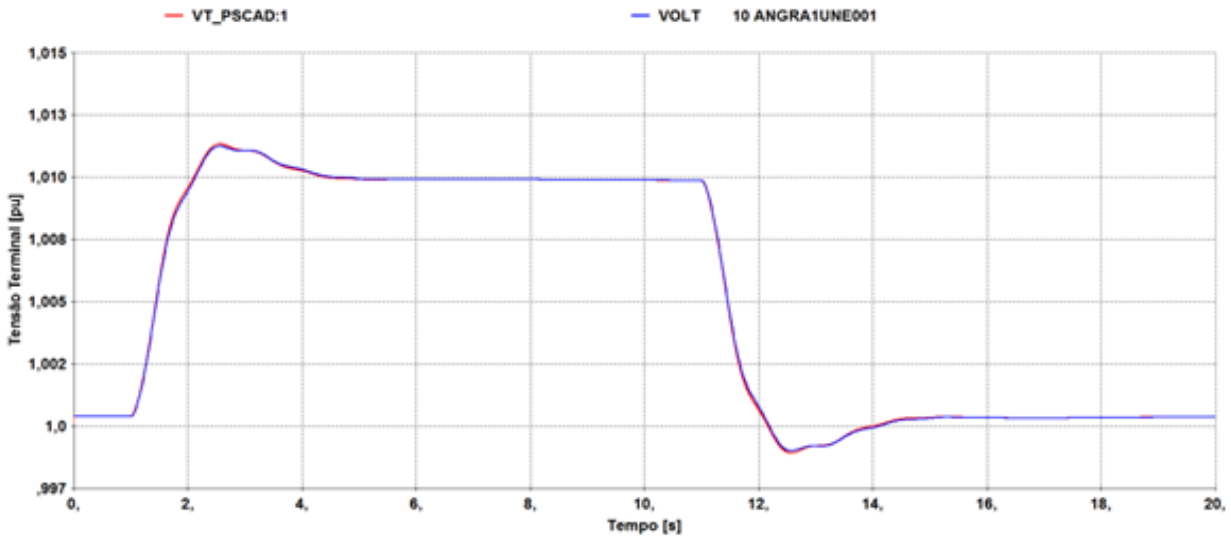

Figura 4-301 - Tensão terminal

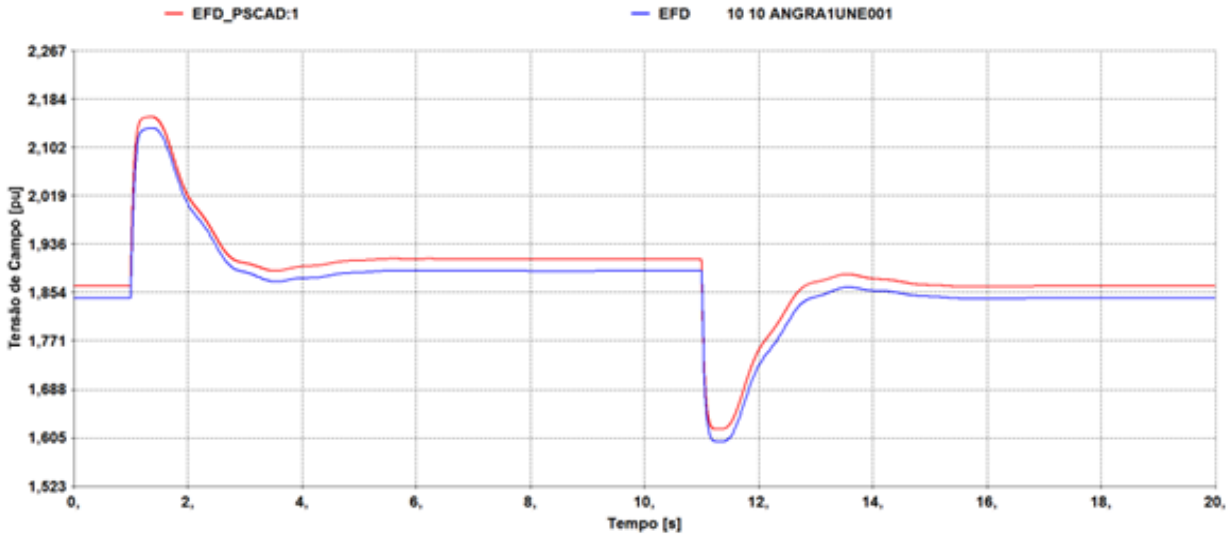

Figura 4-302 - Tensão de campo

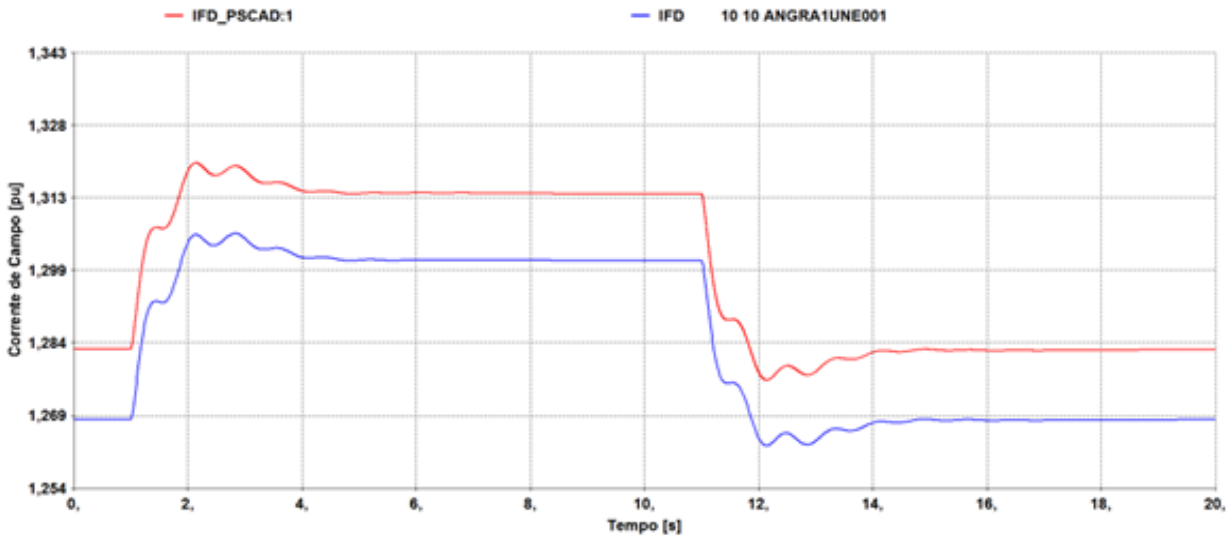

Figura 4-303 - Corrente de campo

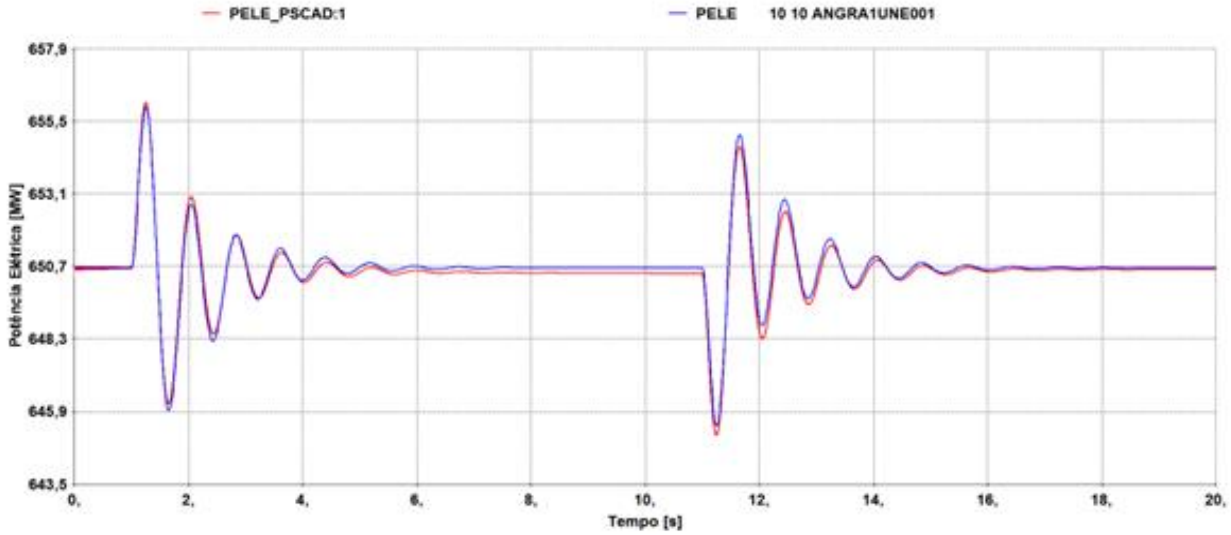

Figura 4-304 - Potência ativa

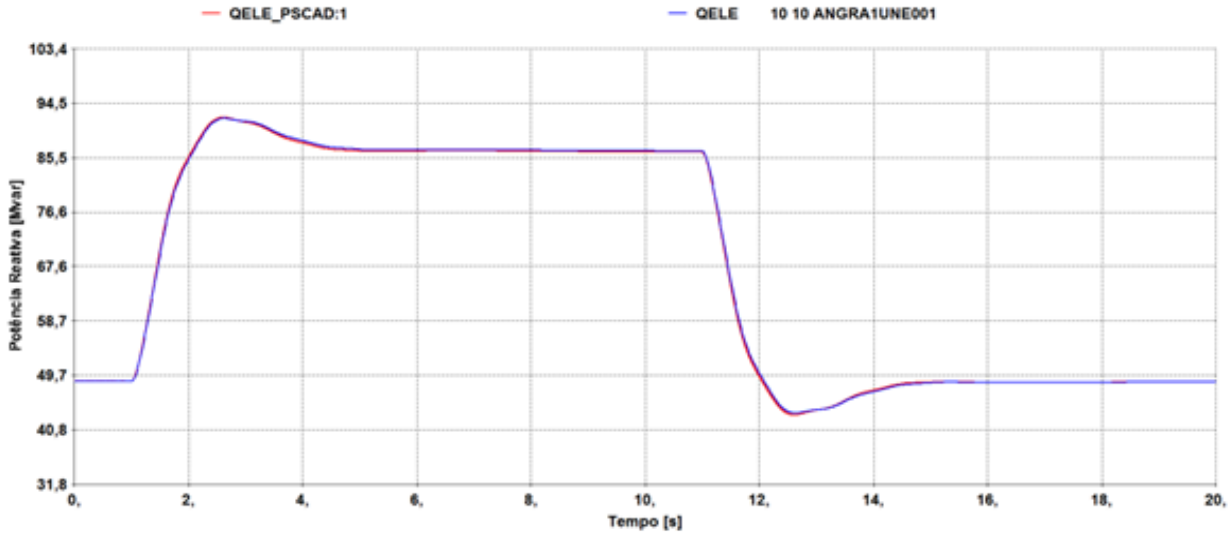

Figura 4-305 - Potência reativa

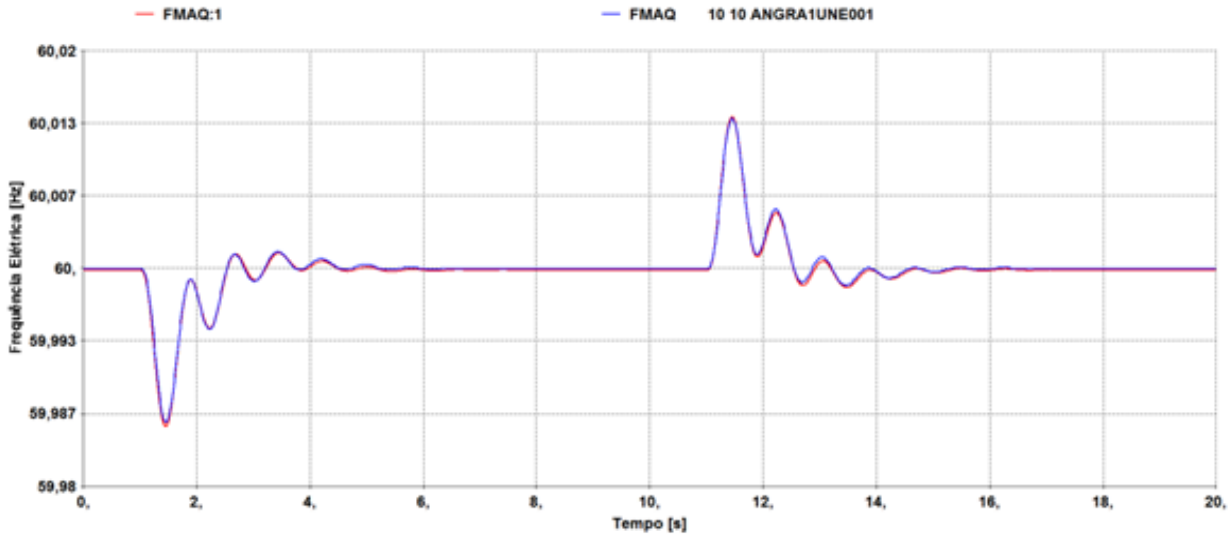

Figura 4-306 - Velocidade da máquina

4.12.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

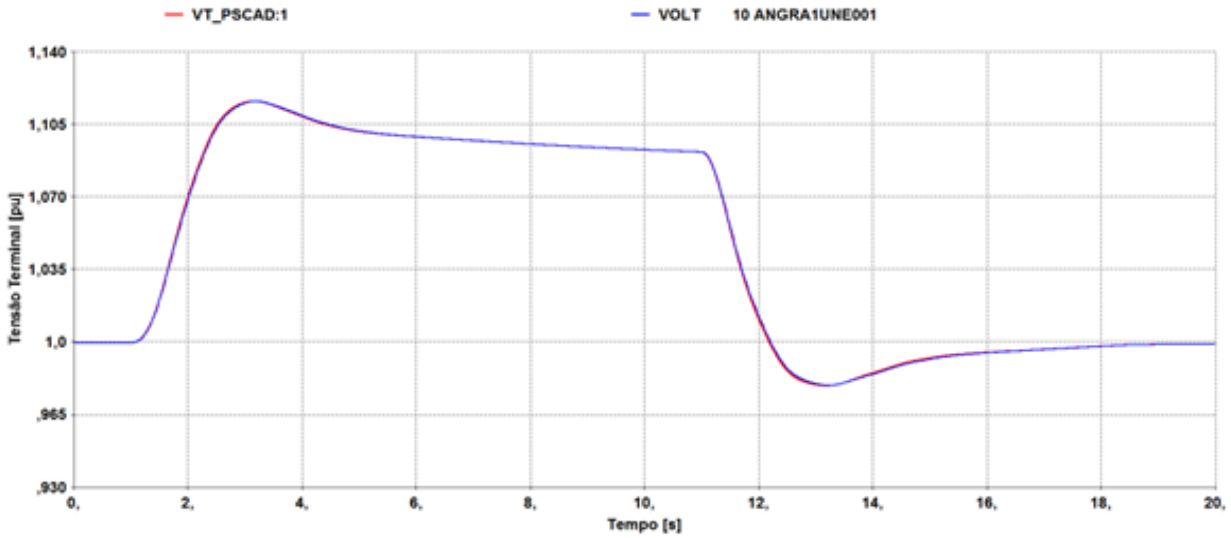

Figura 4-307 - Tensão terminal

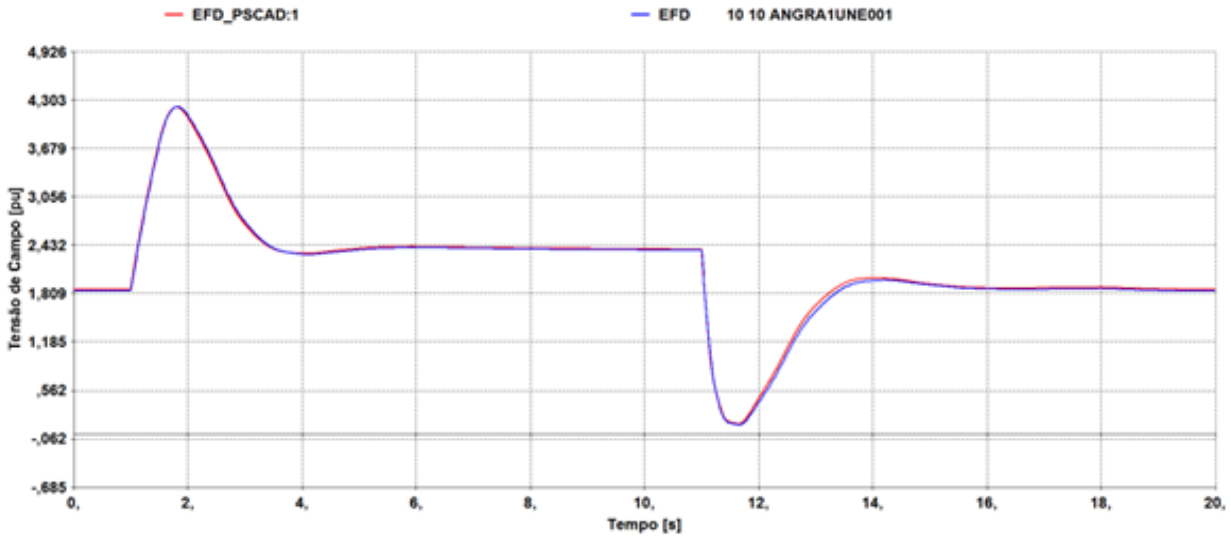

Figura 4-308 - Tensão de campo

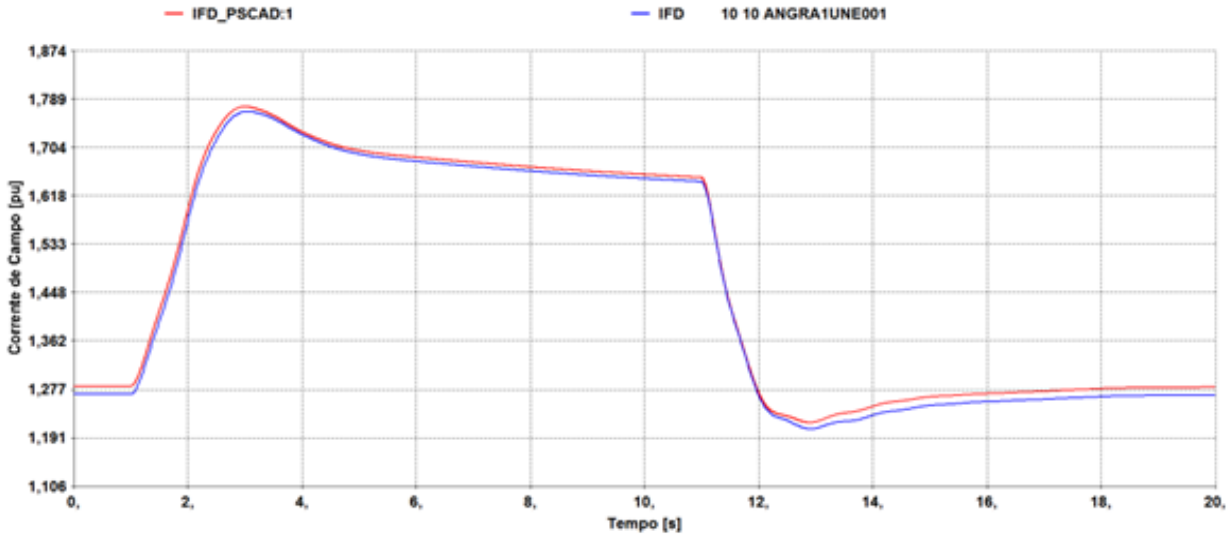

Figura 4-309 - Corrente de campo

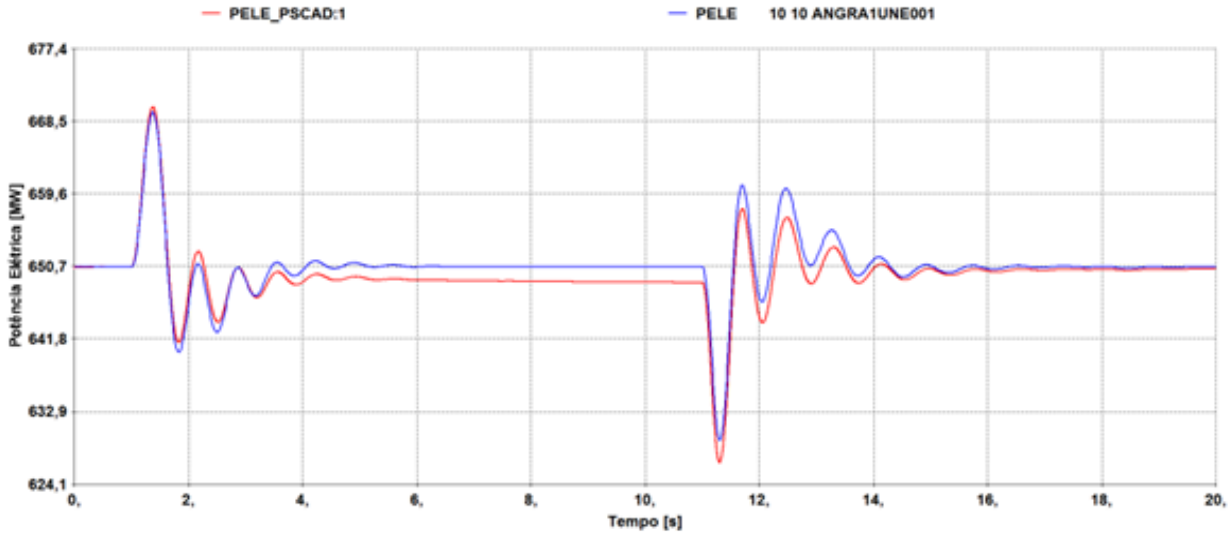

Figura 4-310 - Potência ativa

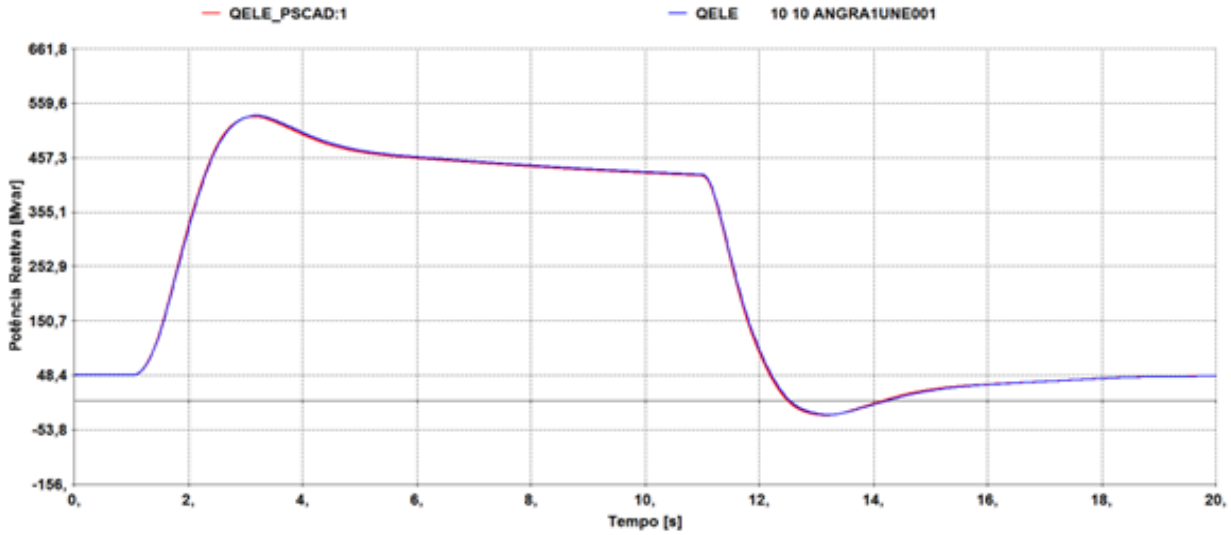

Figura 4-311 - Potência reativa

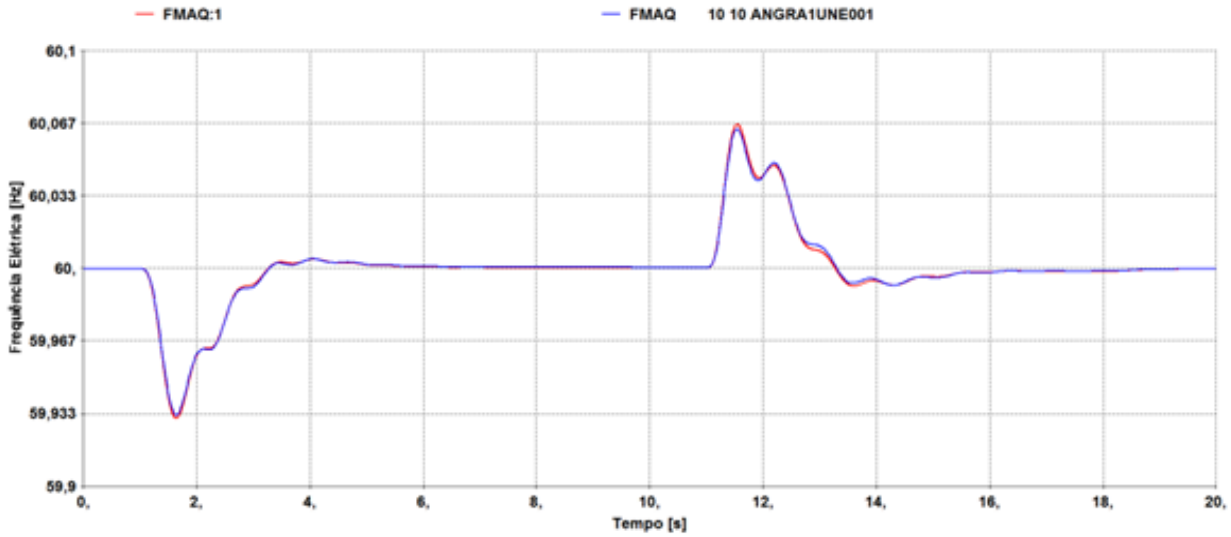

Figura 4-312 - Velocidade da máquina

4.13 UNE ANGRA II E III

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores das UNE Angra II e III, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.13.1 Modelo das UNE Angra II e III

A Tabela 4-37 apresenta os parâmetros das UNE Angra II e III disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-37 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	160	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	152	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	46,9	I(KA)	60,998	
x'q (%)	87,5	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	31,9	H(s)	4,51	
xl(%)	27	D(pu)	0	
T'd(s)	6,2	Ra(pu)	0	
T'q(s)	2	xp(pu)	0,27	Reatância de Potier
T''d(s)	0,054	xd(pu)	1,6	
T''q(s)	0,2	xd_(pu)	0,469	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	6,2	T'd
H(s)	4,51	xd__(pu)	0,319	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,054	T''d
S(MVA)	1458	Xq(pu)	1,52	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,875	x'q
		Tq0_(s)	2	T'q
		xq__(pu)	0,319	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,2	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.13.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-38, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação das UNE Angra II e III estão apresentados na Tabela 4-39. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-38, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-39. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-313.

Tabela 4-38 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UNE Angra II e III	
Ag	**Y1**	0,0201
Bg	**Y2**	8,5472
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-39 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,82	0,800
1,022	0,950
1,065	0,975
1,111	1,000
1,18	1,033
1,264	1,067
1,361	1,100
1,814	1,200
2,743	1,300

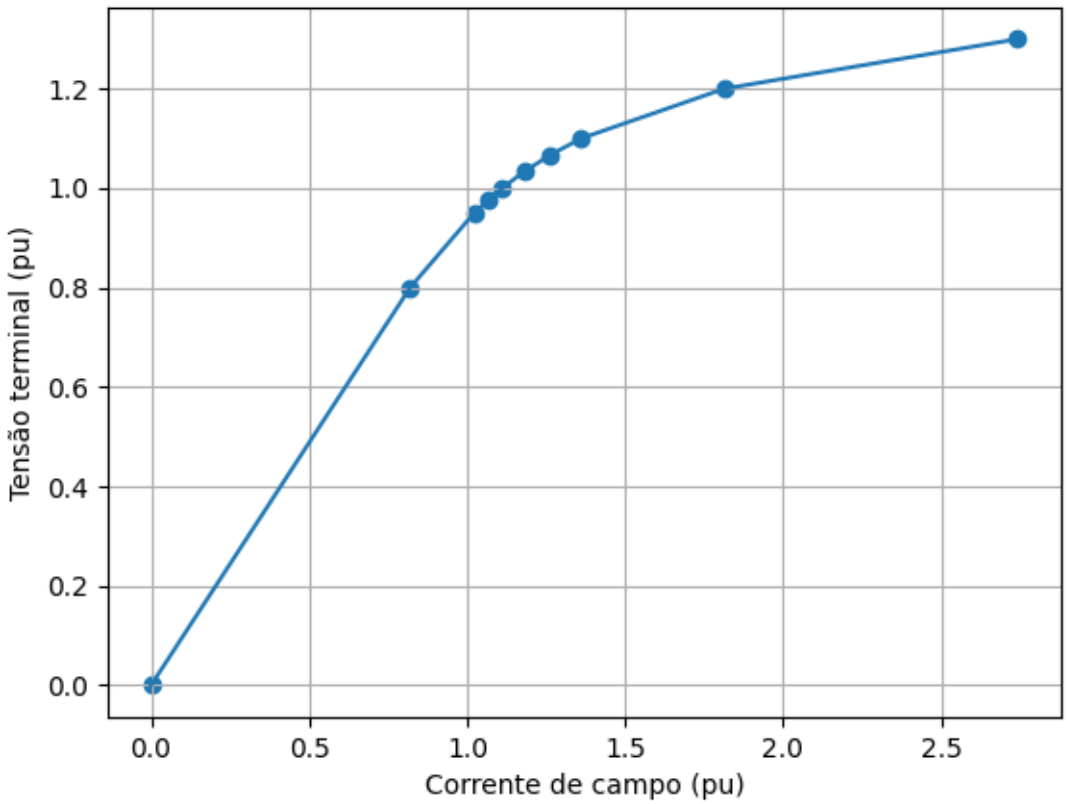

Figura 4-313 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.13.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.13.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.13.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.13.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

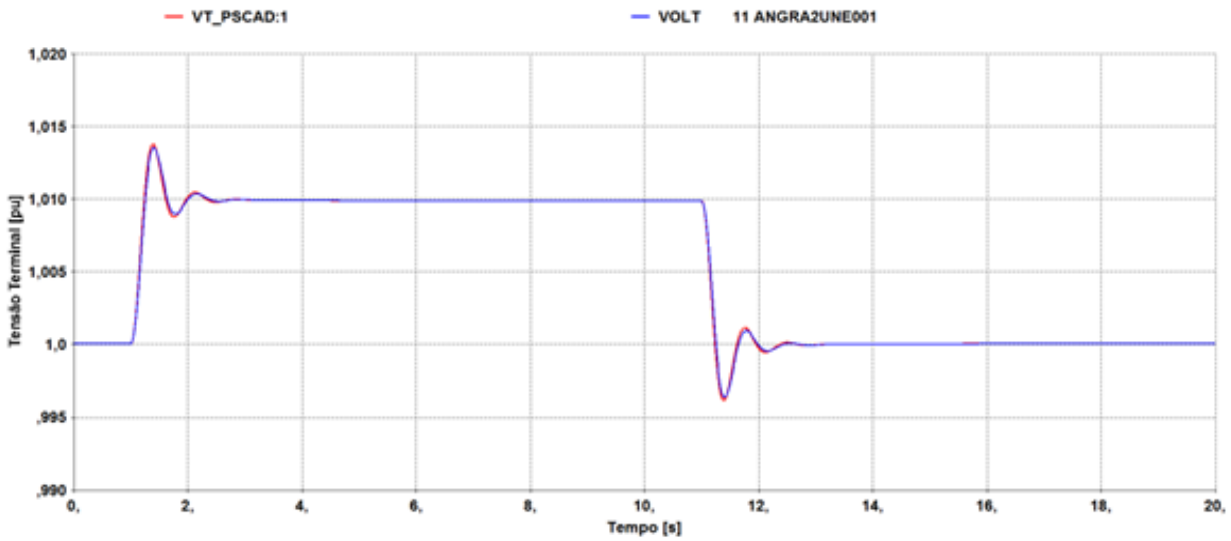

Figura 4-314 - Tensão terminal

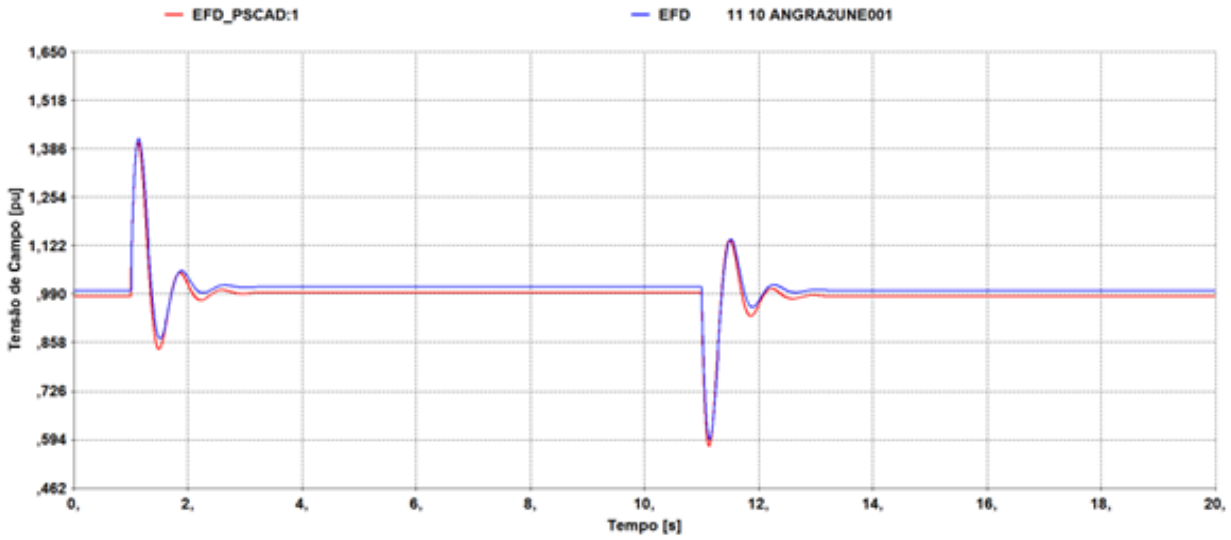

Figura 4-315 - Tensão de campo

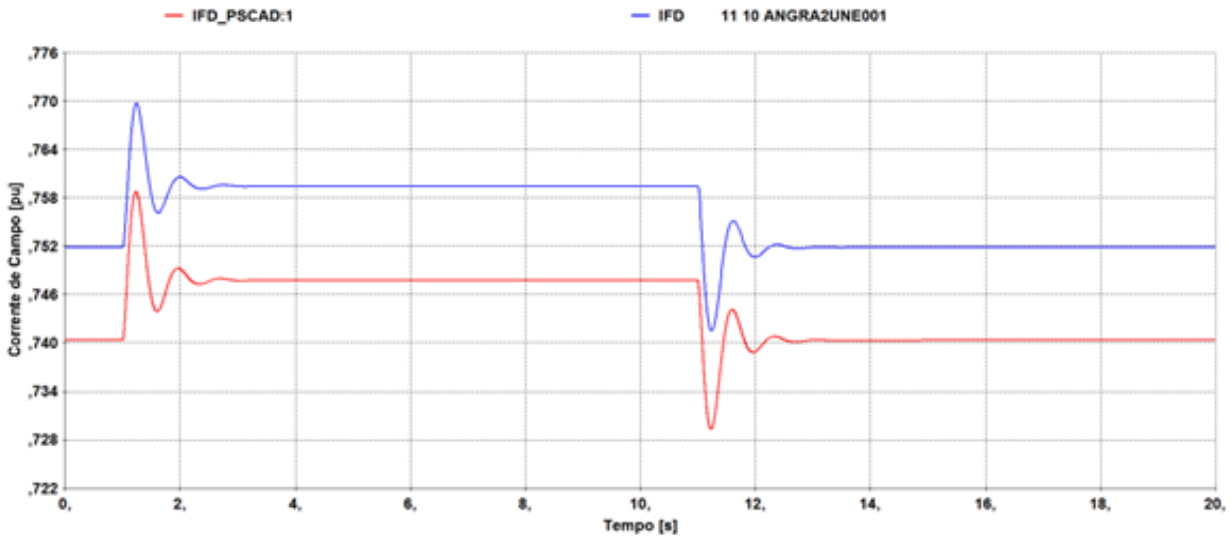

Figura 4-316 - Corrente de campo

4.13.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

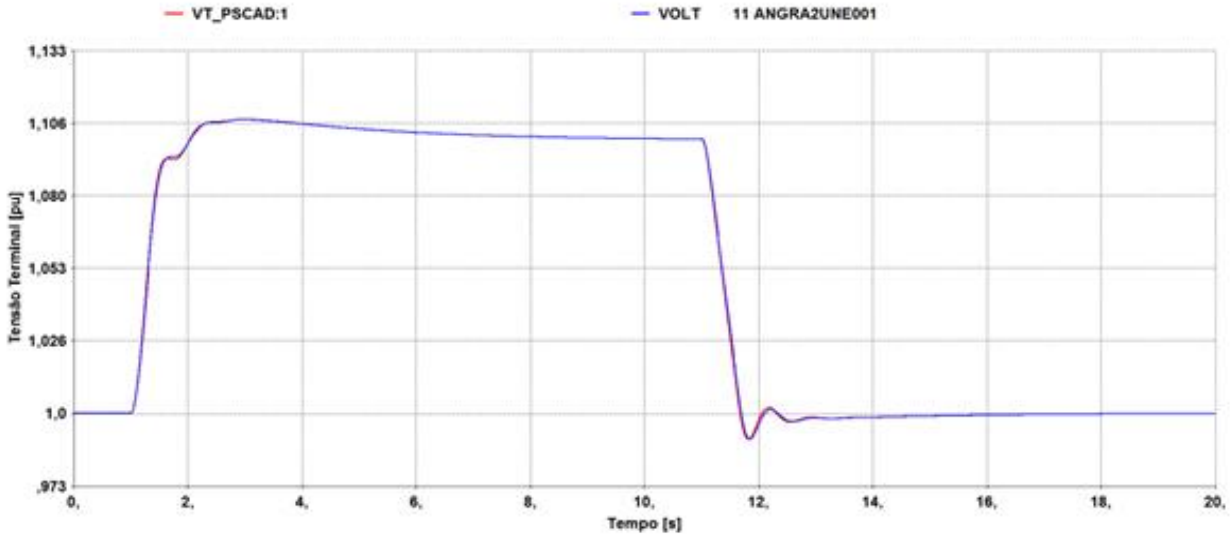

Figura 4-317 - Tensão terminal

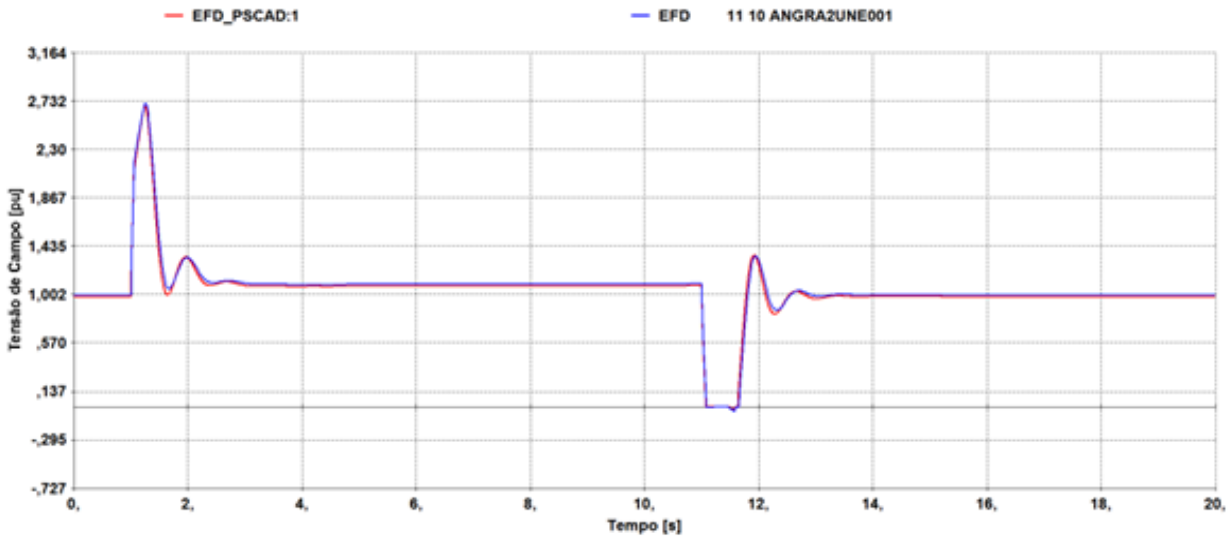

Figura 4-318 - Tensão de campo

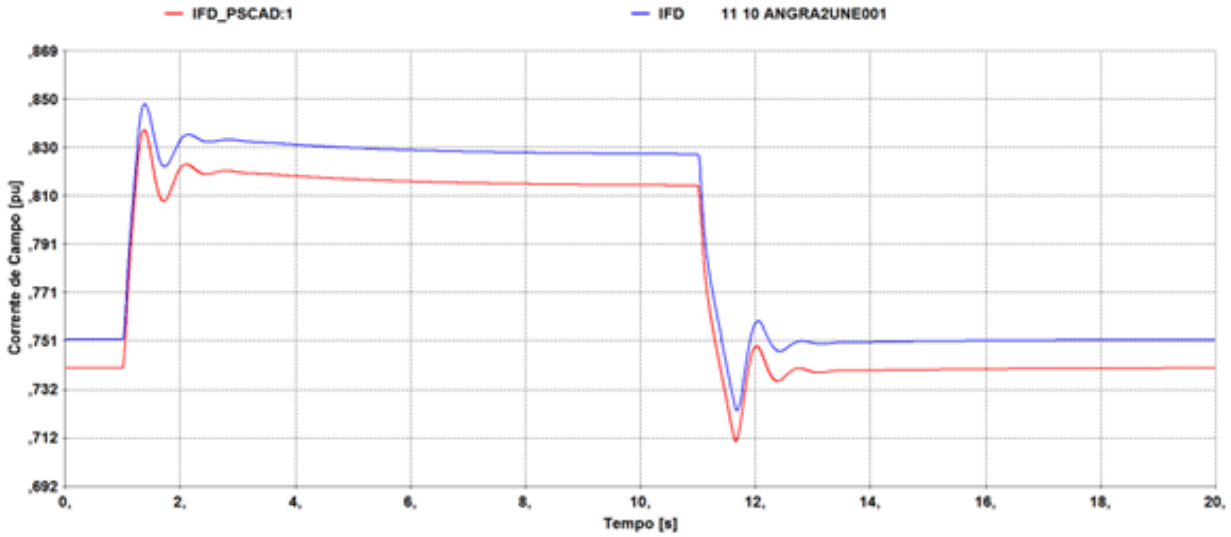

Figura 4-319 - Corrente de campo

4.13.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.13.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.13.4.2.

4.13.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

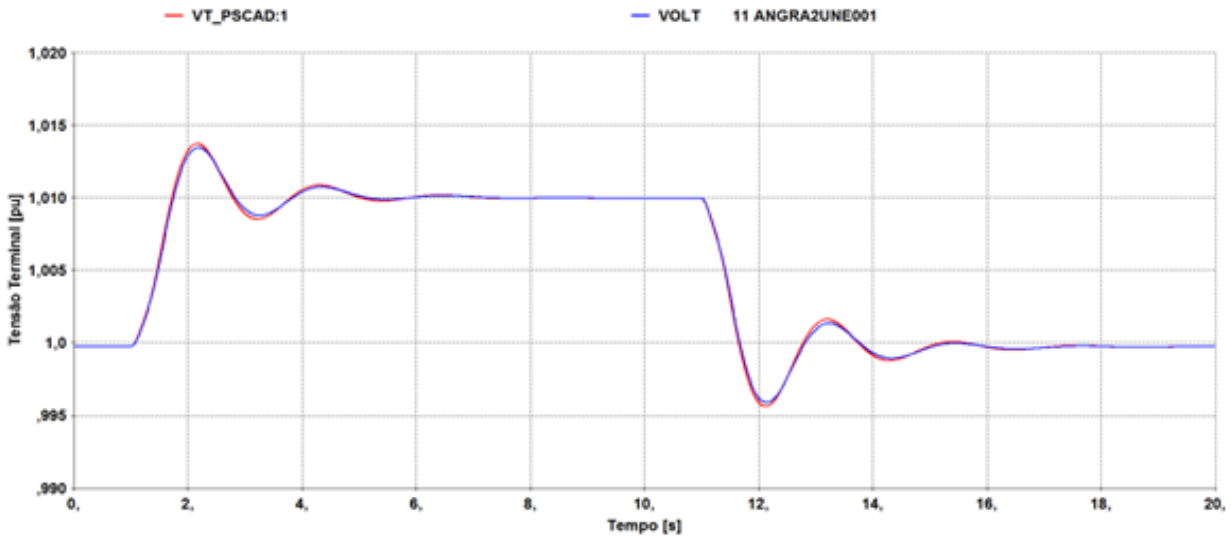

Figura 4-320 - Tensão terminal

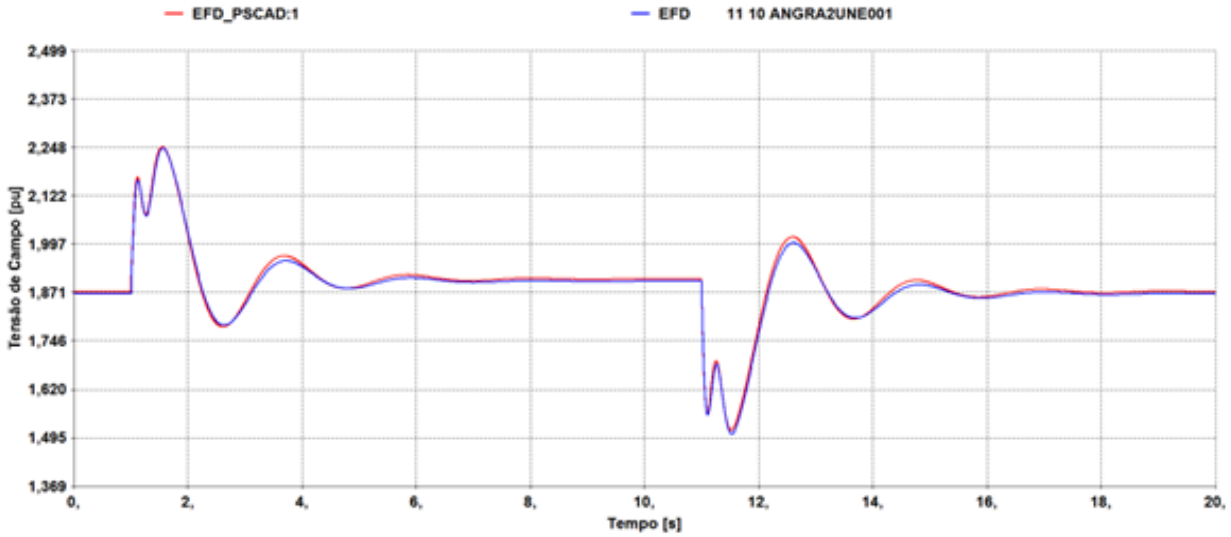

Figura 4-321 - Tensão de campo

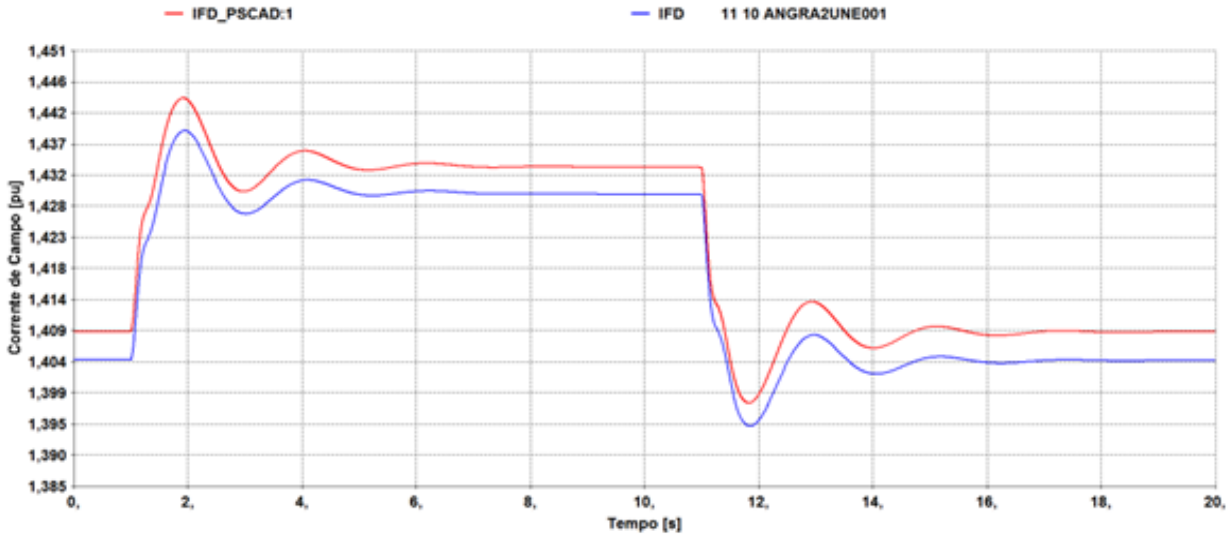

Figura 4-322 - Corrente de campo

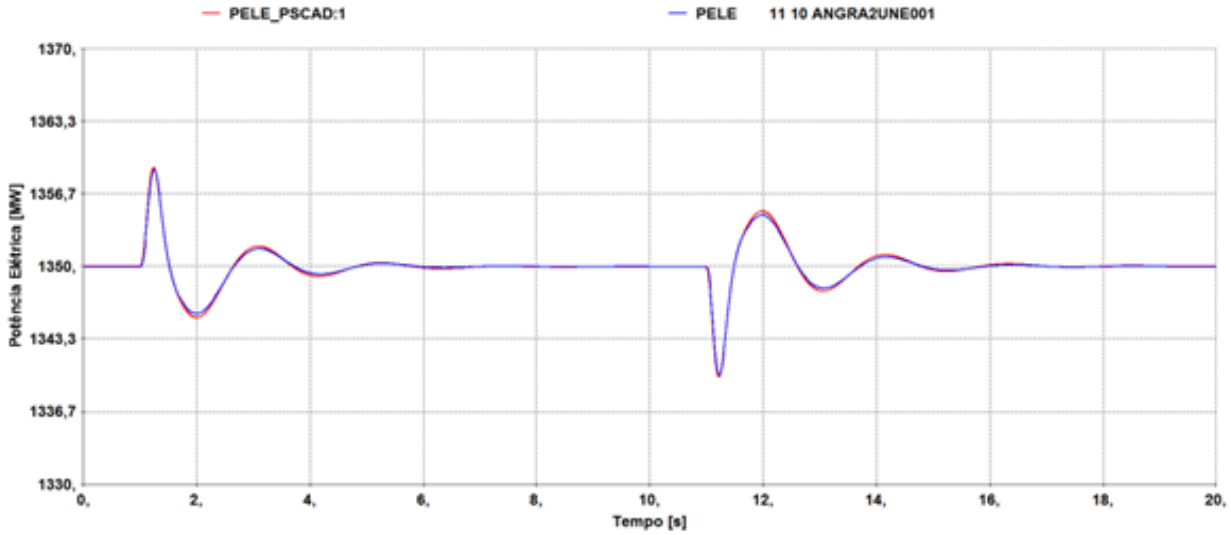

Figura 4-323 - Potência ativa

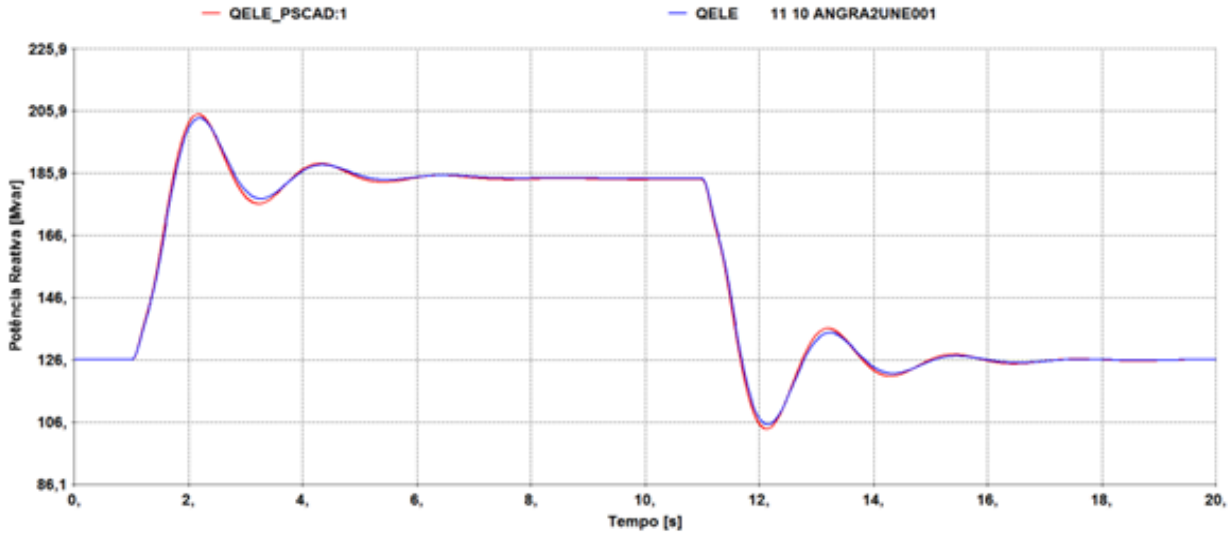

Figura 4-324 - Potência reativa

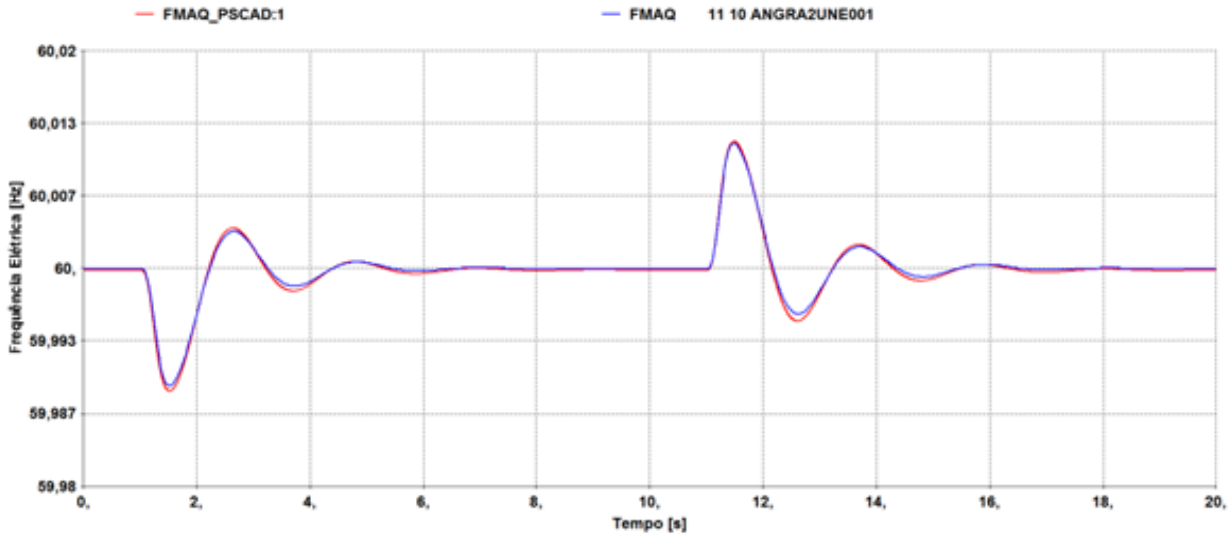

Figura 4-325 - Velocidade da máquina

4.13.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

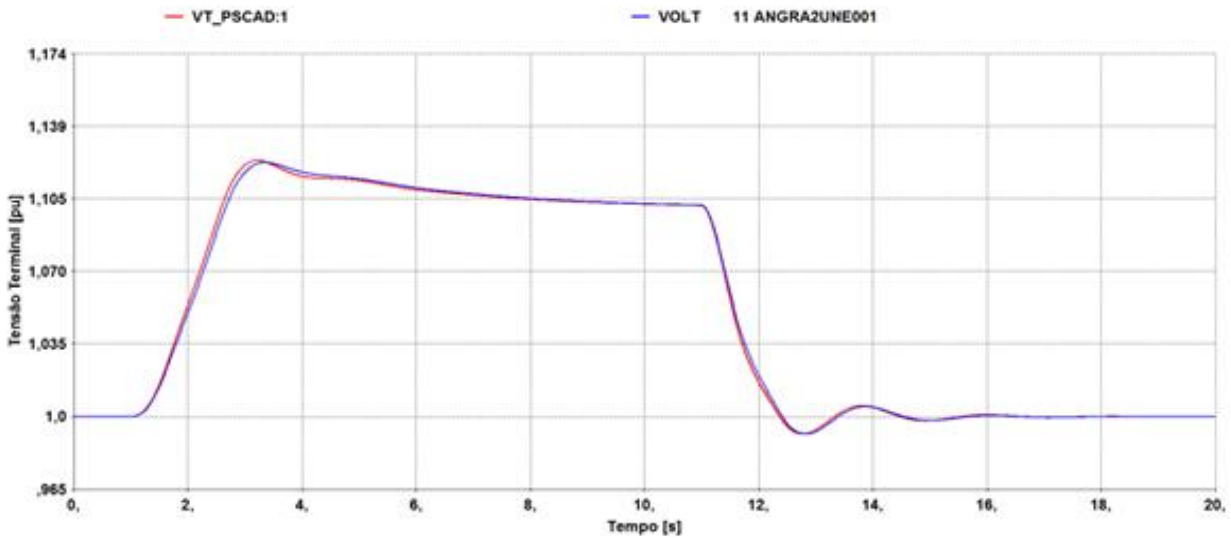

Figura 4-326 - Tensão terminal

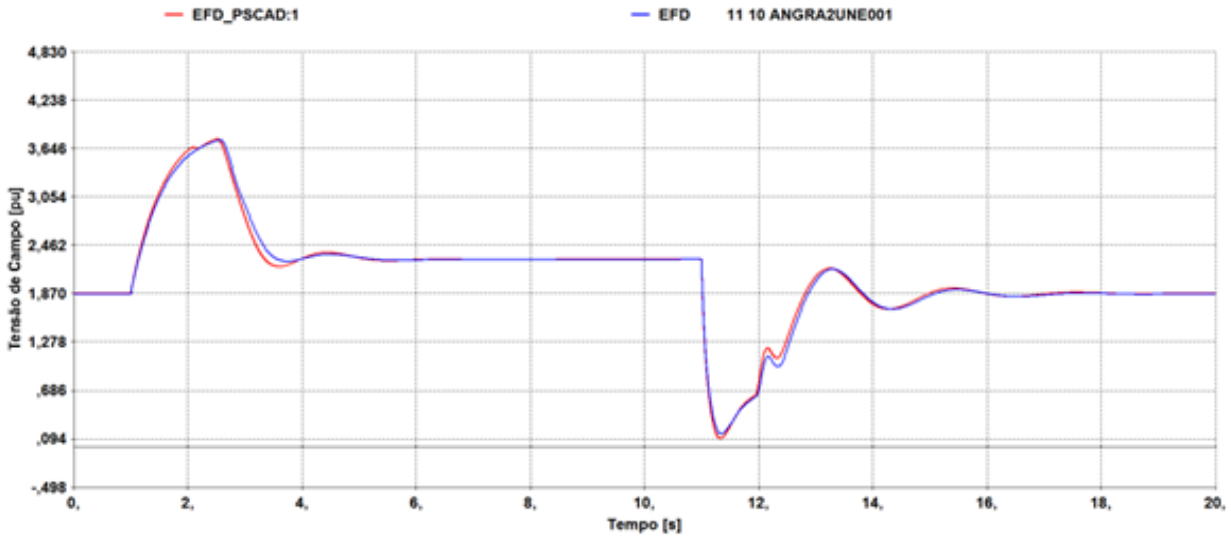

Figura 4-327 - Tensão de campo

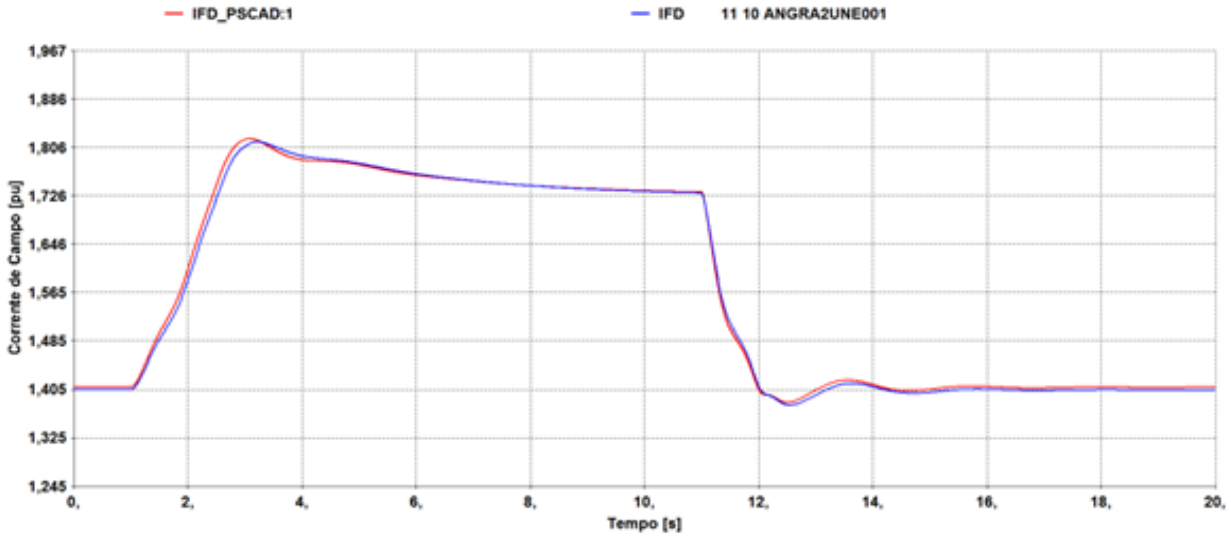

Figura 4-328 - Corrente de campo

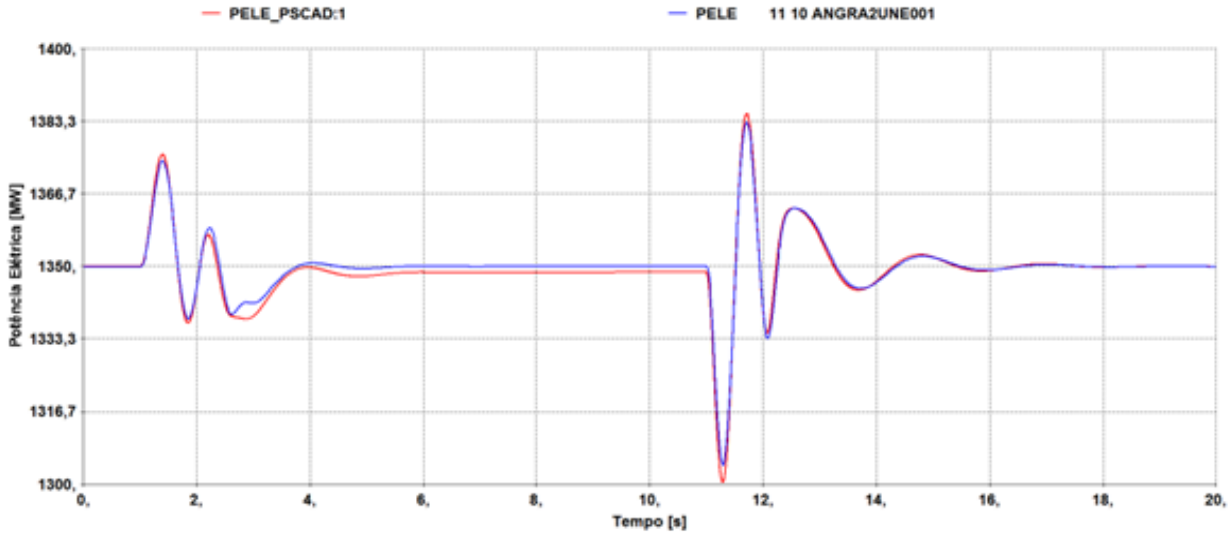

Figura 4-329 - Potência ativa

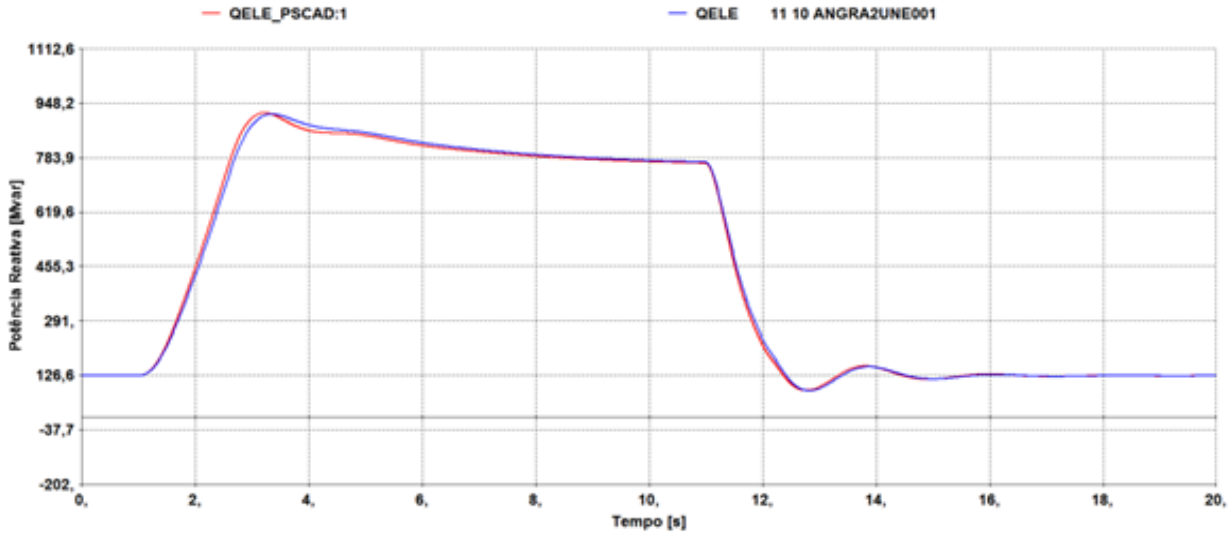

Figura 4-330 - Potência reativa

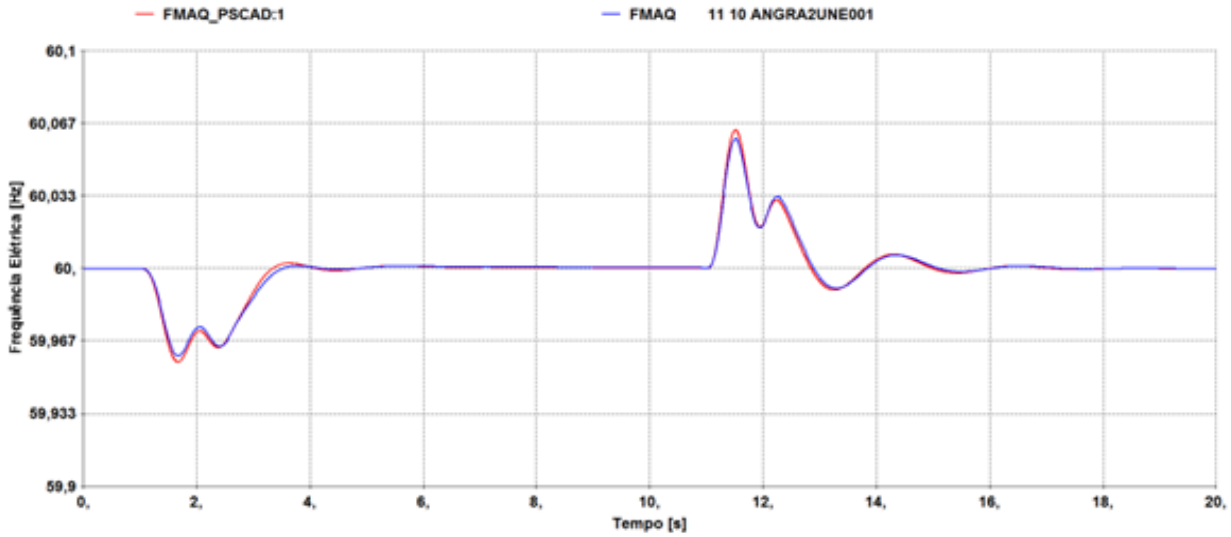

Figura 4-331 - Velocidade da máquina

4.14 UHE LUIZ CARLOS BARRETO

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Luiz Carlos Barreto, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.14.1 Modelo da UHE Luiz Carlos Barreto

A Tabela 4-40 apresenta os parâmetros da UHE Luiz Carlos Barreto disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-40 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	93,59	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	59	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	24	I(KA)	7,698	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	21,5	H(s)	4,3	
xl(%)	18,5	D(pu)	0	
T'd(s)	5,6	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,185	Reatância de Potier
T''d(s)	0,02	xd(pu)	0,936	
T''q(s)	0,05	xd_(pu)	0,24	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	5,6	T'd
H(s)	4,3	xd__(pu)	0,215	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,02	T''d
S(MVA)	184	Xq(pu)	0,59	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,215	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,05	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.14.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-41, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Luiz Carlos Barreto estão apresentados na Tabela 4-42. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-41, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-42. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-332

Tabela 4-41 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Luiz Carlos Barreto	
Ag	**Y1**	0,017
Bg	**Y2**	8,7
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-42 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,817	0,800
1,013	0,950
1,053	0,975
1,097	1,000
1,162	1,033
1,24	1,067
1,331	1,100
1,752	1,200
2,617	1,300

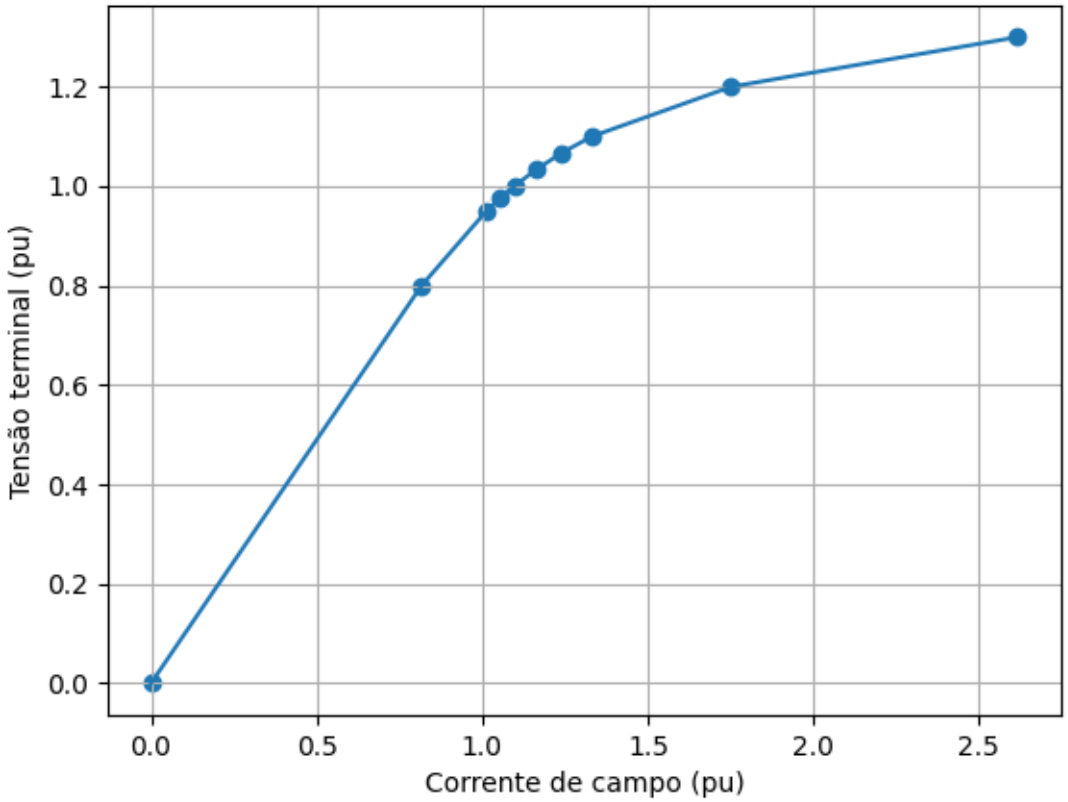

Figura 4-332 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.14.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.14.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.14.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.14.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

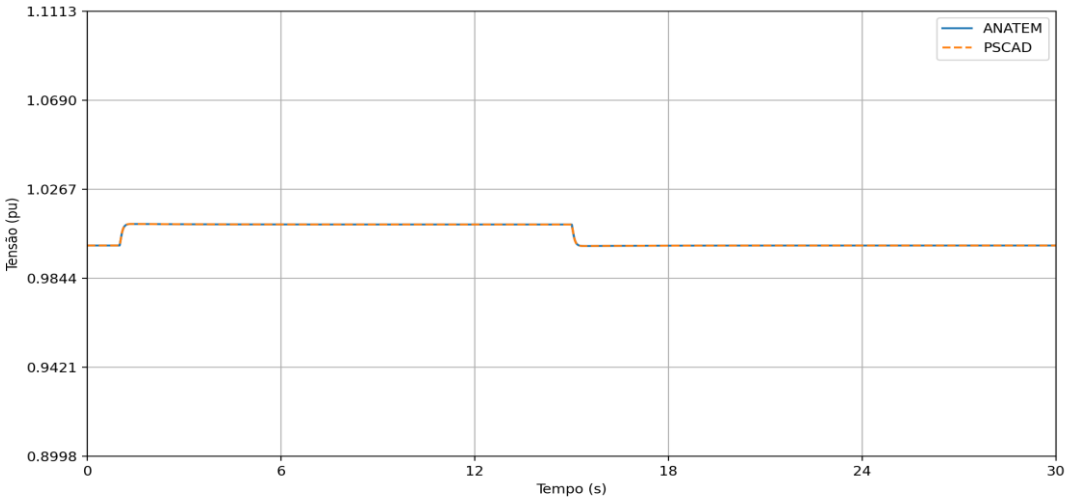

Figura 4-333 - Tensão terminal

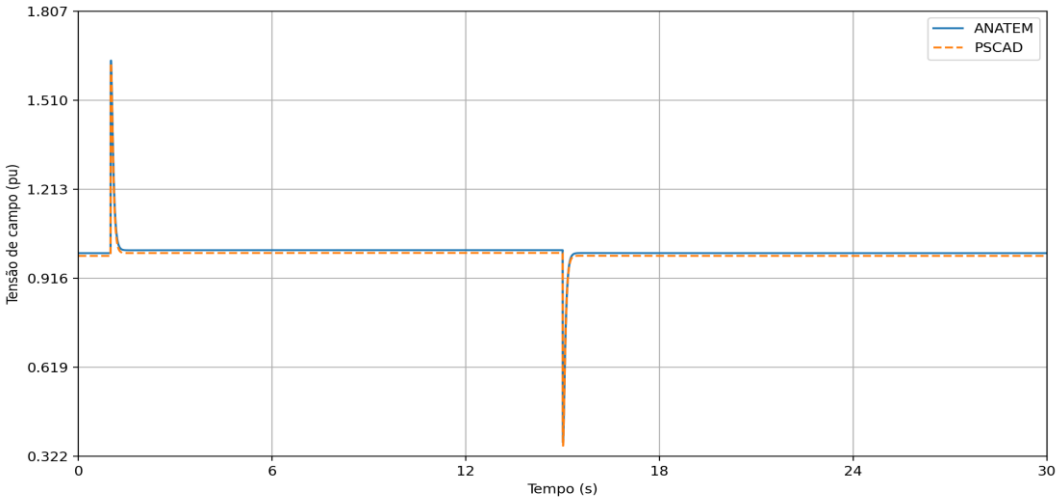

Figura 4-334 - Tensão de campo

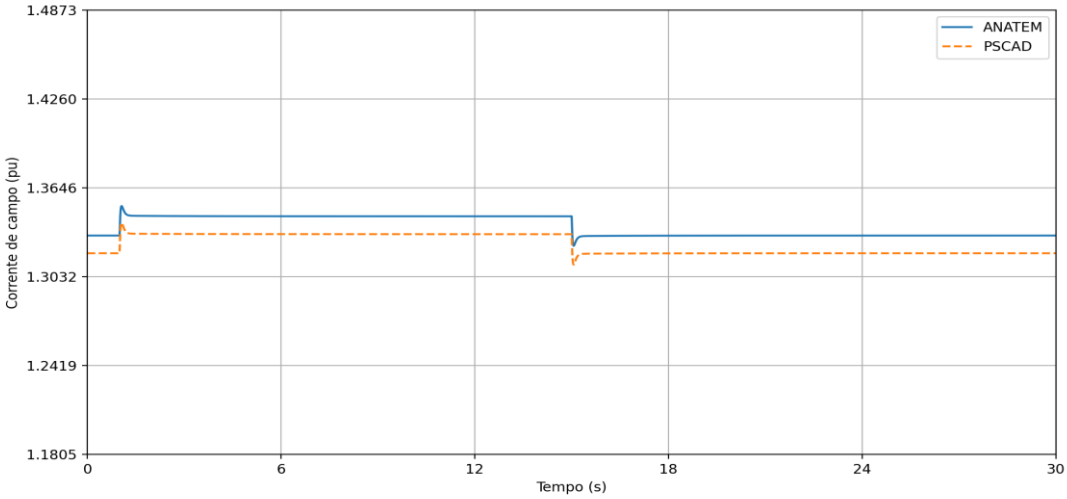

Figura 4-335 - Corrente de campo

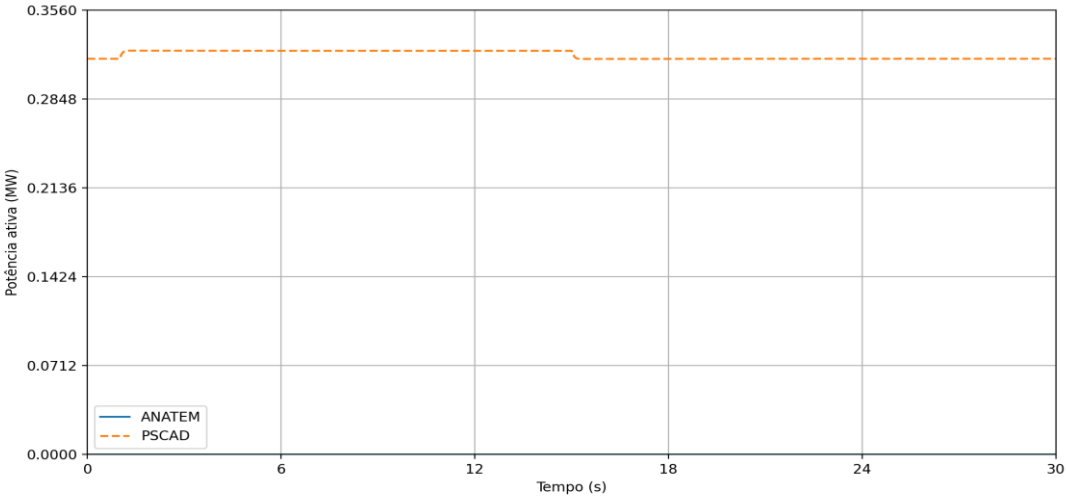

Figura 4-336 - Potência ativa

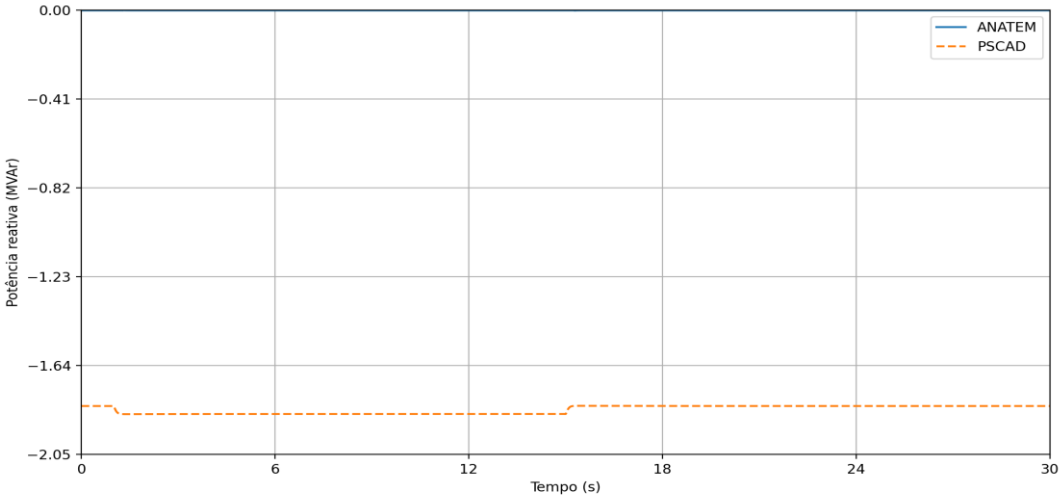

Figura 4-337 - Potência reativa

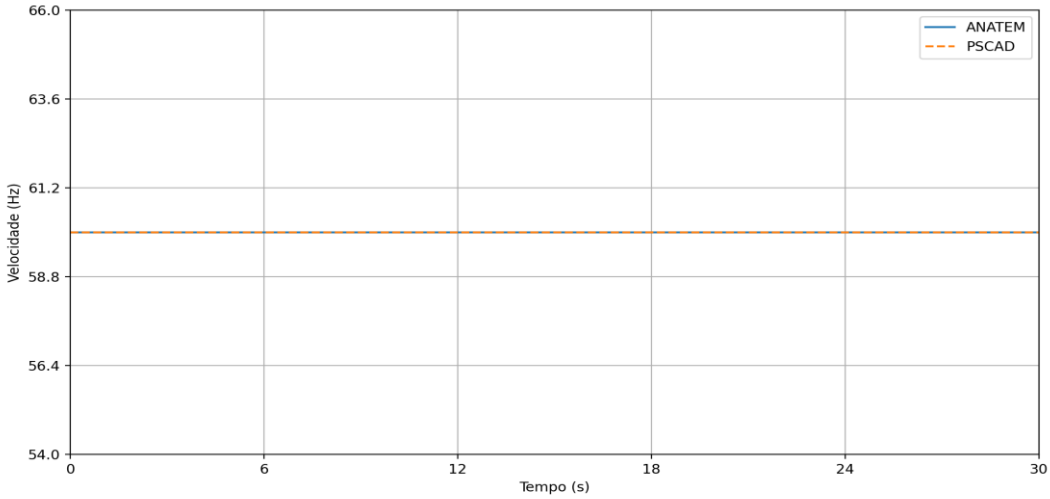

Figura 4-338 - Velocidade da máquina

4.14.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

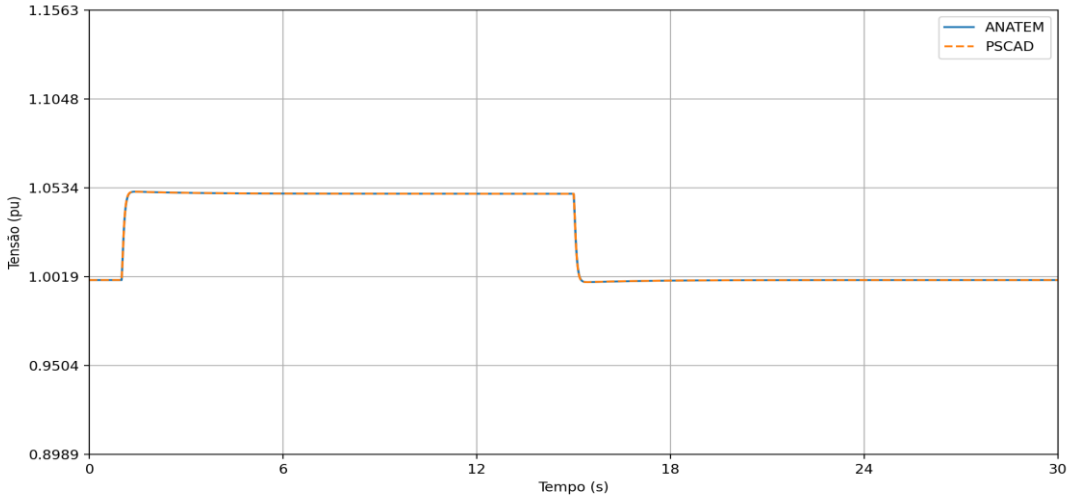

Figura 4-339 - Tensão terminal

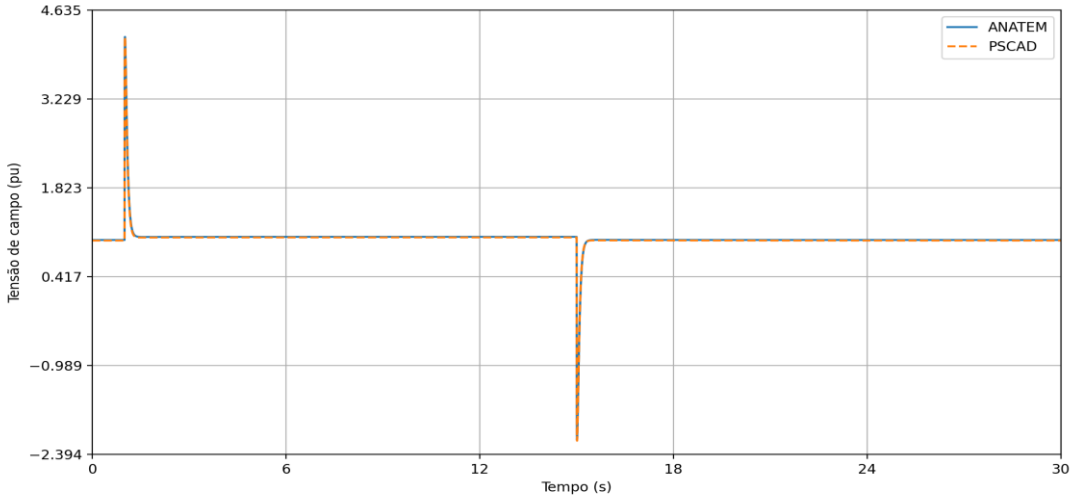

Figura 4-340 - Tensão de campo

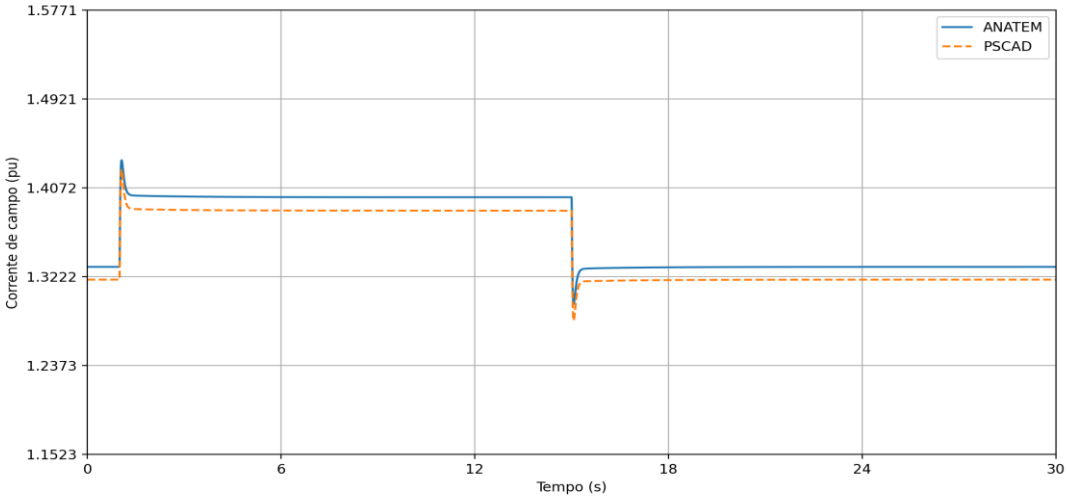

Figura 4-341 - Corrente de campo

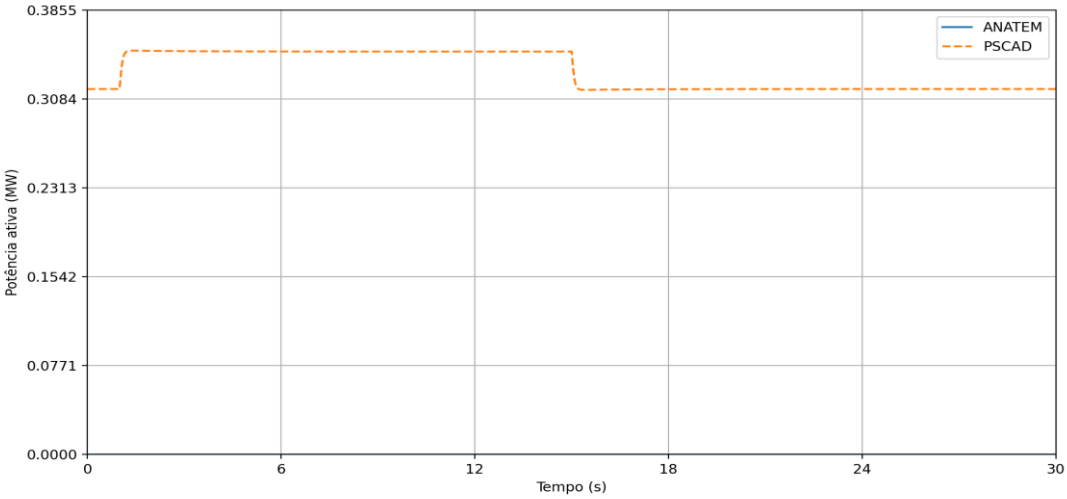

Figura 4-342 - Potência ativa

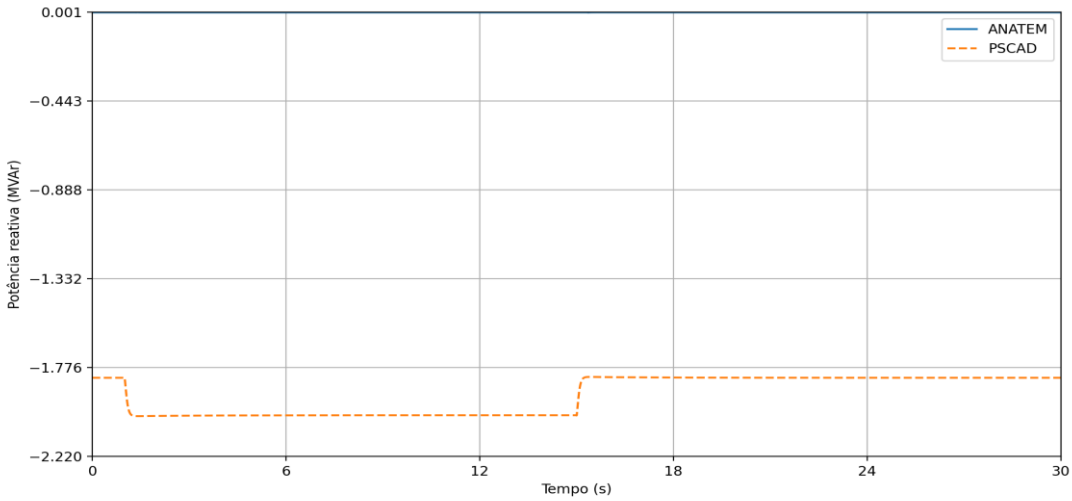

Figura 4-343 - Potência reativa

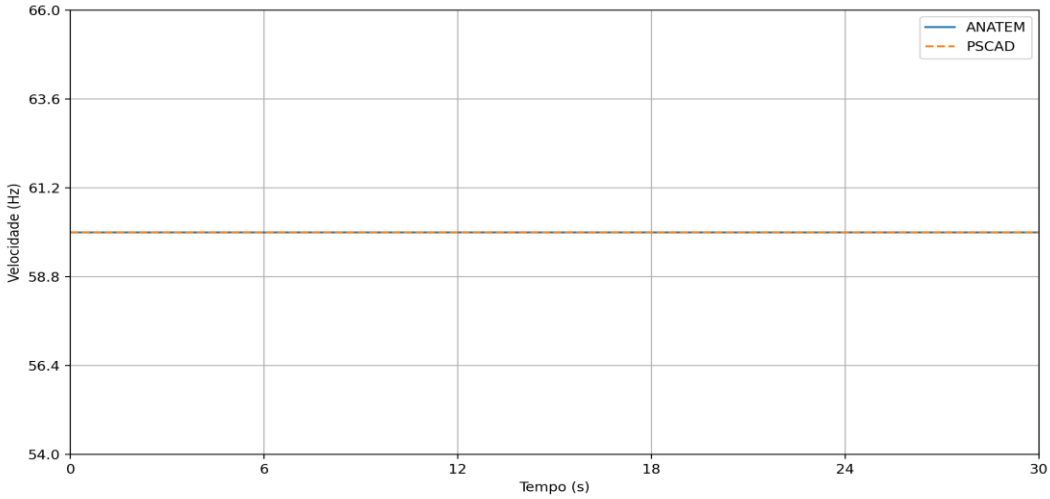

Figura 4-344 - Velocidade da máquina

4.14.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.14.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.14.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.14.4.3.

4.14.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

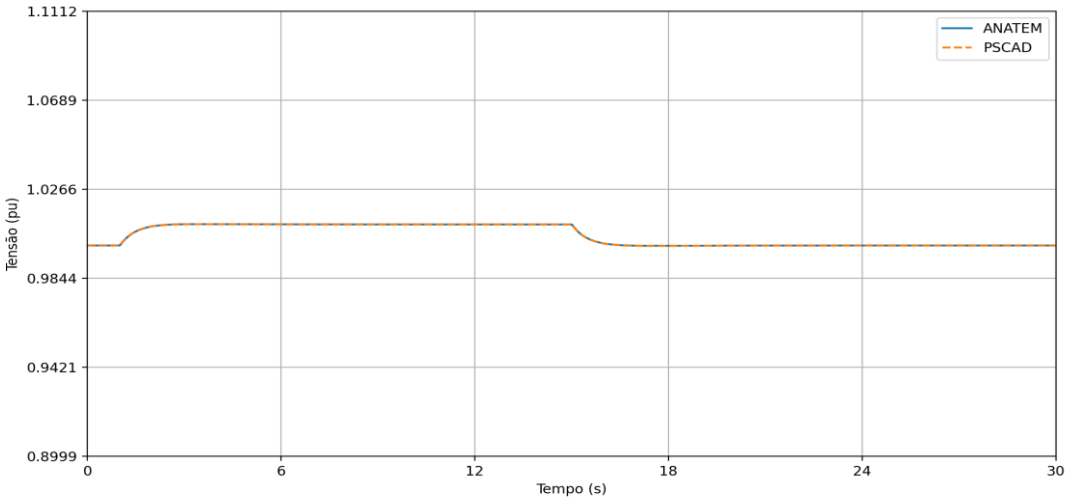

Figura 4-345 - Tensão terminal

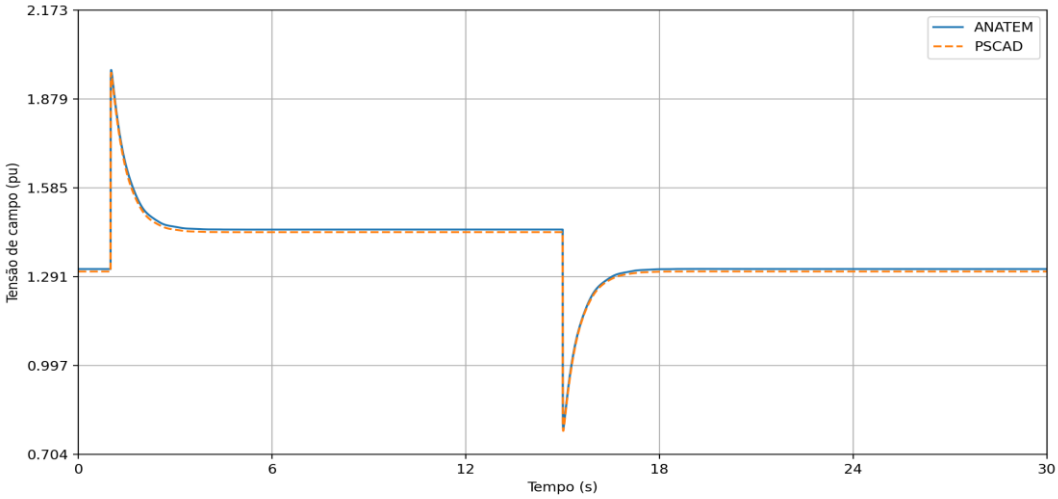

Figura 4-346 - Tensão de campo

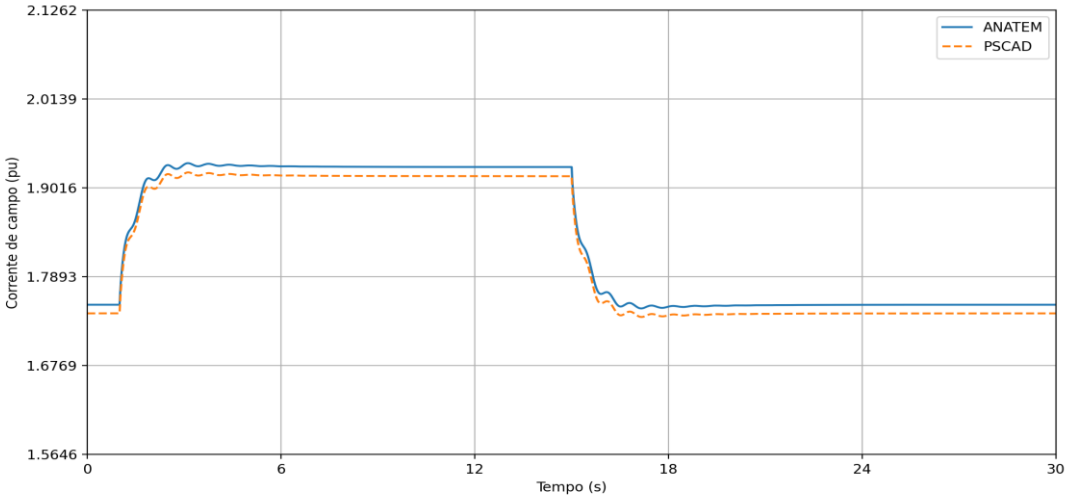

Figura 4-347 - Corrente de campo

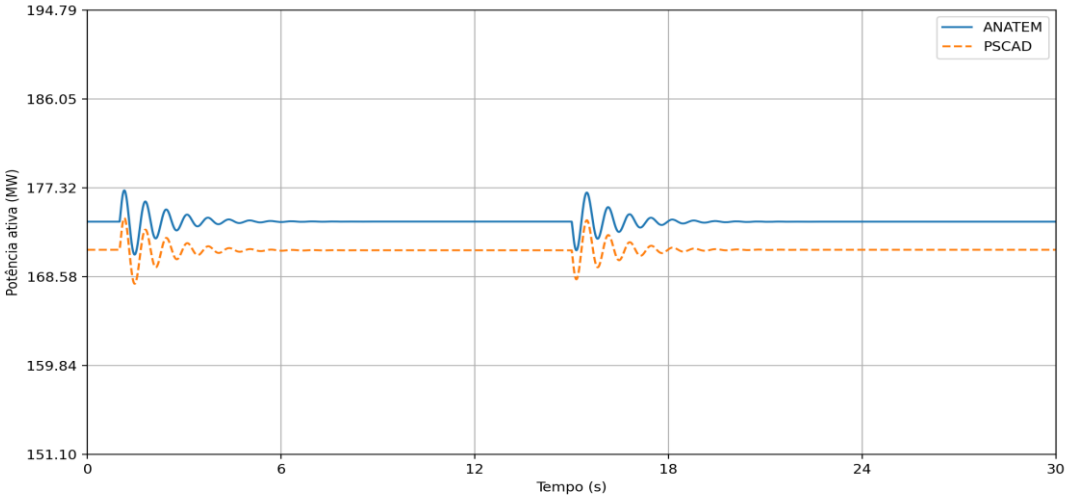

Figura 4-348 - Potência ativa

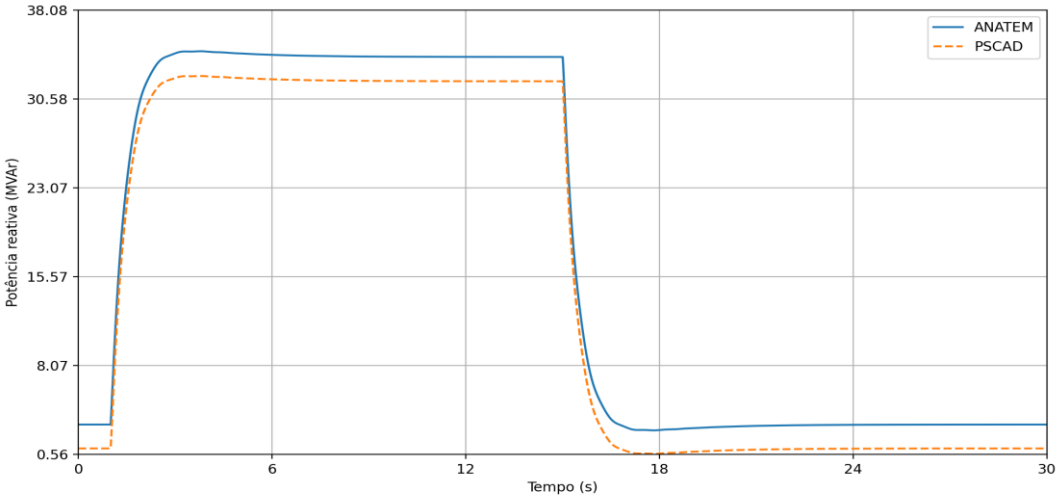

Figura 4-349 - Potência reativa

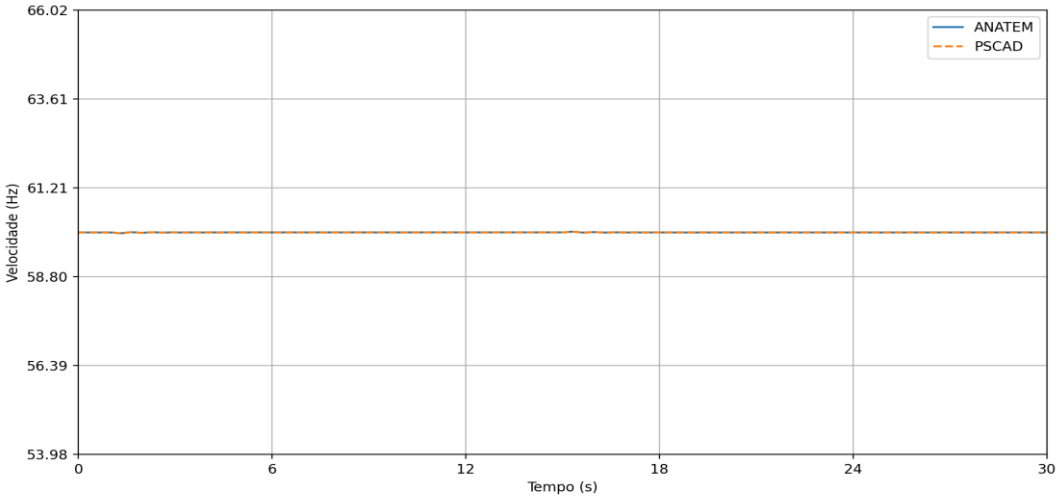

Figura 4-350 - Velocidade da máquina

4.14.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

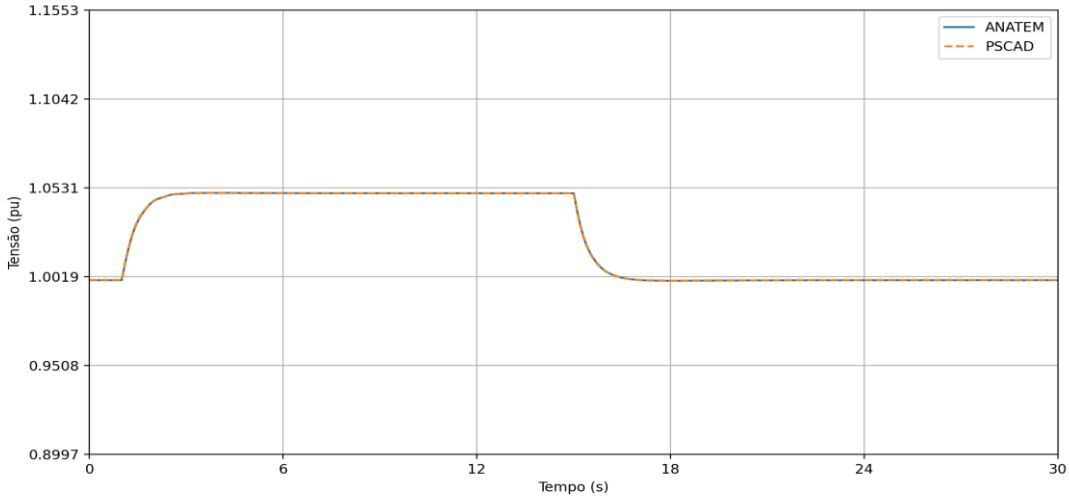

Figura 4-351 - Tensão terminal

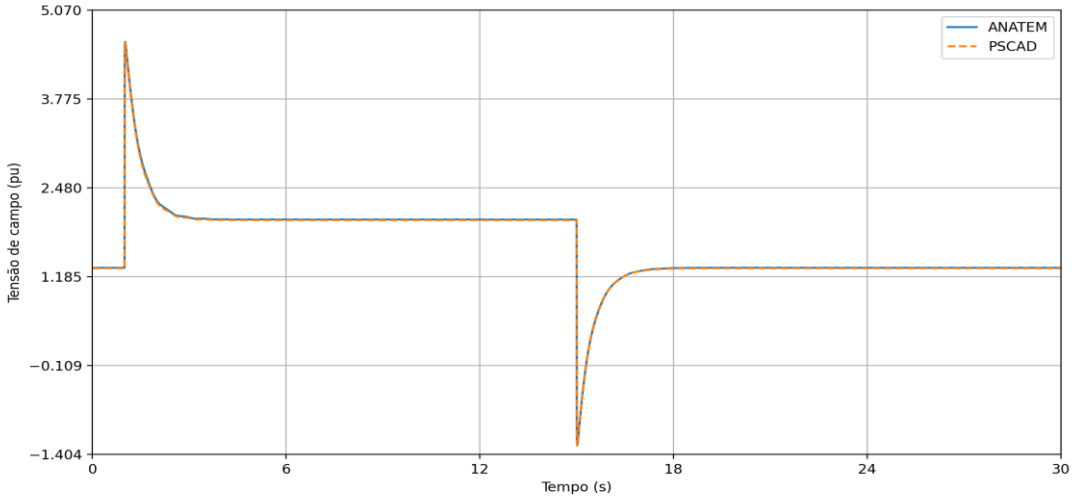

Figura 4-352 - Tensão de campo

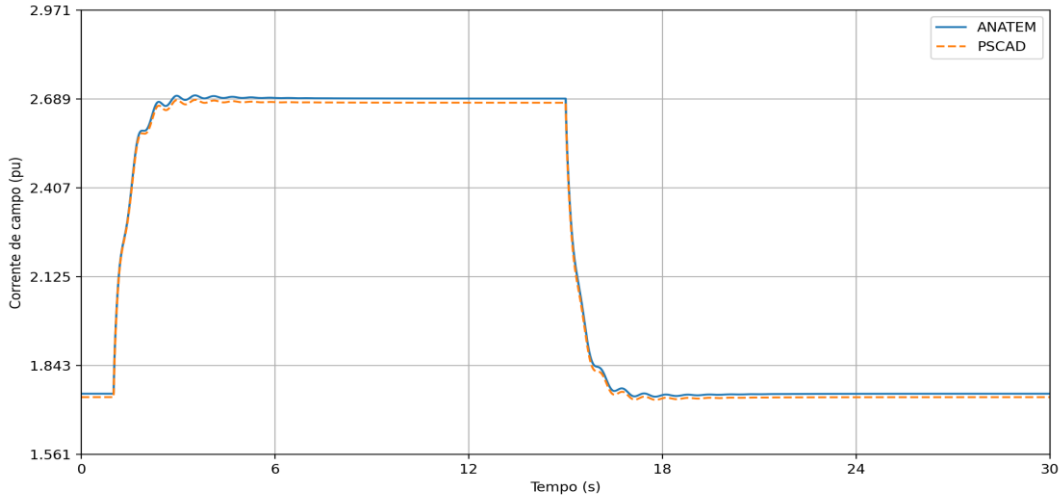

Figura 4-353 - Corrente de campo

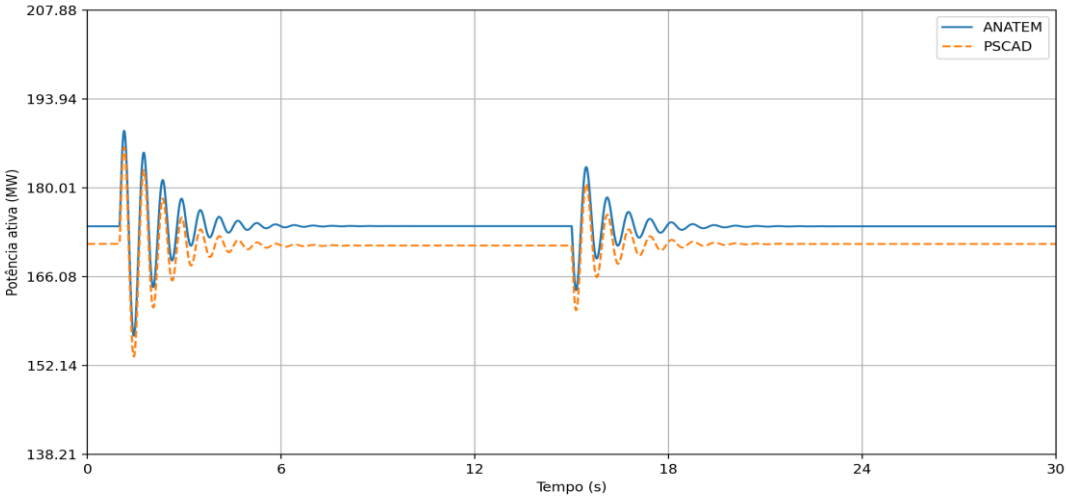

Figura 4-354 - Potência ativa

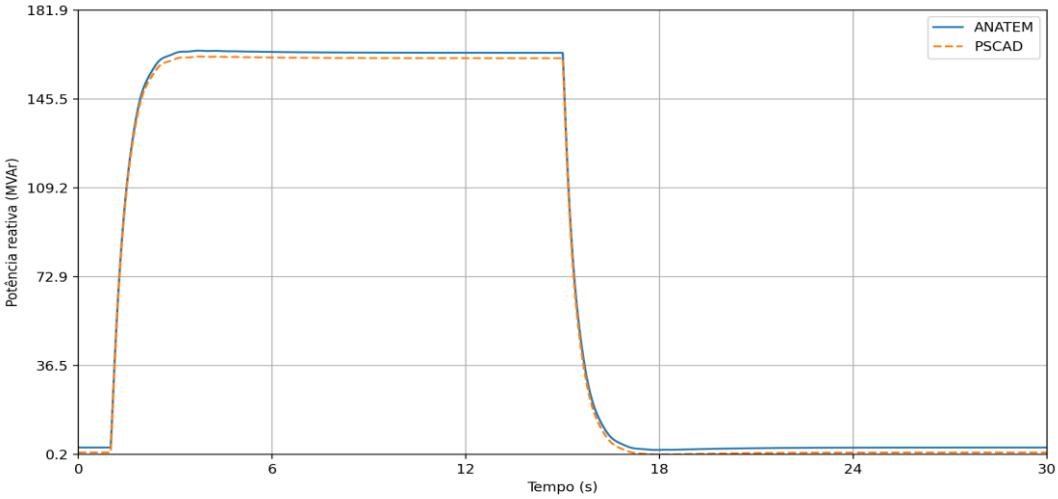

Figura 4-355 - Potência reativa

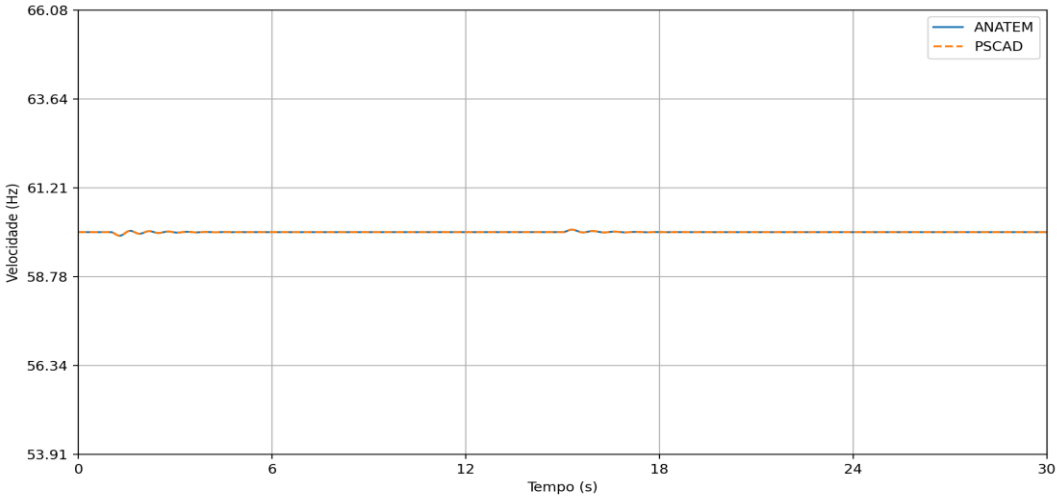

Figura 4-356 - Velocidade da máquina

4.14.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

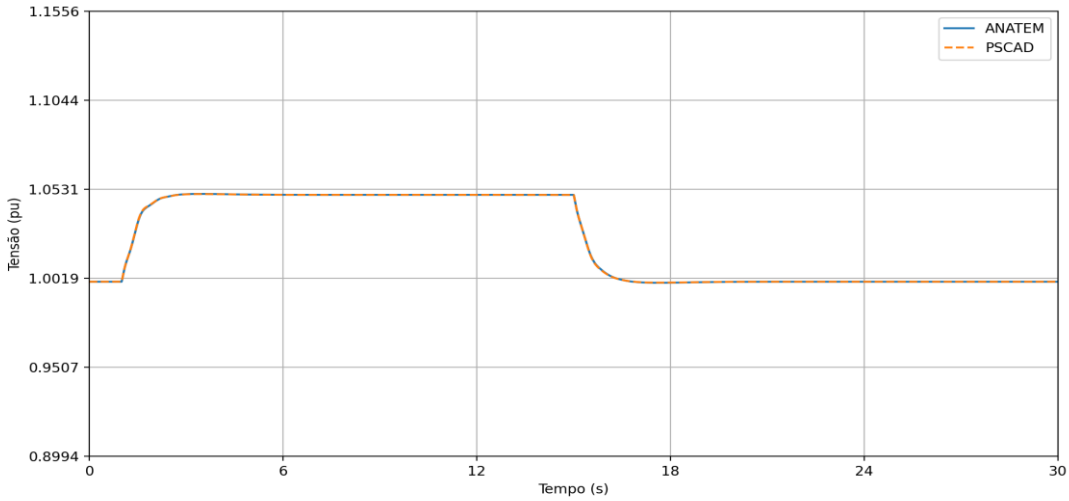

Figura 4-357 - Tensão terminal

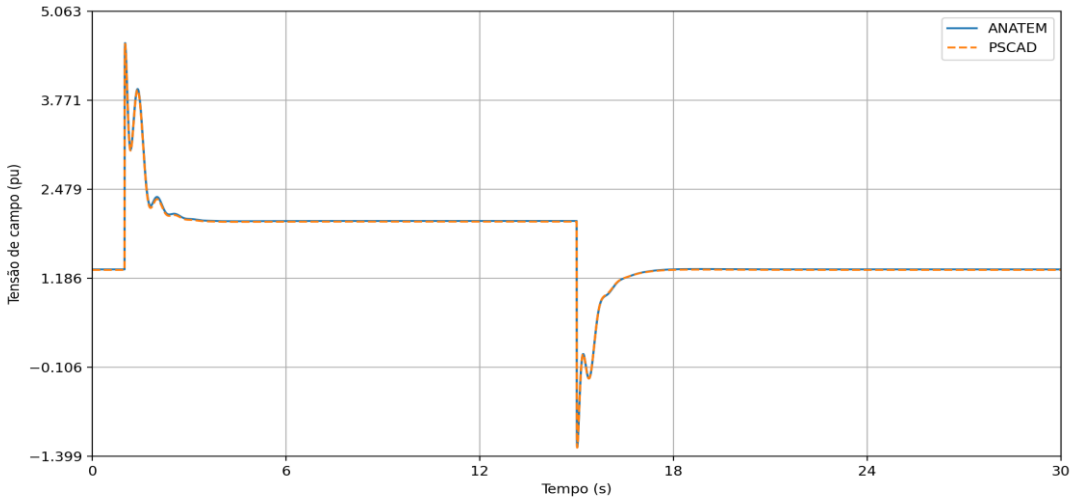

Figura 4-358 - Tensão de campo

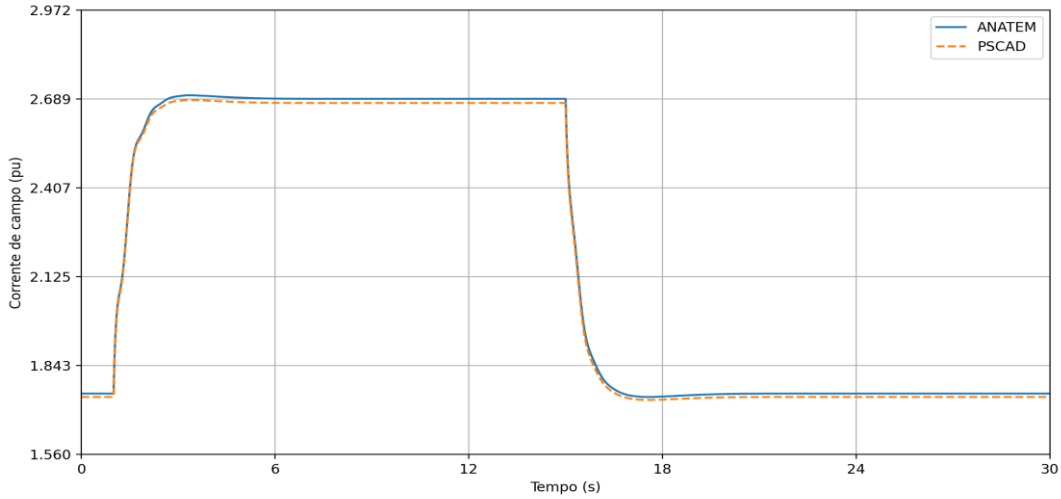

Figura 4-359 - Corrente de campo

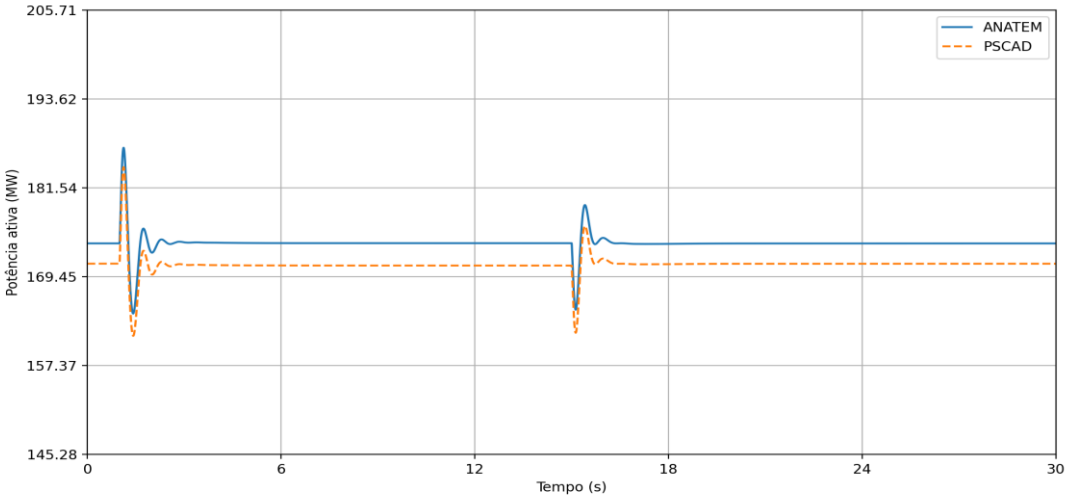

Figura 4-360 - Potência ativa

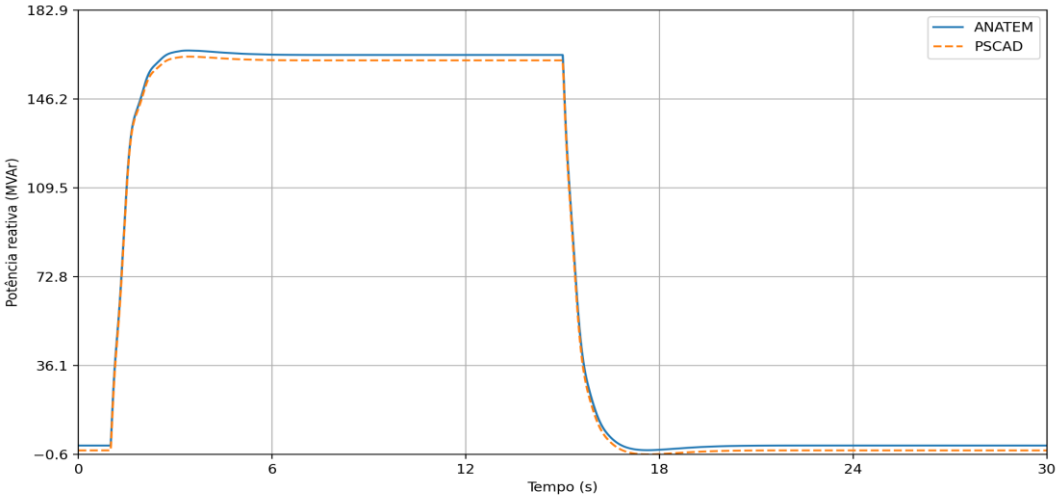

Figura 4-361 - Potência reativa

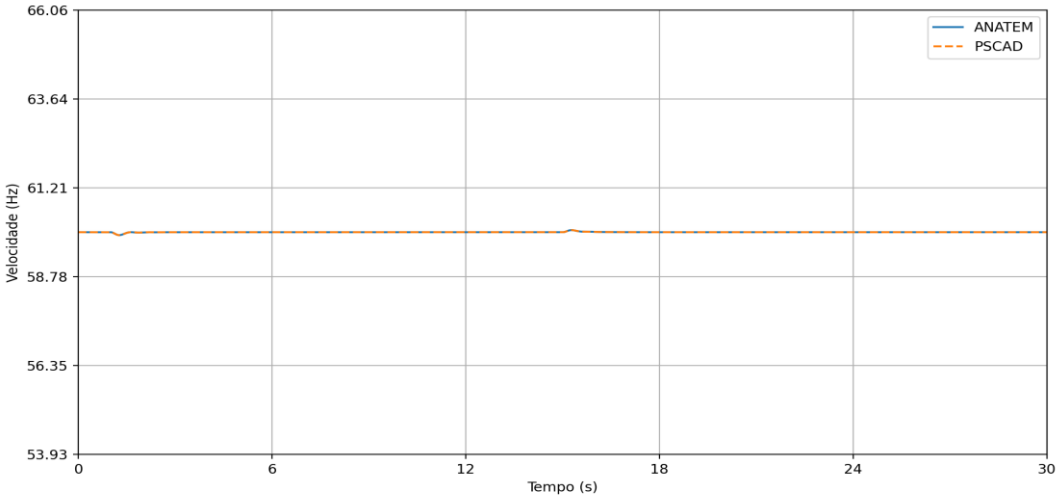

Figura 4-362 - Velocidade da máquina

4.15 UHE FURNAS

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Furnas, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.15.1 Modelo da UHE Furnas

A Tabela 4-43 apresenta os parâmetros da UHE Furnas disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-43 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	76,3	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	56	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	29	I(KA)	6,694	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	20,5	H(s)	5	
xl(%)	12	D(pu)	0	
T'd(s)	5	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,12	Reatância de Potier
T''d(s)	0,085	xd(pu)	0,763	
T''q(s)	0,285	xd_(pu)	0,29	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	5	T'd
H(s)	5	xd__(pu)	0,205	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,085	T''d
S(MVA)	160	Xq(pu)	0,56	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,205	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,285	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.15.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-44, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Furnas estão apresentados na Tabela 4-45. A

partir dos parâmetros da Tabela 4-44, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-45. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-363

Tabela 4-44 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Furnas	
Ag	**Y1**	0,0177
Bg	**Y2**	7,6795
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-45 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,818	0,800
1,006	0,950
1,043	0,975
1,082	1,000
1,139	1,033
1,205	1,067
1,277	1,100
1,582	1,200
2,123	1,300

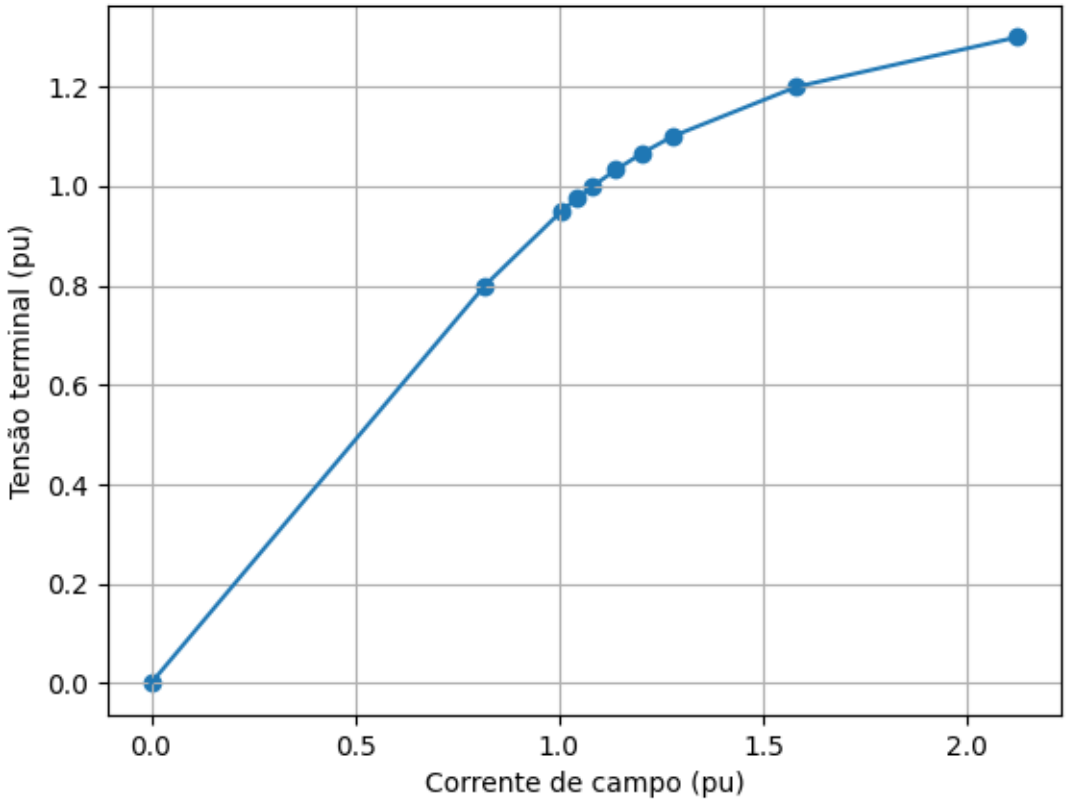

Figura 4-363 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.15.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.15.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.15.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.15.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

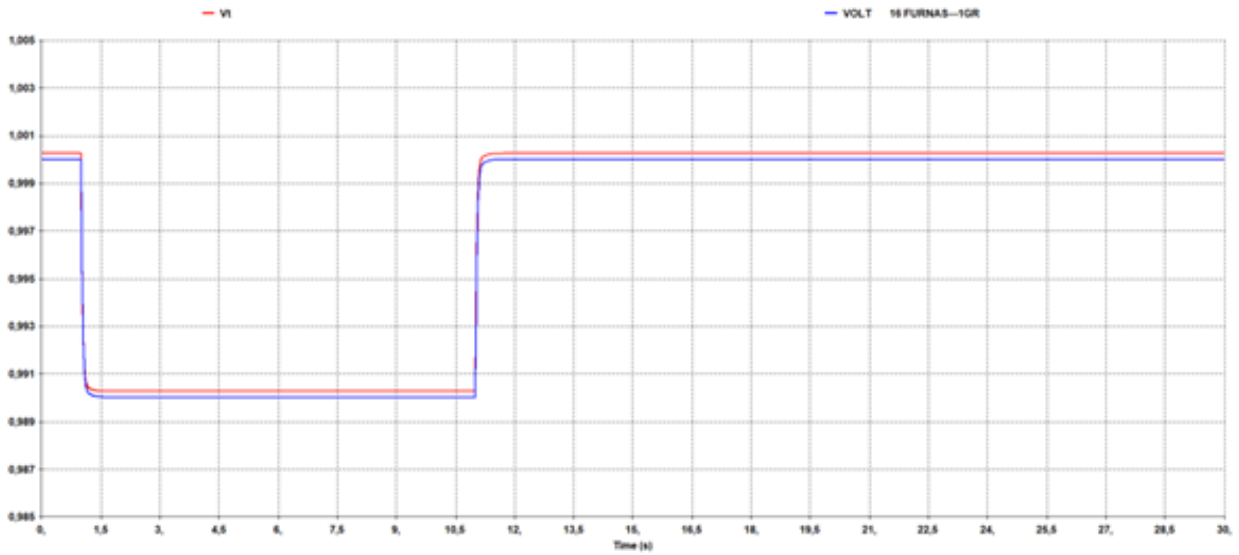

Figura 4-364 - Tensão terminal

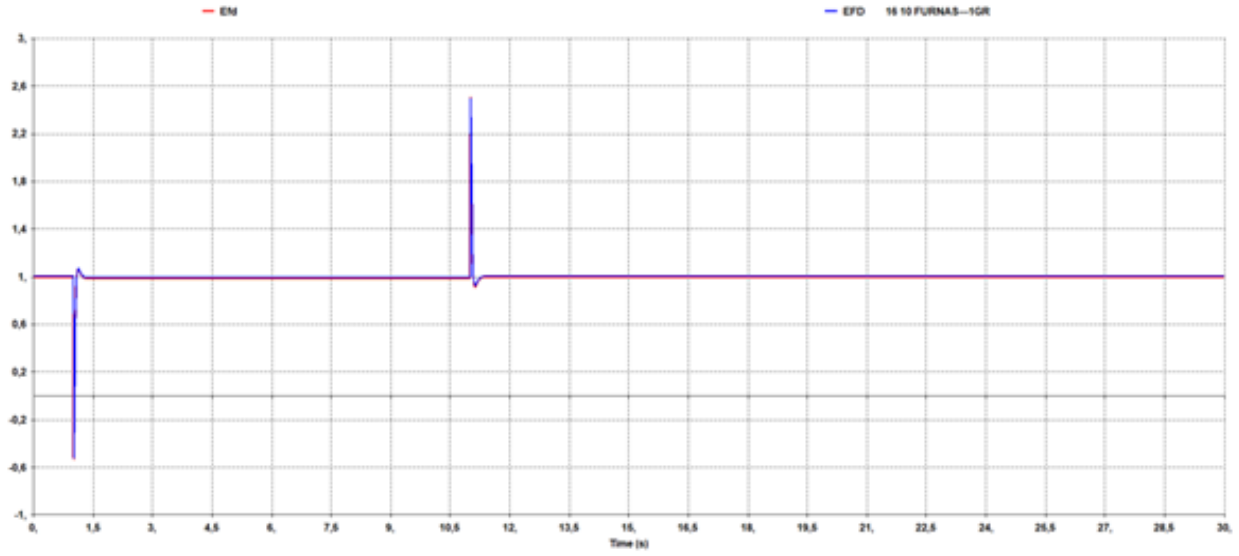

Figura 4-365 - Tensão de campo

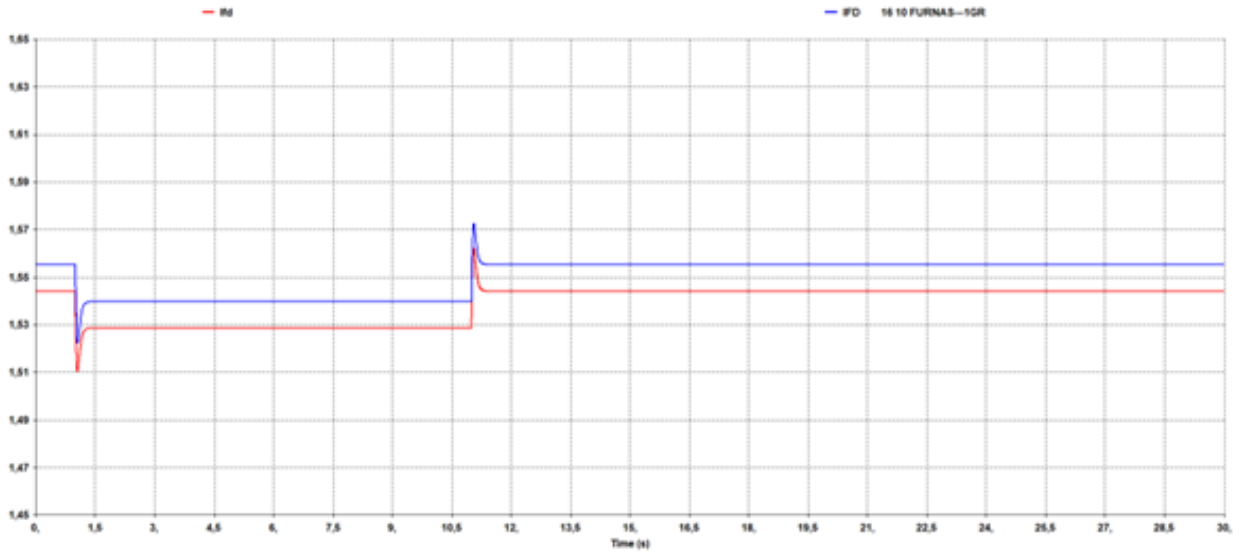

Figura 4-366 - Corrente de campo

4.15.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

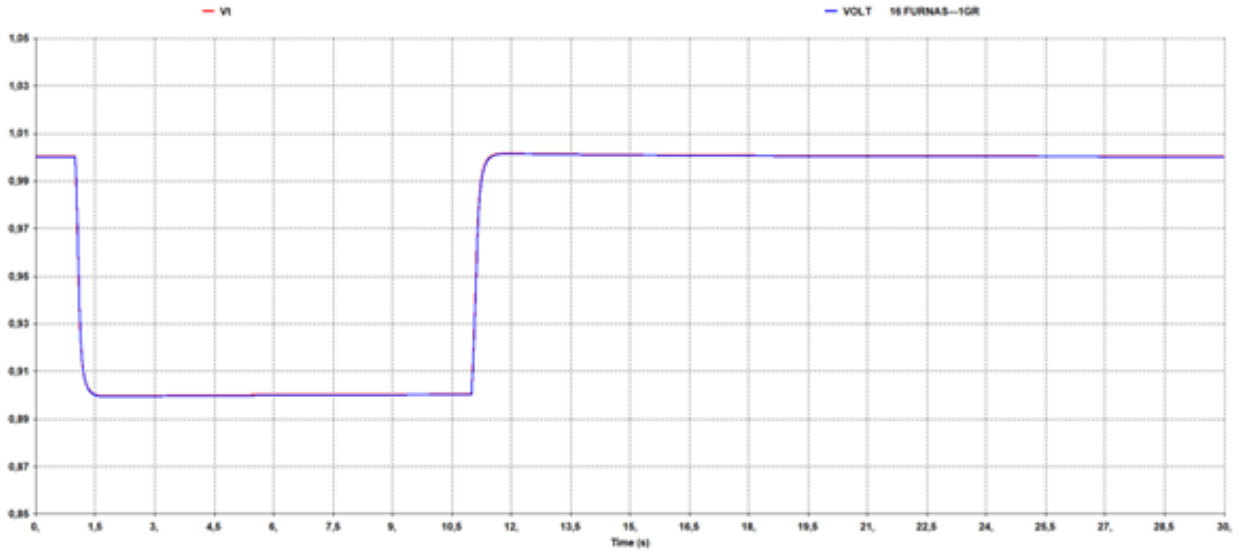

Figura 4-367 - Tensão terminal

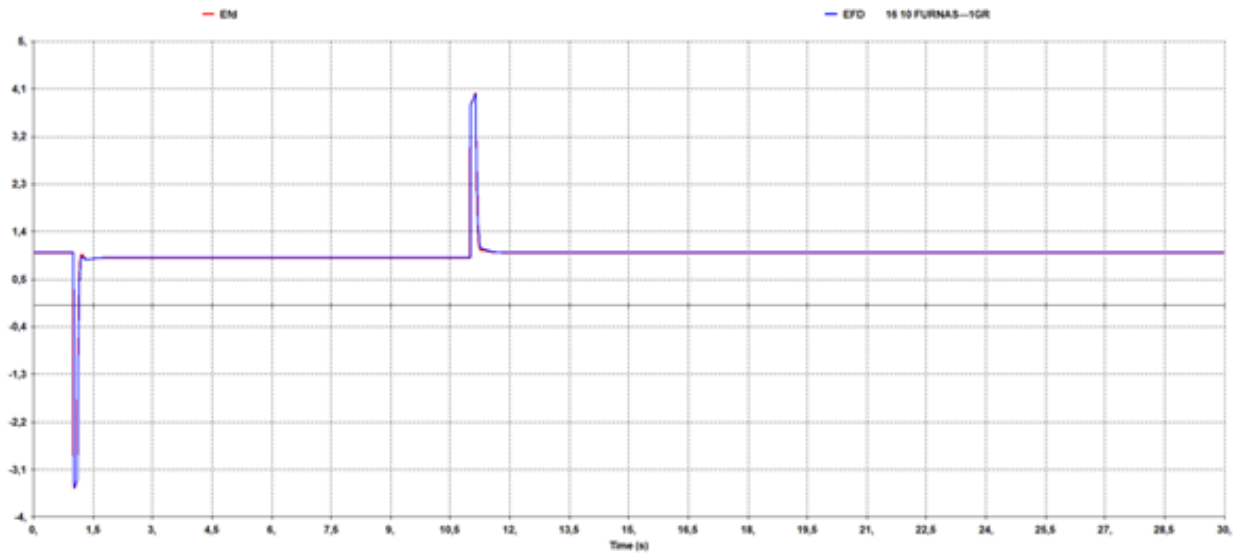

Figura 4-368 - Tensão de campo

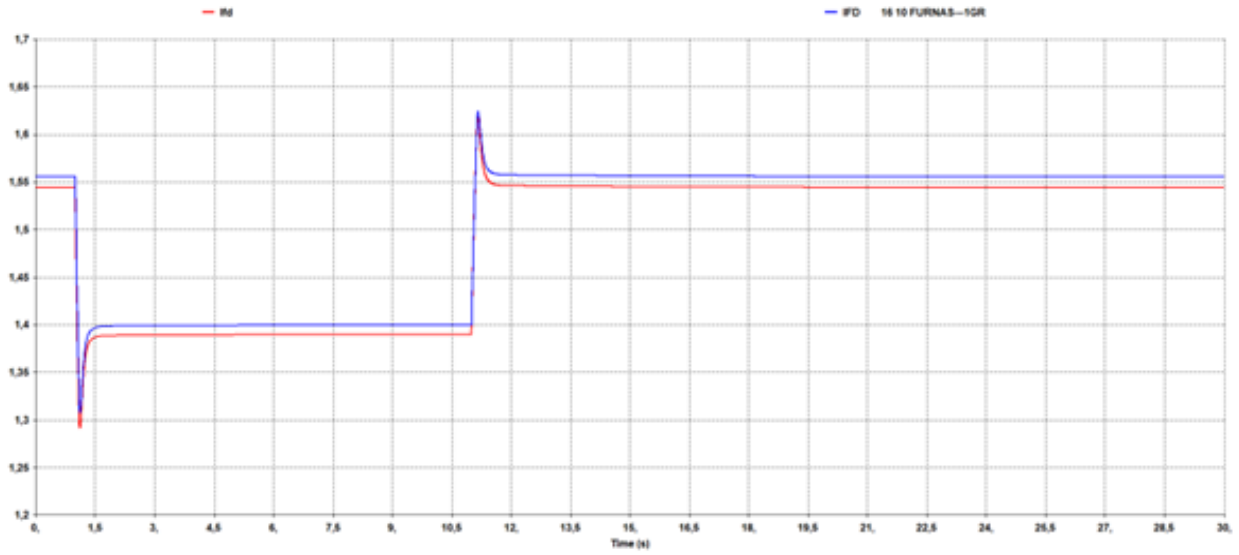

Figura 4-369 - Corrente de campo

4.15.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.15.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.15.4.2.

4.15.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

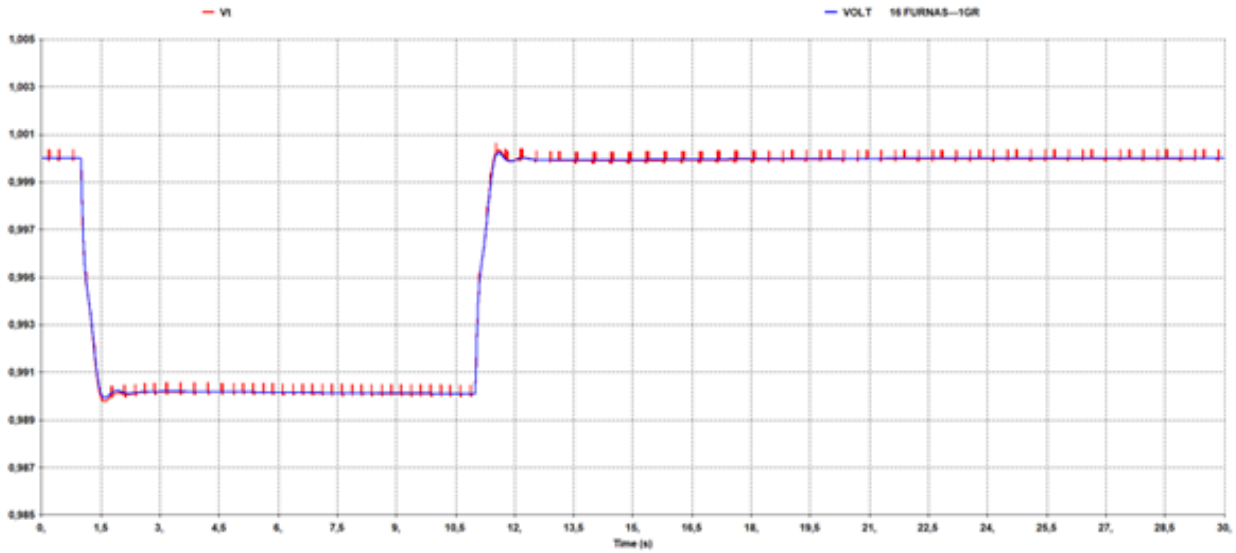

Figura 4-370 - Tensão terminal

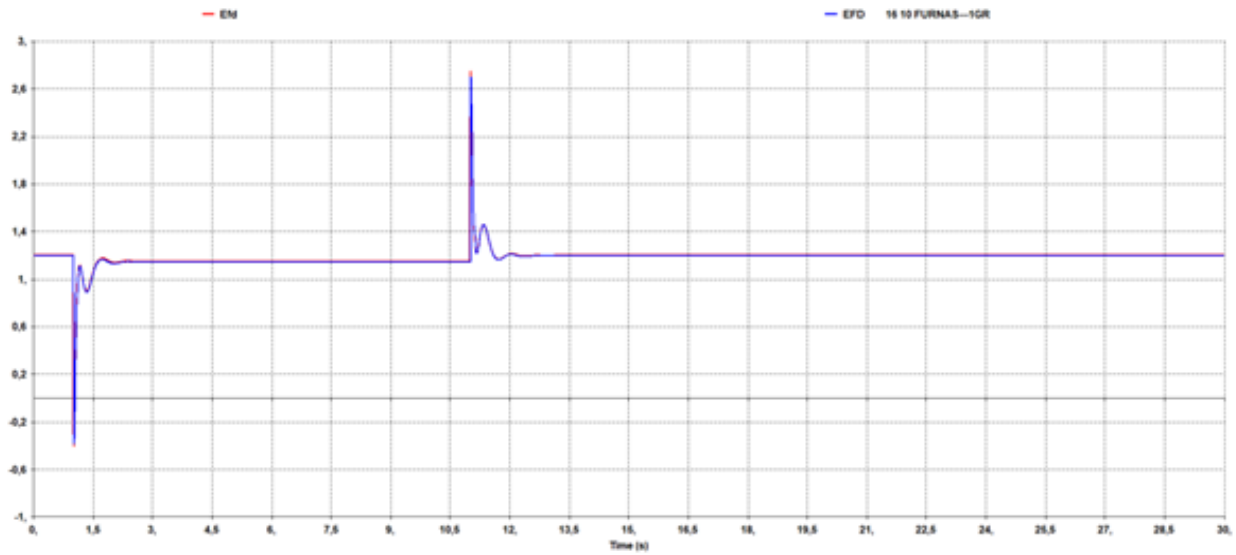

Figura 4-371 - Tensão de campo

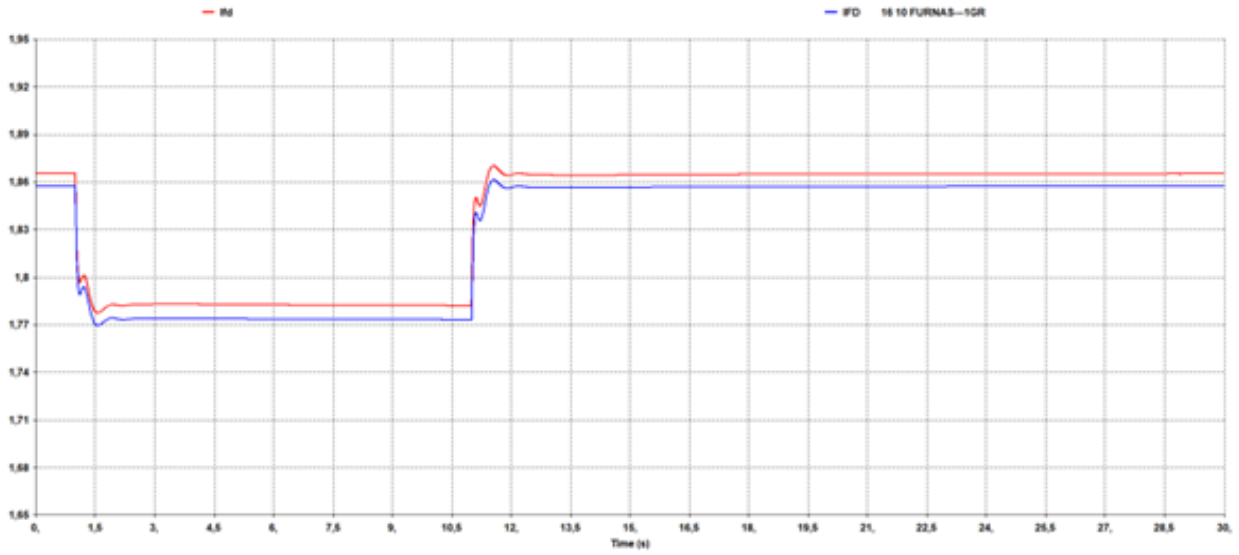

Figura 4-372 - Corrente de campo

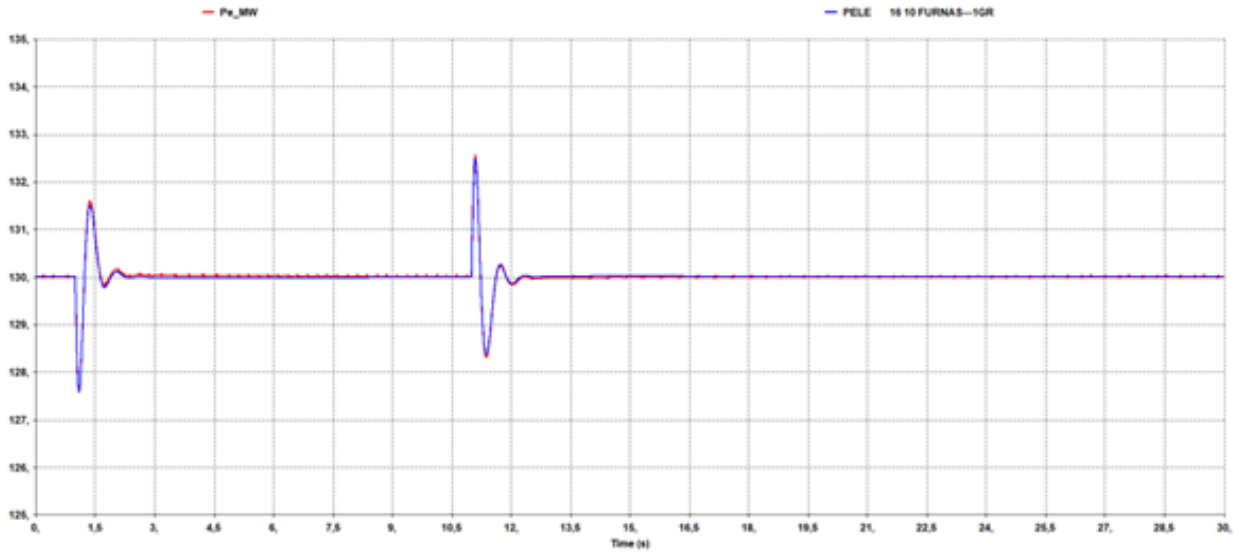

Figura 4-373 - Potência ativa

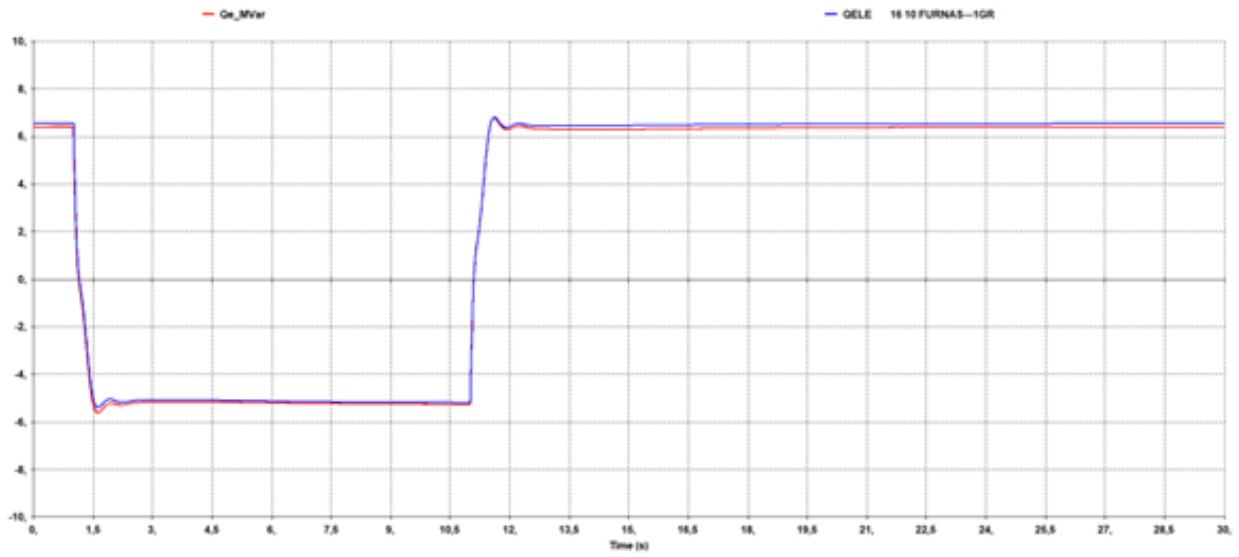

Figura 4-374 - Potência reativa

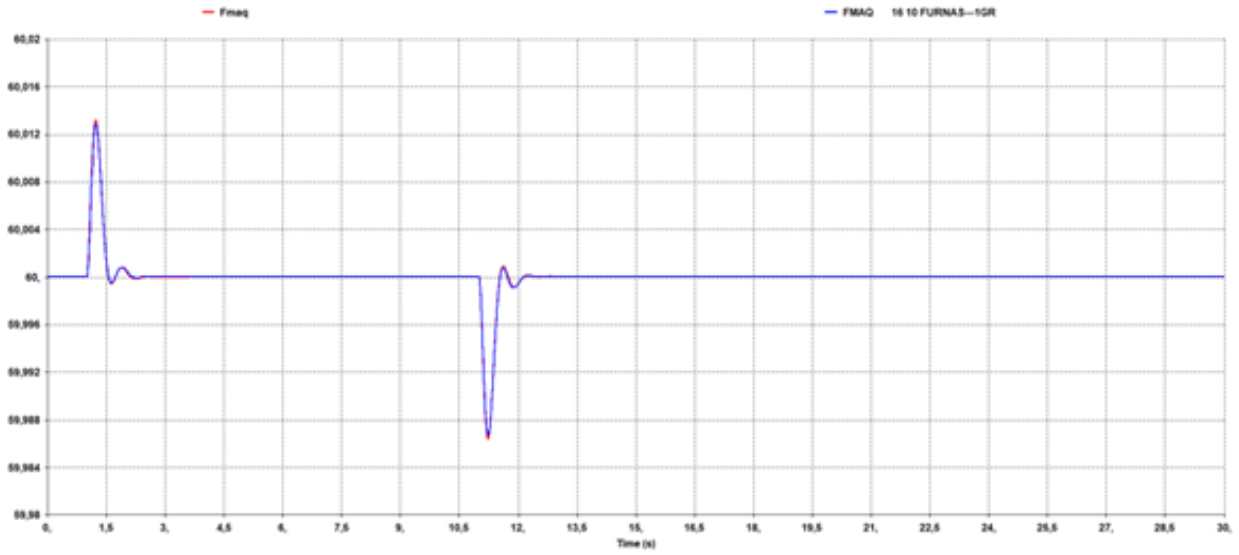

Figura 4-375 - Velocidade da máquina

4.15.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

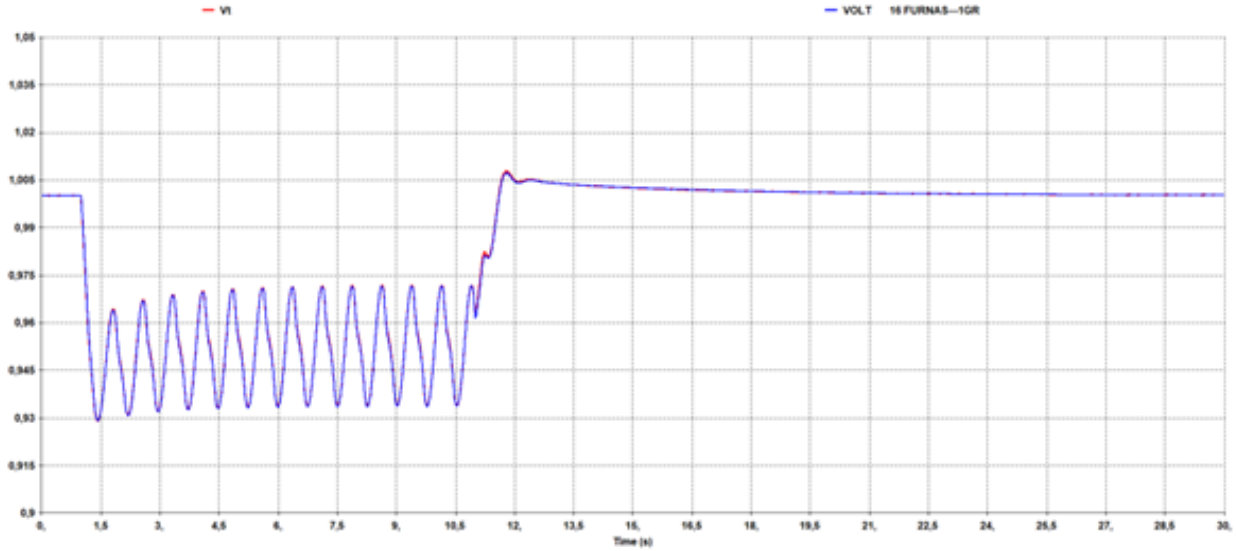

Figura 4-376 - Tensão terminal

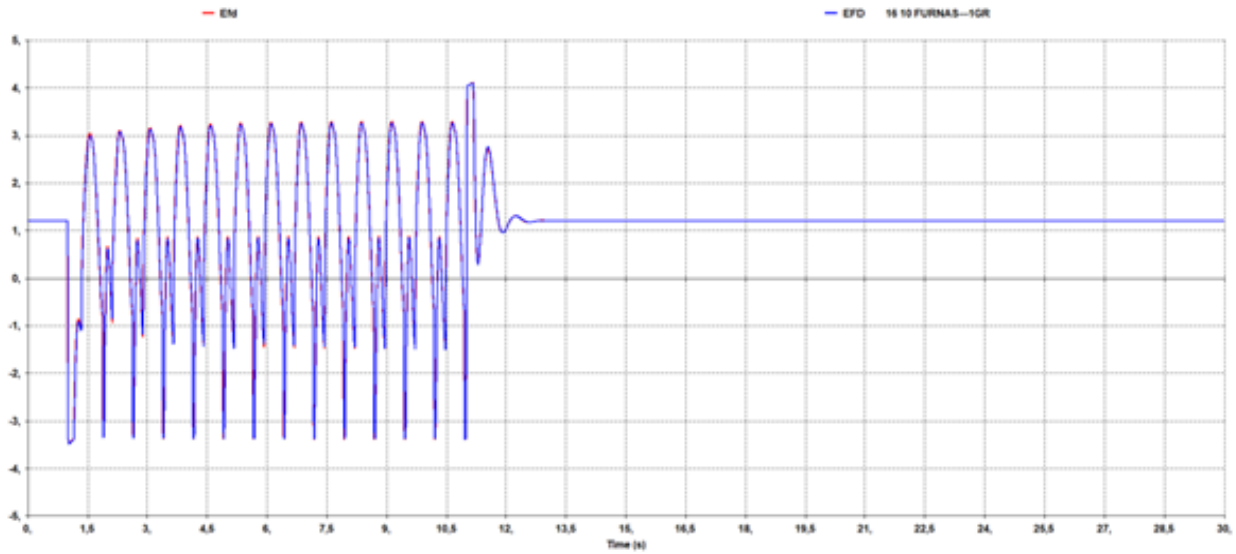

Figura 4-377 - Tensão de campo

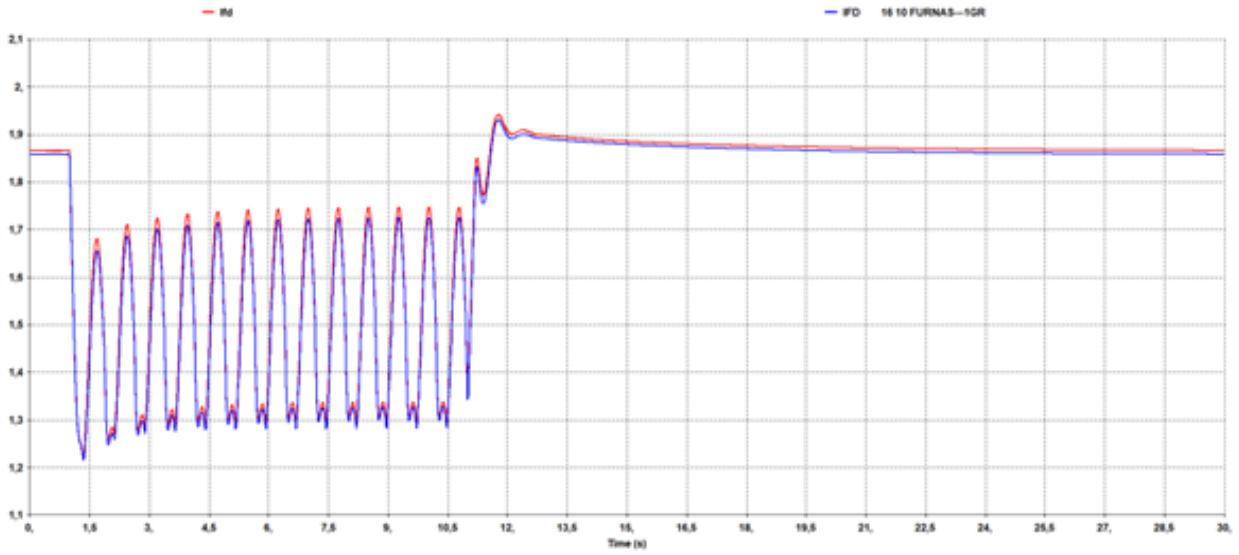

Figura 4-378 - Corrente de campo

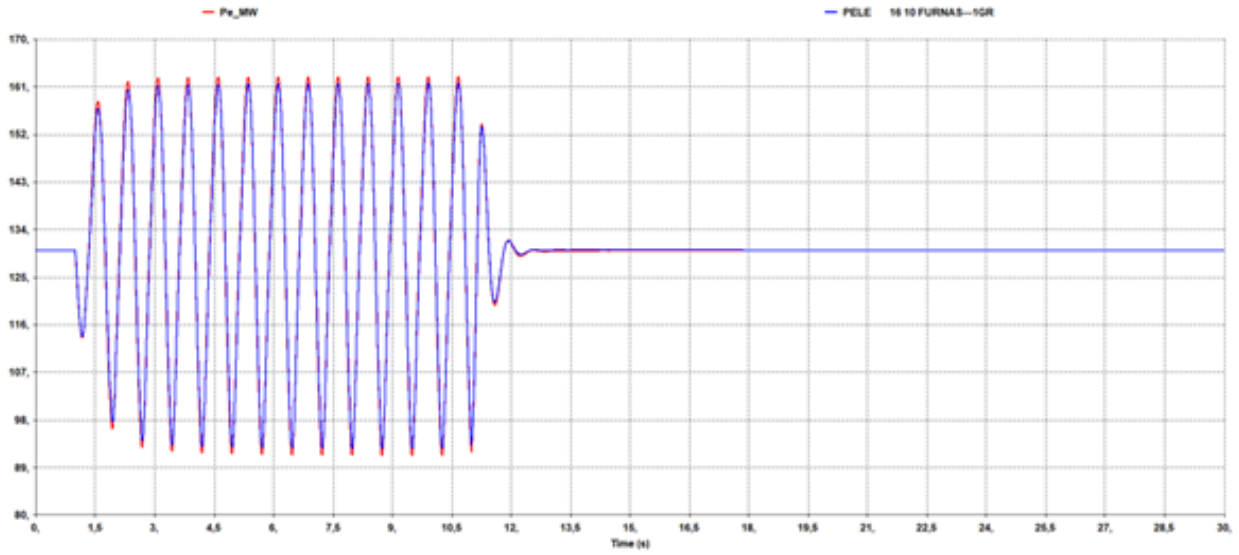

Figura 4-379 - Potência ativa

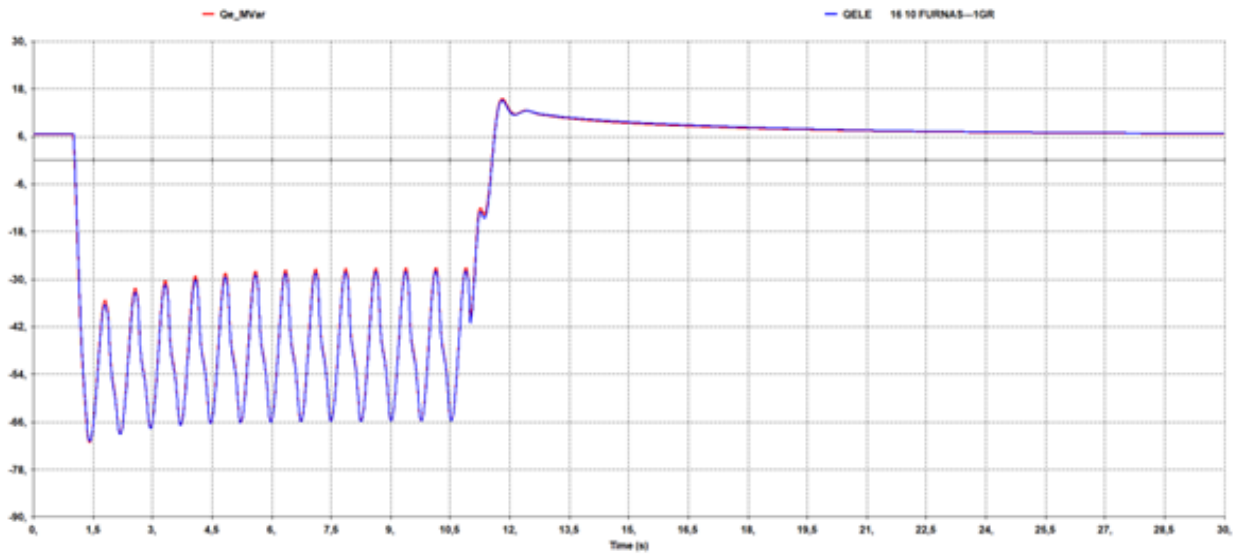

Figura 4-380 - Potência reativa

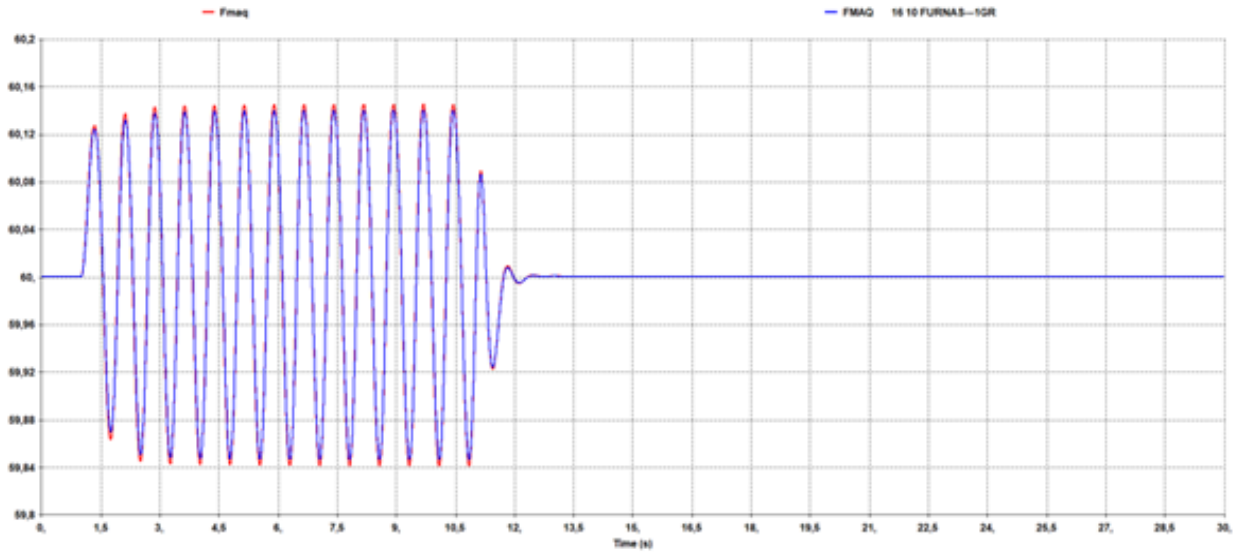

Figura 4-381 - Velocidade da máquina

4.16 UHE MARIMBONDO

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Marimbondo, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.16.1 Modelo da UHE Marimbondo

A Tabela 4-46 apresenta os parâmetros da UHE Marimbondo disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-46 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	106	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	63	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	33	I(KA)	7,949	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	25	H(s)	4,3	
xl(%)	21	D(pu)	0	
T'd(s)	6	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,21	Reatância de Potier
T''d(s)	0,04	xd(pu)	1,06	
T''q(s)	0,055	xd_(pu)	0,33	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	6	T'd
H(s)	4,3	xd__(pu)	0,25	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,04	T''d
S(MVA)	190	Xq(pu)	0,63	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,25	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,055	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.16.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-47, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Marimbondo estão apresentados na Tabela 4-48. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-47, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-48. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-382.

Tabela 4-47 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Marimbondo	
Ag	**Y1**	0,0155
Bg	**Y2**	8,068
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-48 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,816	0,800
1,002	0,950
1,039	0,975
1,078	1,000
1,135	1,033
1,201	1,067
1,274	1,100
1,591	1,200
2,176	1,300

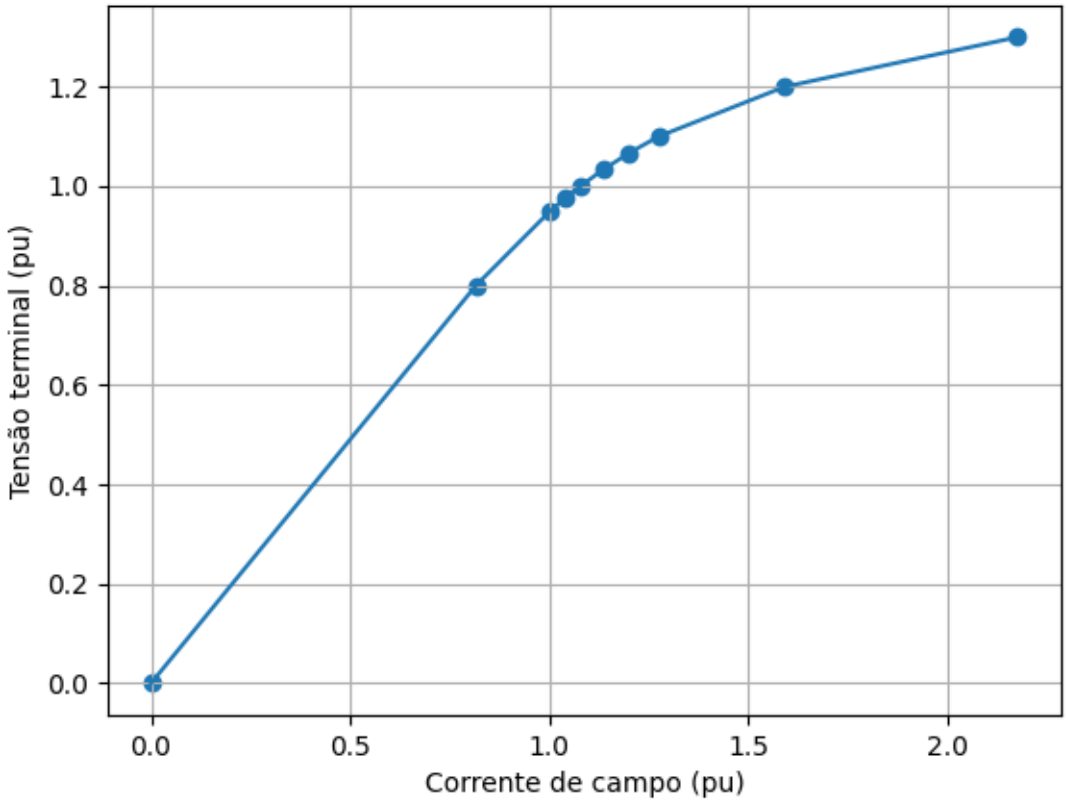

Figura 4-382 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.16.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.16.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.16.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.16.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

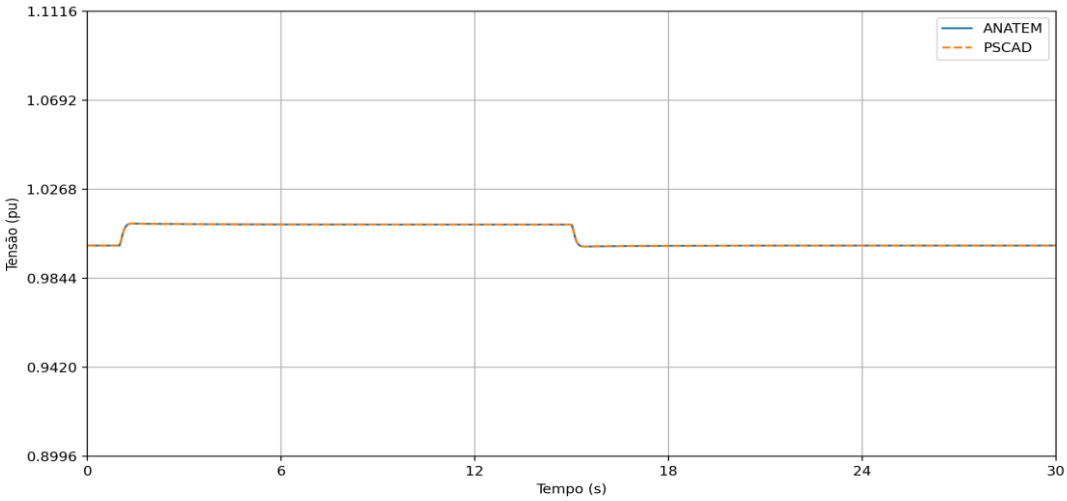

Figura 4-383 - Tensão terminal

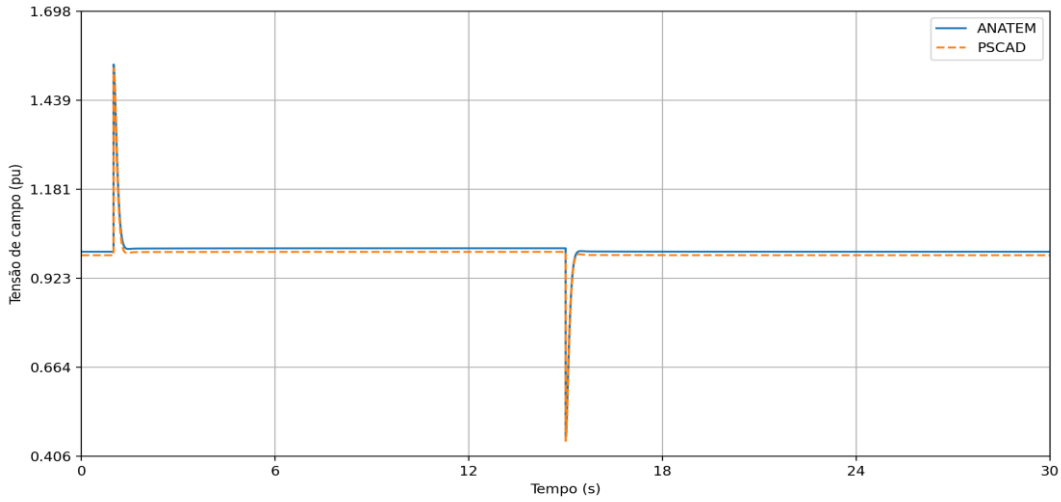

Figura 4-384 - Tensão de campo

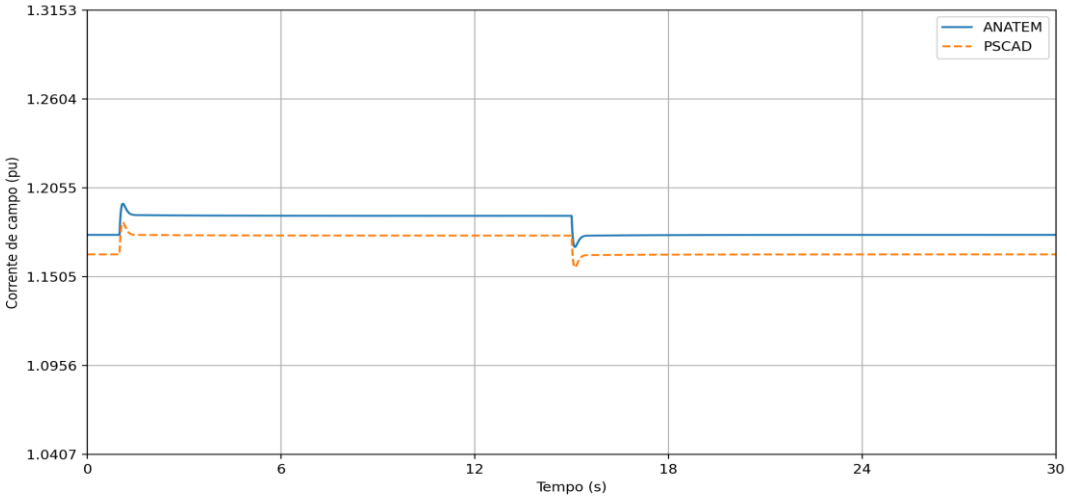

Figura 4-385 - Corrente de campo

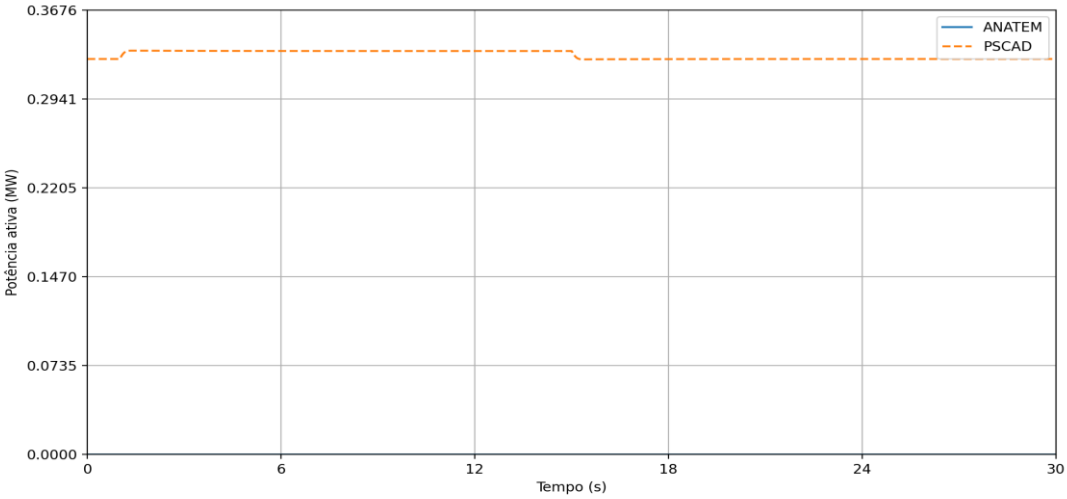

Figura 4-386 - Potência ativa

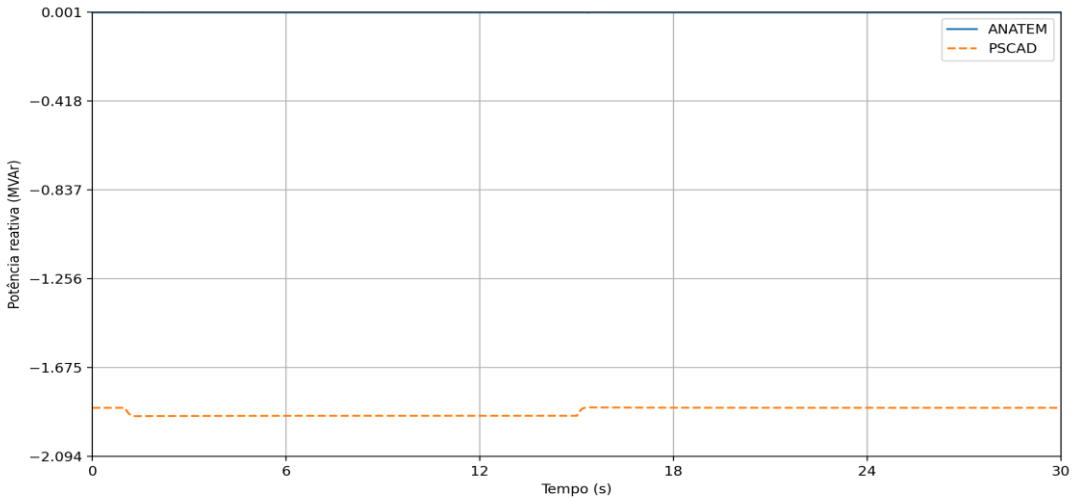

Figura 4-387 - Potência reativa

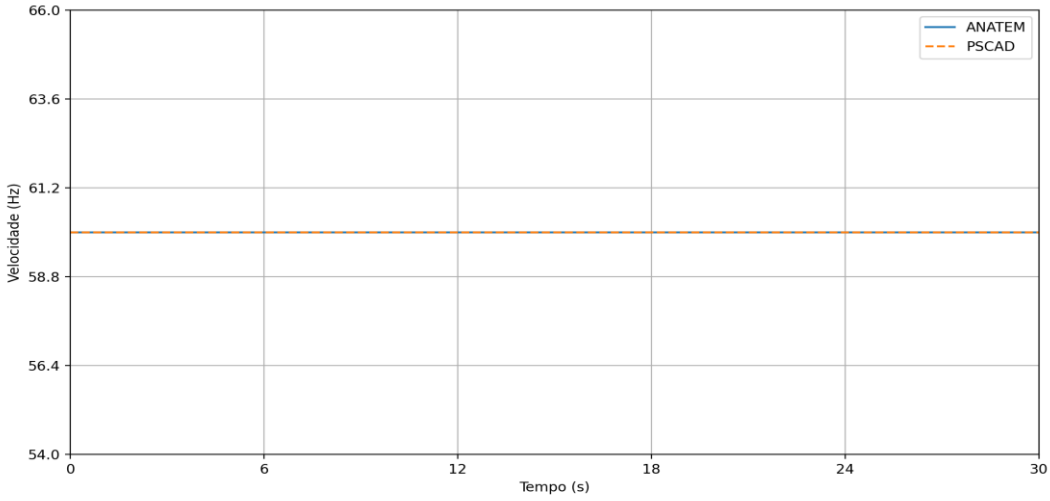

Figura 4-388 - Velocidade da máquina

4.16.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

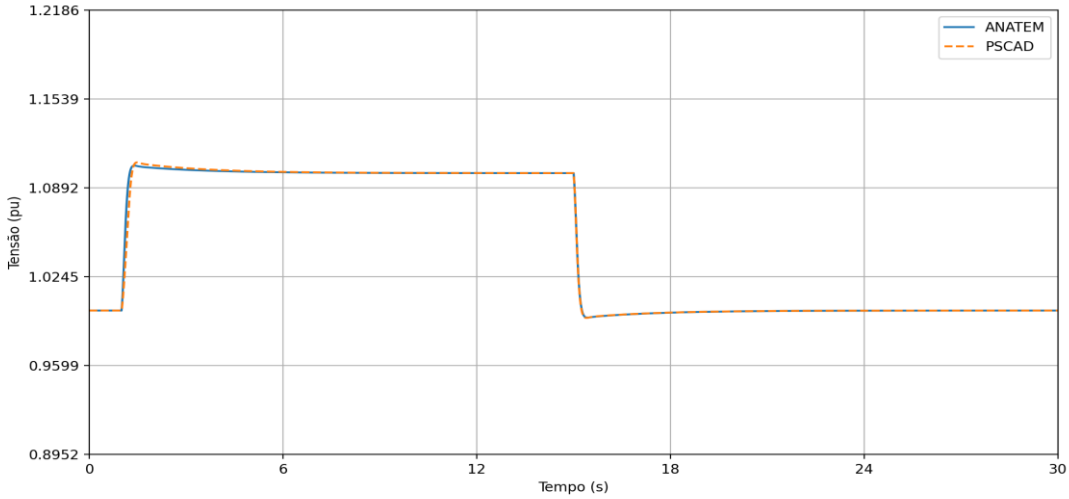

Figura 4-389 - Tensão terminal

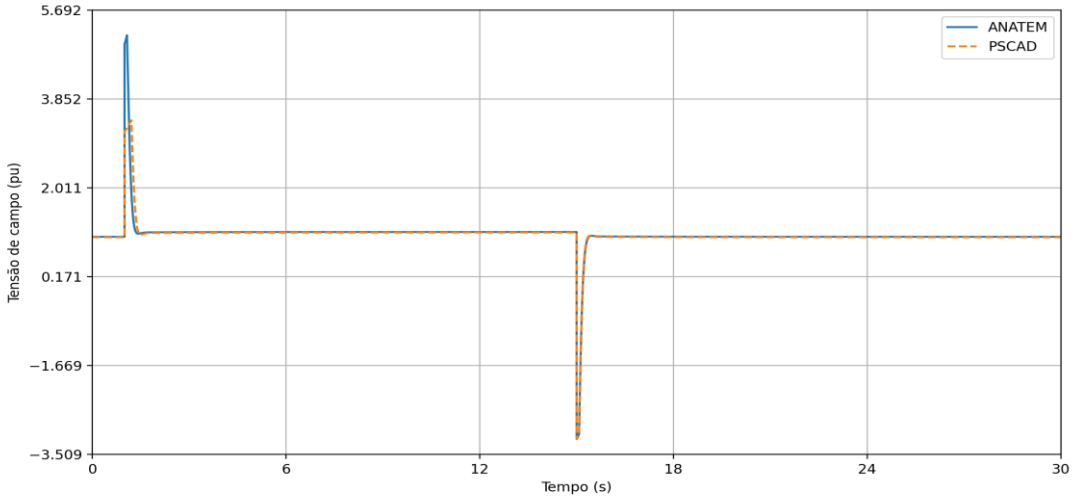

Figura 4-390 - Tensão de campo

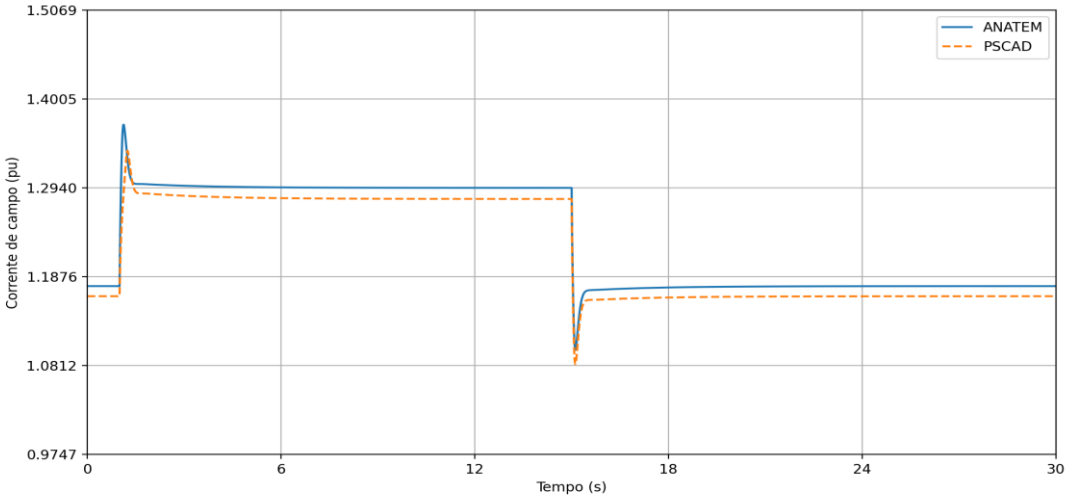

Figura 4-391 - Corrente de campo

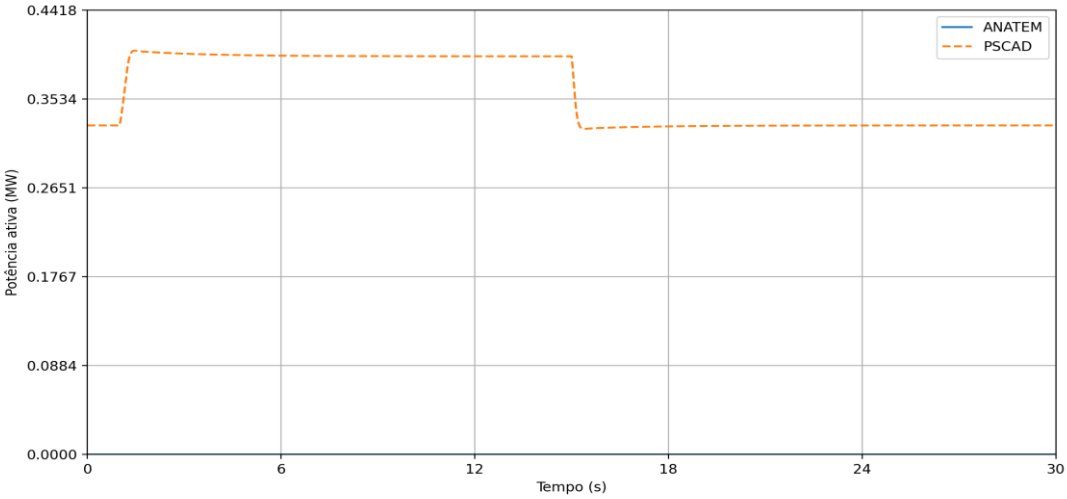

Figura 4-392 - Potência ativa

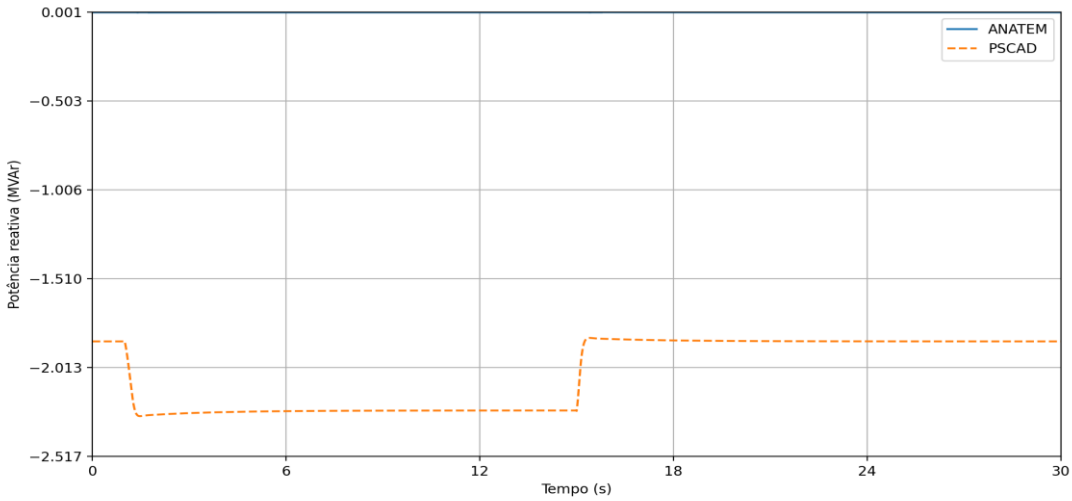

Figura 4-393 - Potência reativa

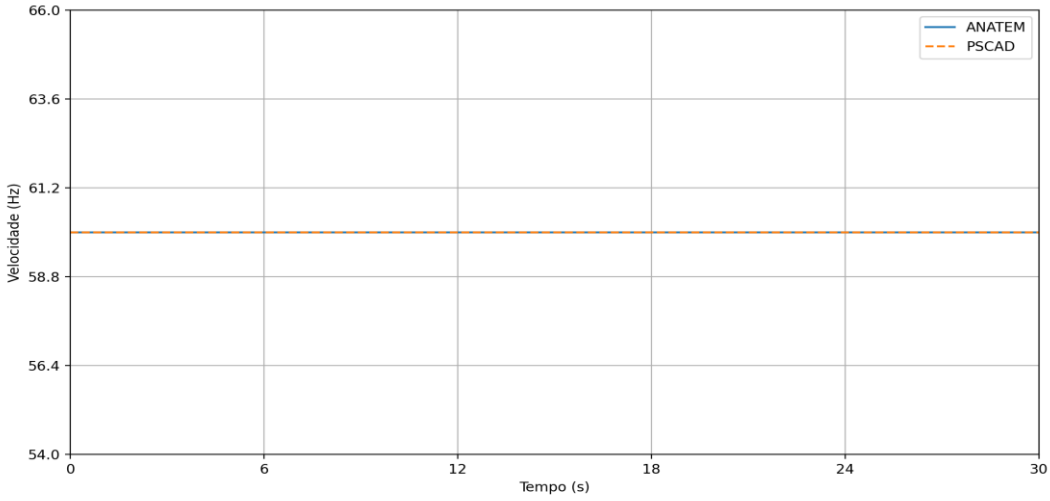

Figura 4-394 - Velocidade da máquina

4.16.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.16.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.16.4.2.

4.16.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

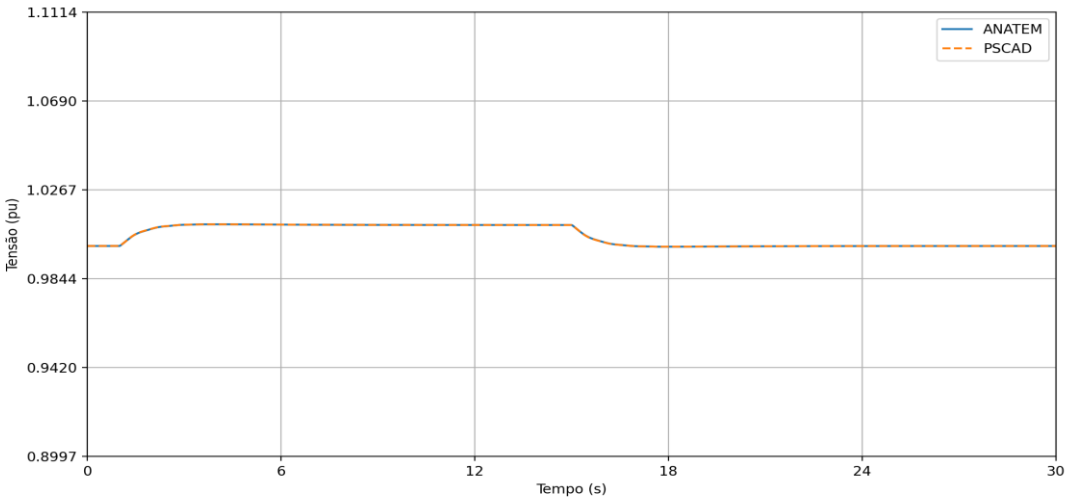

Figura 4-395 - Tensão terminal

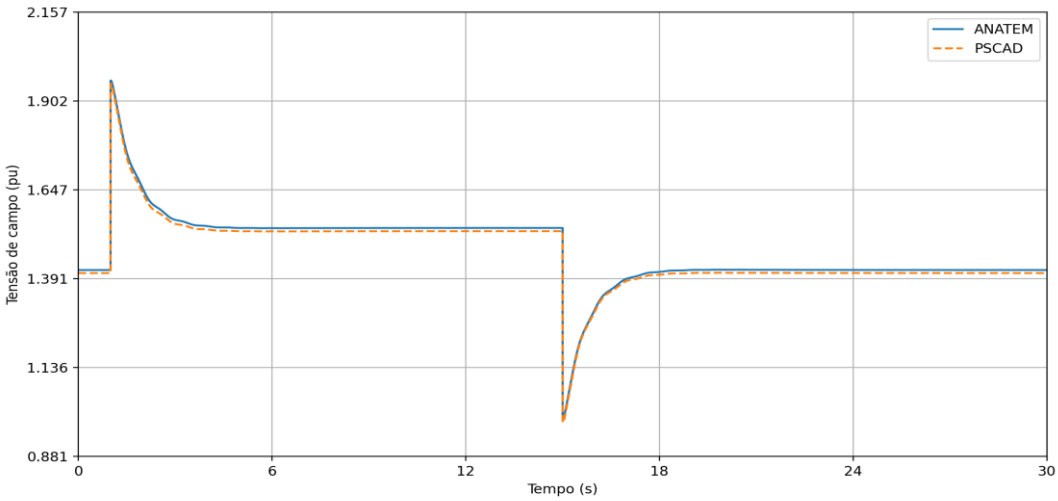

Figura 4-396 - Tensão de campo

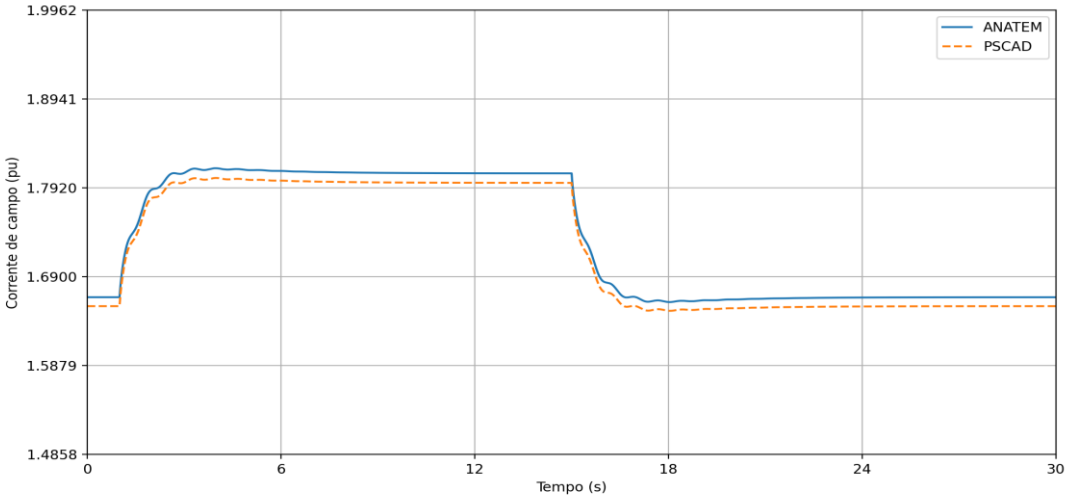

Figura 4-397 - Corrente de campo

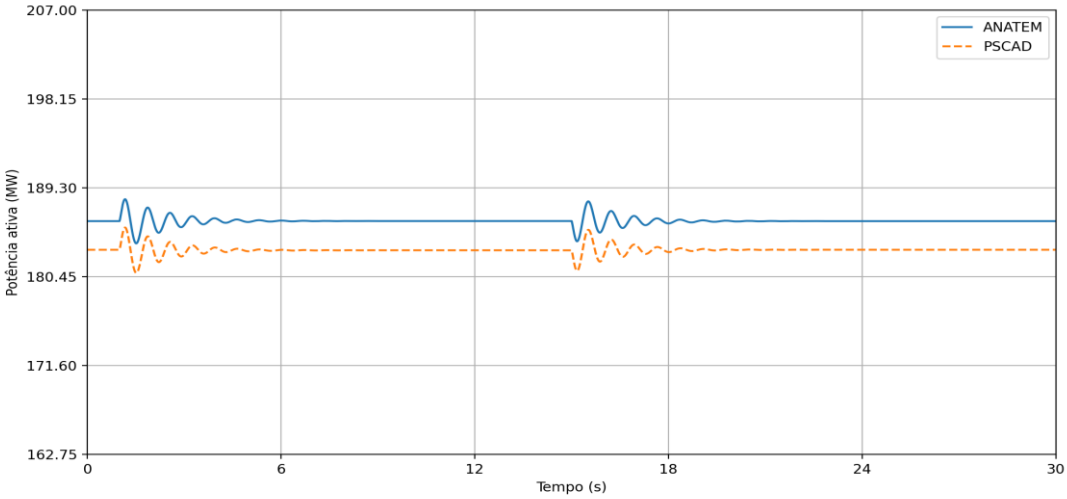

Figura 4-398 - Potência ativa

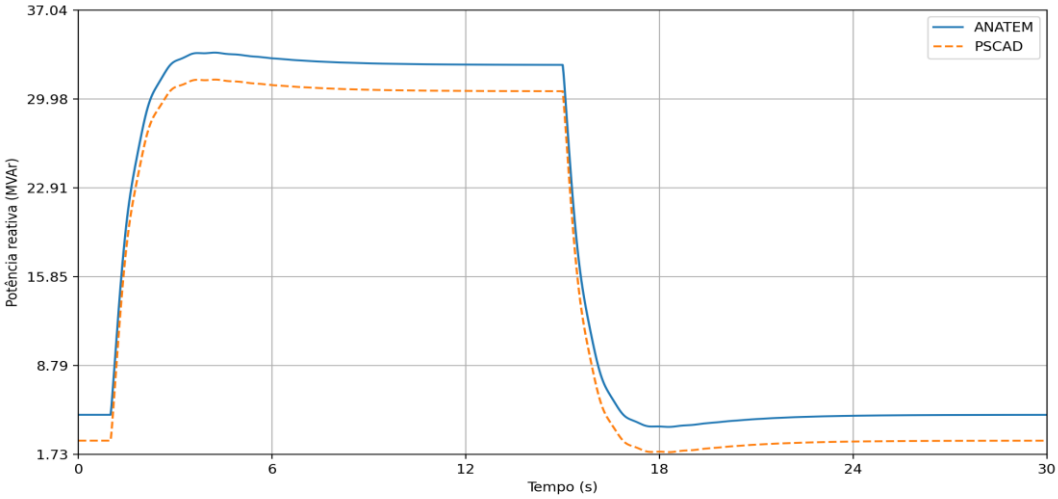

Figura 4-399 - Potência reativa

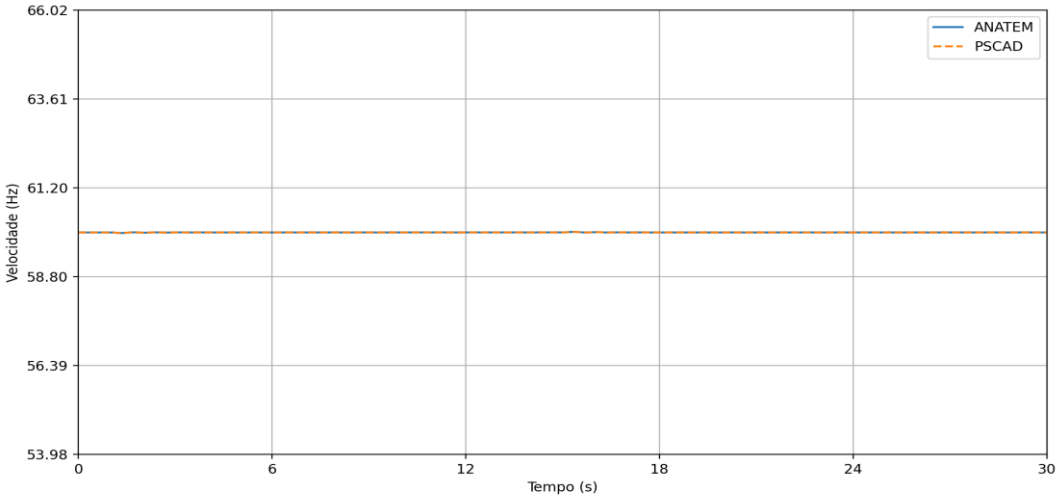

Figura 4-400 - Velocidade da máquina

4.16.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

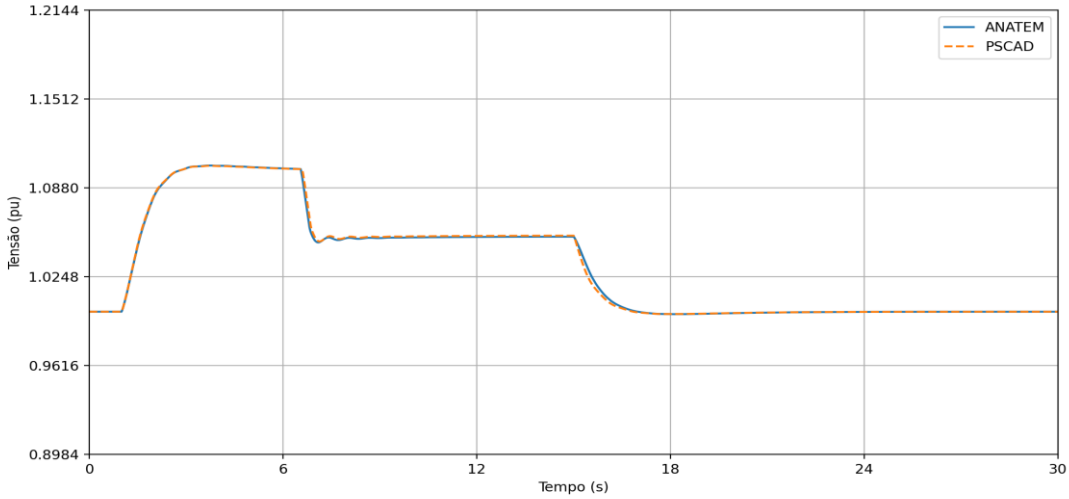

Figura 4-401 - Tensão terminal

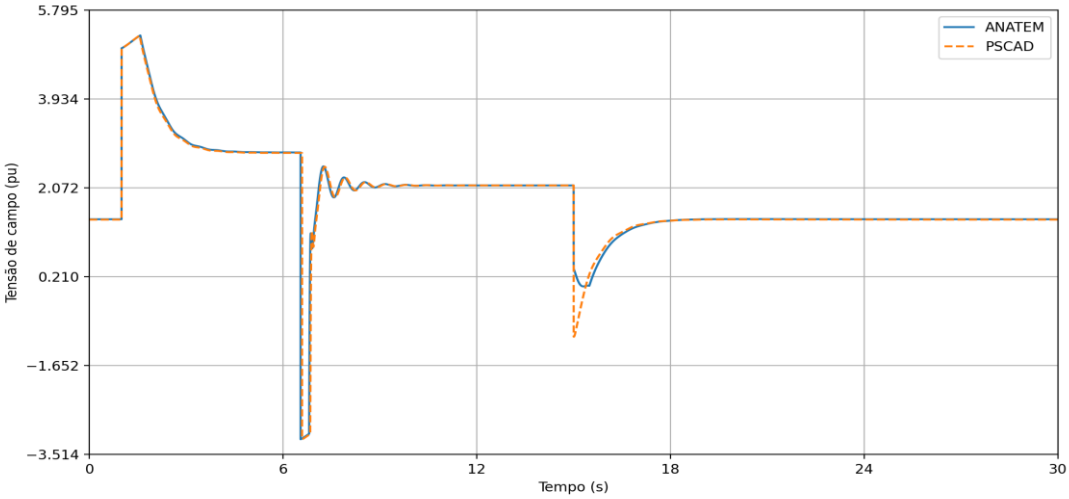

Figura 4-402 - Tensão de campo

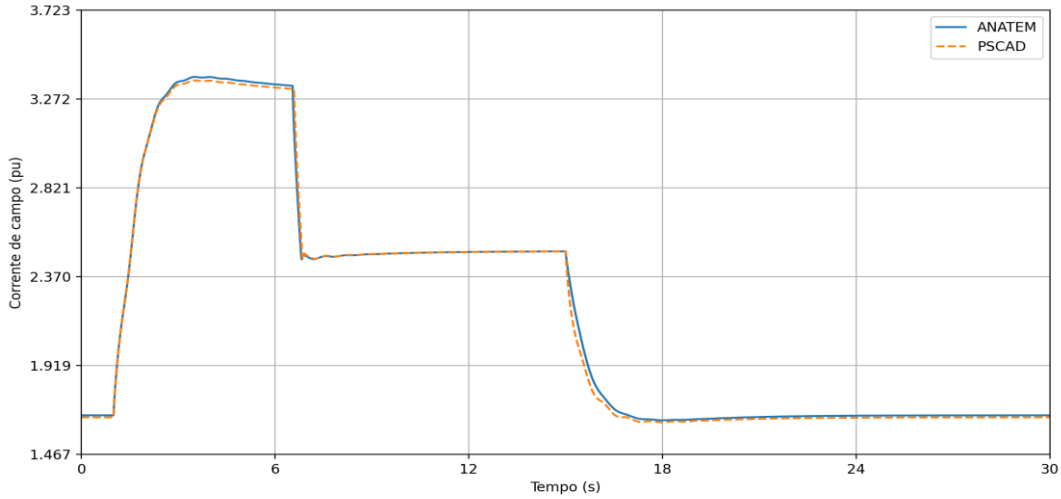

Figura 4-403 - Corrente de campo

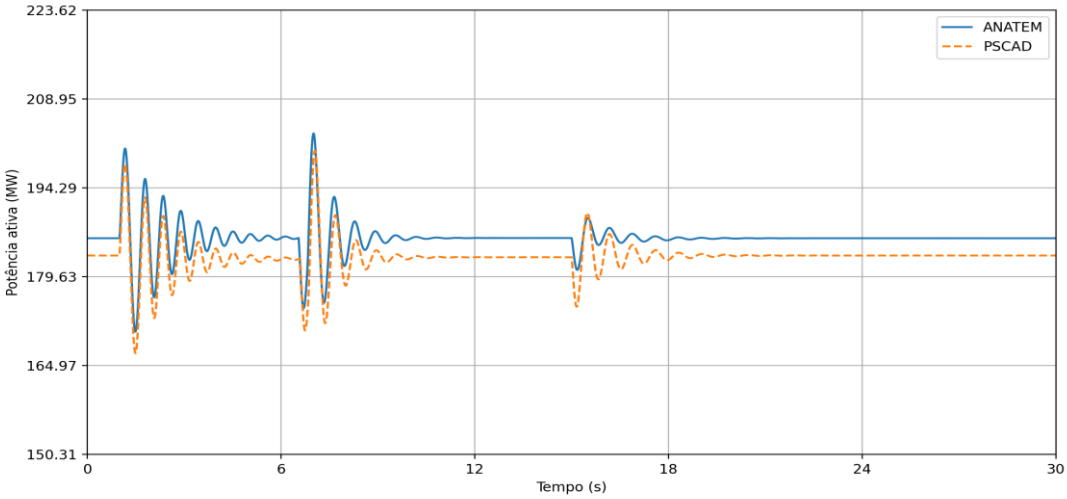

Figura 4-404 - Potência ativa

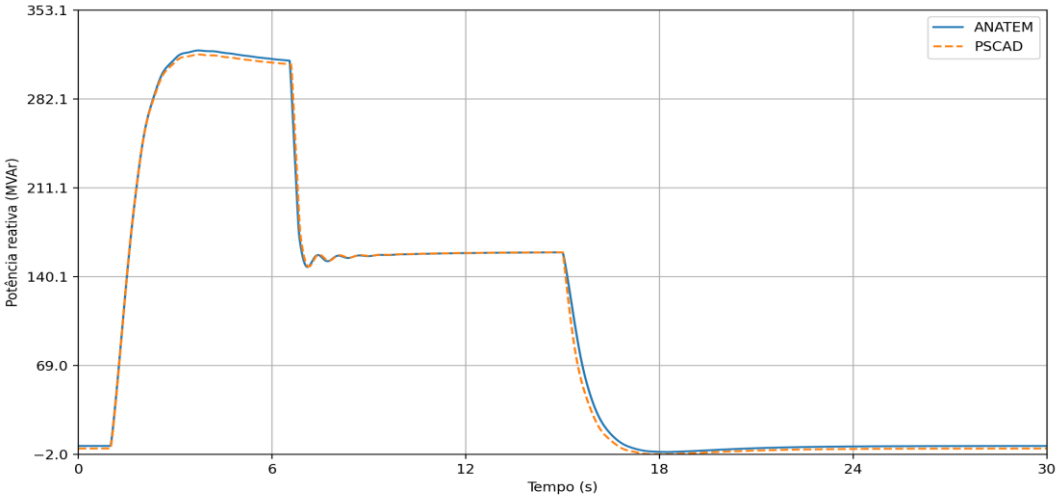

Figura 4-405 - Potência reativa

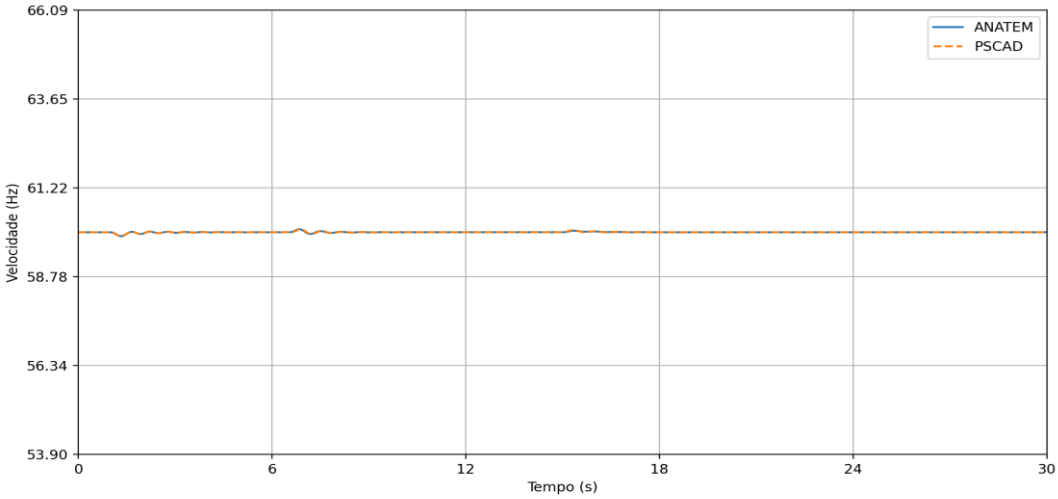

Figura 4-406 - Velocidade da máquina

4.17 UHE MASCARENHAS DE MORAES A

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Mascarenhas de Moraes A, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.17.1 Modelo da UHE Mascarenhas de Moraes A

A Tabela 4-49 apresenta os parâmetros da UHE Mascarenhas de Moraes A disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-49 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	88	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	57	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	34	I(KA)	2,176	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	27	H(s)	2,482	
xl(%)	16,1	D(pu)	0	
T'd(s)	4,53	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,161	Reatância de Potier
T''d(s)	0,01	xd(pu)	0,88	
T''q(s)	0,005	xd_(pu)	0,34	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	4,53	T'd
H(s)	2,482	xd__(pu)	0,27	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,01	T''d
S(MVA)	52	Xq(pu)	0,57	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,27	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,005	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.17.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-50, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Mascarenhas de Moraes A estão apresentados

na Tabela 4-51. A partir dos parâmetros da Tabela 4-50, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-51. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-407.

Tabela 4-50 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Mascarenhas de Moraes A	
Ag	**Y1**	0,008
Bg	**Y2**	9,56
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-51 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,808	0,800
0,984	0,950
1,018	0,975
1,054	1,000
1,107	1,033
1,17	1,067
1,241	1,100
1,566	1,200
2,253	1,300

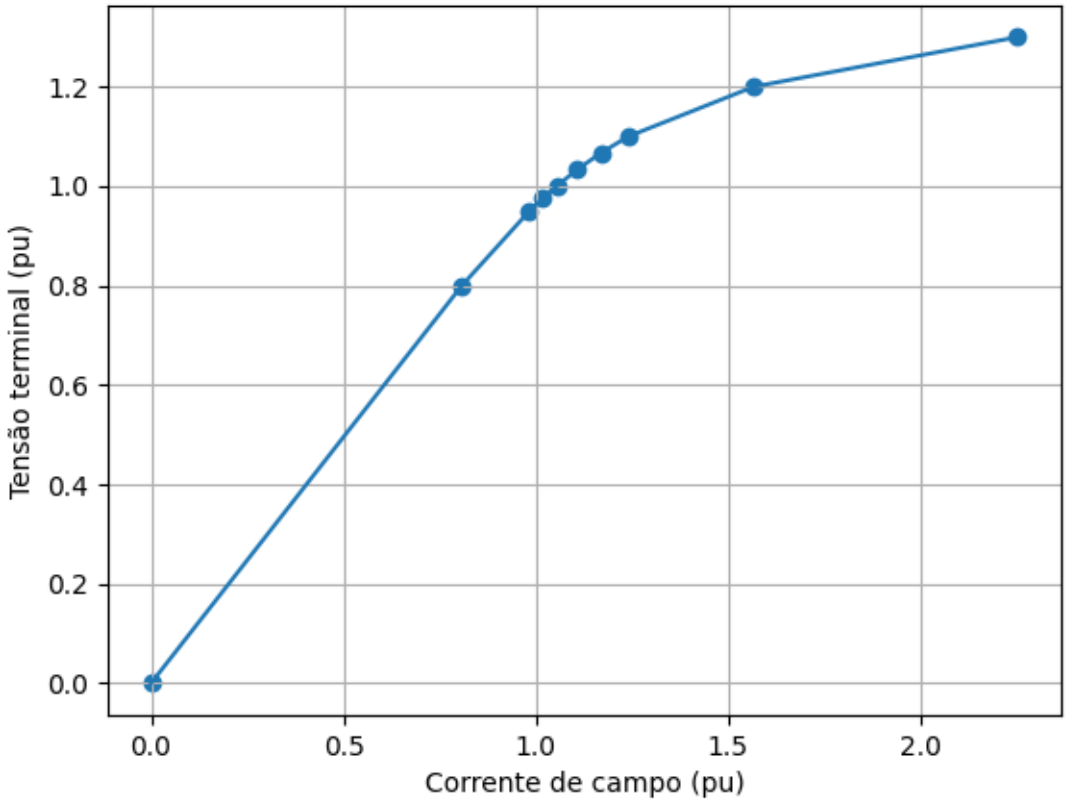

Figura 4-407 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.17.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.17.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.17.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.17.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

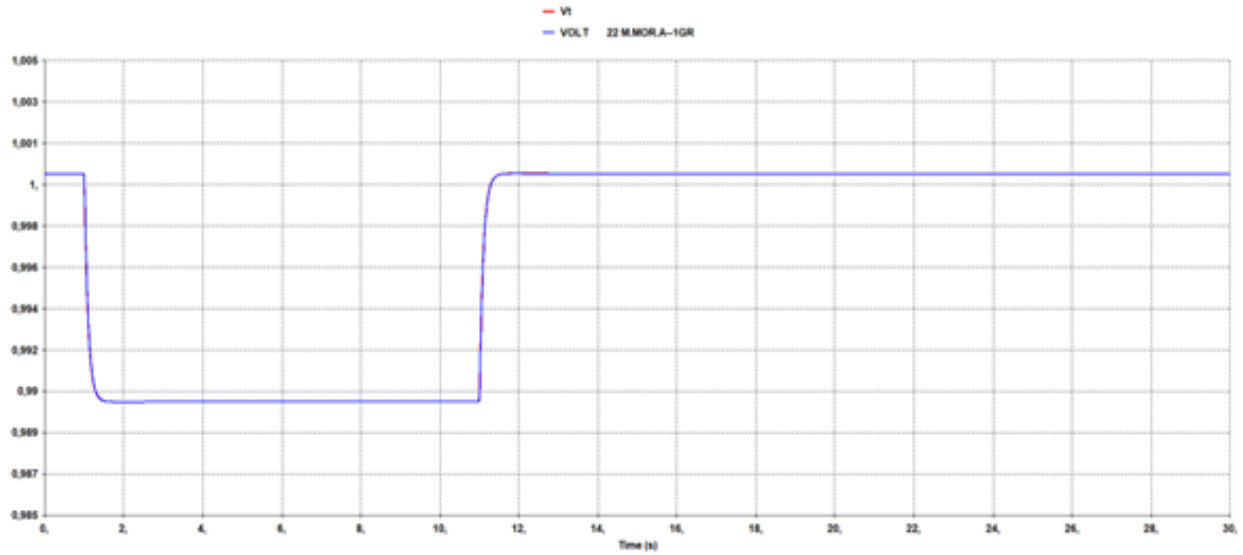

Figura 4-408 - Tensão terminal

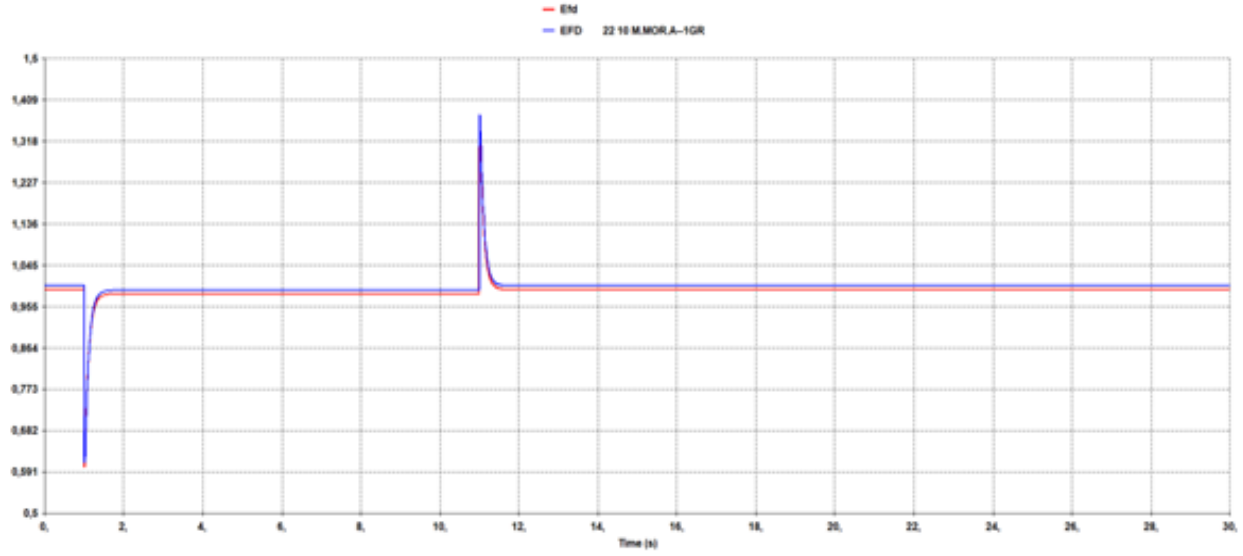

Figura 4-409 - Tensão de campo

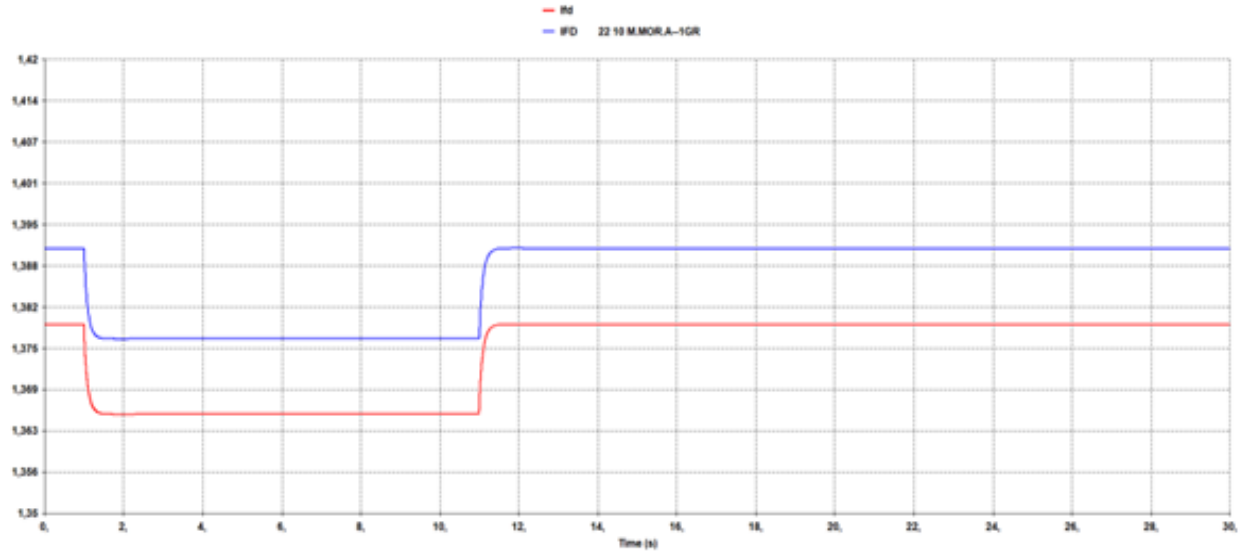

Figura 4-410 - Corrente de campo

4.17.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

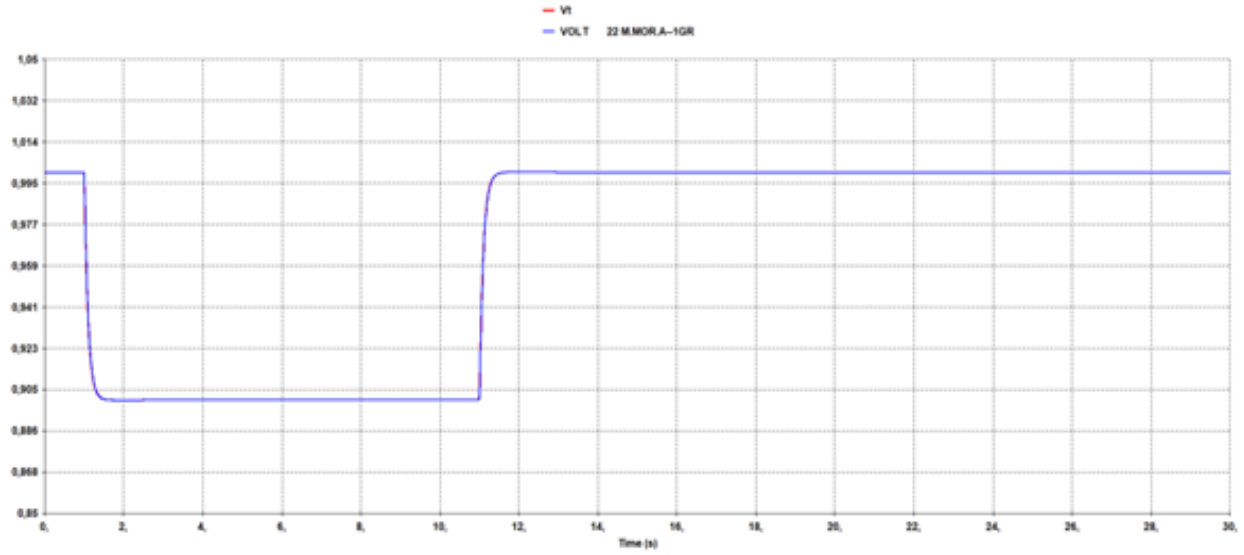

Figura 4-411 - Tensão terminal

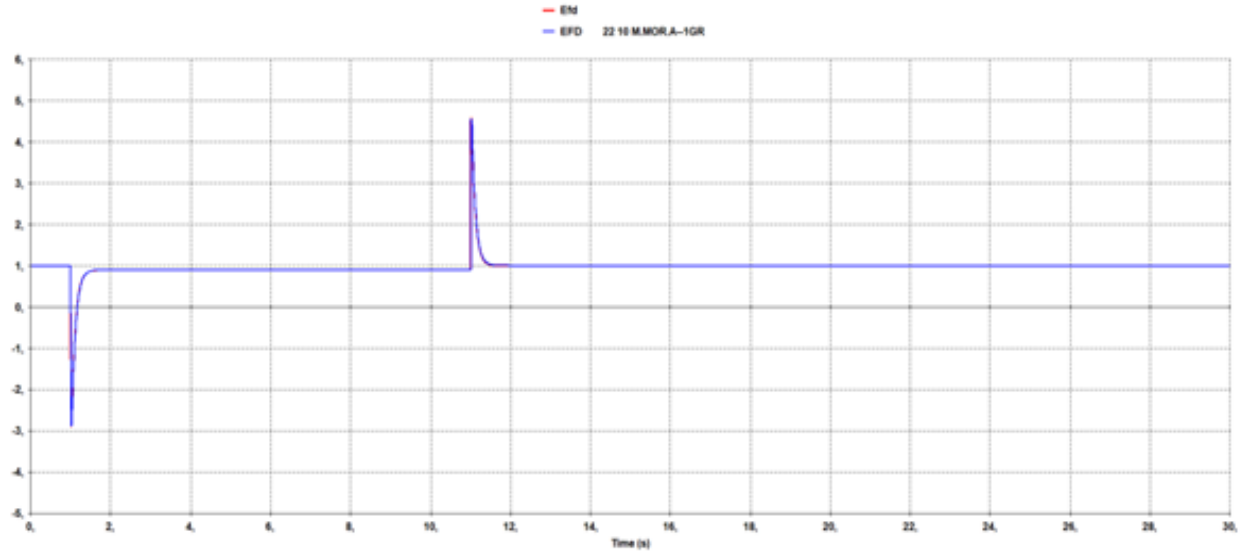

Figura 4-412 - Tensão de campo

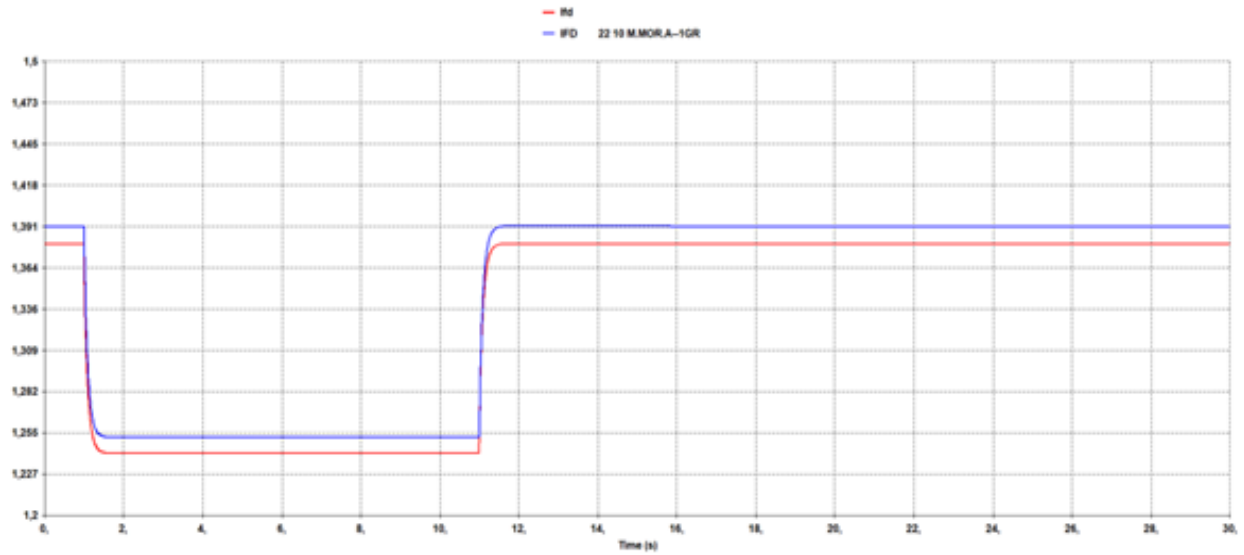

Figura 4-413 - Corrente de campo

4.17.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.17.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.17.4.2.

4.17.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

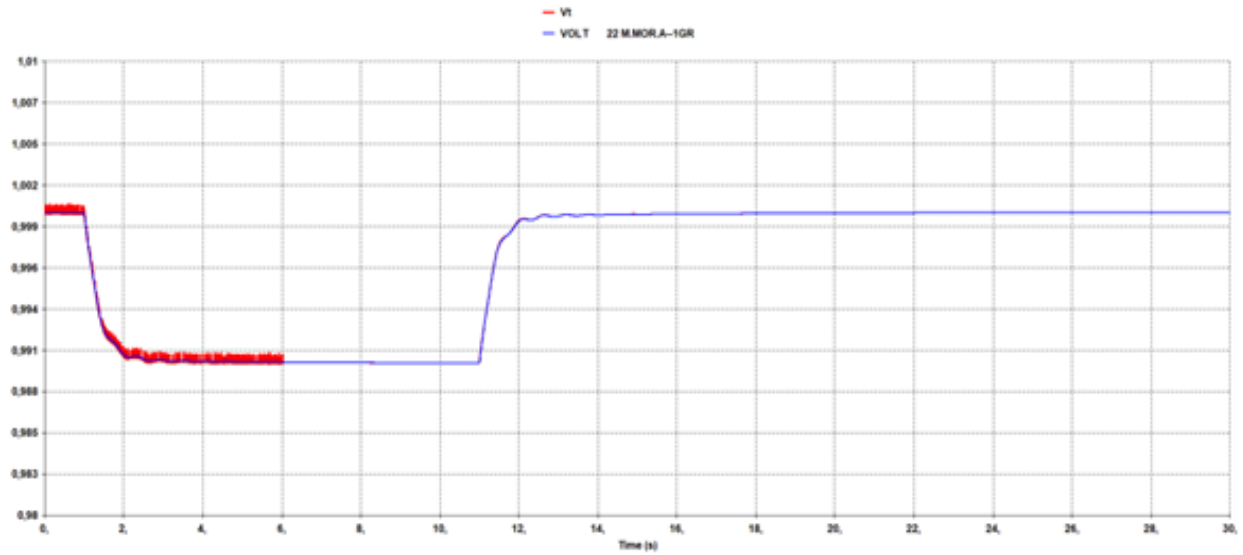

Figura 4-414 - Tensão terminal

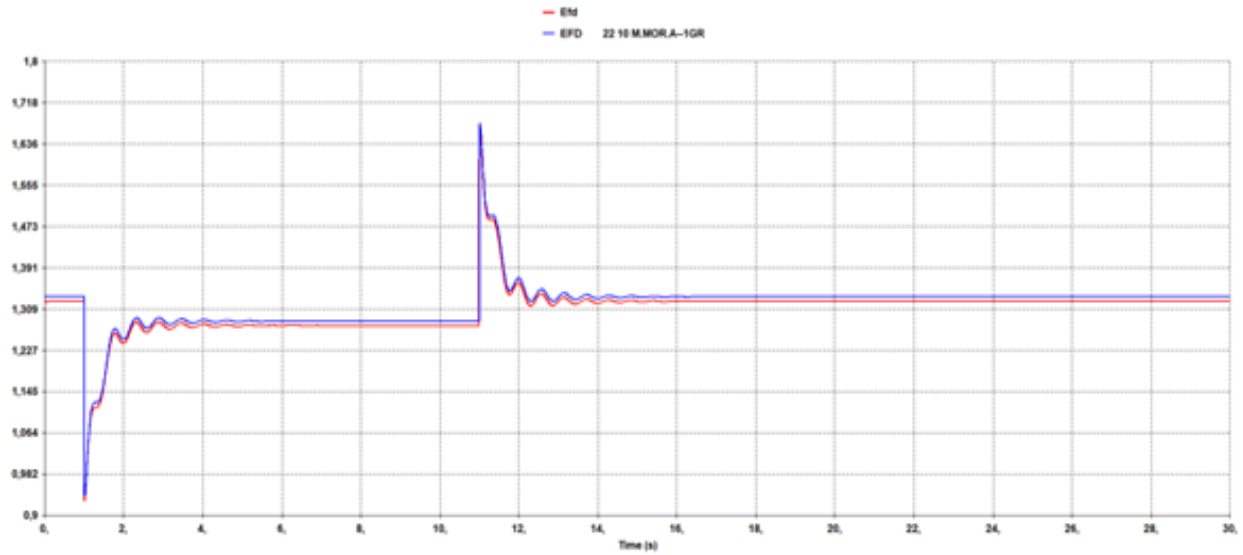

Figura 4-415 - Tensão de campo

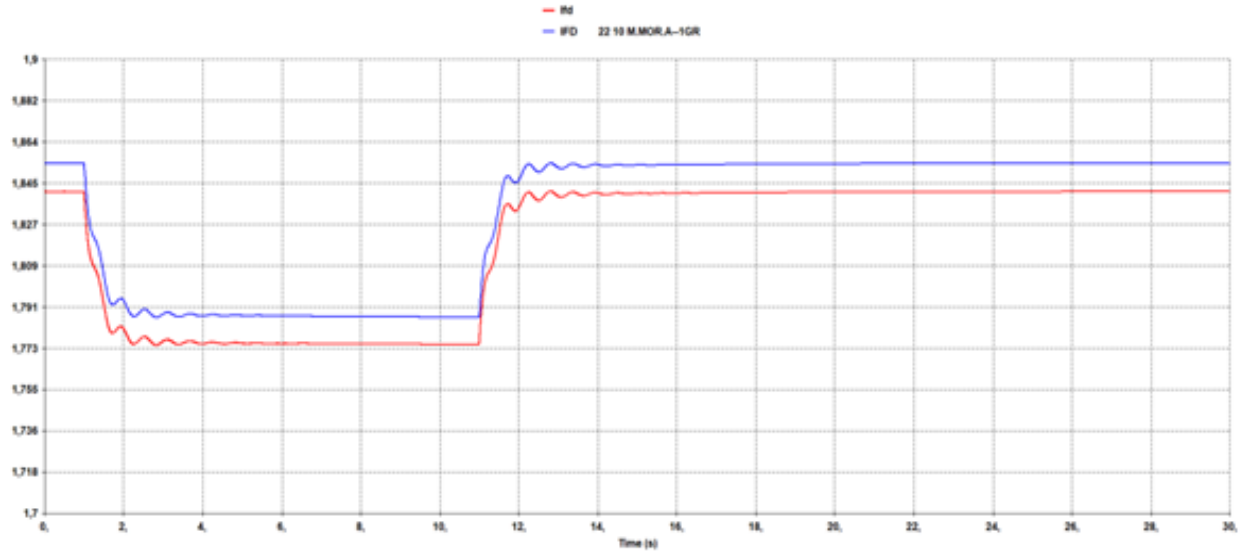

Figura 4-416 - Corrente de campo

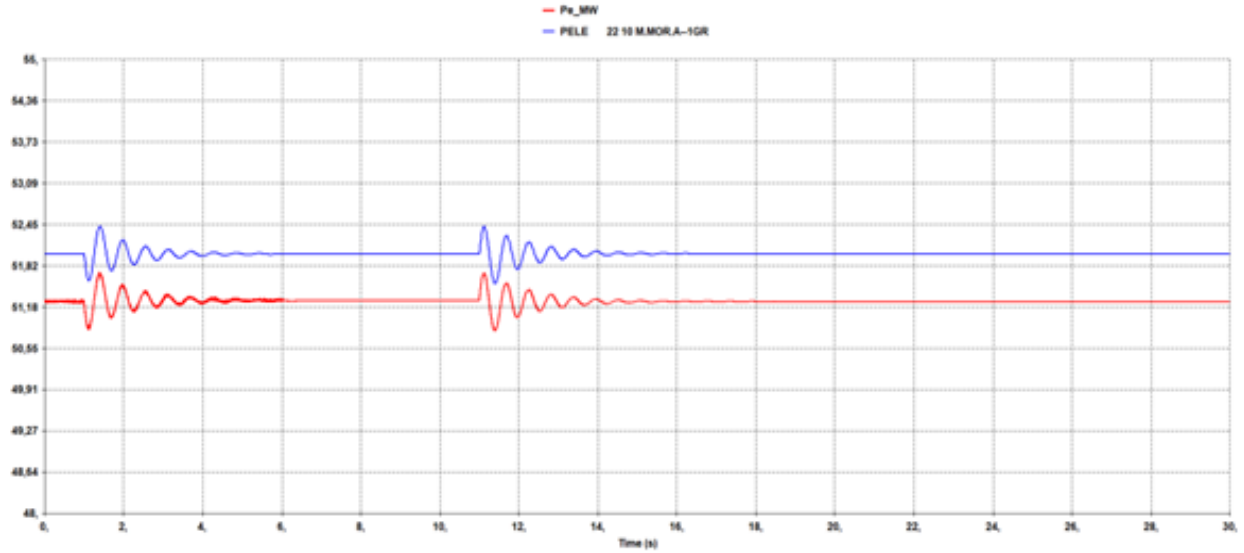

Figura 4-417 - Potência ativa

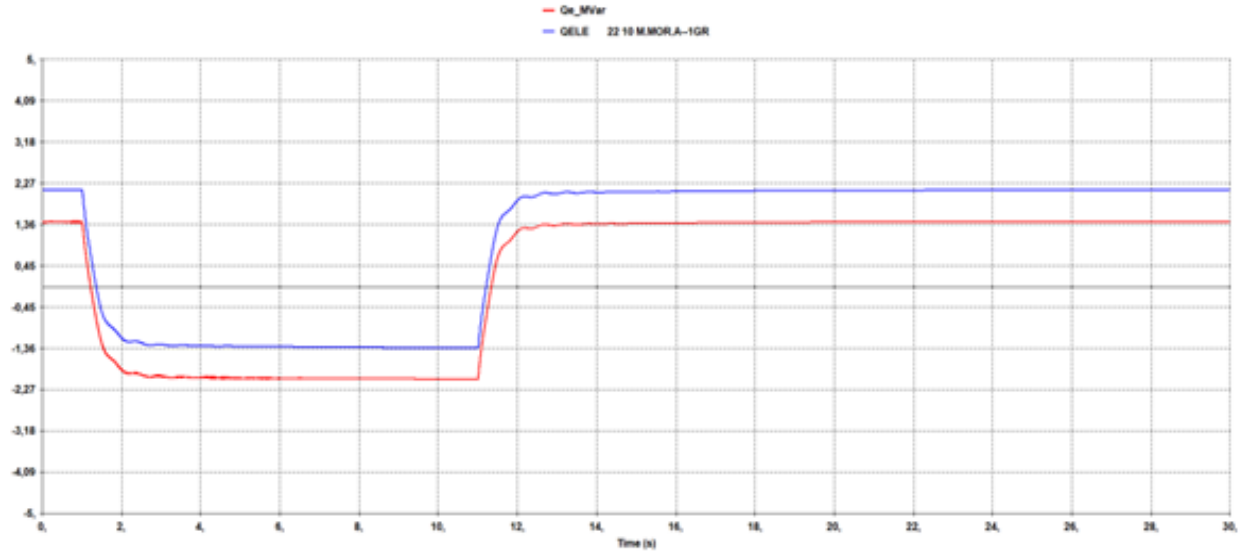

Figura 4-418 - Potência reativa

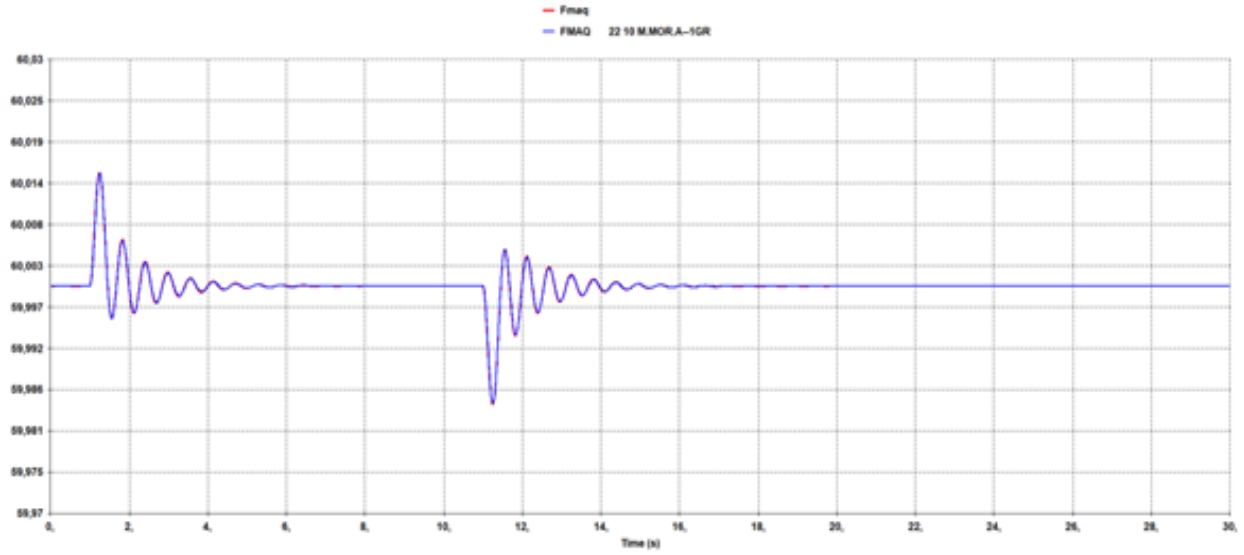

Figura 4-419 - Velocidade da máquina

4.17.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

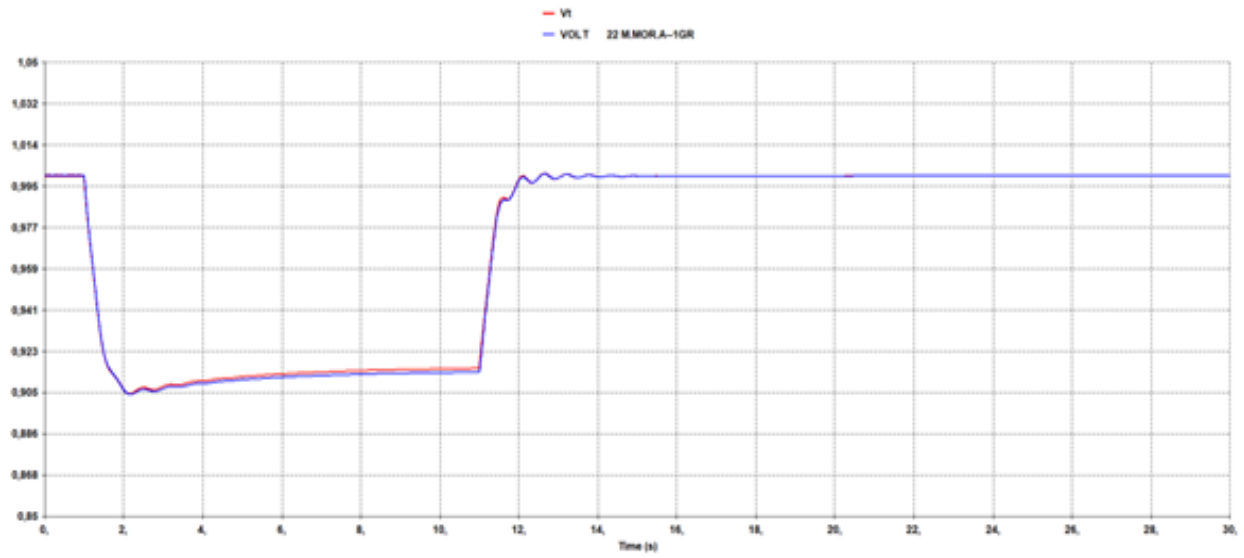

Figura 4-420 - Tensão terminal

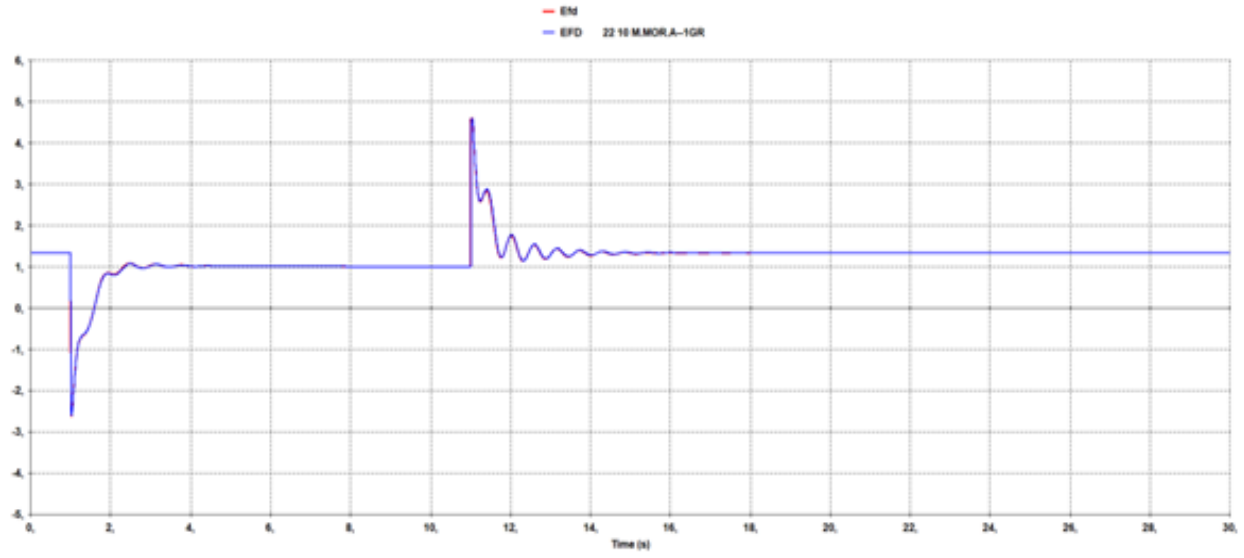

Figura 4-421 - Tensão de campo

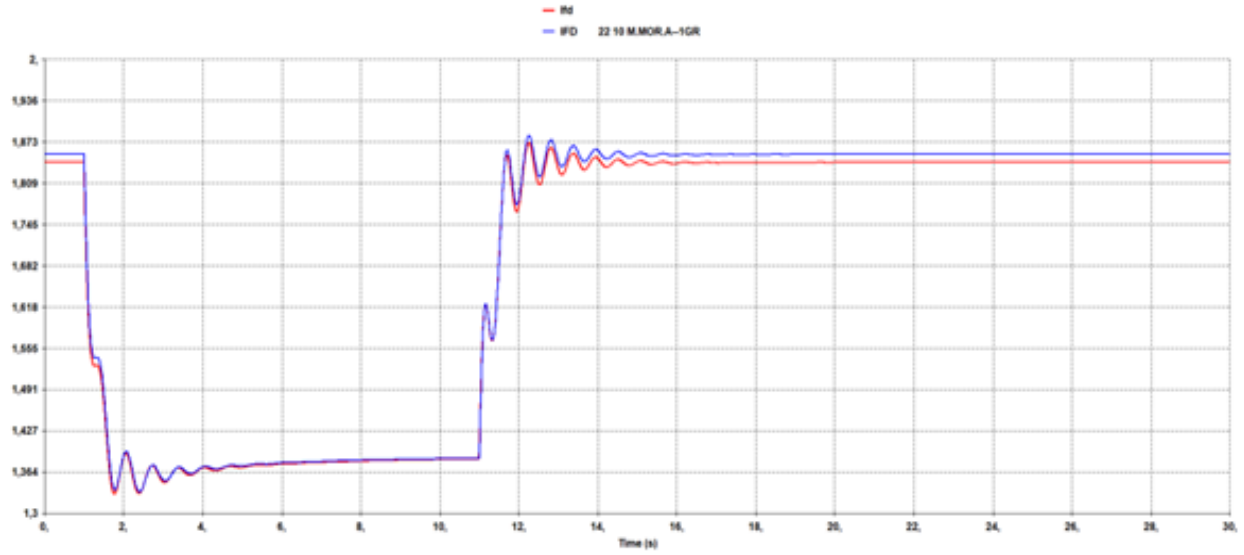

Figura 4-422 - Corrente de campo

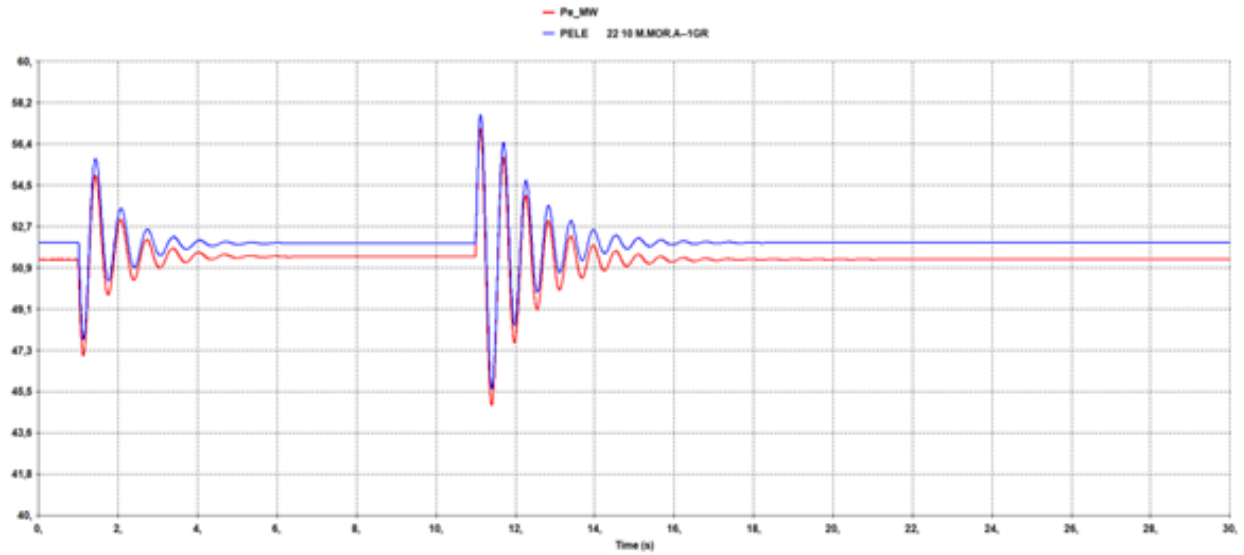

Figura 4-423 - Potência ativa

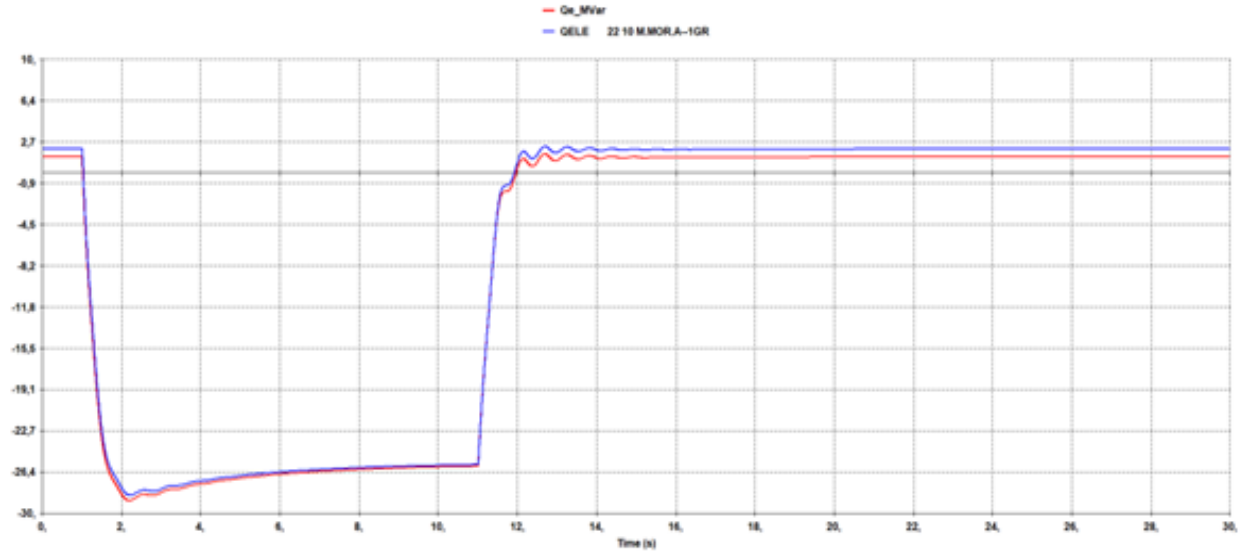

Figura 4-424 - Potência reativa

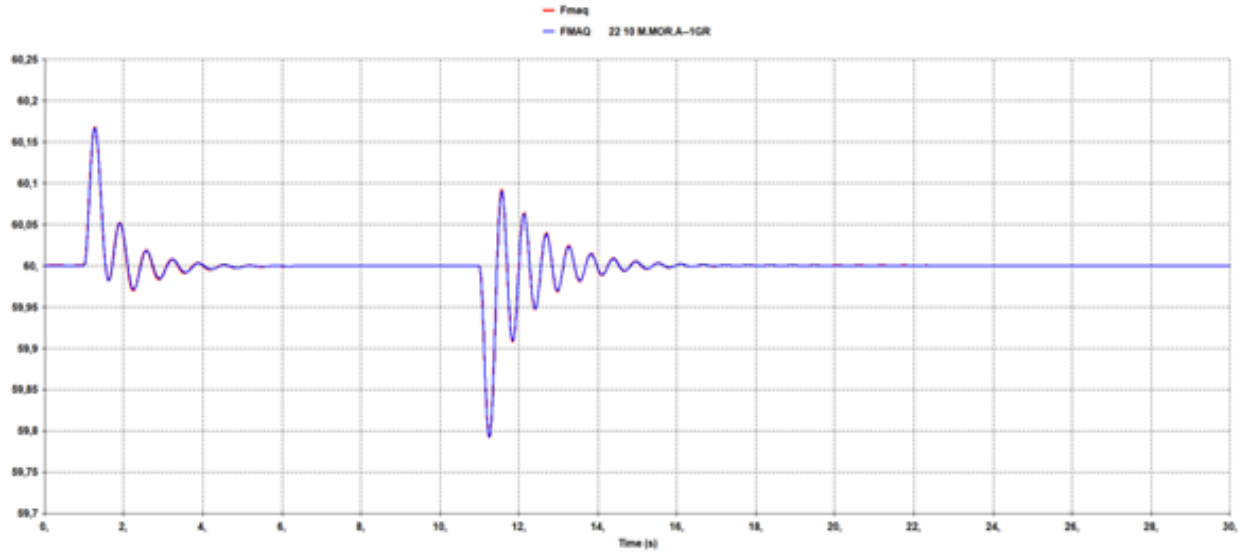

Figura 4-425 - Velocidade da máquina

4.18 UHE ITUMBIARA

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Itumbiara, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.18.1 Modelo da UHE Itumbiara

A Tabela 4-52 apresenta os parâmetros da UHE Itumbiara disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-52 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	73	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	52	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	26	I(KA)	15,27	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	20	H(s)	4,31	
xl(%)	19	D(pu)	0	
T'd(s)	8,3	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,19	Reatância de Potier
T''d(s)	0,06	xd(pu)	0,73	
T''q(s)	0,03	xd_(pu)	0,26	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	8,3	T'd
H(s)	4,31	xd__(pu)	0,2	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,06	T''d
S(MVA)	365	Xq(pu)	0,52	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,2	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,03	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.18.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-53, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Itumbiara estão apresentados na Tabela 4-54.

A partir dos parâmetros da Tabela 4-53, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-54. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-426.

Tabela 4-53 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Itumbiara	
Ag	**Y1**	0,017
Bg	**Y2**	10,125
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-54 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,817	0,800
1,028	0,950
1,075	0,975
1,129	1,000
1,213	1,033
1,321	1,067
1,455	1,100
2,176	1,200
3,986	1,300

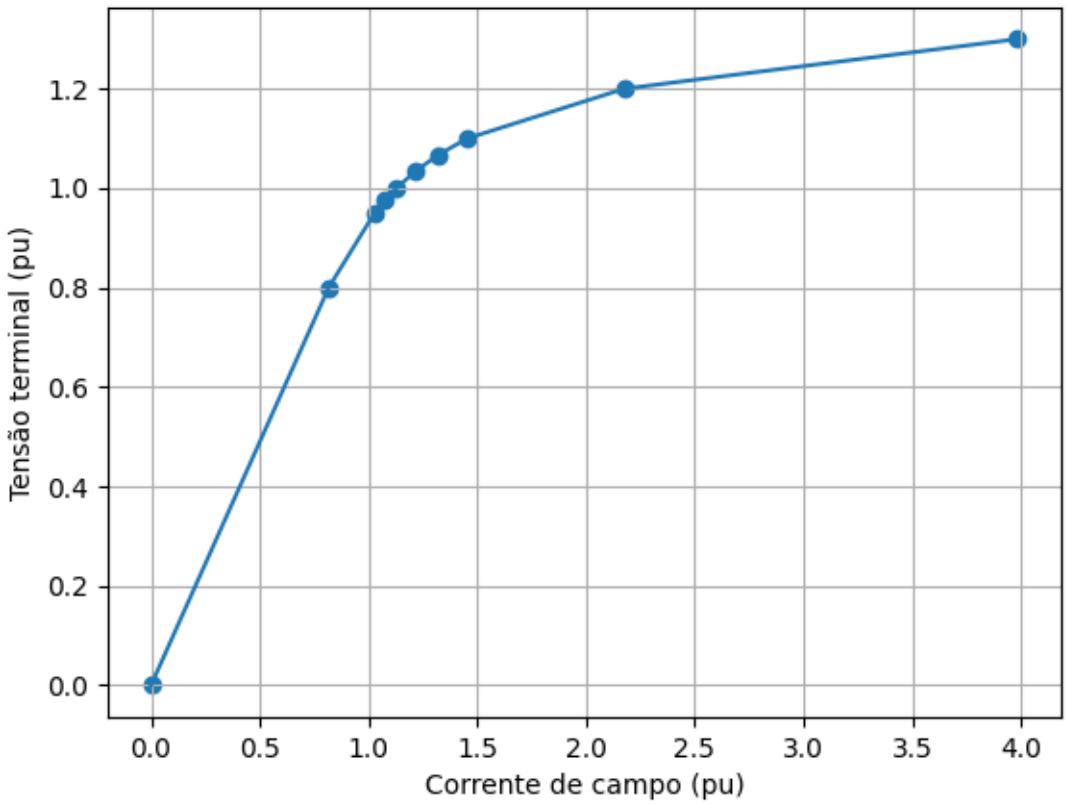

Figura 4-426 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.18.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.18.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.18.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.18.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

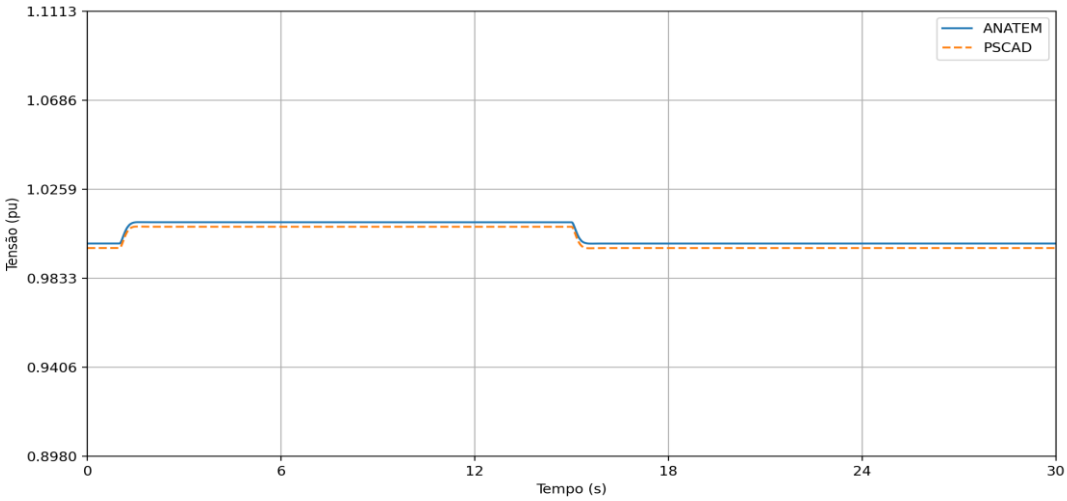

Figura 4-427 - Tensão terminal

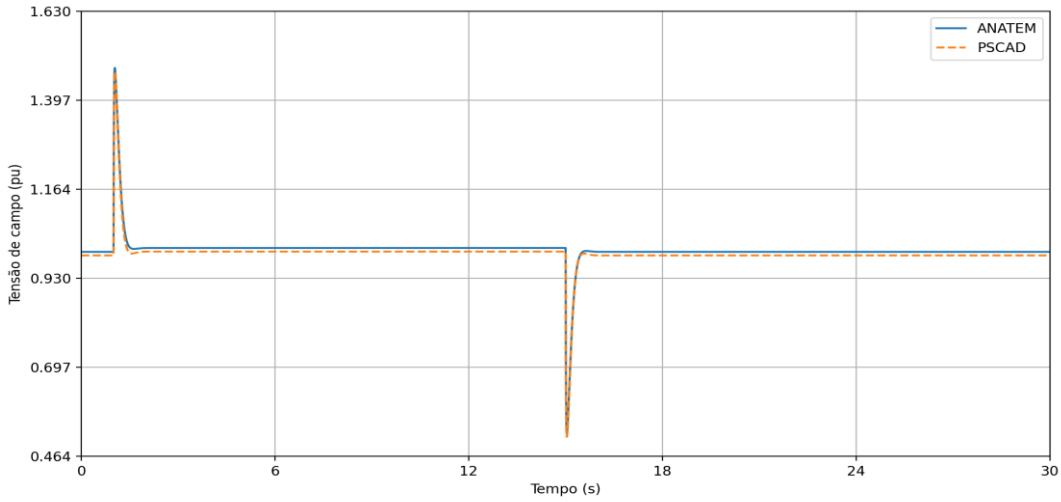

Figura 4-428 - Tensão de campo

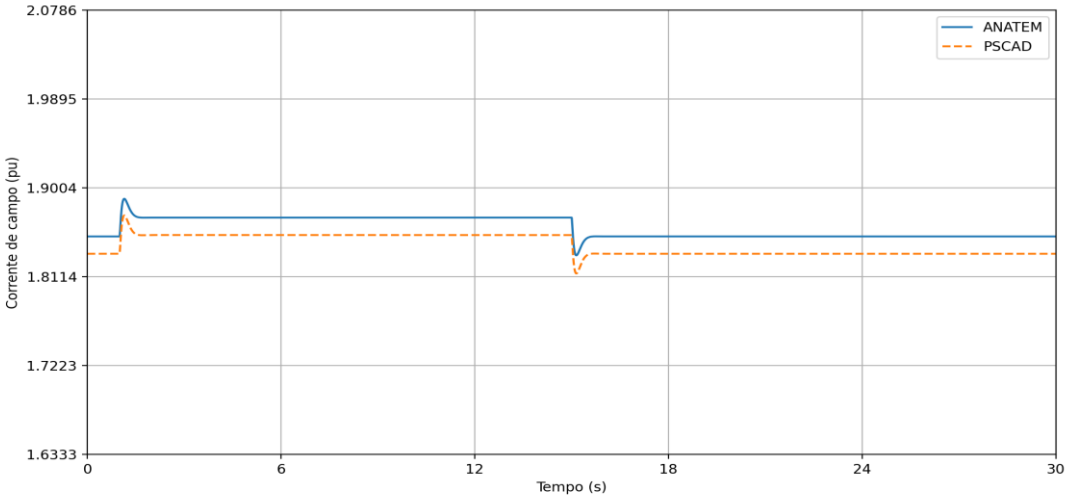

Figura 4-429 - Corrente de campo

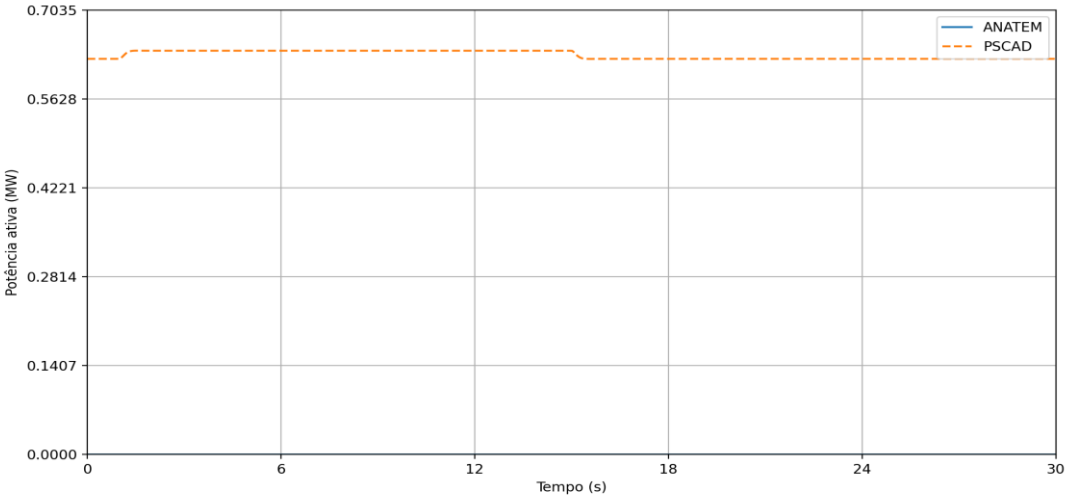

Figura 4-430 - Potência ativa

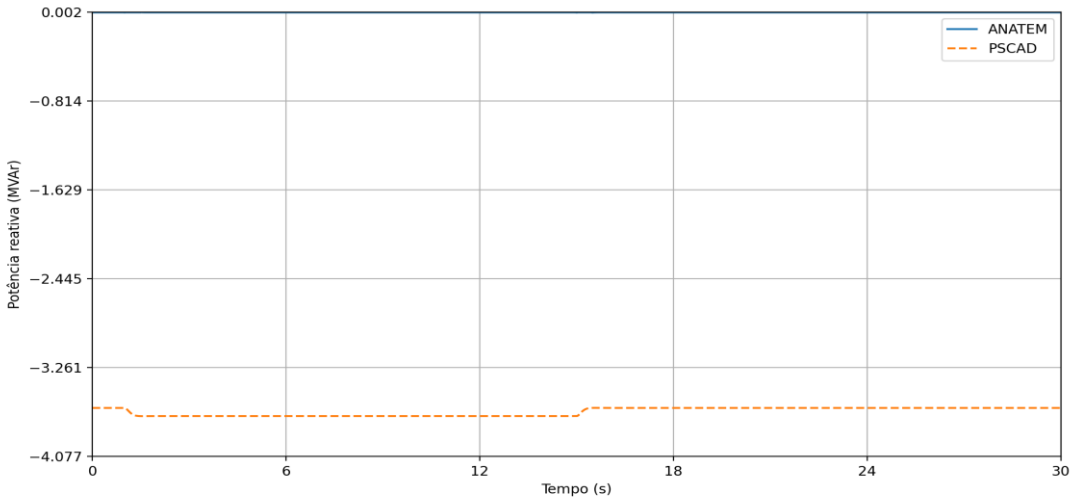

Figura 4-431 - Potência reativa

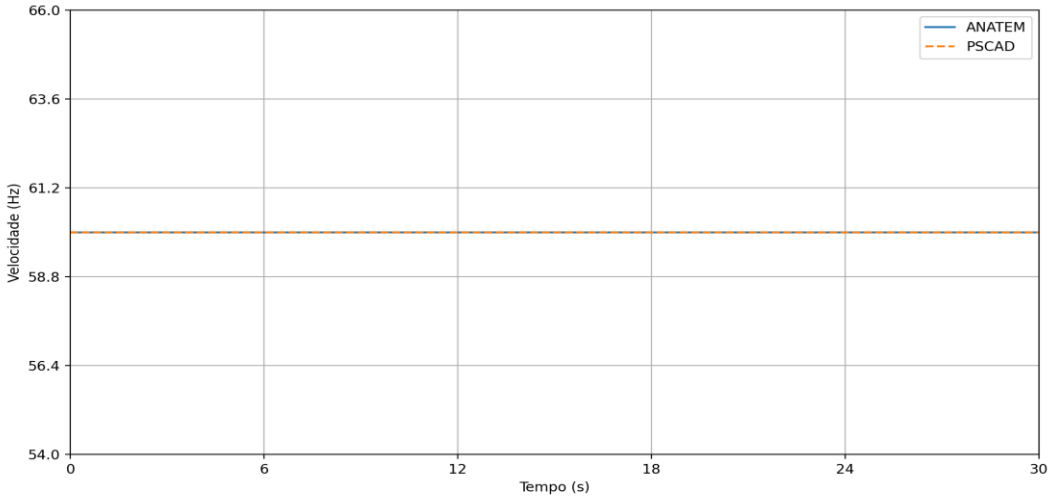

Figura 4-432 - Velocidade da máquina

4.18.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

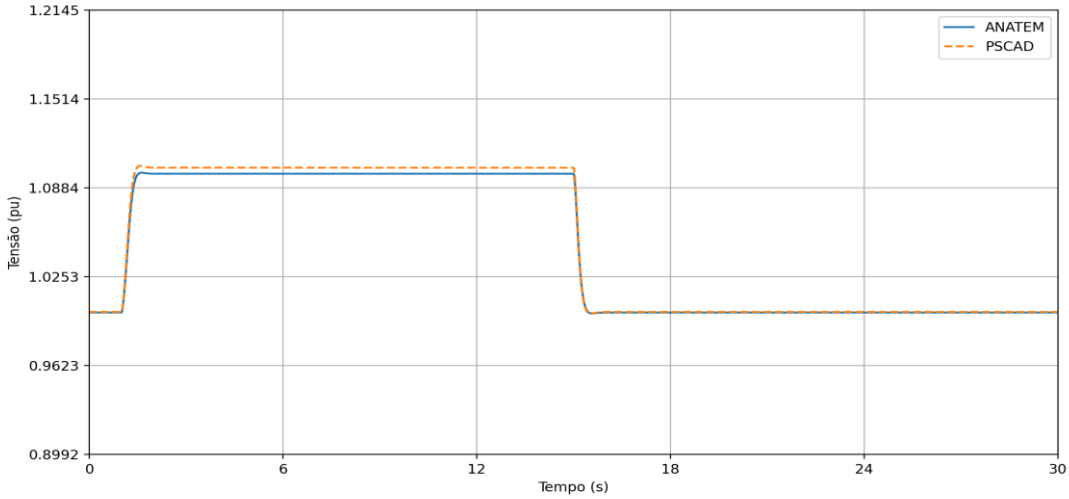

Figura 4-433 - Tensão terminal

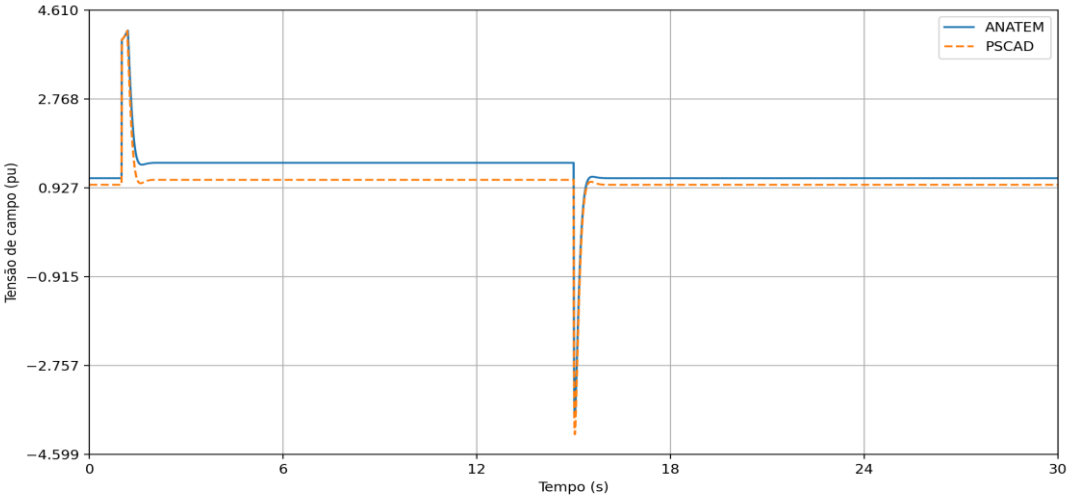

Figura 4-434 - Tensão de campo

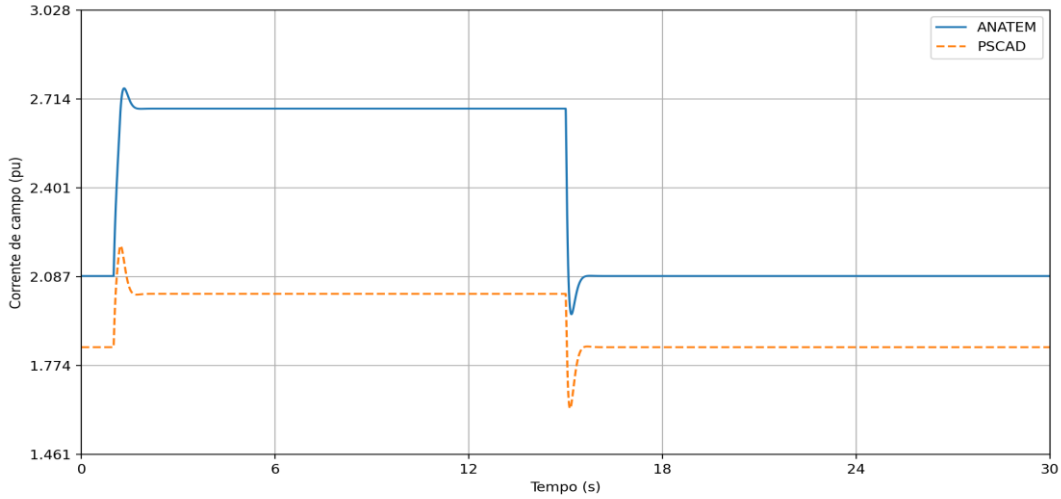

Figura 4-435 - Corrente de campo

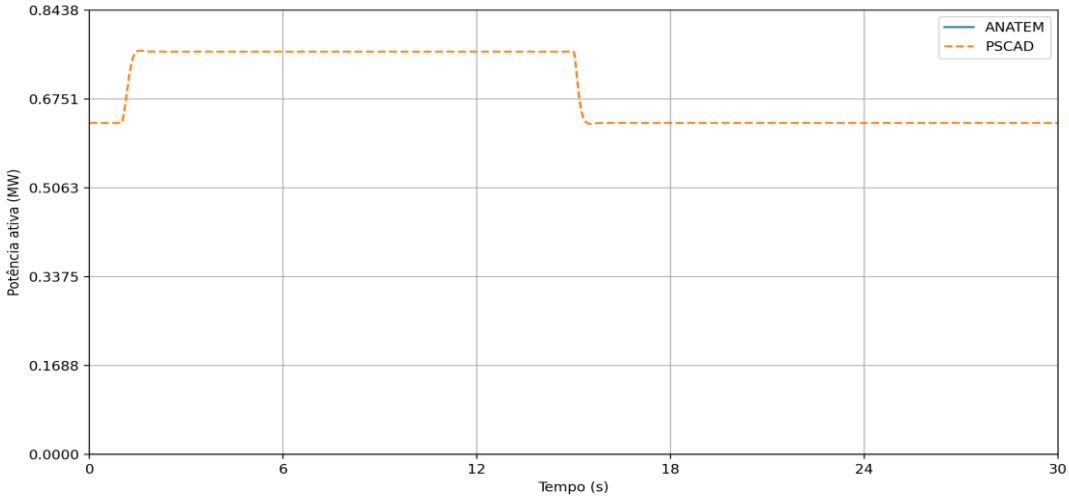

Figura 4-436 - Potência ativa

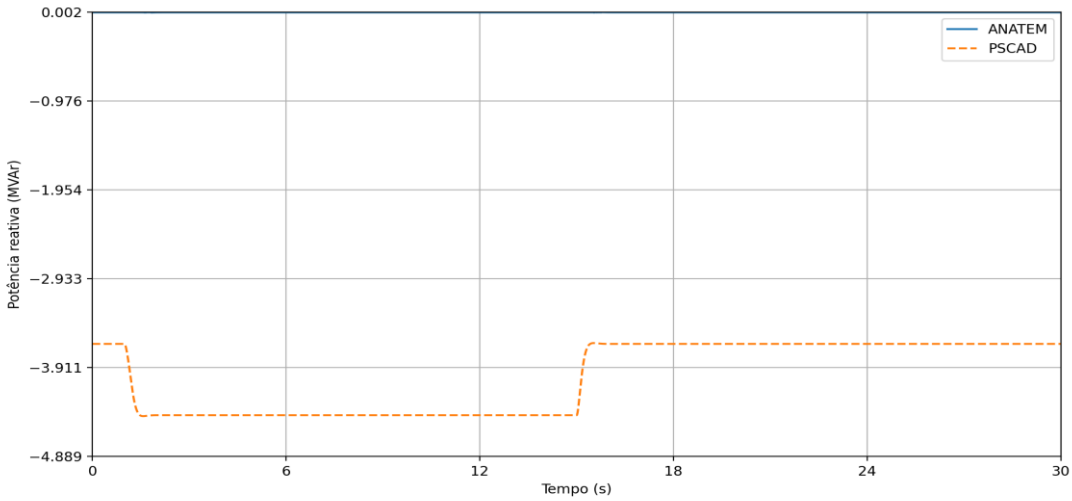

Figura 4-437 - Potência reativa

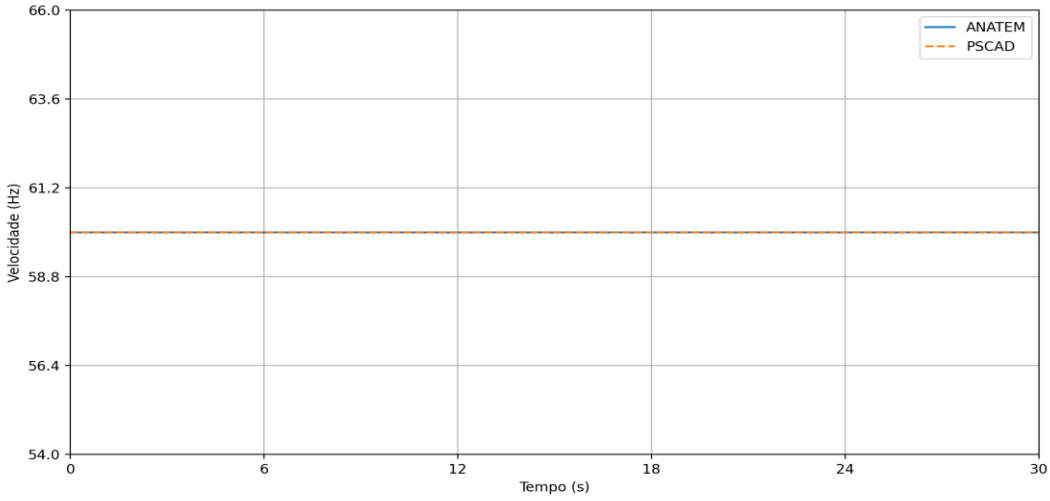

Figura 4-438 - Velocidade da máquina

4.18.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.18.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.18.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.18.4.3.

4.18.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

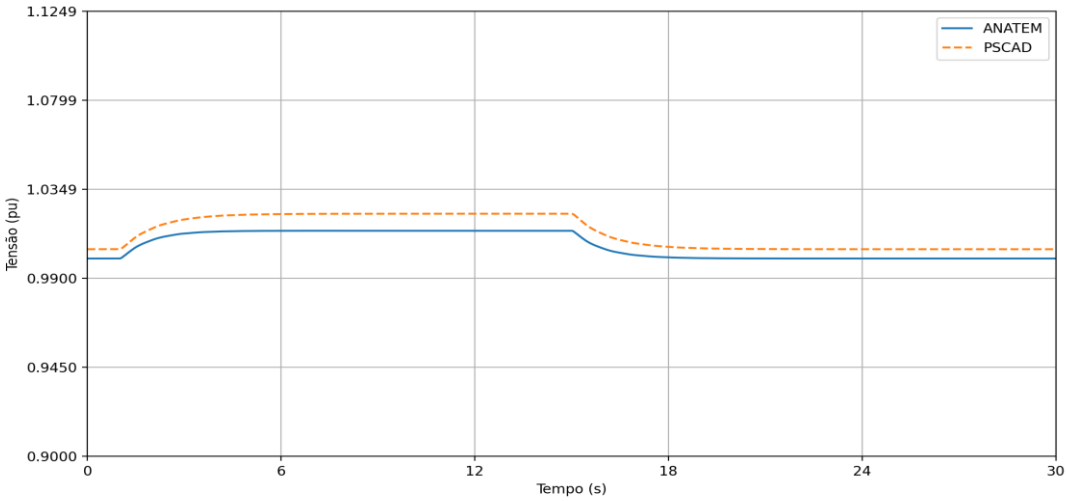

Figura 4-439 - Tensão terminal

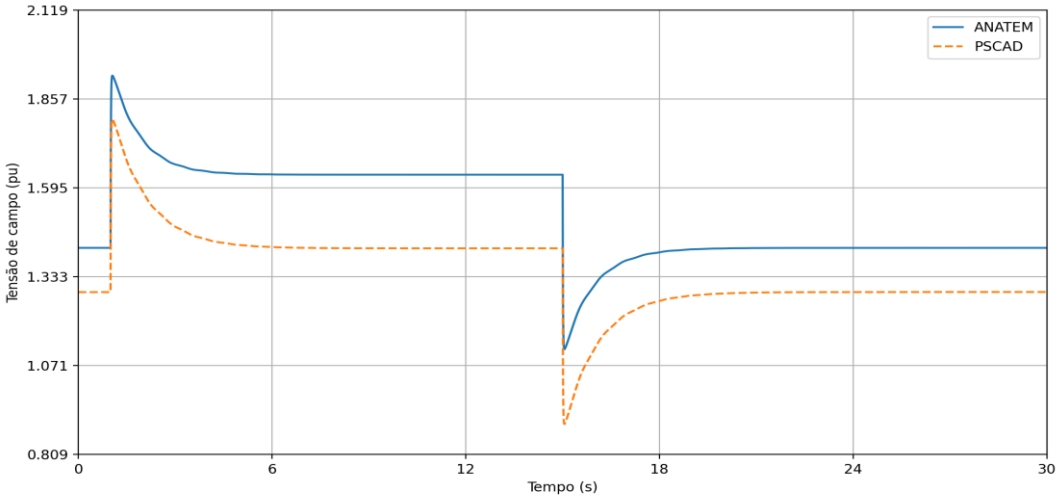

Figura 4-440 - Tensão de campo

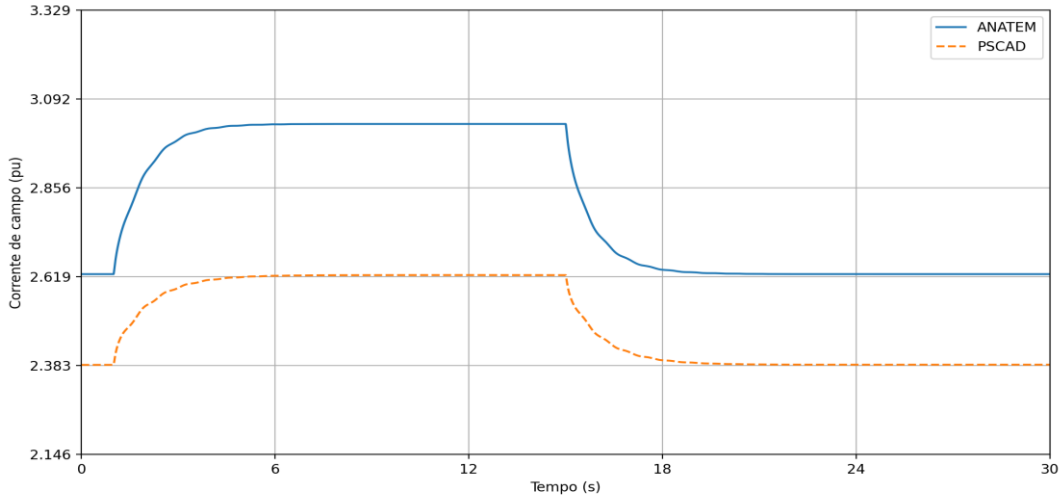

Figura 4-441 - Corrente de campo

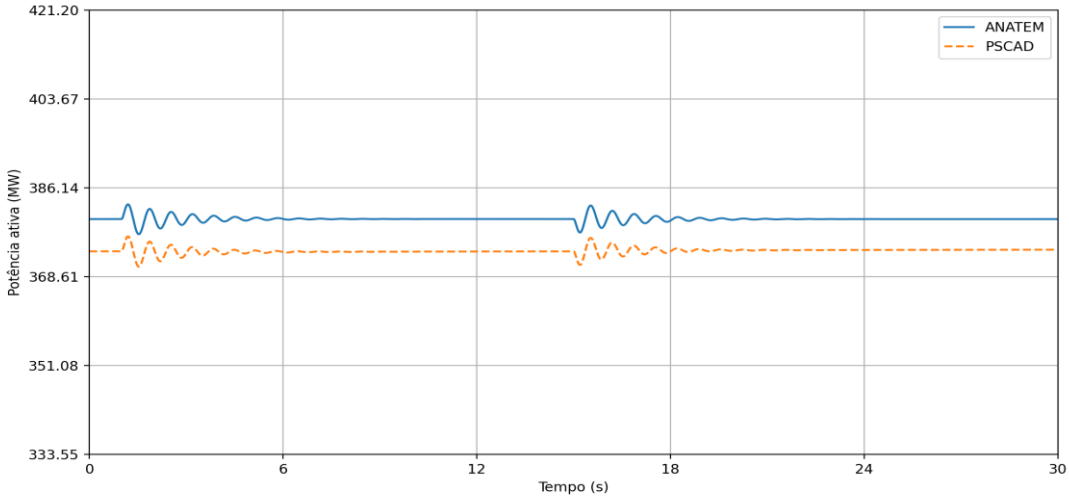

Figura 4-442 - Potência ativa

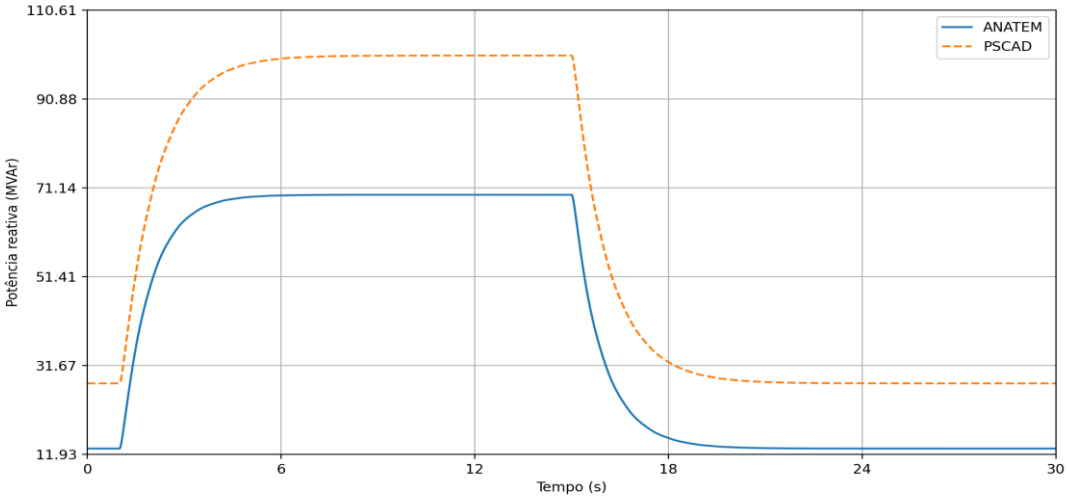

Figura 4-443 - Potência reativa

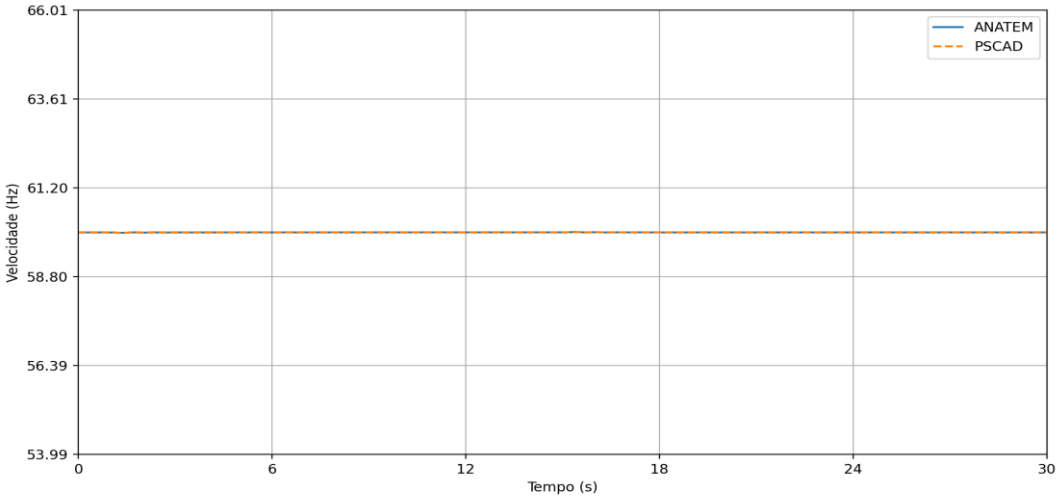

Figura 4-444 - Velocidade da máquina

4.18.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

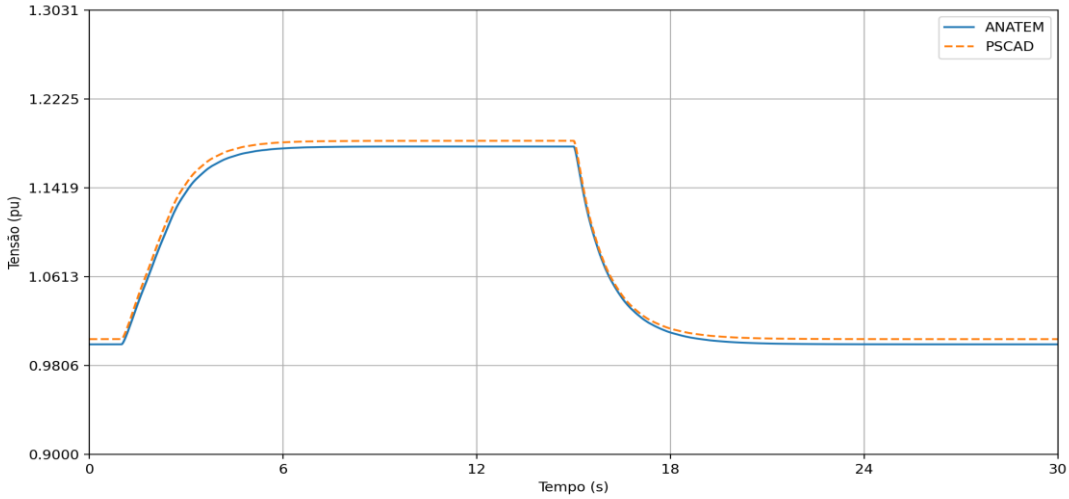

Figura 4-445 - Tensão terminal

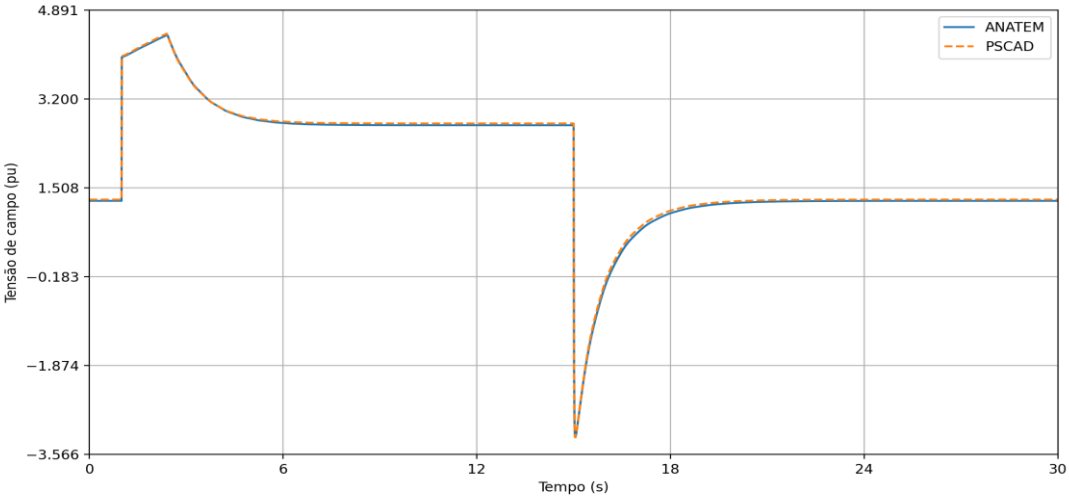

Figura 4-446 - Tensão de campo

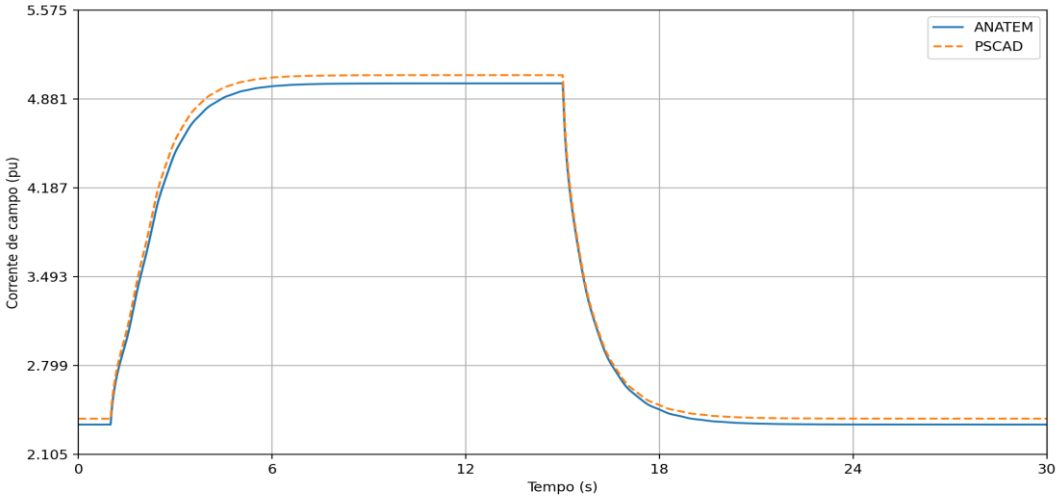

Figura 4-447 - Corrente de campo

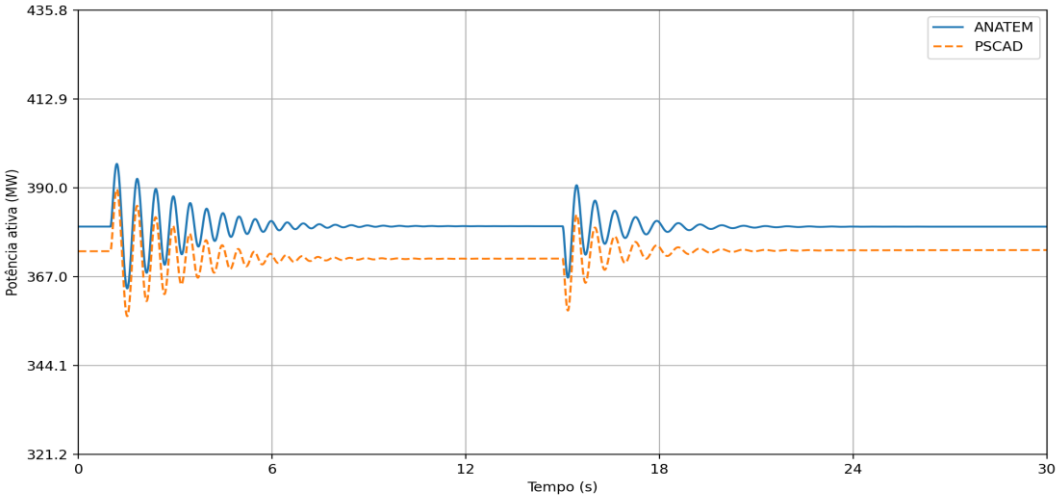

Figura 4-448 - Potência ativa

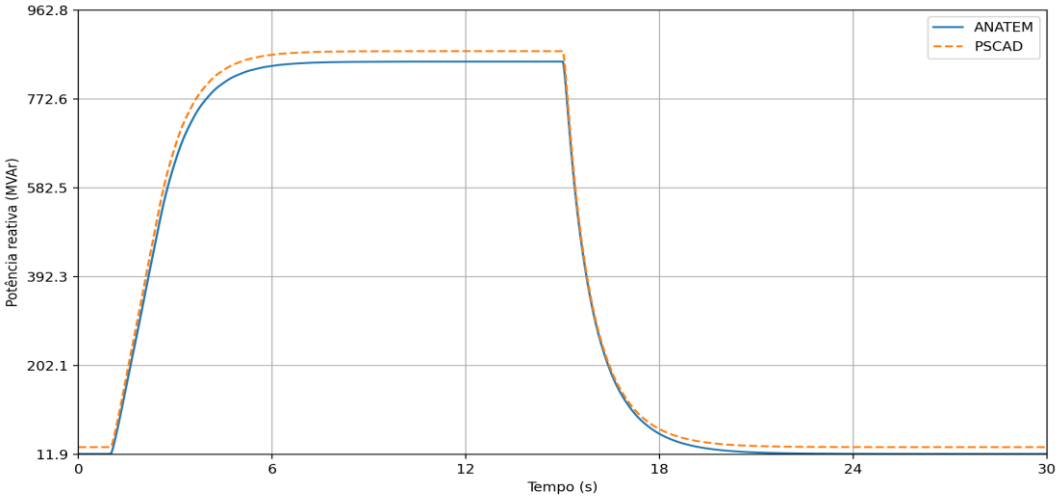

Figura 4-449 - Potência reativa

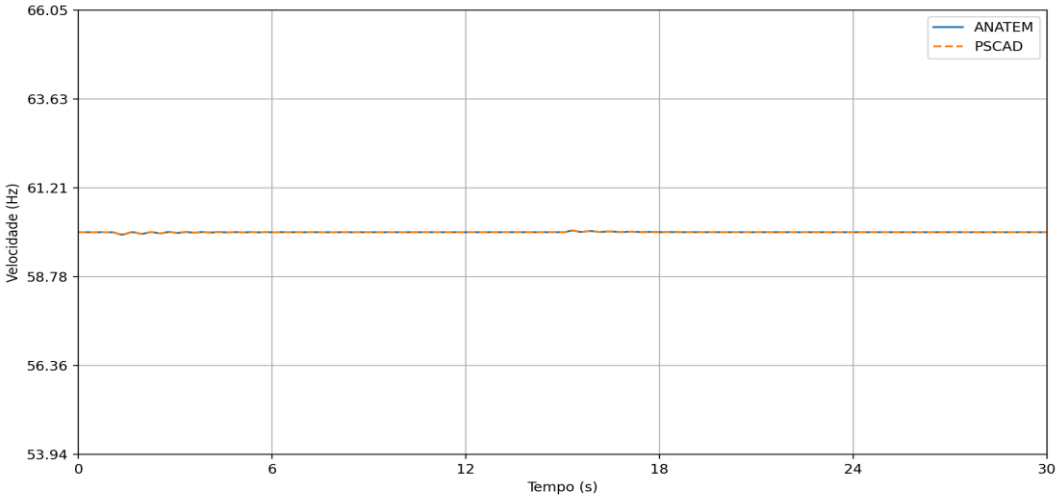

Figura 4-450 - Velocidade da máquina

4.18.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

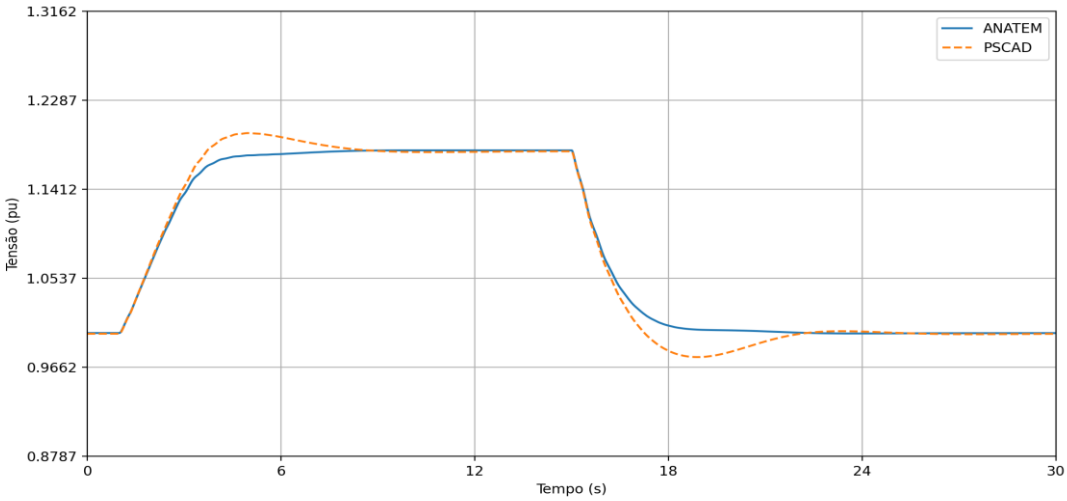

Figura 4-451 - Tensão terminal

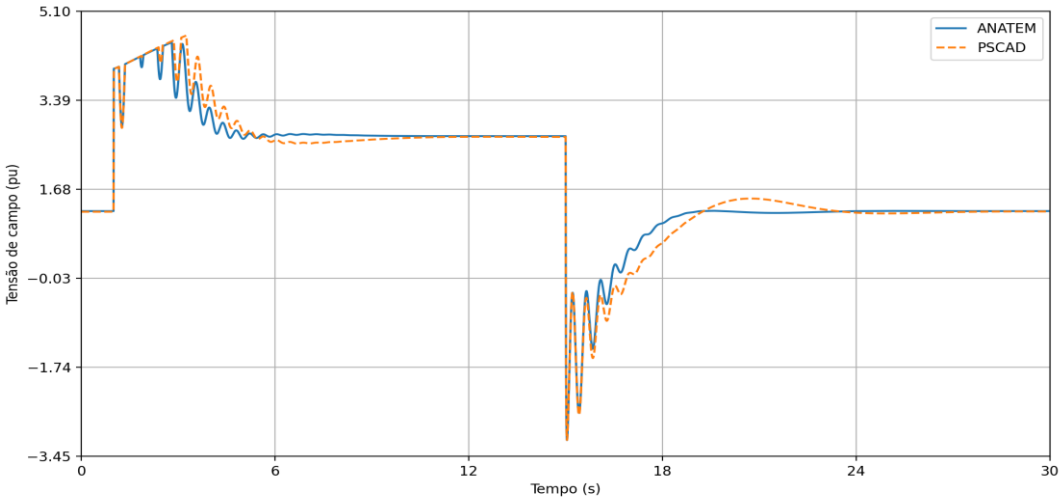

Figura 4-452 - Tensão de campo

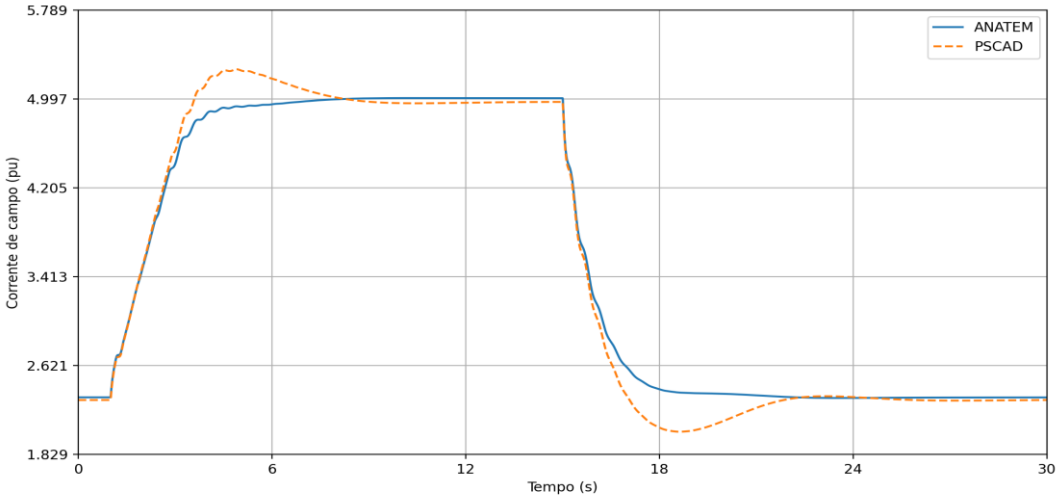

Figura 4-453 - Corrente de campo

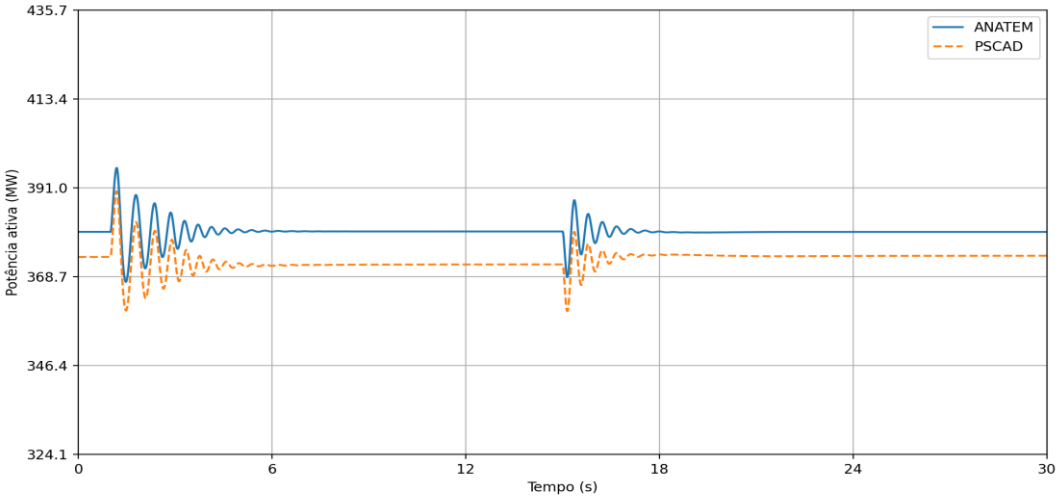

Figura 4-454 - Potência ativa

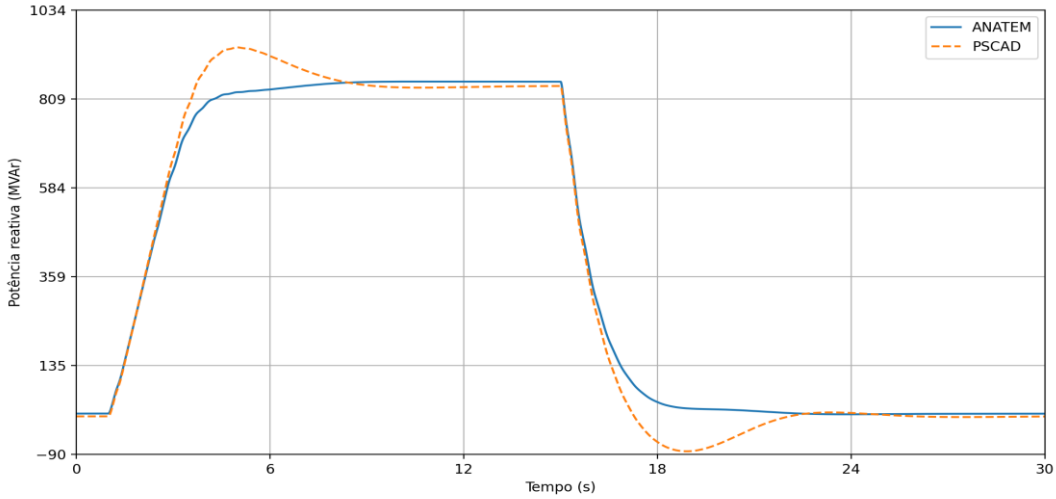

Figura 4-455 - Potência reativa

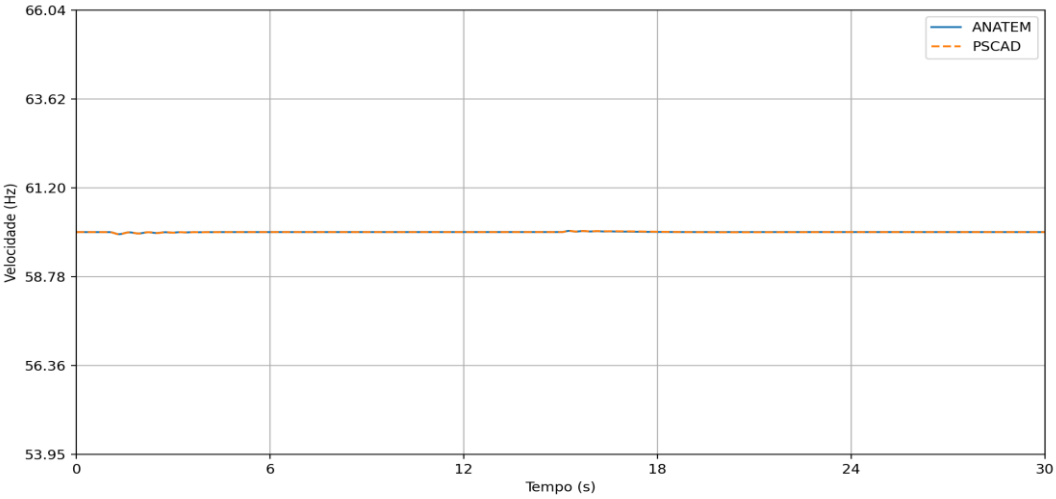

Figura 4-456 - Velocidade da máquina

4.19 CS FURNAS

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Furnas, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.19.1 Modelo do CS Furnas

A Tabela 4-55 apresenta os parâmetros do CS Furnas disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-55 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	76,3	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	56	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	29	I(KA)	6,694	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	20,5	H(s)	5	
xl(%)	12	D(pu)	0	
T'd(s)	5	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,12	Reatância de Potier
T''d(s)	0,085	xd(pu)	0,763	
T''q(s)	0,285	xd_(pu)	0,29	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	5	T'd
H(s)	5	xd__(pu)	0,205	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,085	T''d
S(MVA)	160	Xq(pu)	0,56	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,205	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,285	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.19.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-56, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Furnas estão apresentados na Tabela 4-57. A

partir dos parâmetros da Tabela 4-56, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-57. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-457.

Tabela 4-56 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Furnas	
Ag	**Y1**	0,0177
Bg	**Y2**	7,6795
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-57 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,818	0,800
1,006	0,950
1,043	0,975
1,082	1,000
1,139	1,033
1,205	1,067
1,277	1,100
1,582	1,200
2,123	1,300

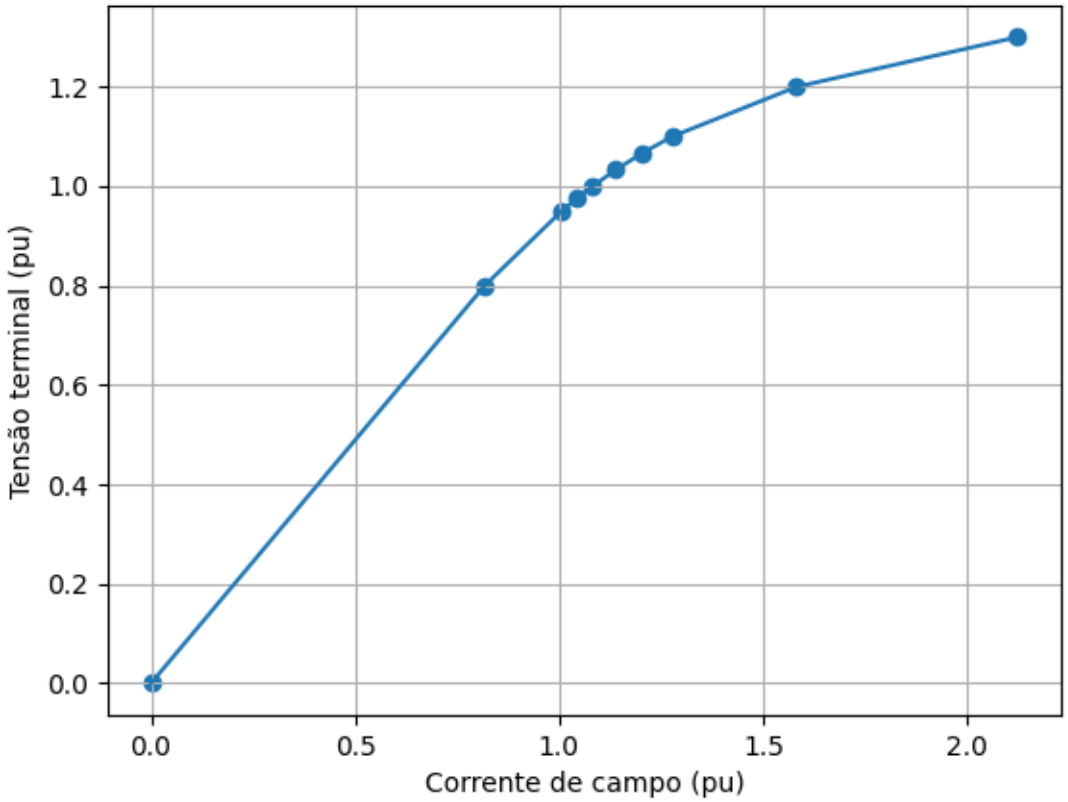

Figura 4-457 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.19.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.19.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.19.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.19.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

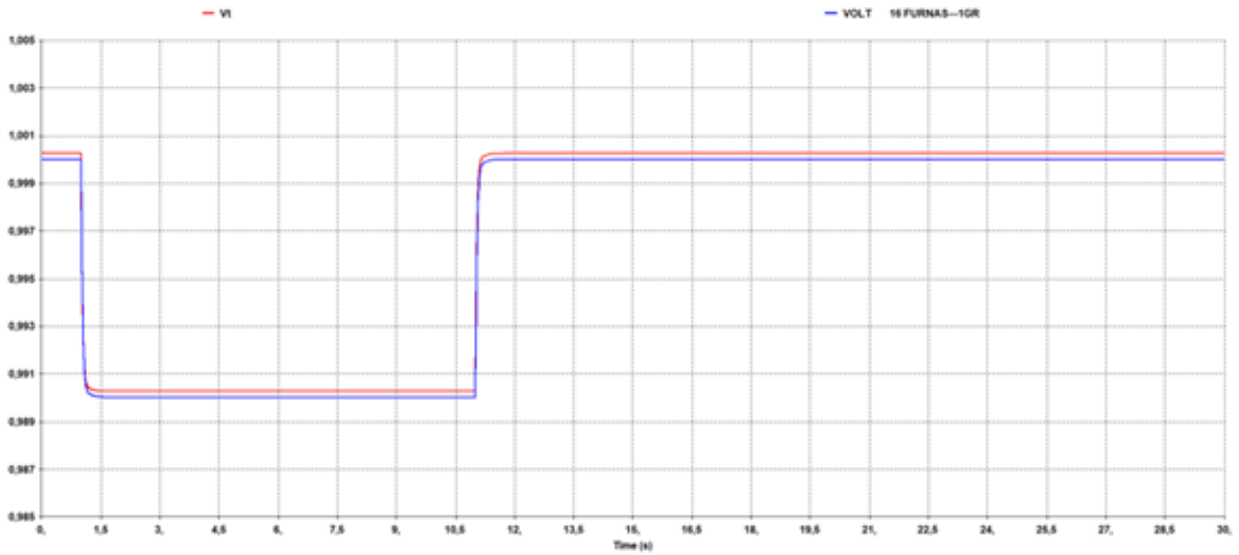

Figura 4-458 - Tensão terminal

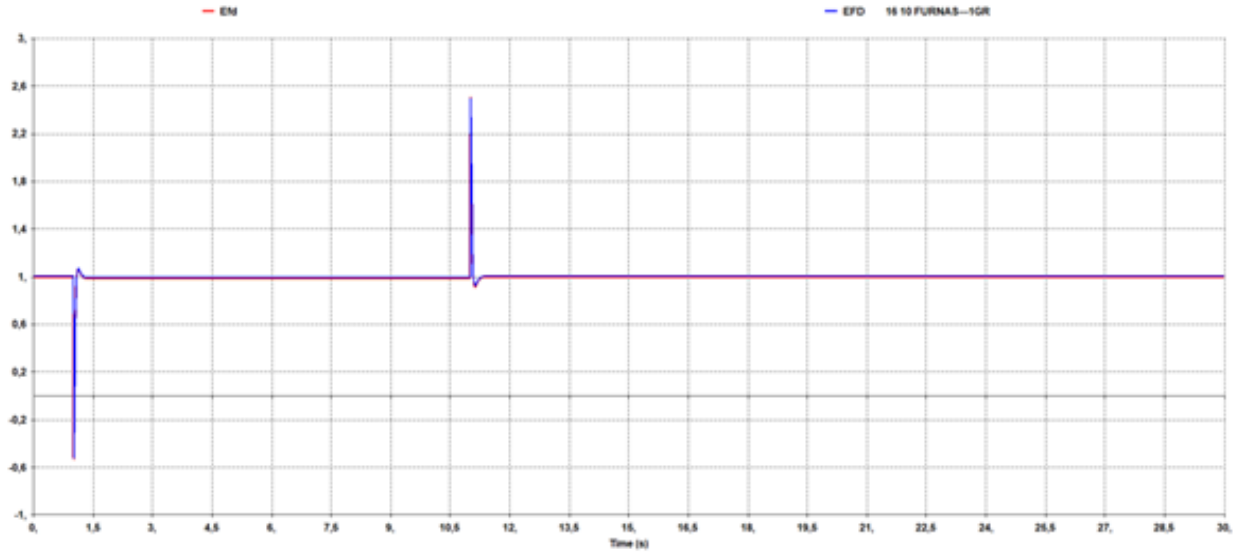

Figura 4-459 - Tensão de campo

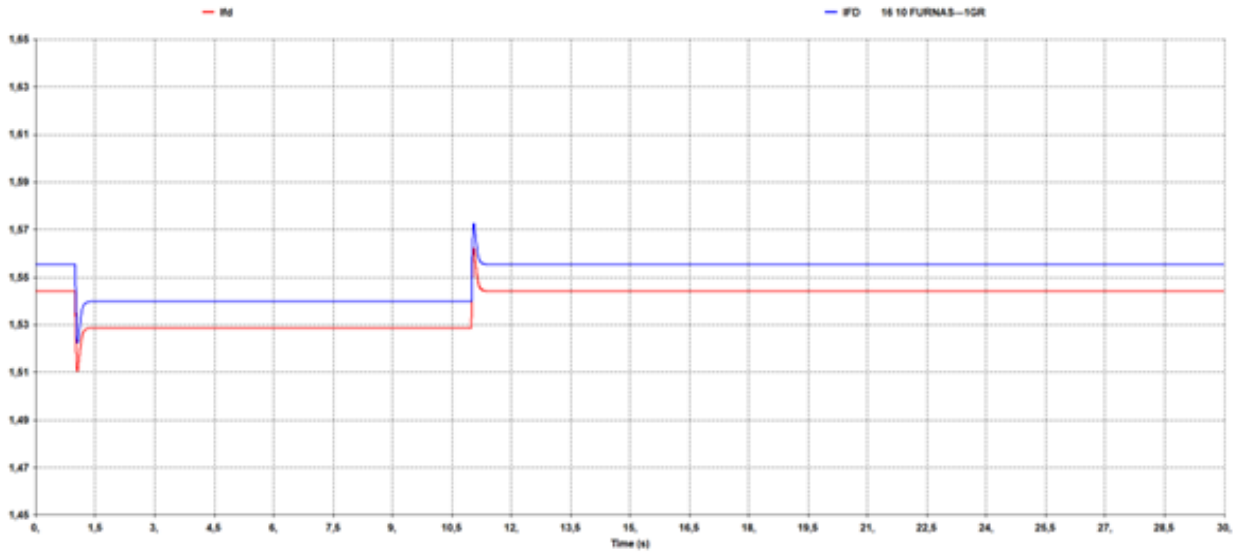

Figura 4-460 - Corrente de campo

4.19.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

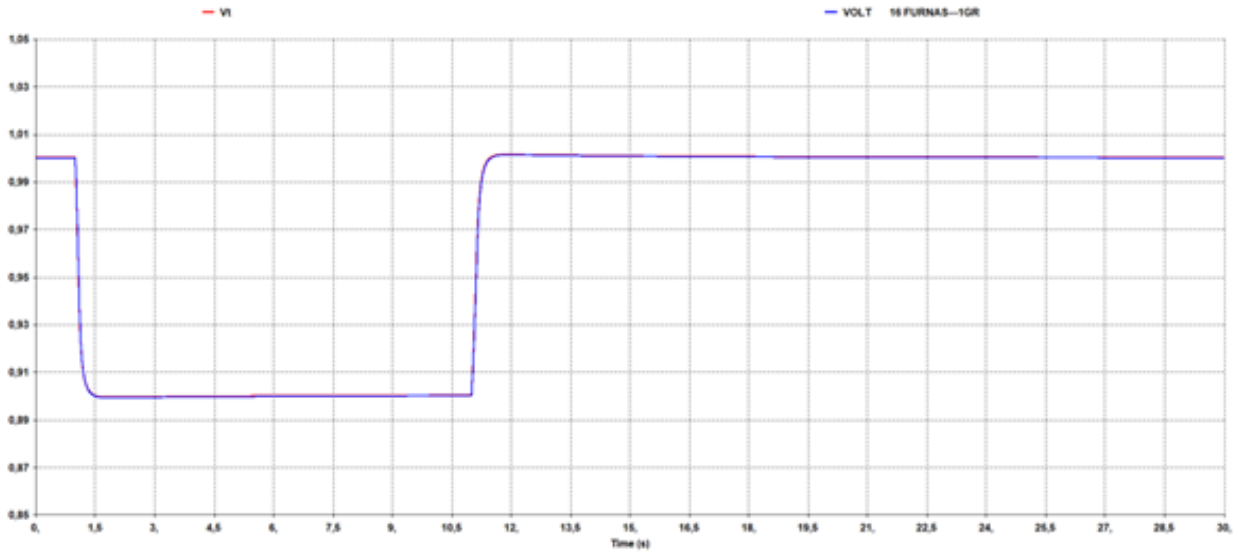

Figura 4-461 - Tensão terminal

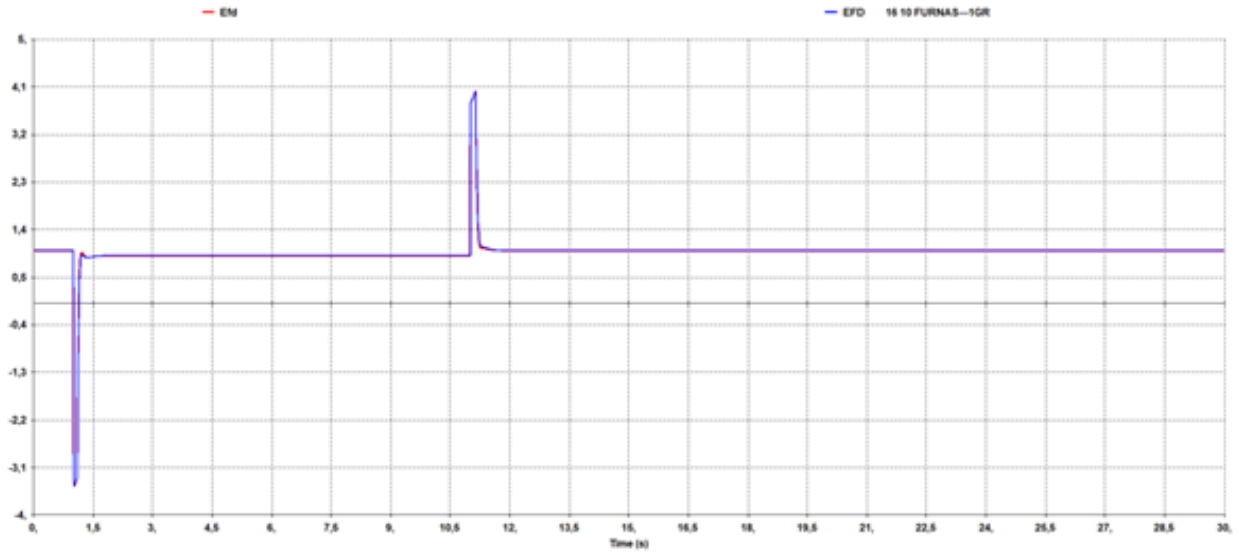

Figura 4-462 - Tensão de campo

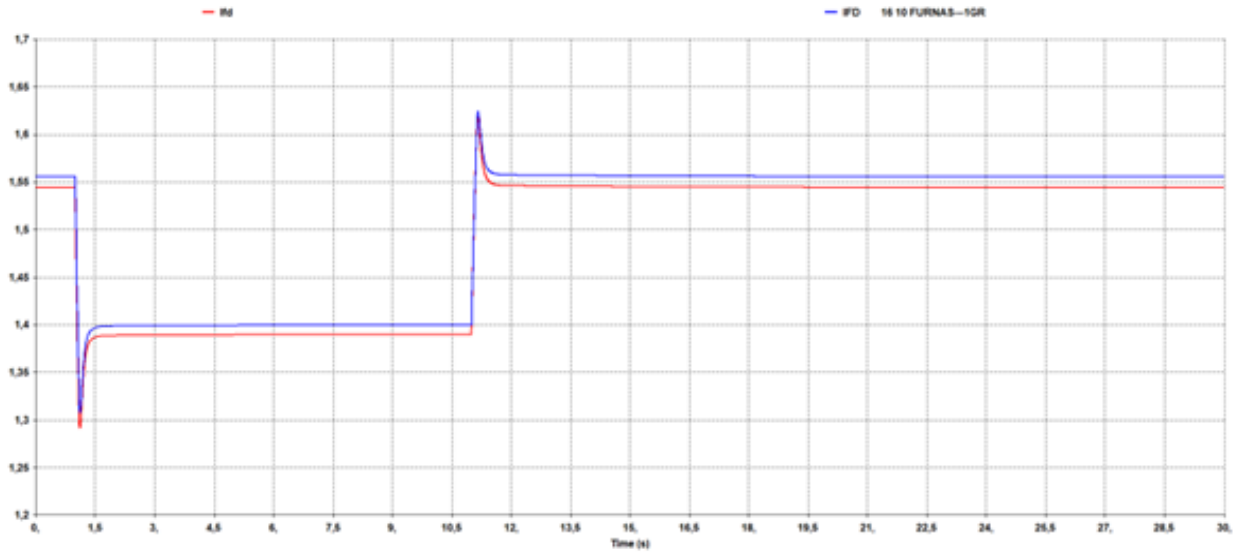

Figura 4-463 - Corrente de campo

4.19.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.19.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.19.4.2.

4.19.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

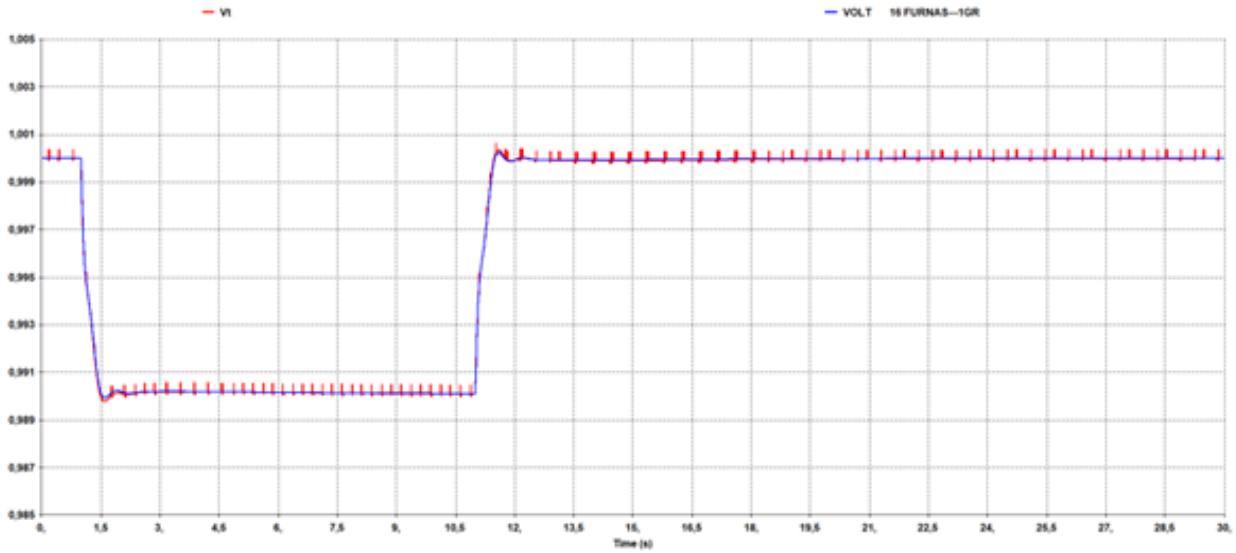

Figura 4-464 - Tensão terminal

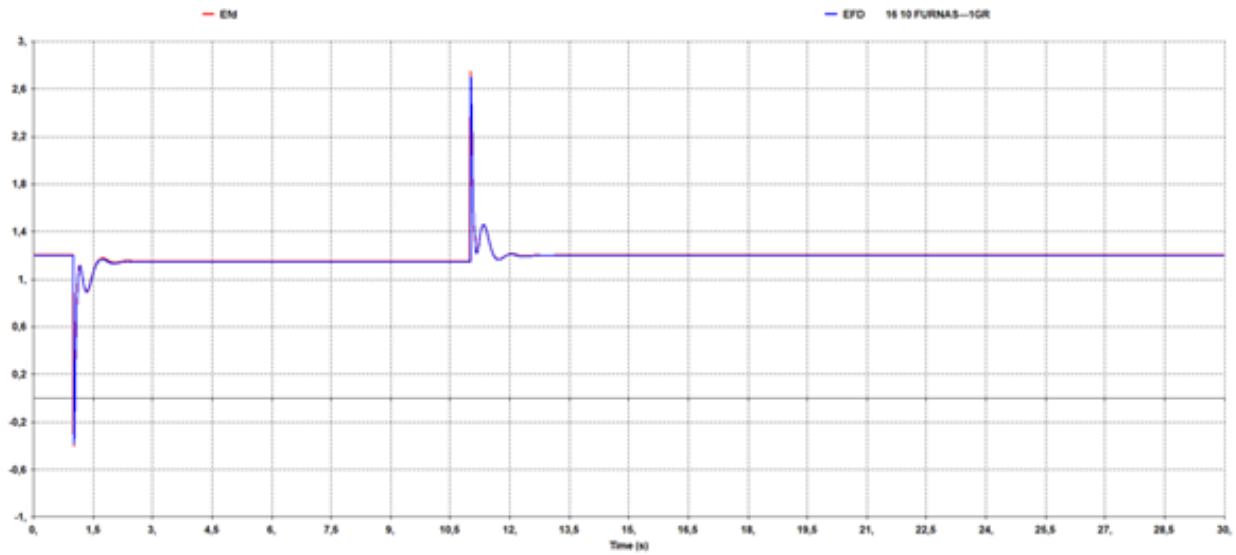

Figura 4-465 - Tensão de campo

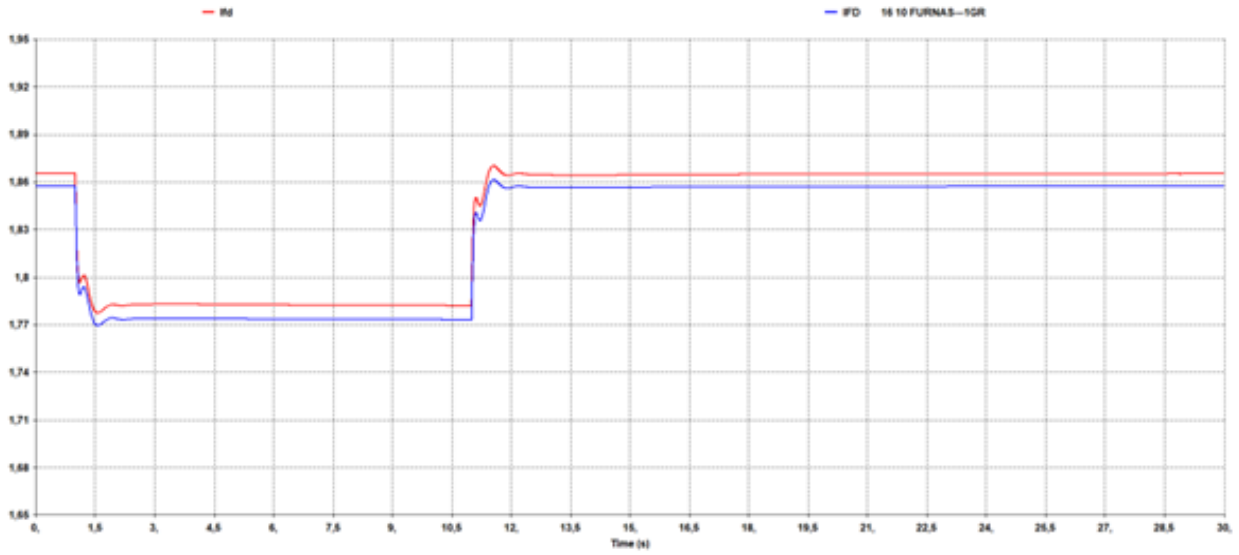

Figura 4-466 - Corrente de campo

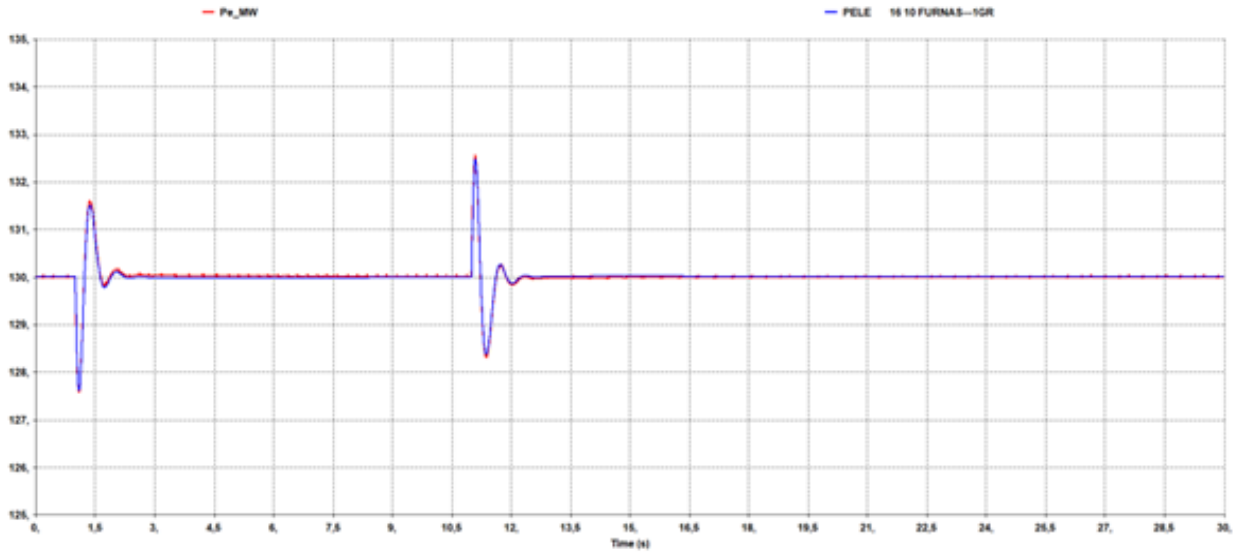

Figura 4-467 - Potência ativa

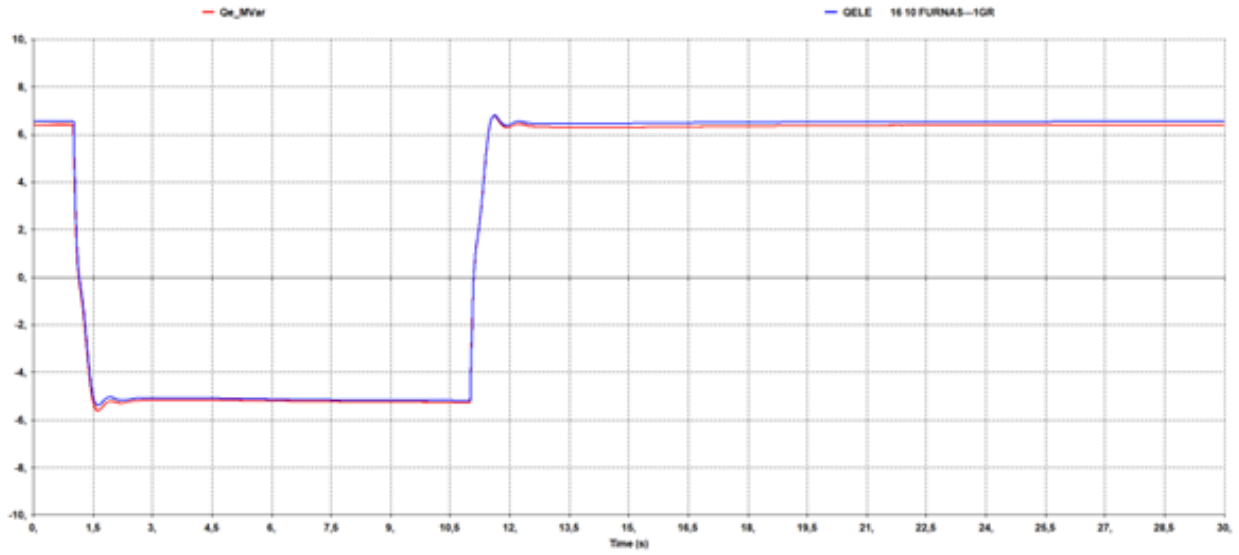

Figura 4-468 - Potência reativa

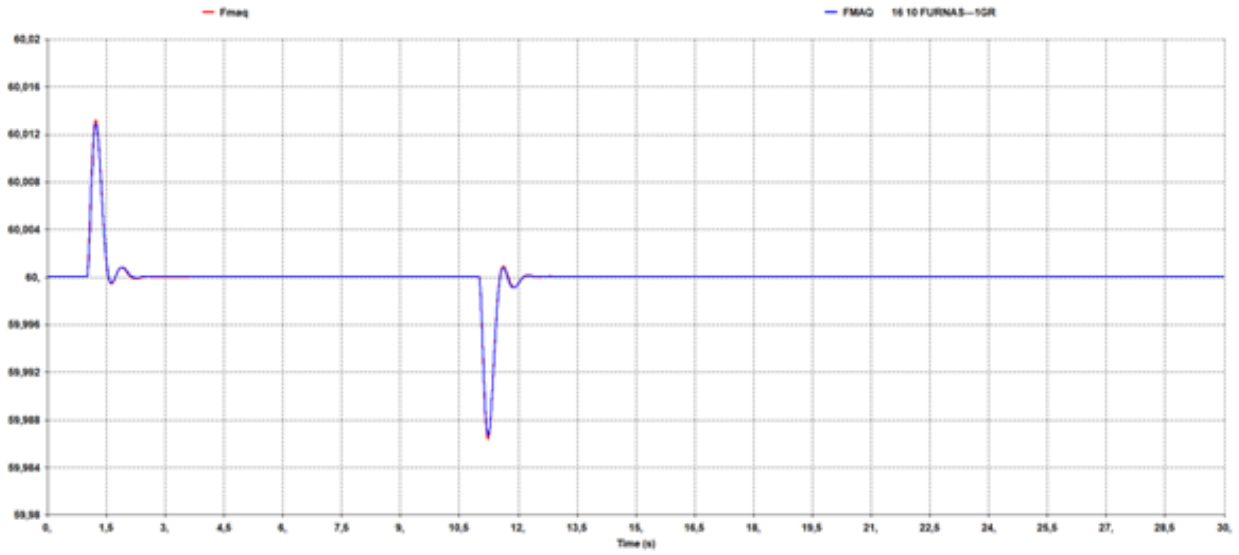

Figura 4-469 - Velocidade da máquina

4.19.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

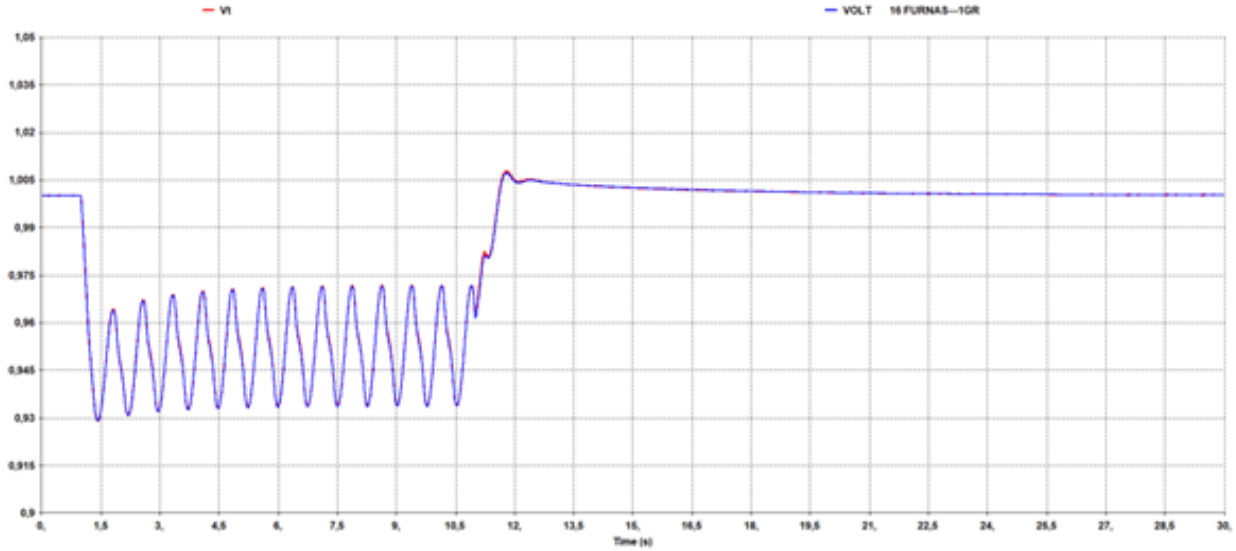

Figura 4-470 - Tensão terminal

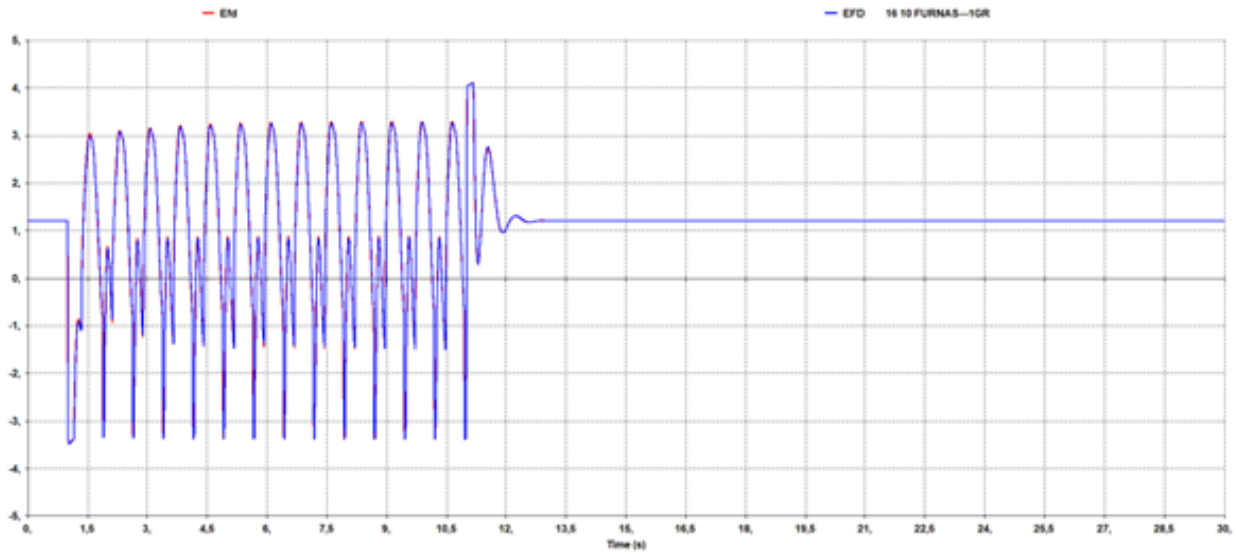

Figura 4-471 - Tensão de campo

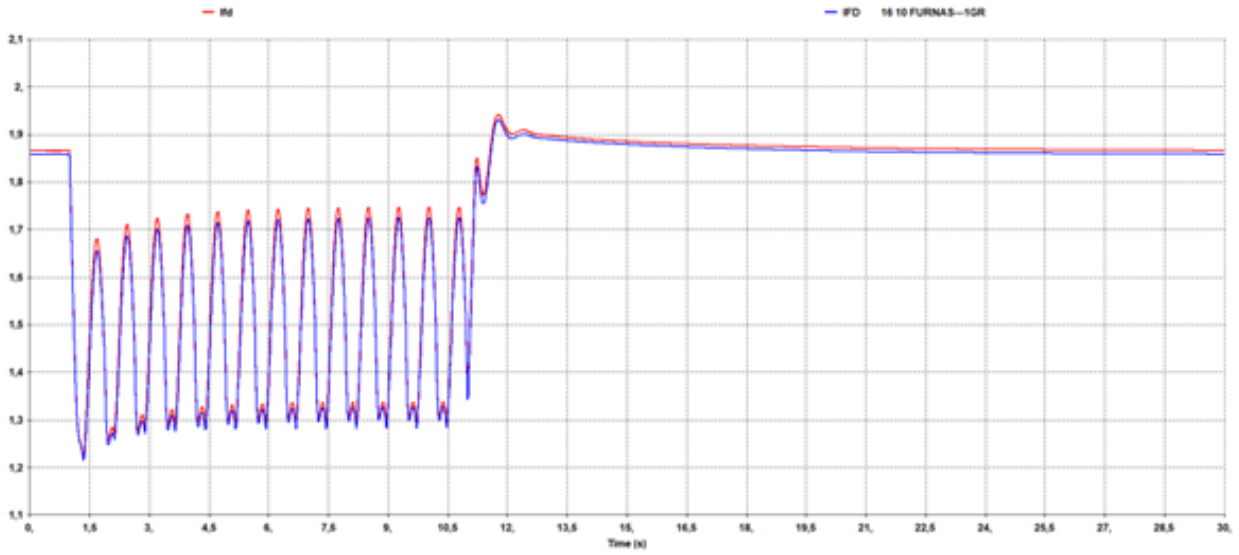

Figura 4-472 - Corrente de campo

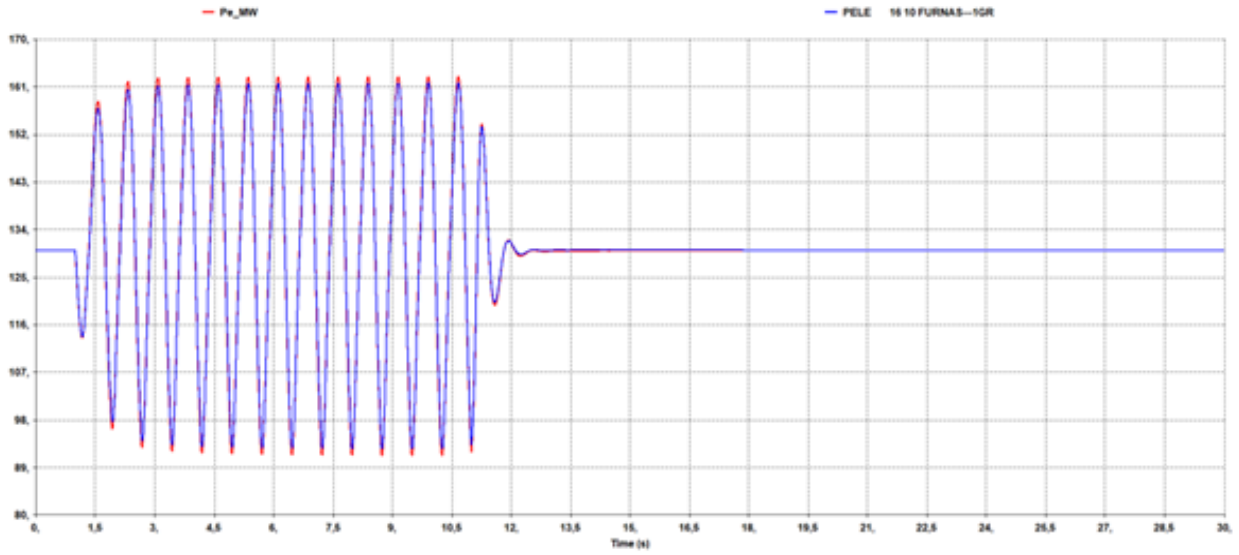

Figura 4-473 - Potência ativa

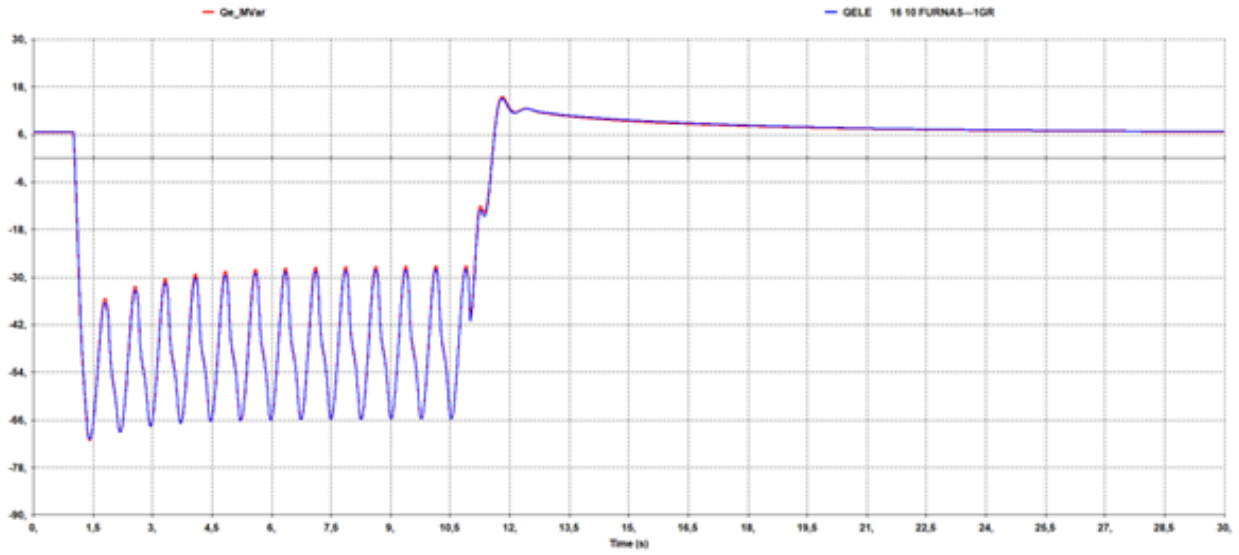

Figura 4-474 - Potência reativa

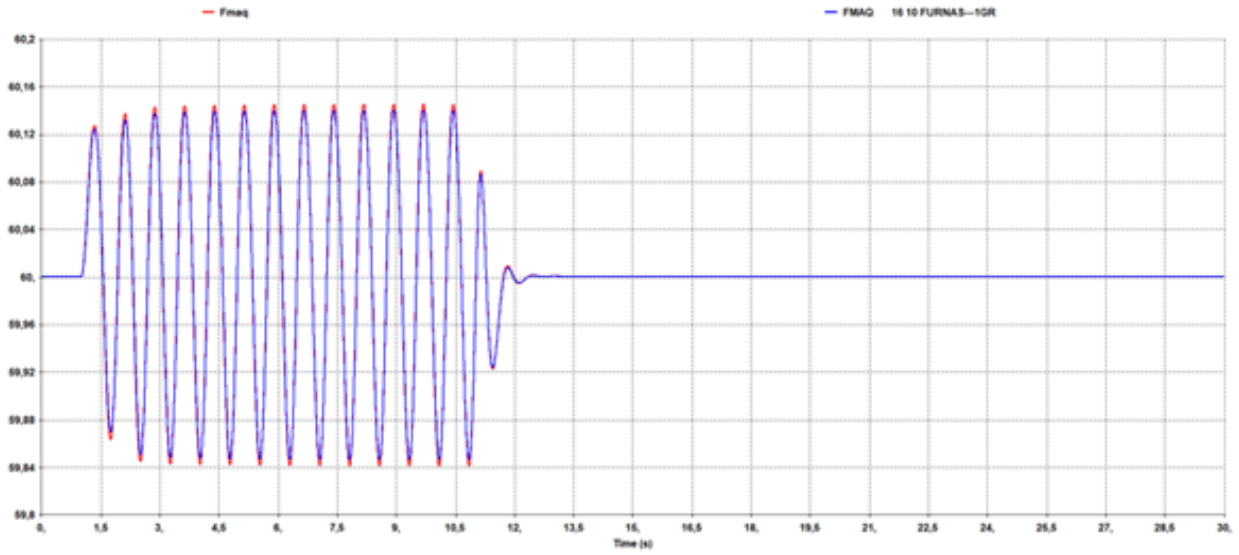

Figura 4-475 - Velocidade da máquina

4.20 CS LUIZ CARLOS BARRETO

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Luiz Carlos Barreto, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.20.1 Modelo do CS Luiz Carlos Barreto

A Tabela 4-58 apresenta os parâmetros do CS Luiz Carlos Barreto disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-58 - Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	93,59	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	59	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	24	I(KA)	7,698	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	21,5	H(s)	4,3	
xl(%)	18,5	D(pu)	0	
T'd(s)	5,6	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,185	Reatância de Potier
T''d(s)	0,02	xd(pu)	0,936	
T''q(s)	0,05	xd_(pu)	0,24	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	5,6	T'd
H(s)	4,3	xd__(pu)	0,215	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,02	T''d
S(MVA)	184	Xq(pu)	0,59	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,215	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,05	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.20.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-59, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Luiz Carlos Barreto estão apresentados na Tabela

4-60. A partir dos parâmetros da Tabela 4-59, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-60. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-476.

Tabela 4-59 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Luiz Carlos Barreto	
Ag	**Y1**	0,017
Bg	**Y2**	8,7
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-60 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,817	0,800
1,013	0,950
1,053	0,975
1,097	1,000
1,162	1,033
1,24	1,067
1,331	1,100
1,752	1,200
2,617	1,300

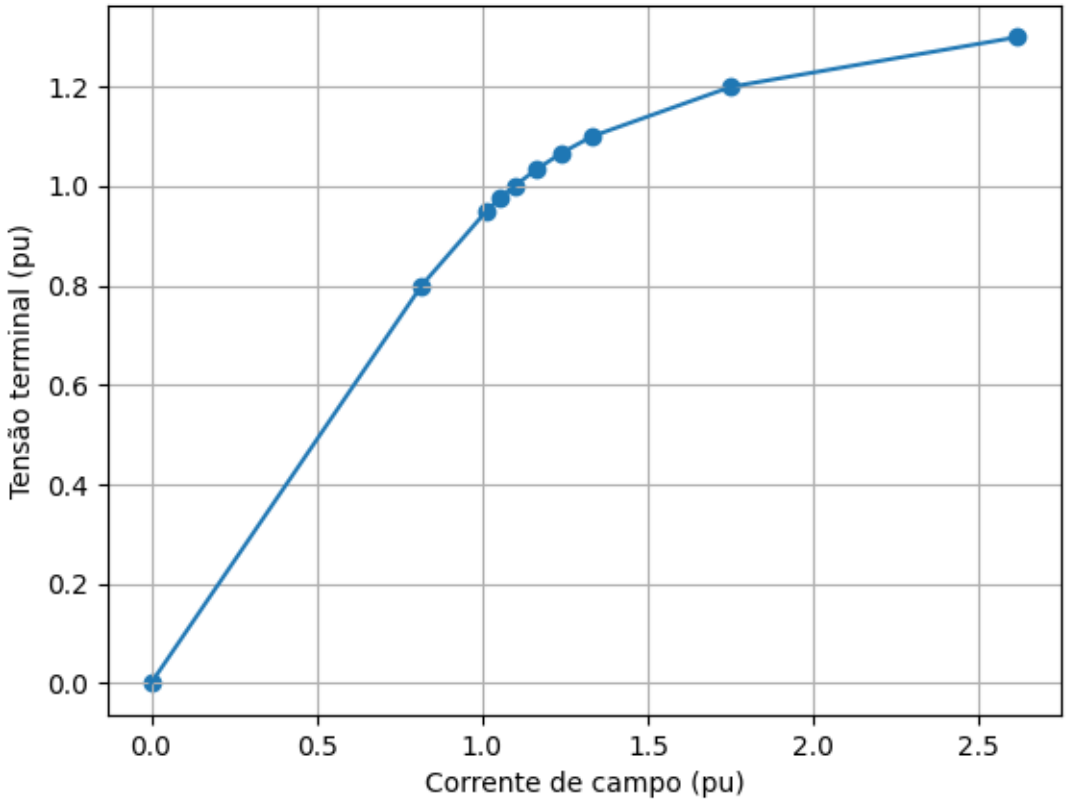

Figura 4-476 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.20.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.20.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.20.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.20.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

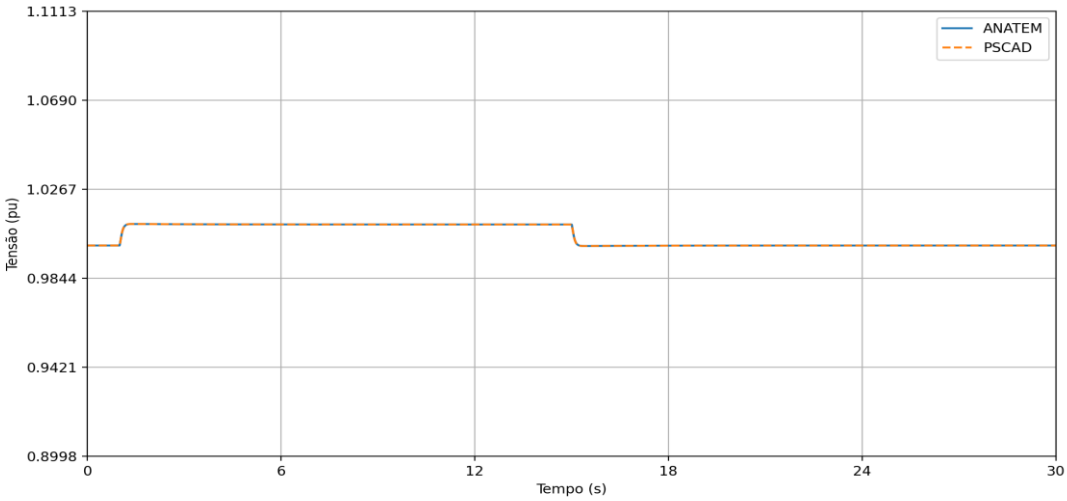

Figura 4-477 – Tensão terminal

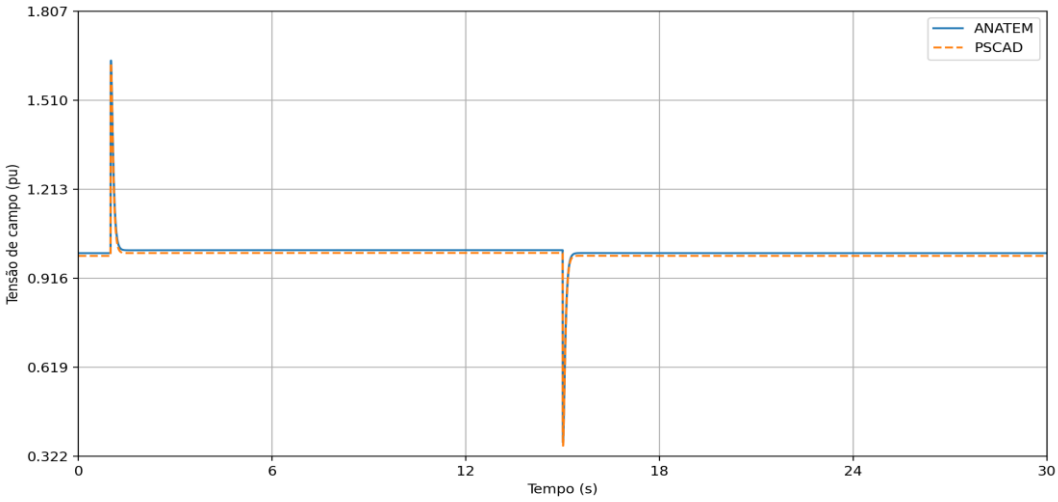

Figura 4-478 – Tensão de campo

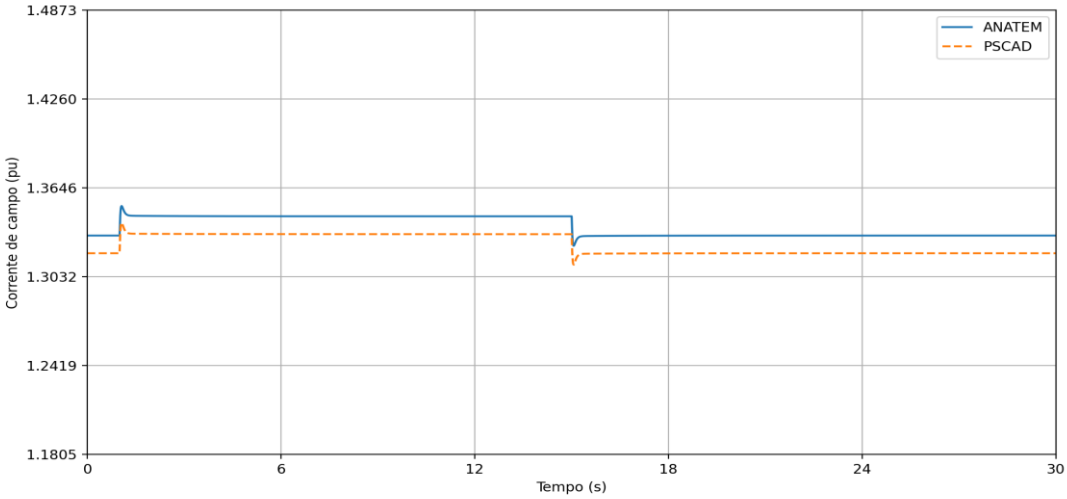

Figura 4-479 – Corrente de campo

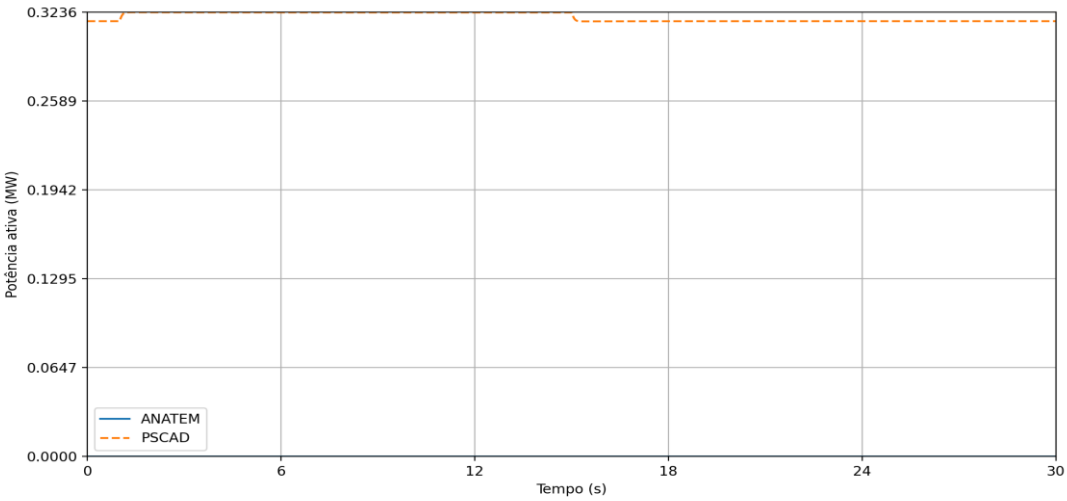

Figura 4-480 – Potência ativa

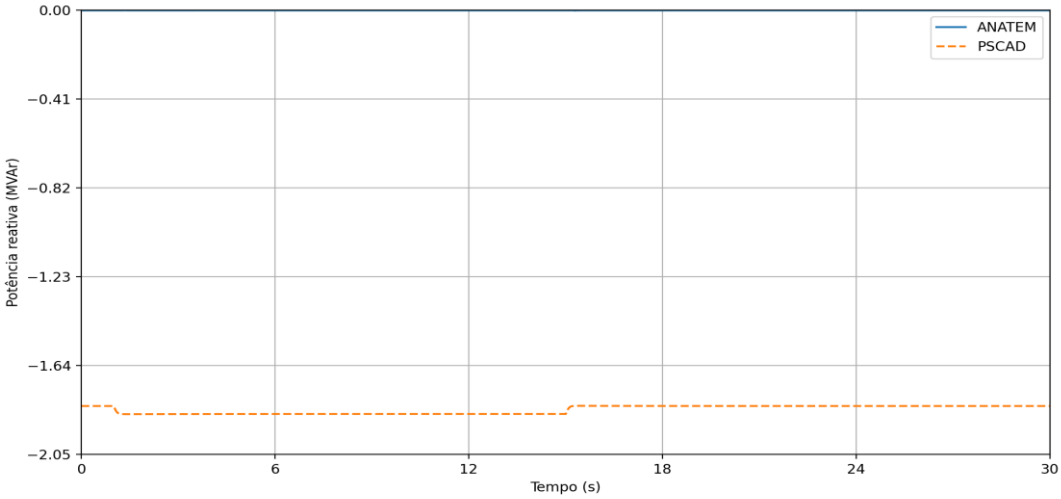

Figura 4-481 – Potência reativa

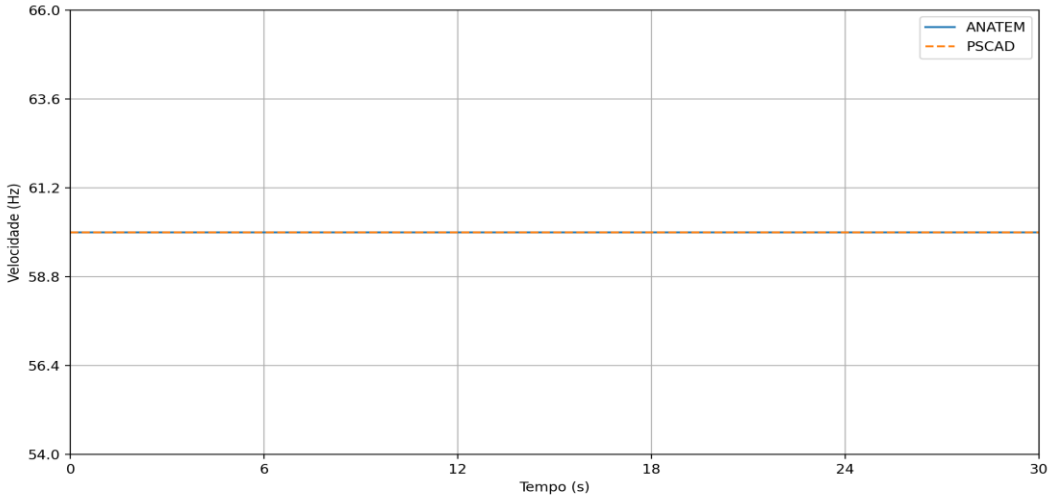

Figura 4-482 – Velocidade da máquina

4.20.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

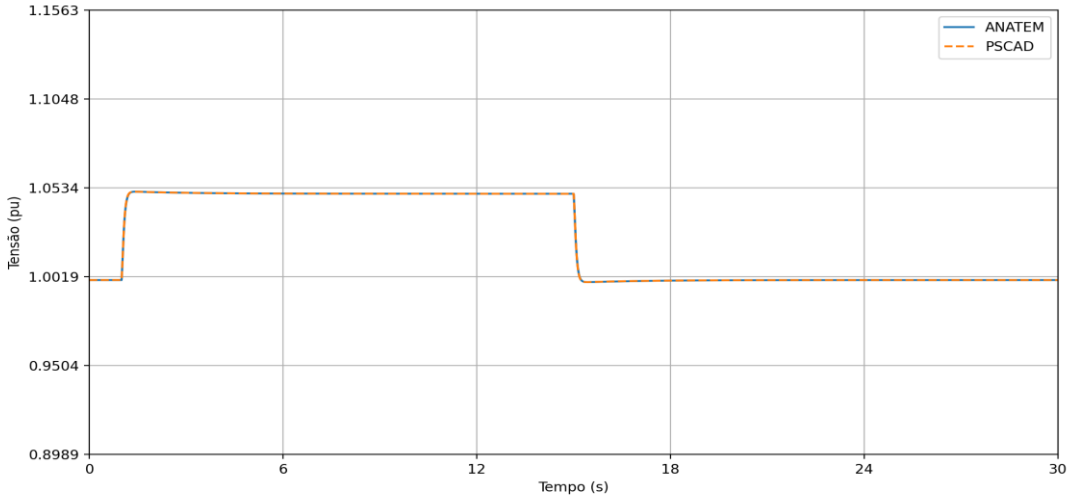

Figura 4-483 – Tensão terminal

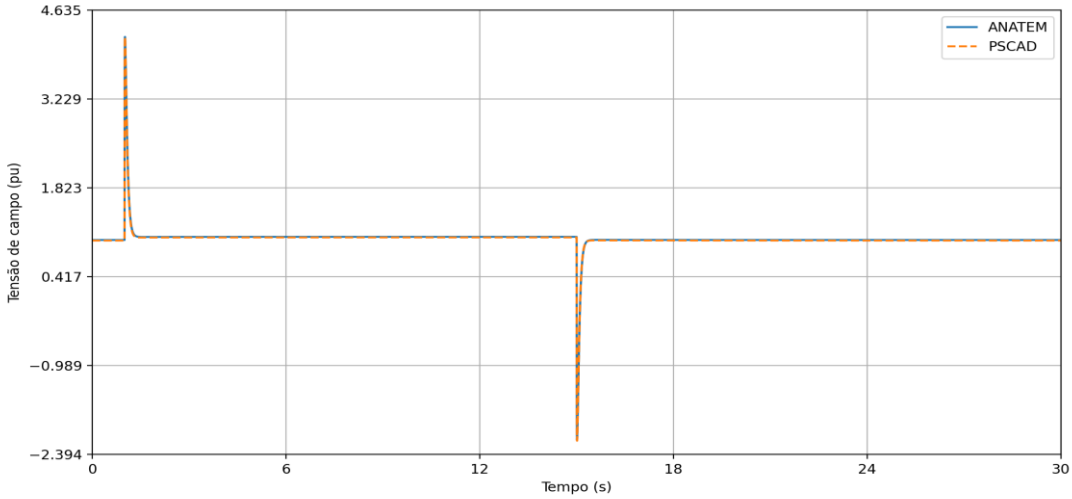

Figura 4-484 – Tensão de campo

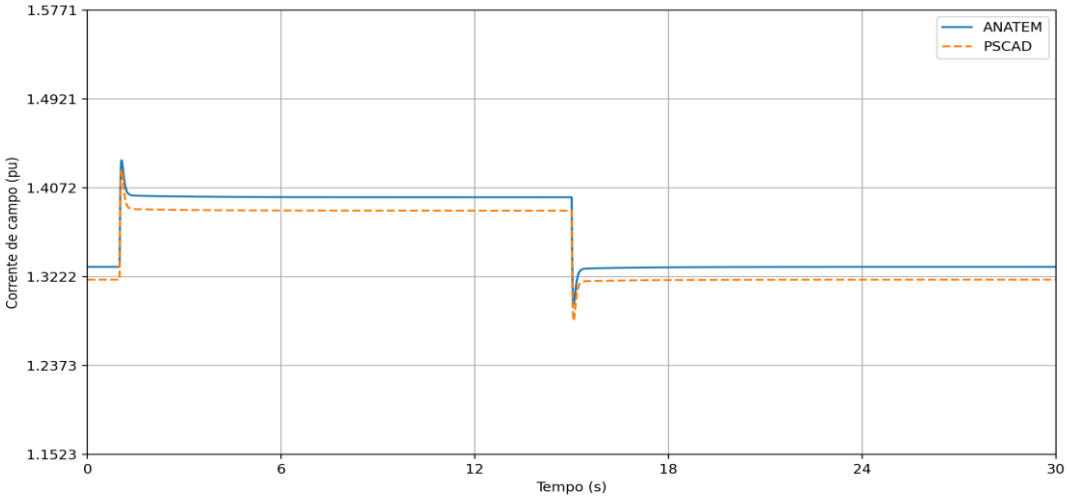

Figura 4-485 – Corrente de campo

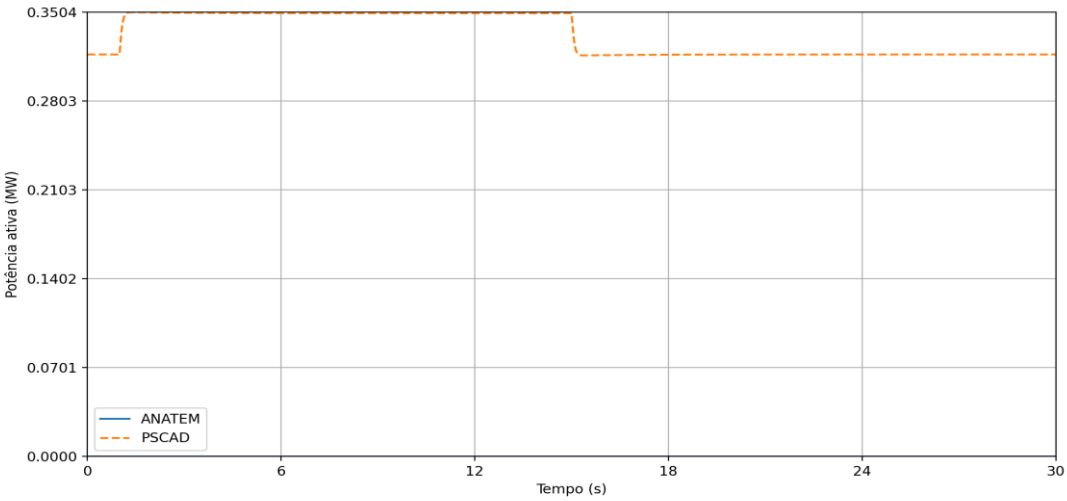

Figura 4-486 – Potência ativa

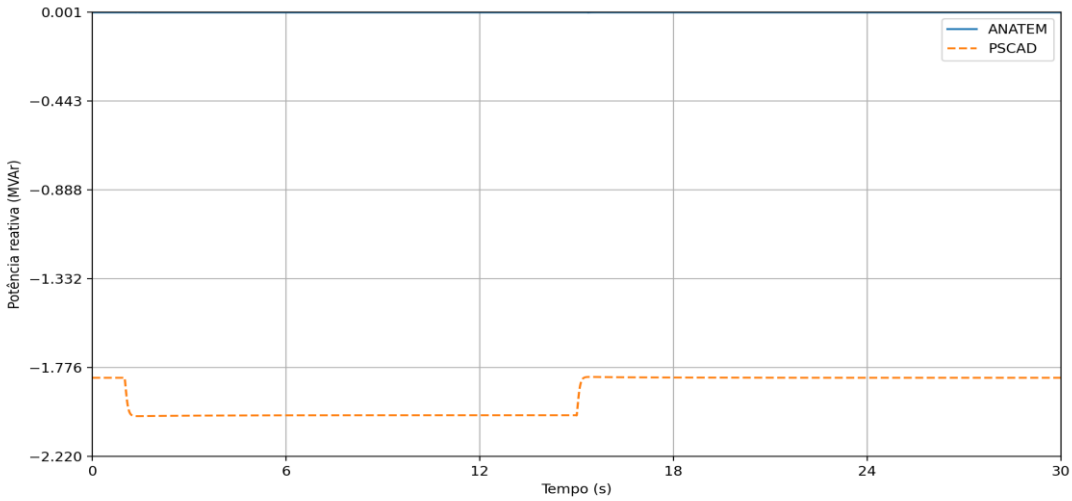

Figura 4-487 – Potência reativa

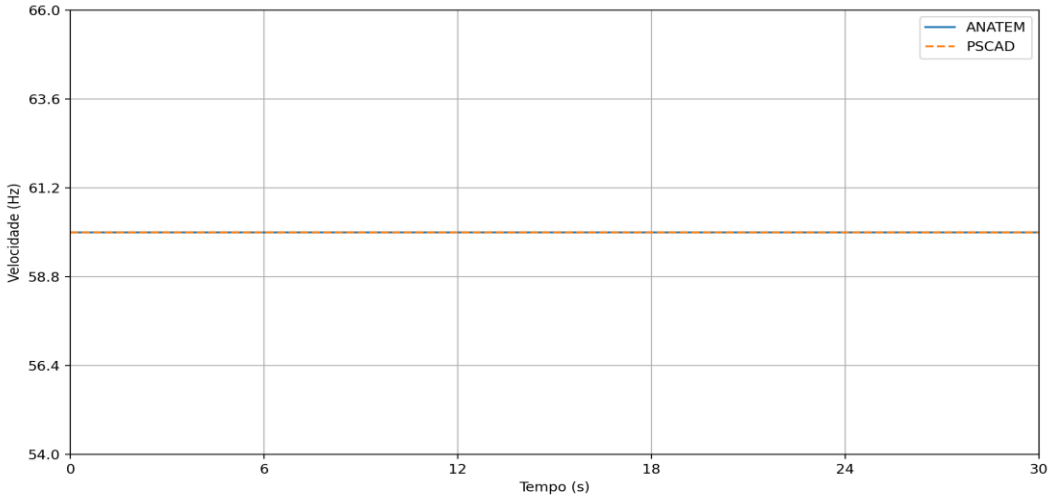

Figura 4-488 – Velocidade da máquina

4.20.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.20.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.20.4.2.

4.20.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

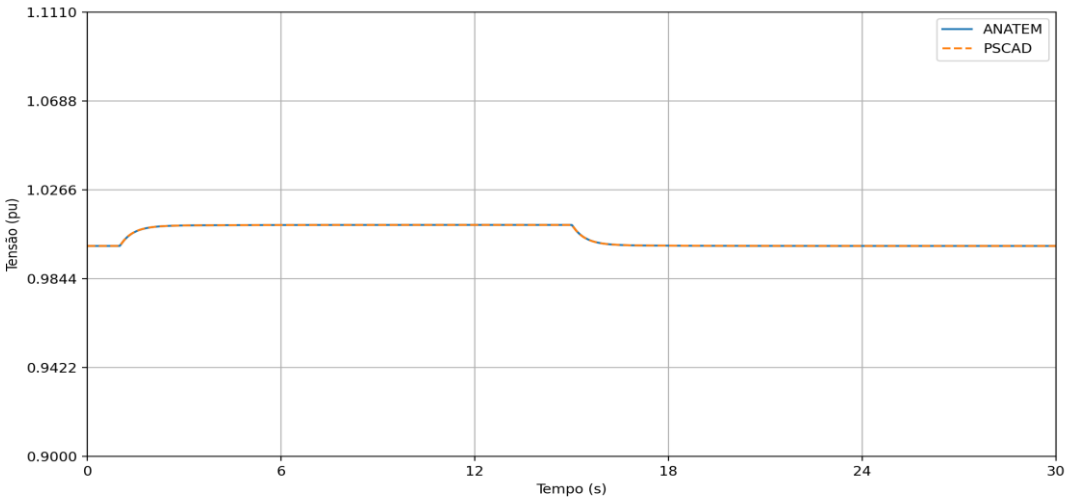

Figura 4-489 – Tensão terminal

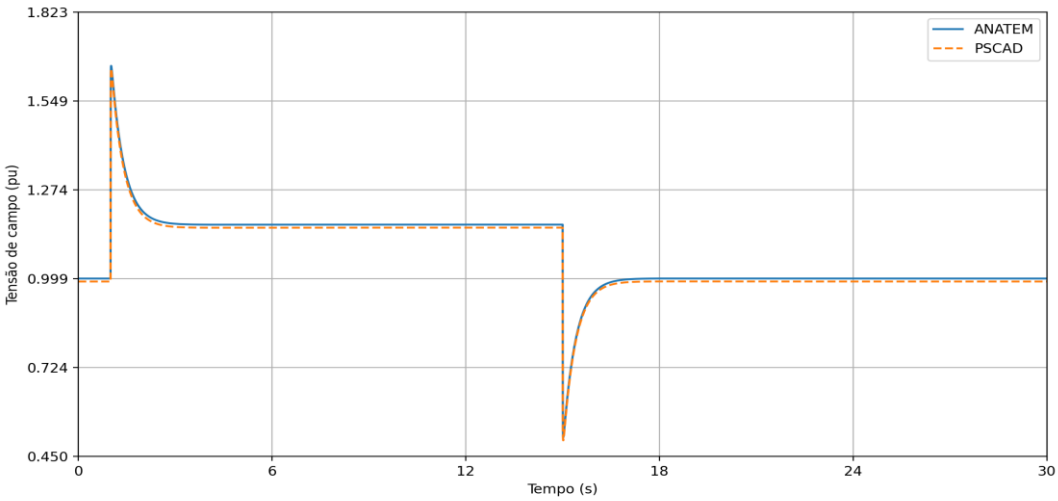

Figura 4-490 – Tensão de campo

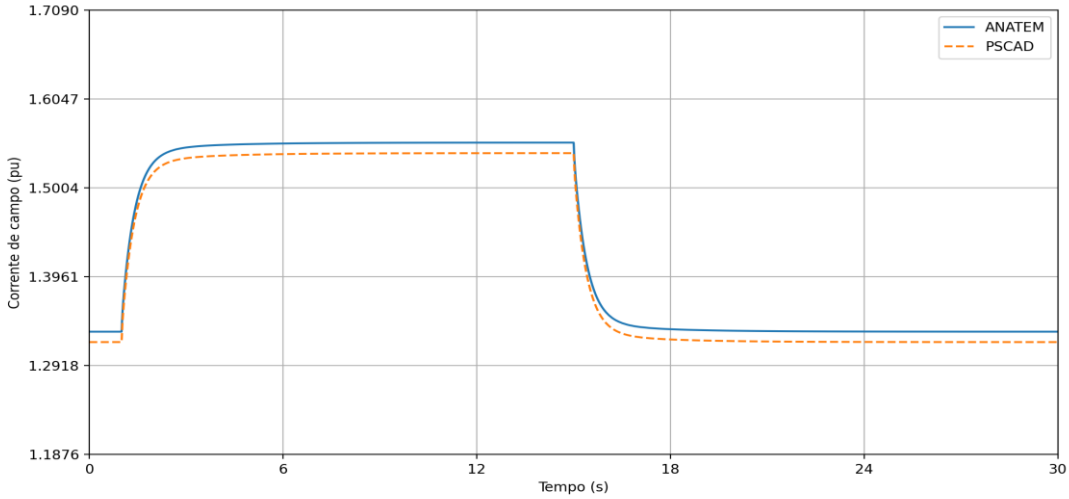

Figura 4-491 – Corrente de campo

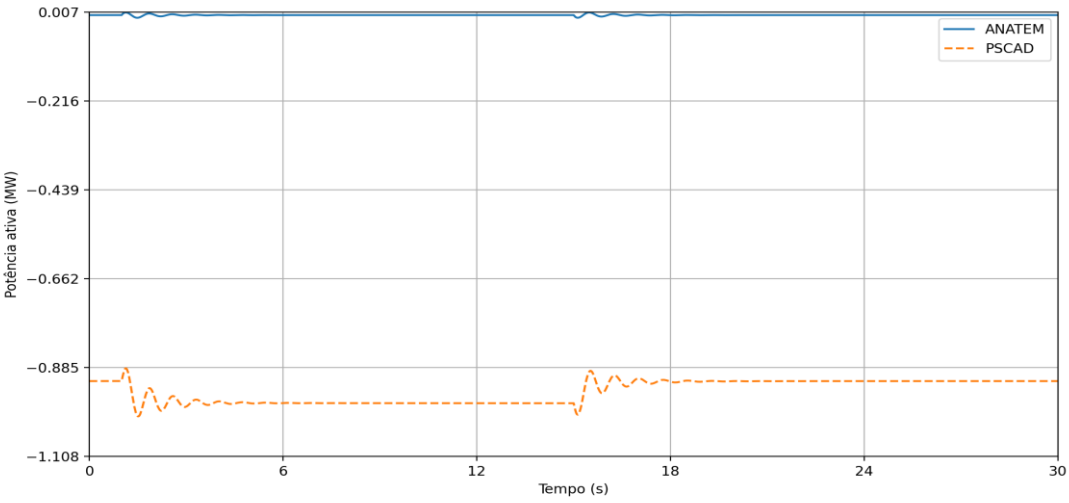

Figura 4-492 – Potência ativa

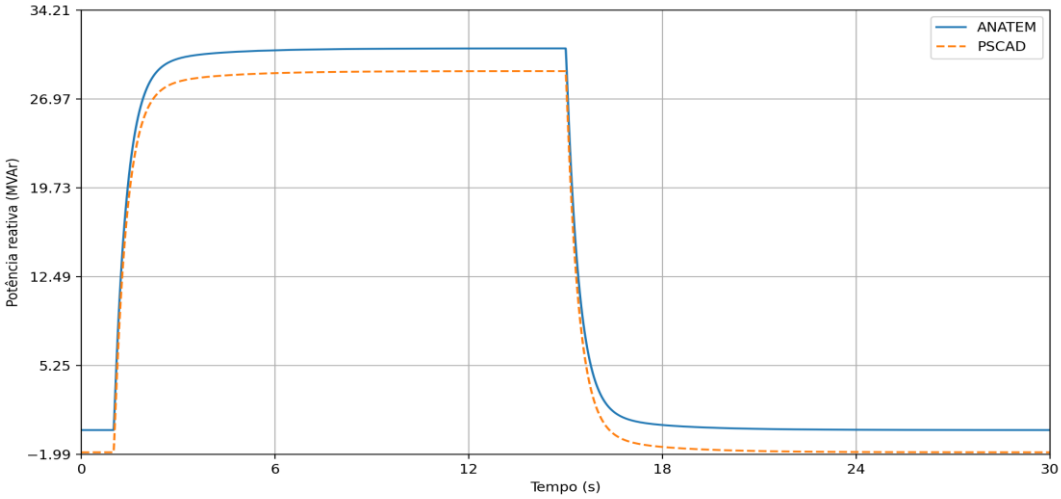

Figura 4-493 – Potência reativa

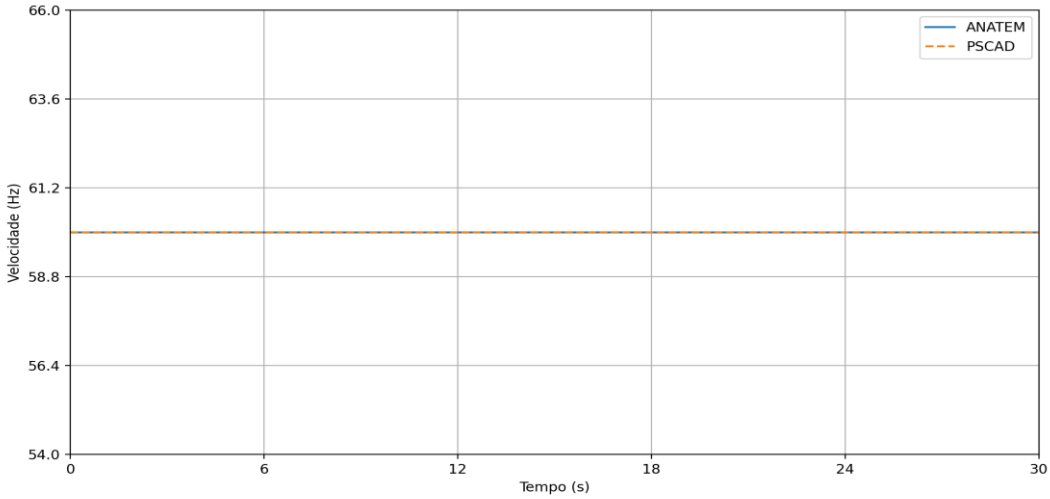

Figura 4-494 – Velocidade da máquina

4.20.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

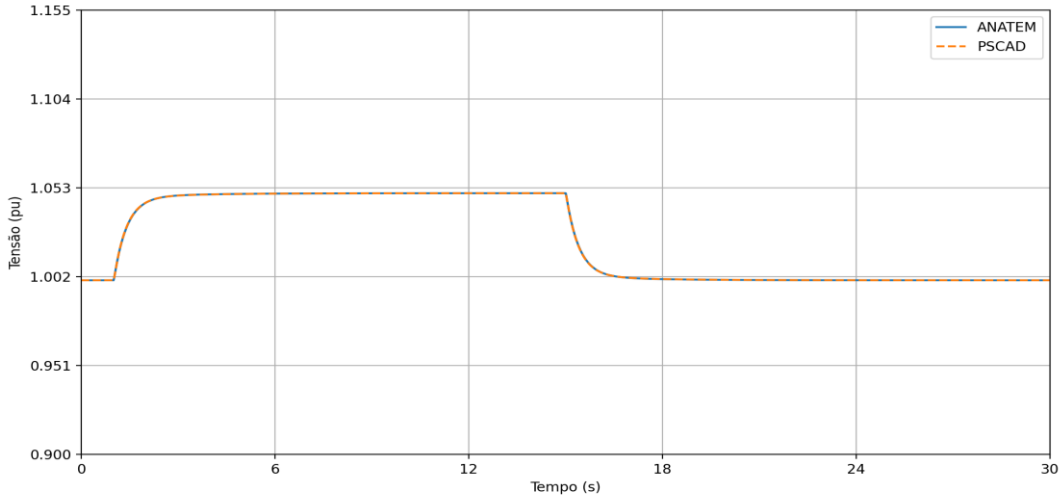

Figura 4-495 – Tensão terminal

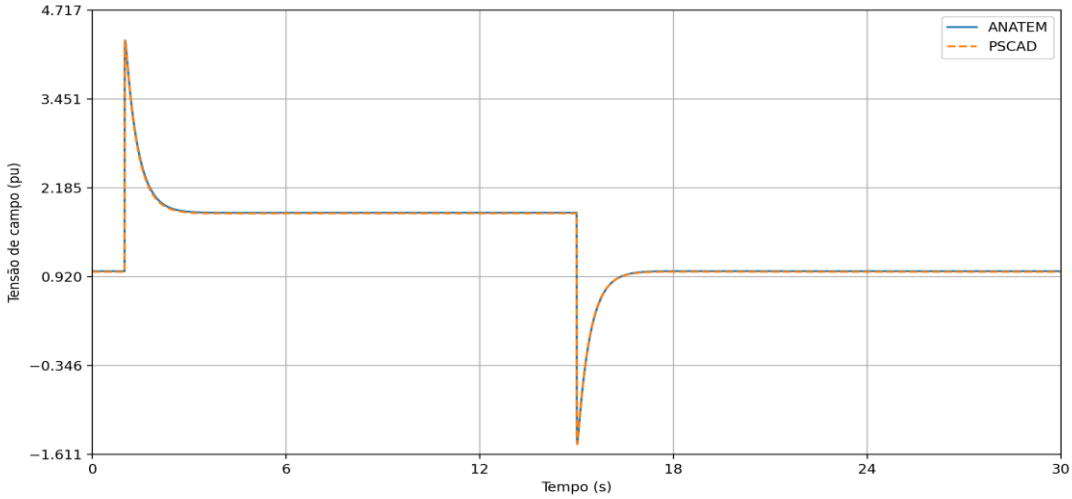

Figura 4-496 – Tensão de campo

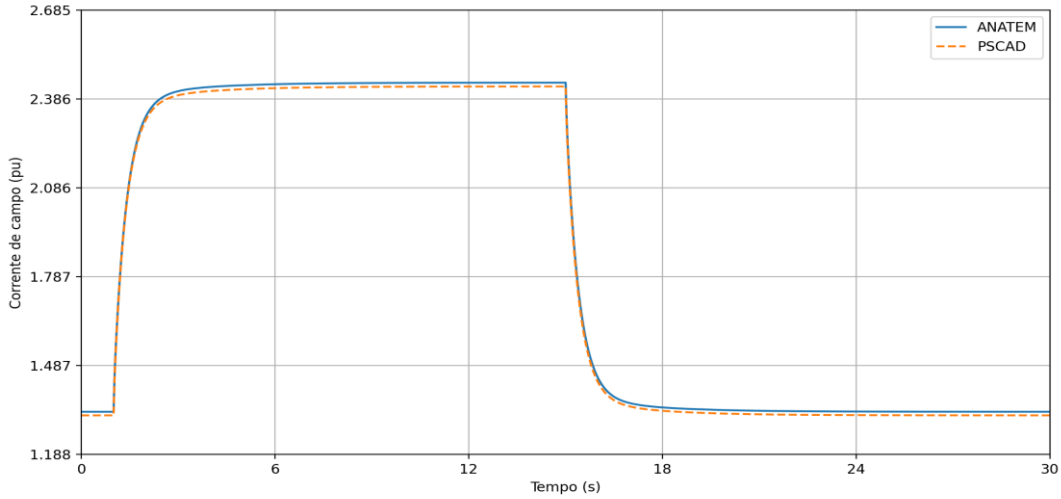

Figura 4-497 – Corrente de campo

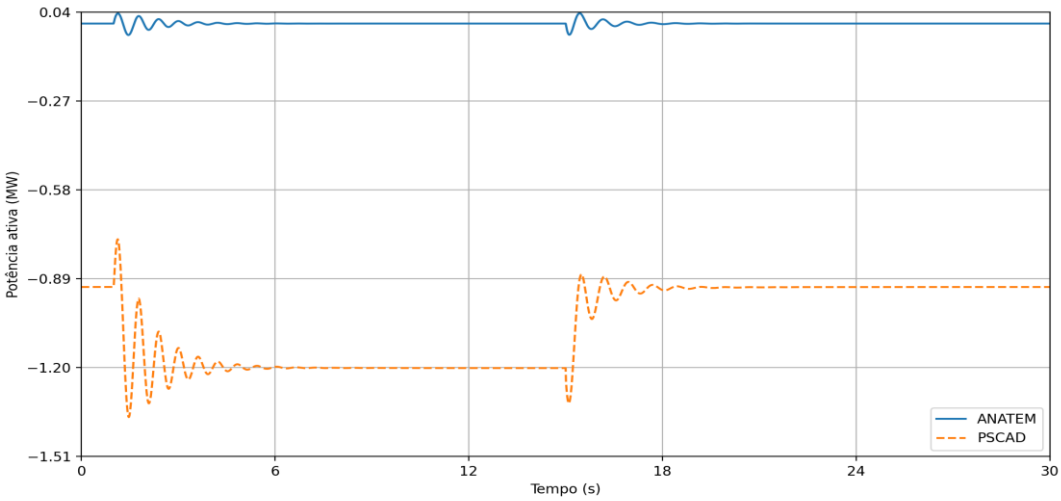

Figura 4-498 – Potência ativa

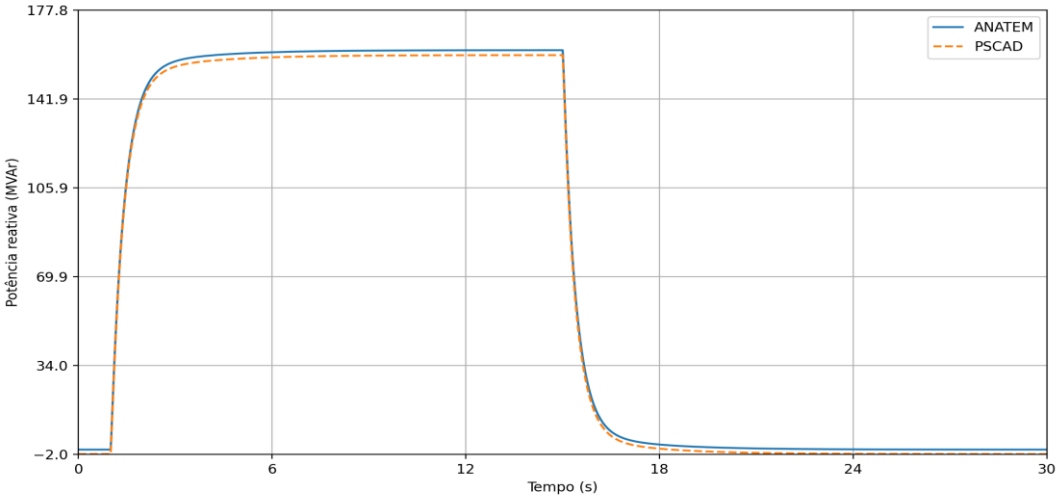

Figura 4-499 – Potência reativa

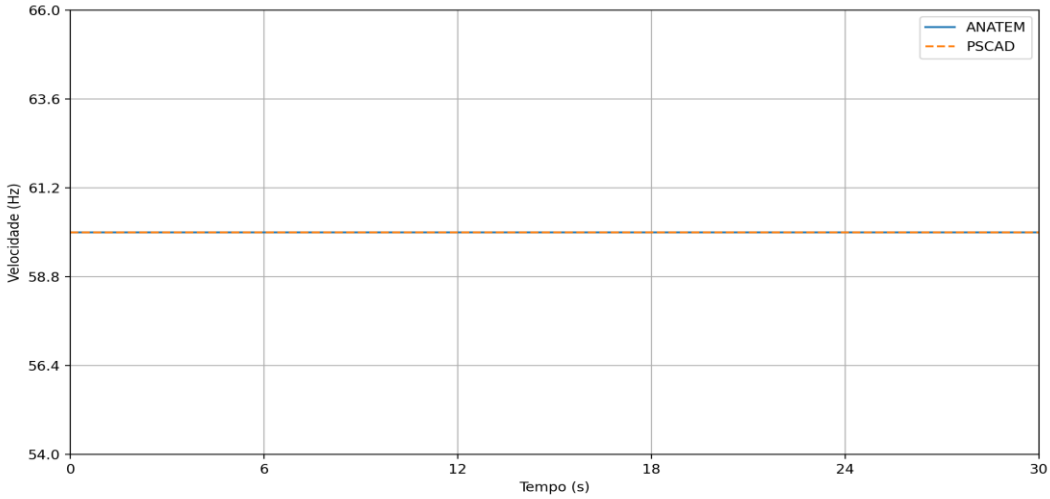

Figura 4-500 – Velocidade da máquina

4.21 CS TIJUCO PRETO

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Tijuco Preto, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.21.1 Modelo do CS Tijuco Preto

A Tabela 4-61 apresenta os parâmetros do CS Tijuco Preto disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-61 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	170	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	100	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	37	I(KA)	12,551	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	25	H(s)	1,6	
xl(%)	17,5	D(pu)	0	
T'd(s)	9	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,175	Reatância de Potier
T''d(s)	0,06	xd(pu)	1,7	
T''q(s)	0,2	xd_(pu)	0,37	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	9	T'd
H(s)	1,6	xd__(pu)	0,25	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,06	T''d
S(MVA)	300	Xq(pu)	1	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,25	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,2	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.21.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-62, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Tijuco Preto estão apresentados na Tabela 4-63.

A partir dos parâmetros da Tabela 4-62, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-63. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-501.

Tabela 4-62 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Tijuco Preto	
Ag	**Y1**	0,06
Bg	**Y2**	4,35
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-63 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,002	0,000
0,86	0,800
1,065	0,950
1,103	0,975
1,143	1,000
1,198	1,033
1,259	1,067
1,321	1,100
1,542	1,200
1,828	1,300

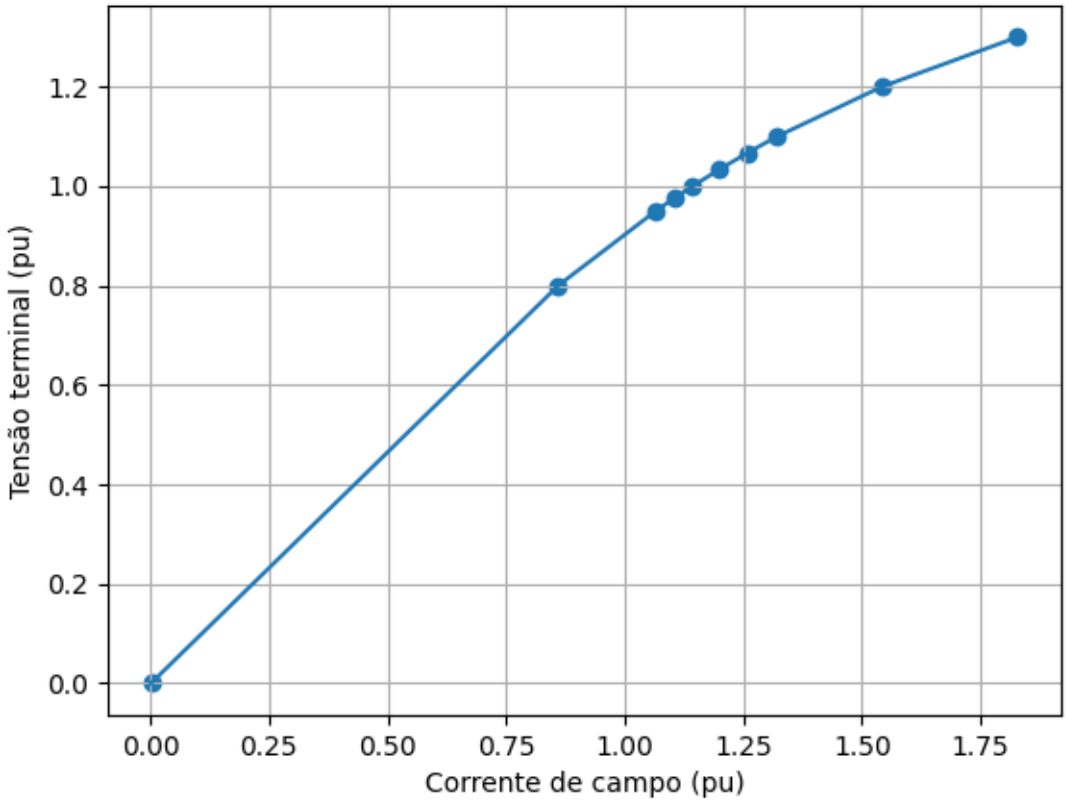

Figura 4-501 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.21.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.21.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.21.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.21.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

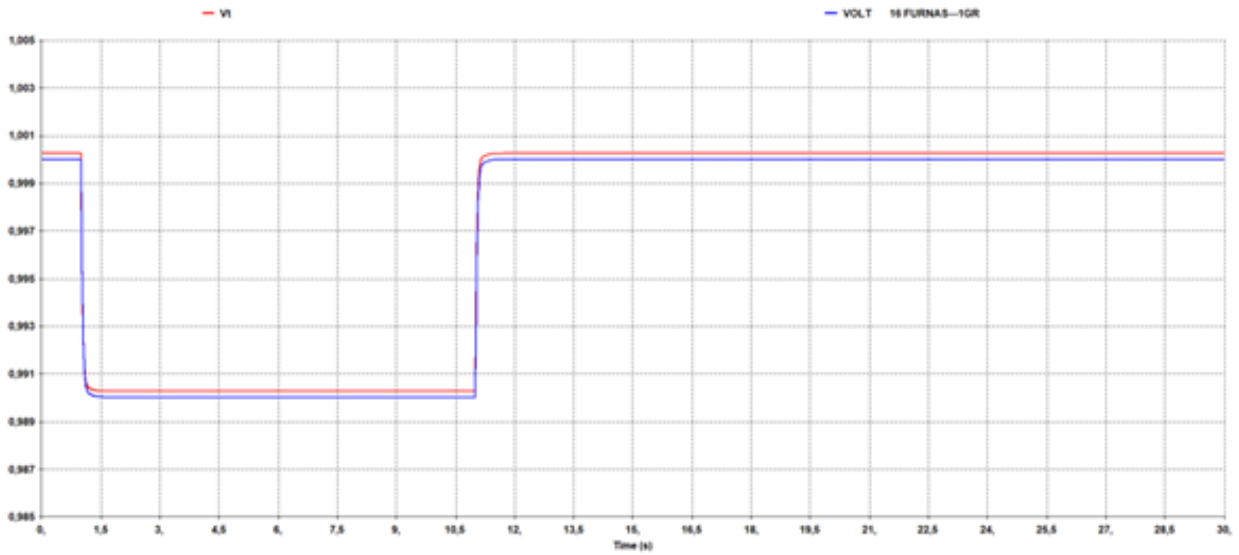

Figura 4-502 – Tensão terminal

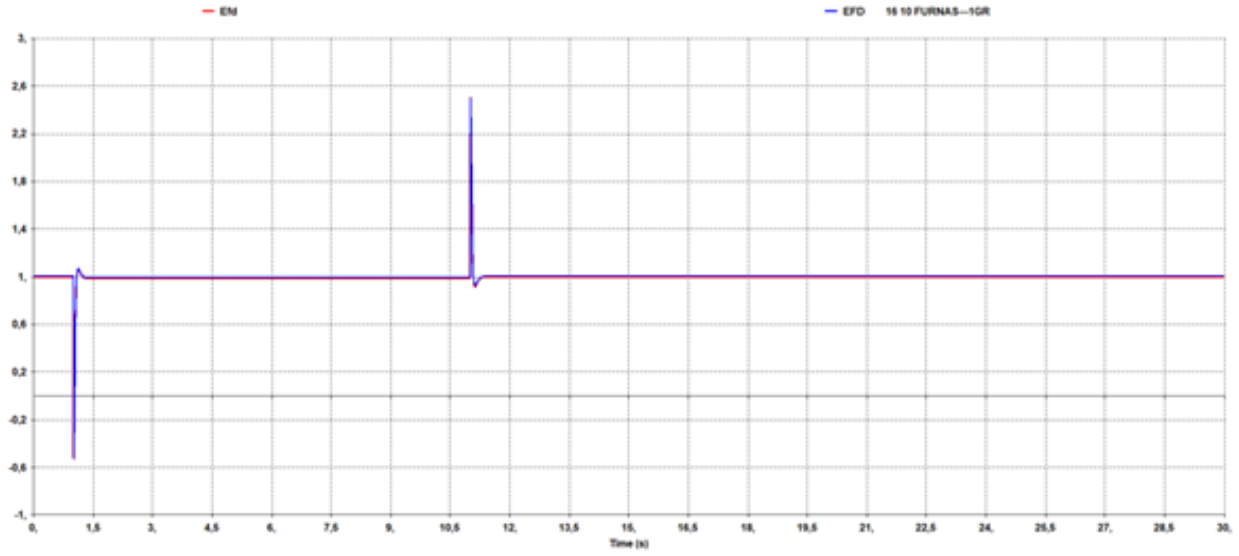

Figura 4-503 – Tensão de campo

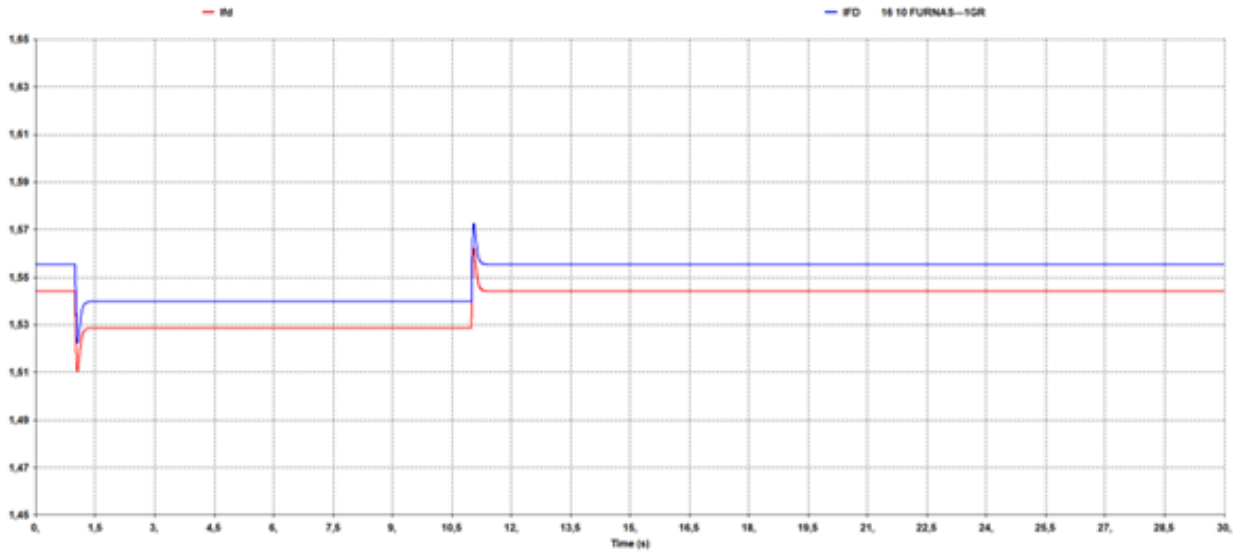

Figura 4-504 – Corrente de campo

4.21.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

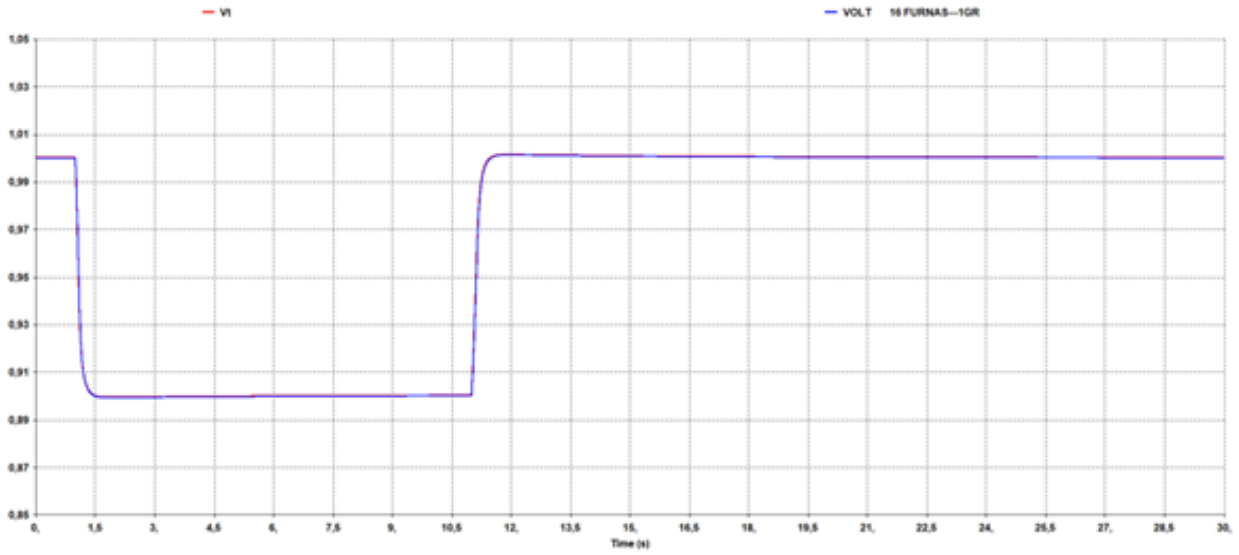

Figura 4-505 – Tensão terminal

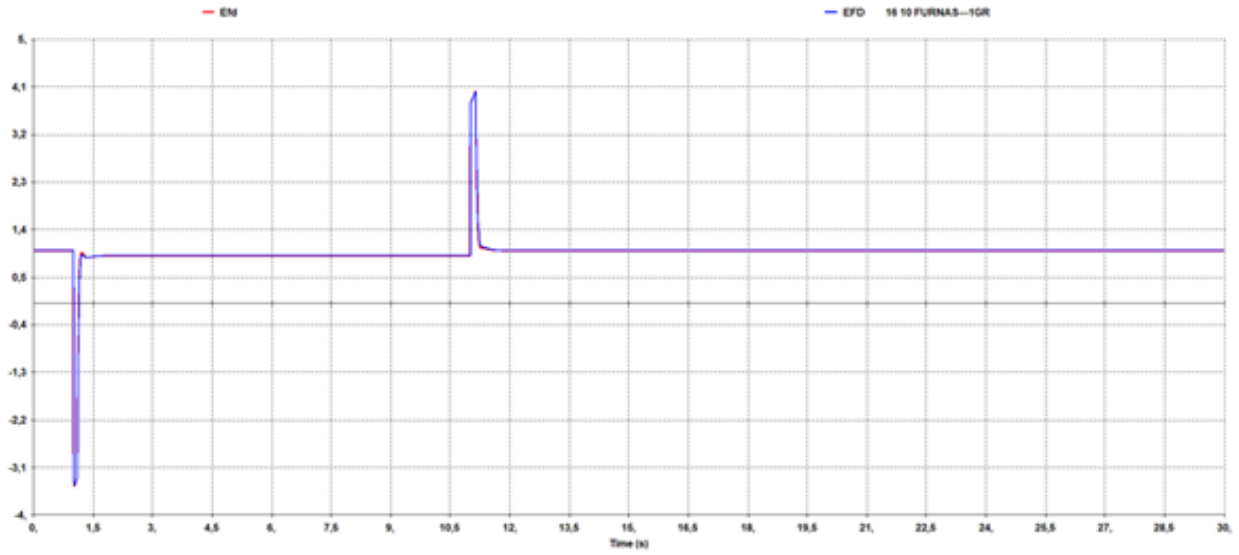

Figura 4-506 – Tensão de campo

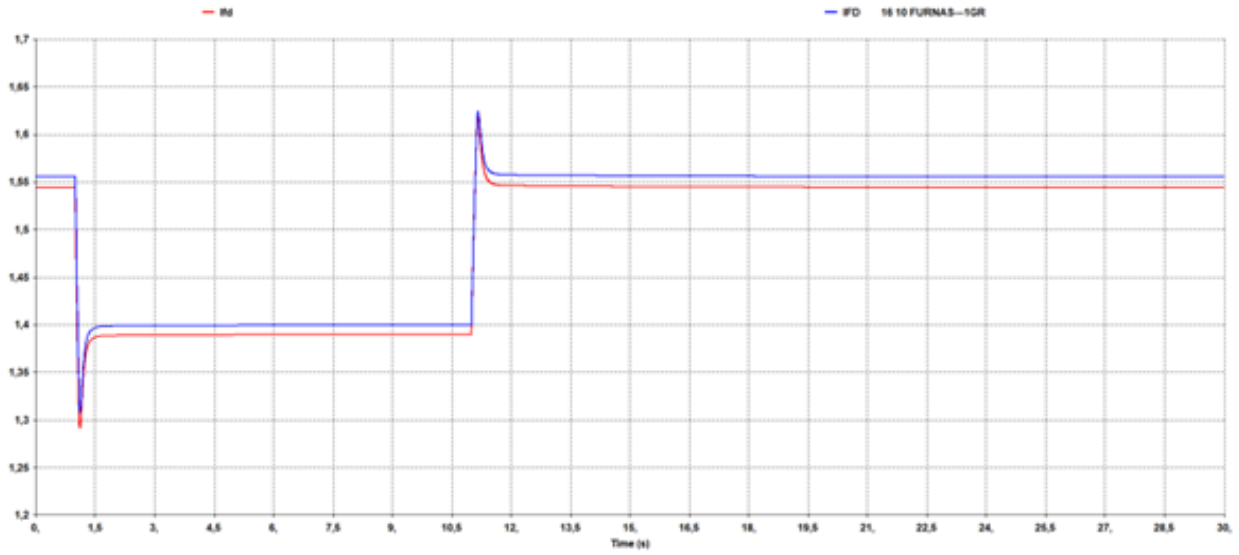

Figura 4-507 – Corrente de campo

4.21.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.21.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.21.4.2.

4.21.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

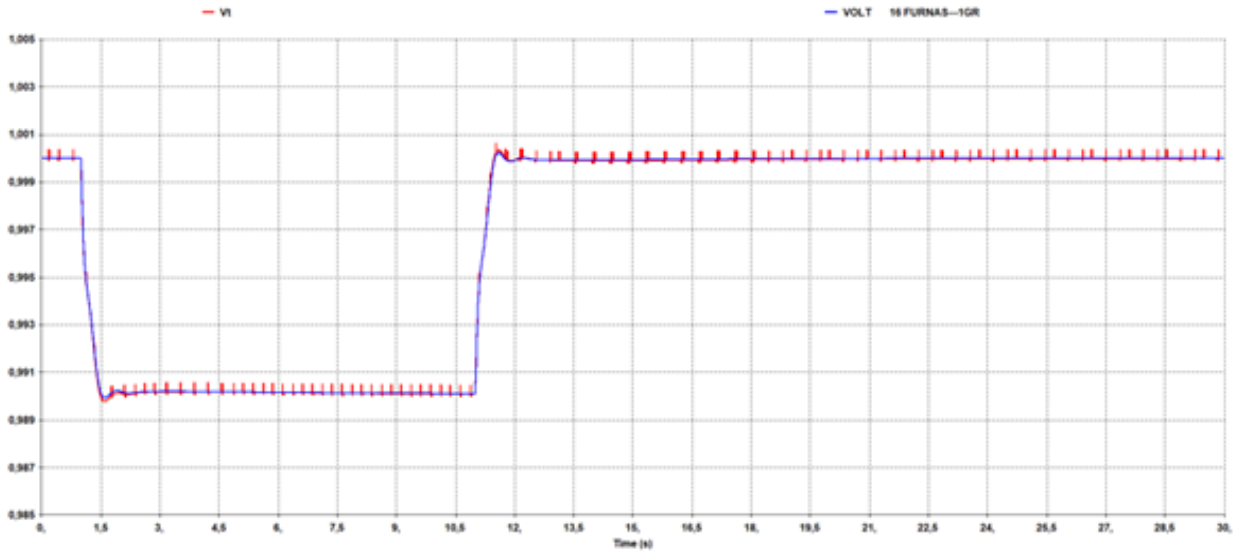

Figura 4-508 – Tensão terminal

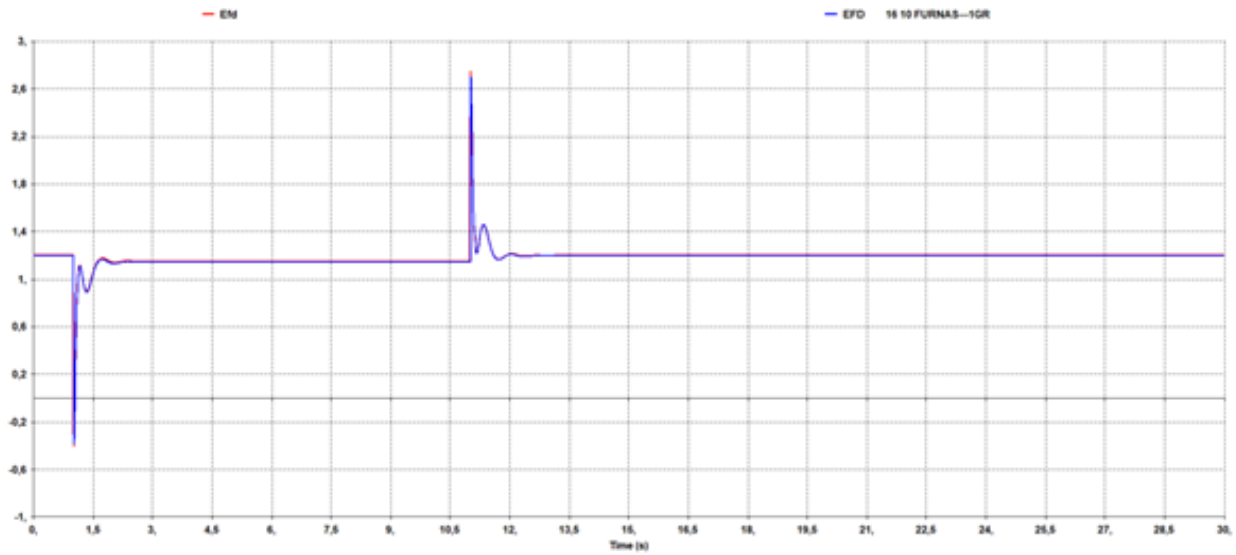

Figura 4-509 – Tensão de campo

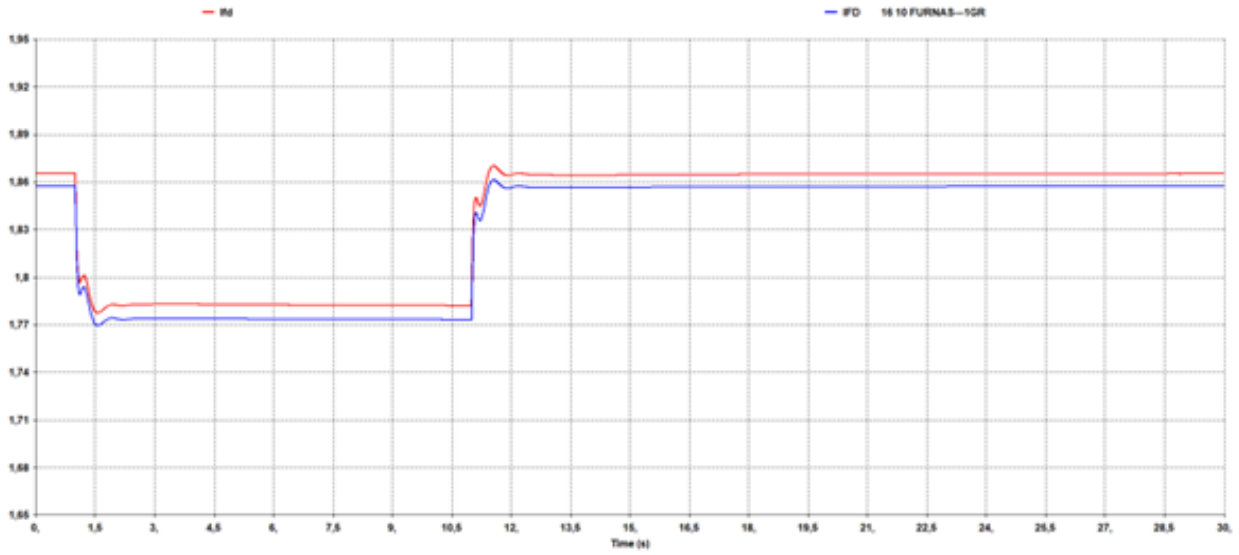

Figura 4-510 – Corrente de campo

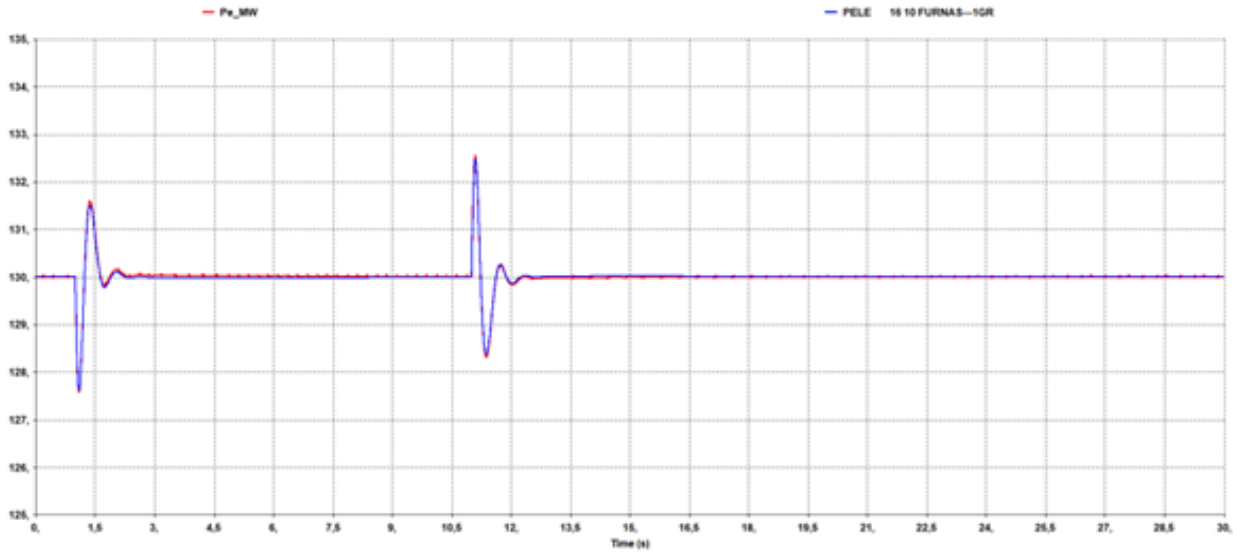

Figura 4-511 – Potência ativa

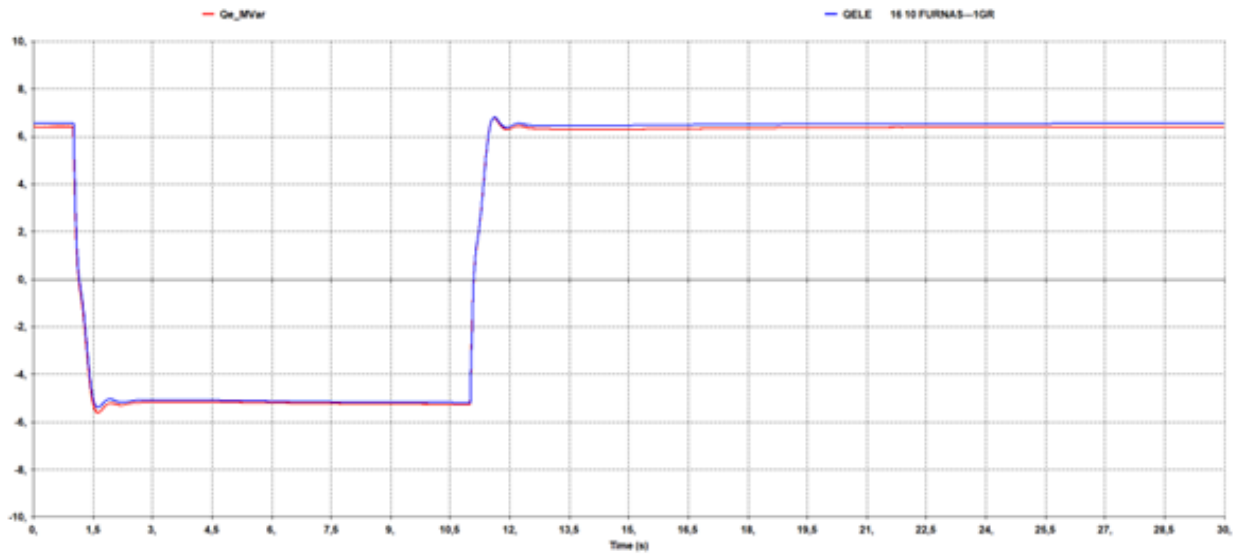

Figura 4-512 – Potência reativa

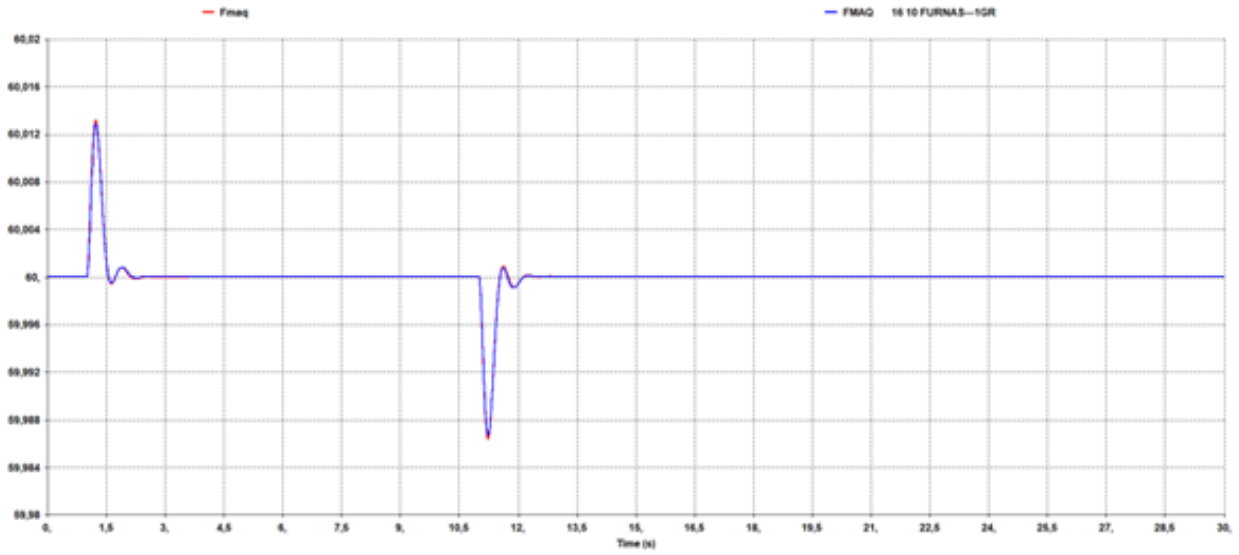

Figura 4-513 – Velocidade da máquina

4.21.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

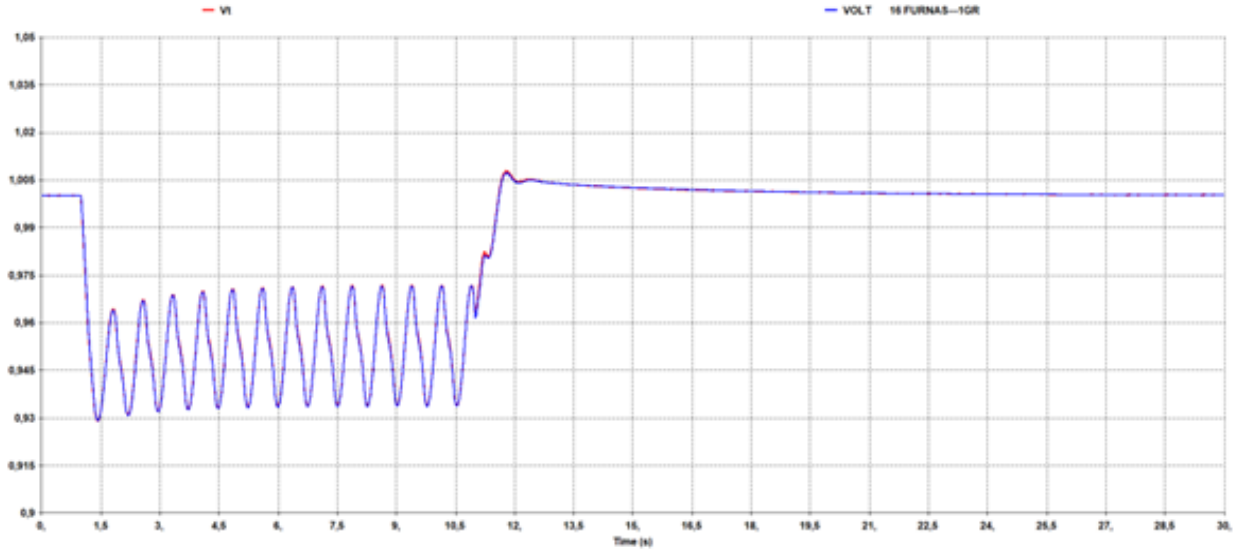

Figura 4-514 – Tensão terminal

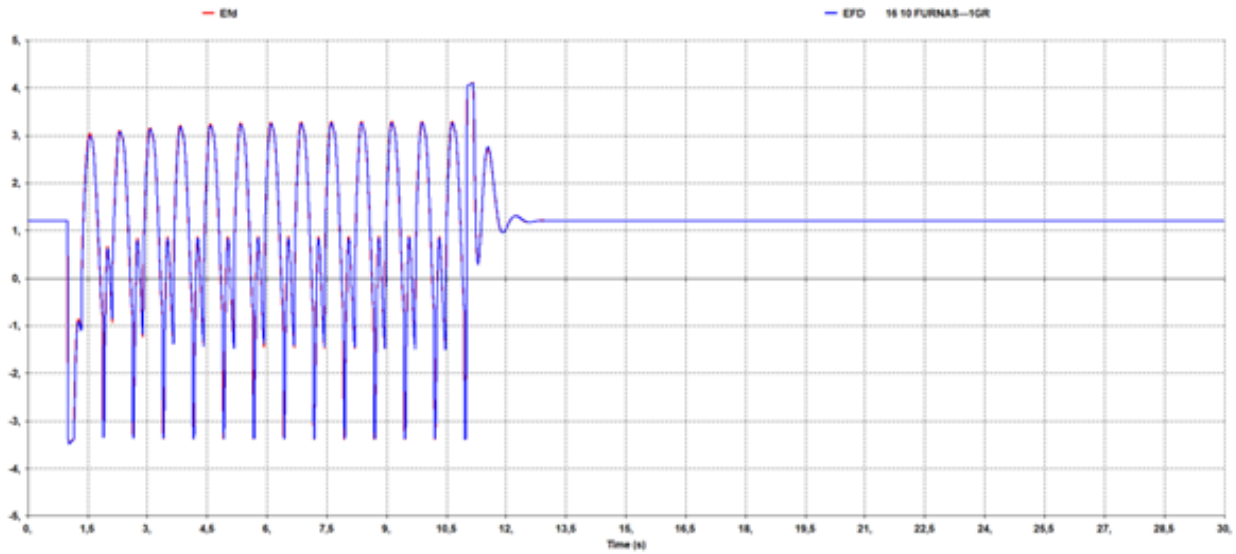

Figura 4-515 – Tensão de campo

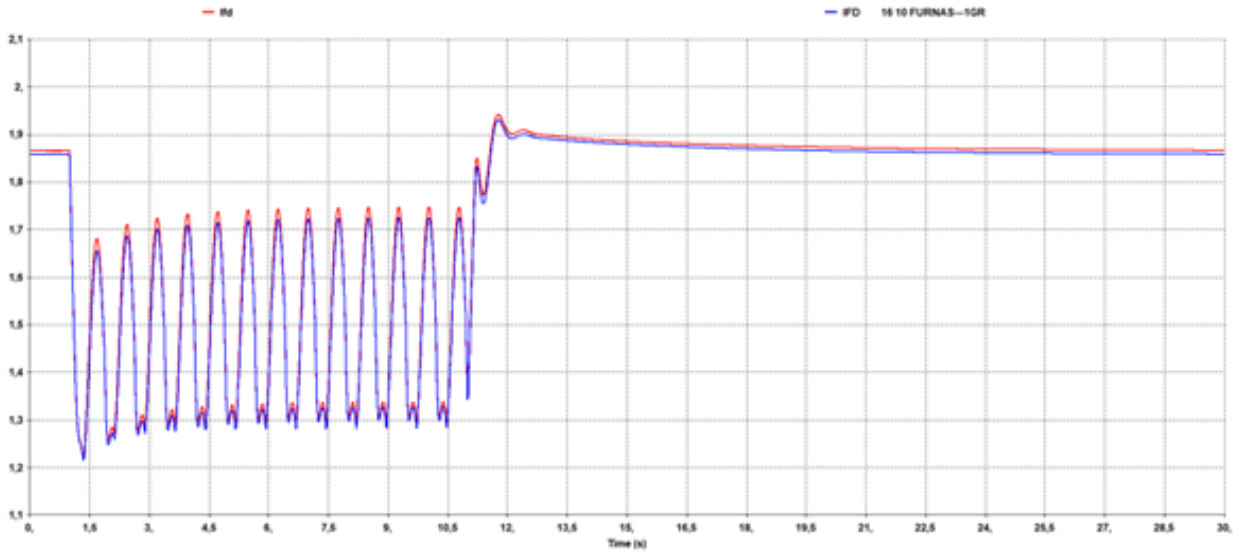

Figura 4-516 – Corrente de campo

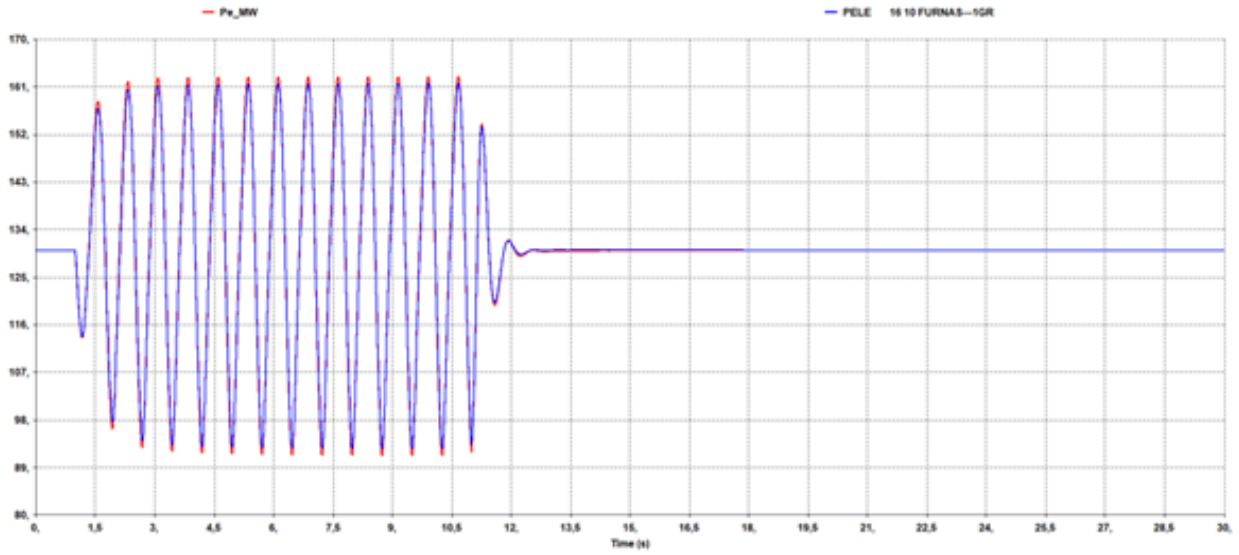

Figura 4-517 – Potência ativa

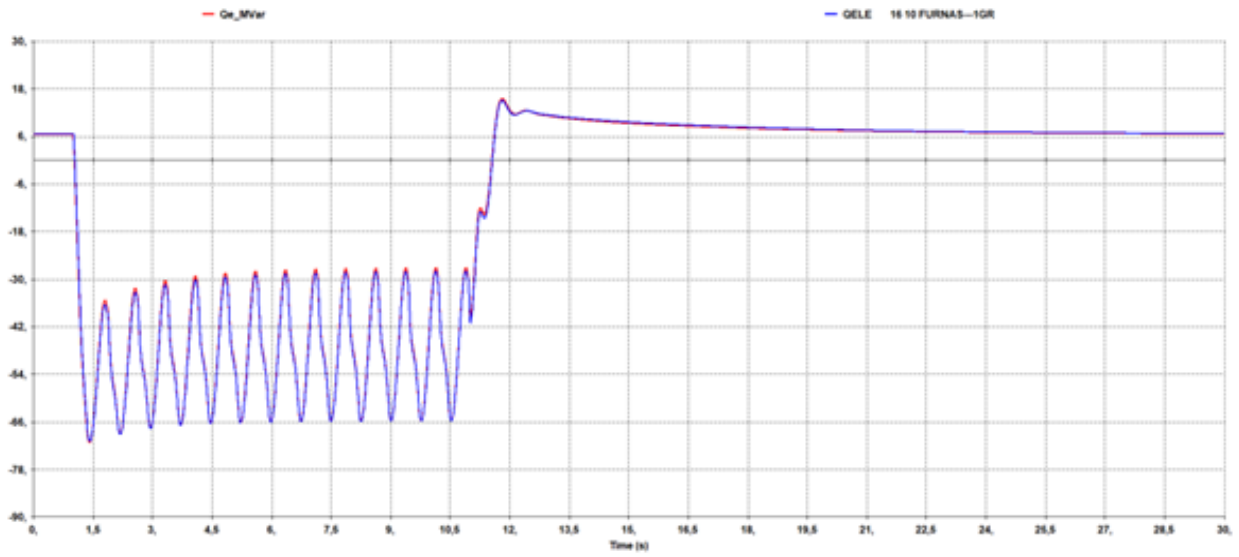

Figura 4-518 – Potência reativa

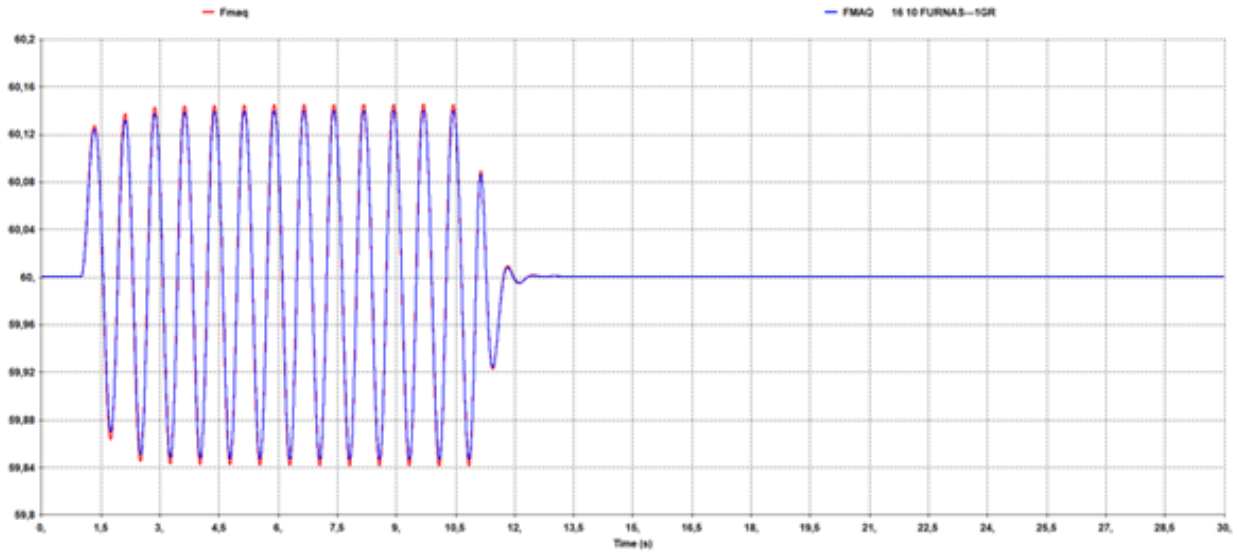

Figura 4-519 – Velocidade da máquina

4.22 CS IBIÚNA

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Ibiúna, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.22.1 Modelo do CS Ibiúna

A Tabela 4-64 apresenta os parâmetros do CS Ibiúna disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-64 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	170	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	100	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	37	I(KA)	12,551	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	22	H(s)	1,6	
xl(%)	15,4	D(pu)	0	
T'd(s)	9	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,154	Reatância de Potier
T''d(s)	0,06	xd(pu)	1,7	
T''q(s)	0,2	xd_(pu)	0,37	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	9	T'd
H(s)	1,6	xd__(pu)	0,22	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,06	T''d
S(MVA)	300	Xq(pu)	1	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,22	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,2	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.22.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-65, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Ibiúna estão apresentados na Tabela 4-66. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-65, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-66. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-520.

Tabela 4-65 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Ibiúna	
Ag	**Y1**	0,018
Bg	**Y2**	7,305
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-66 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,818	0,800
1,004	0,950
1,04	0,975
1,078	1,000
1,132	1,033
1,194	1,067
1,261	1,100
1,534	1,200
1,994	1,300

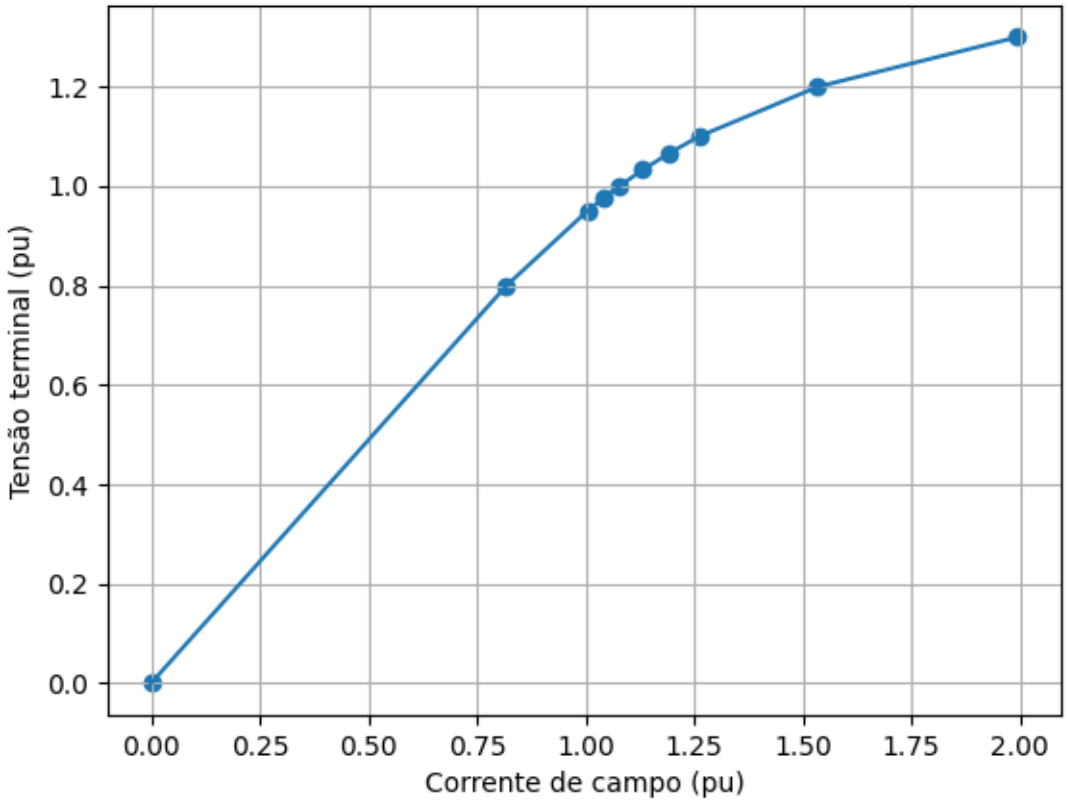

Figura 4-520 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.22.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.22.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.22.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.22.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

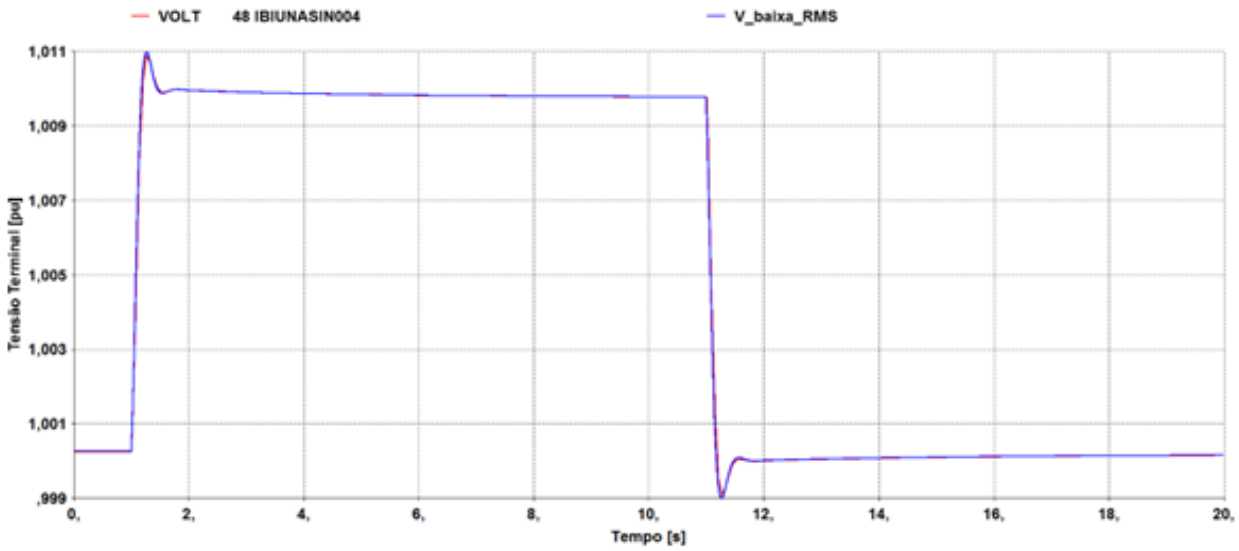

Figura 4-521 – Tensão terminal

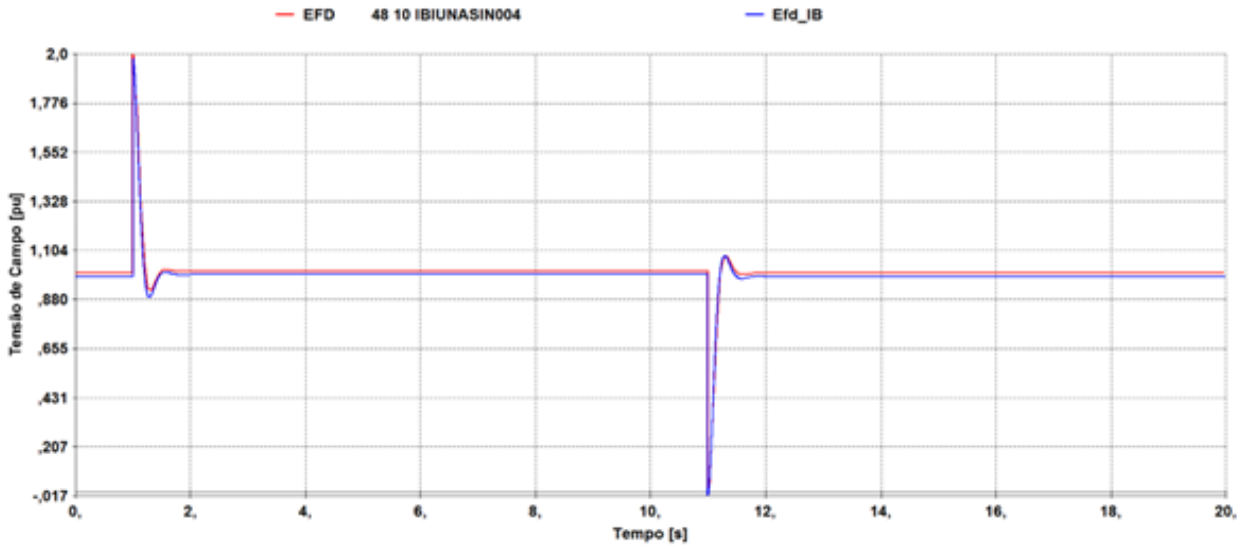

Figura 4-522 – Tensão de campo

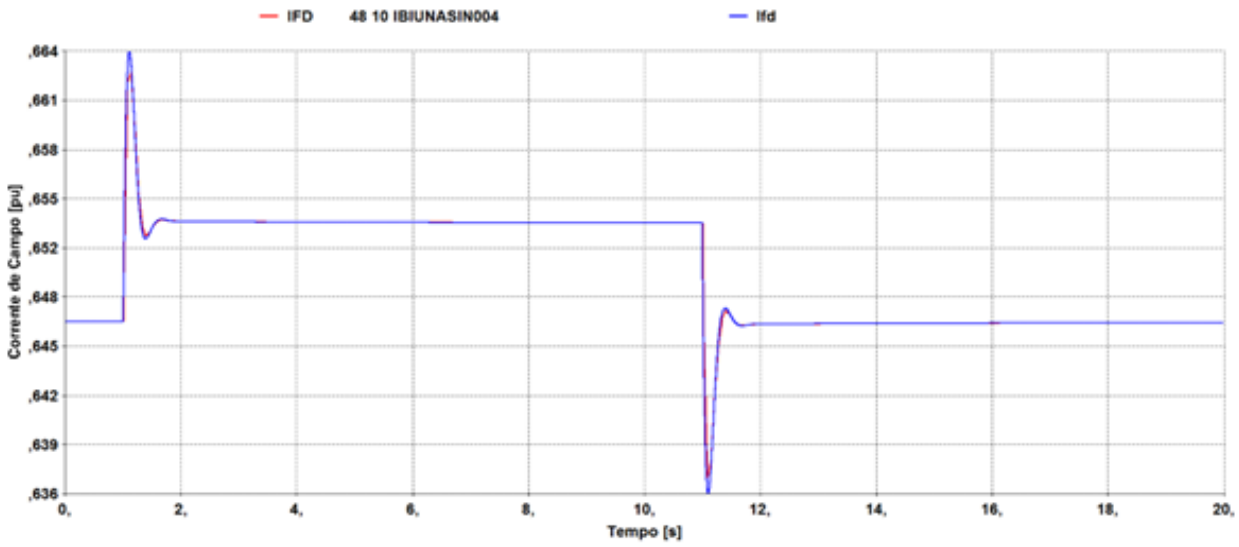

Figura 4-523 – Corrente de campo

4.22.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

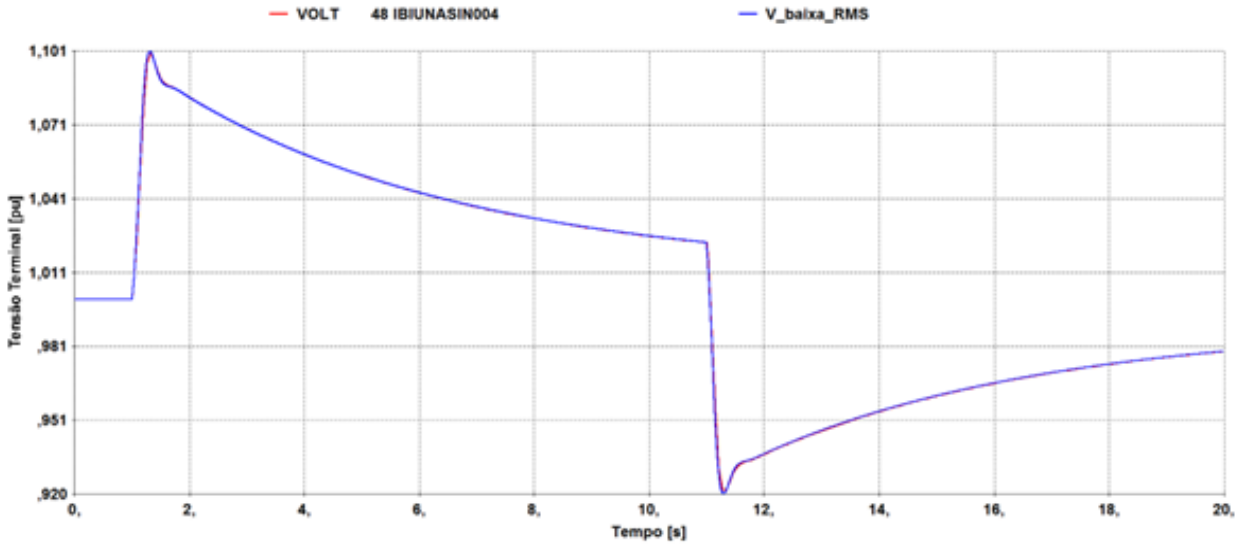

Figura 4-524 – Tensão terminal

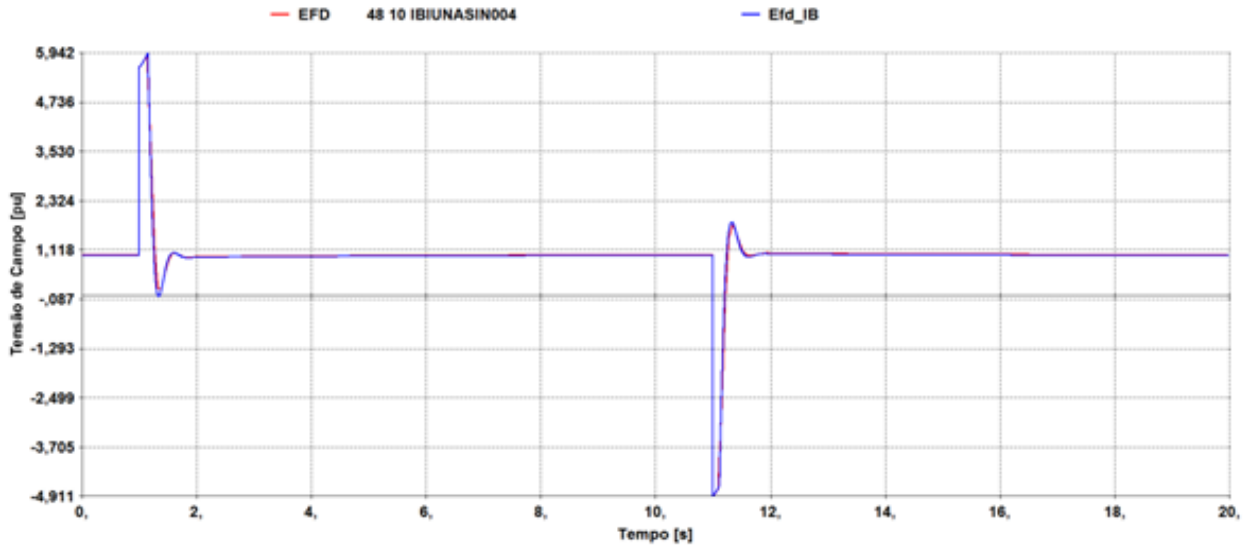

Figura 4-525 – Tensão de campo

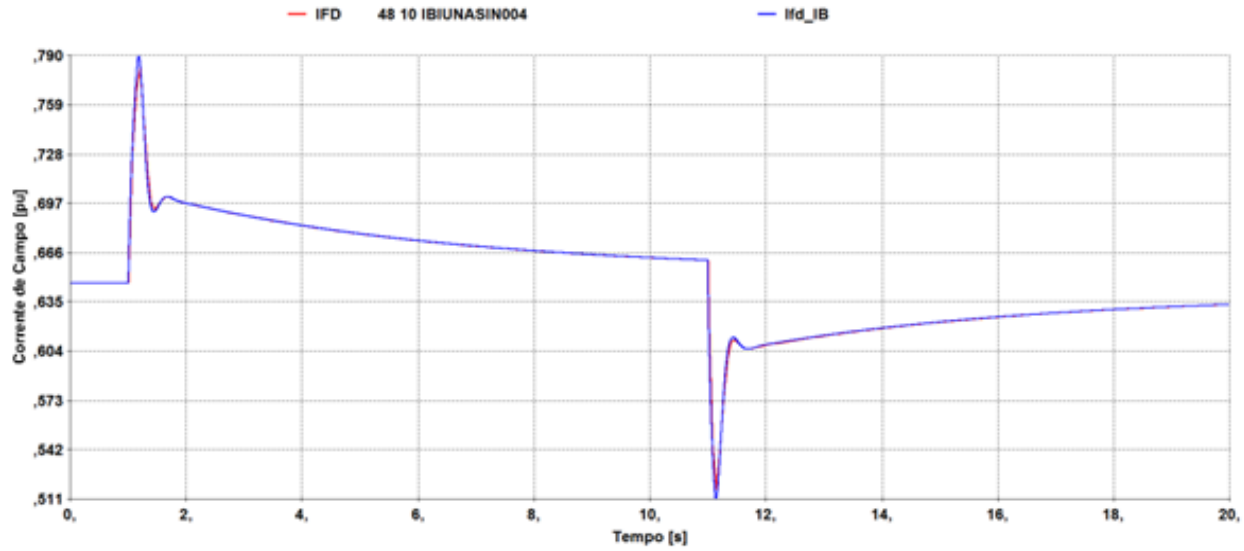

Figura 4-526 – Corrente de campo

4.22.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.22.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.22.4.2.

4.22.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

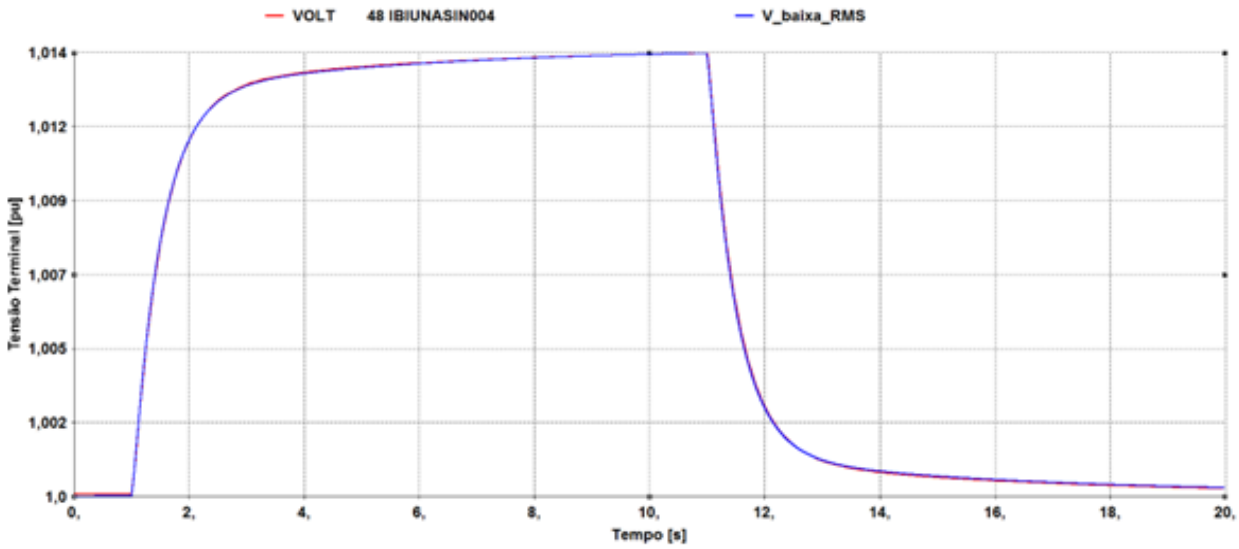

Figura 4-527 – Tensão terminal

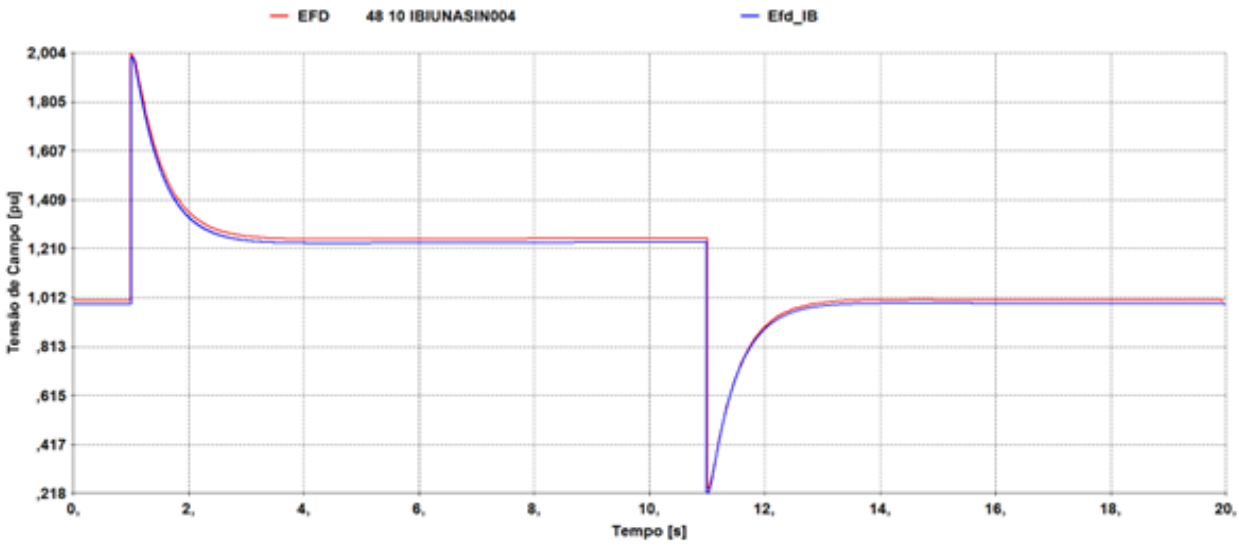

Figura 4-528 – Tensão de campo

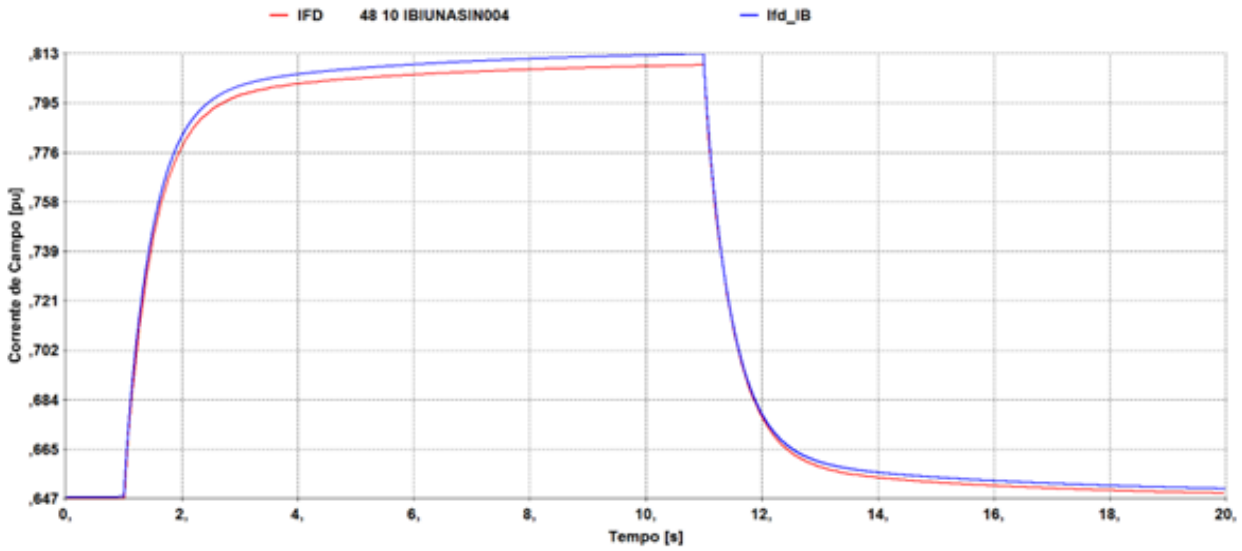

Figura 4-529 – Corrente de campo

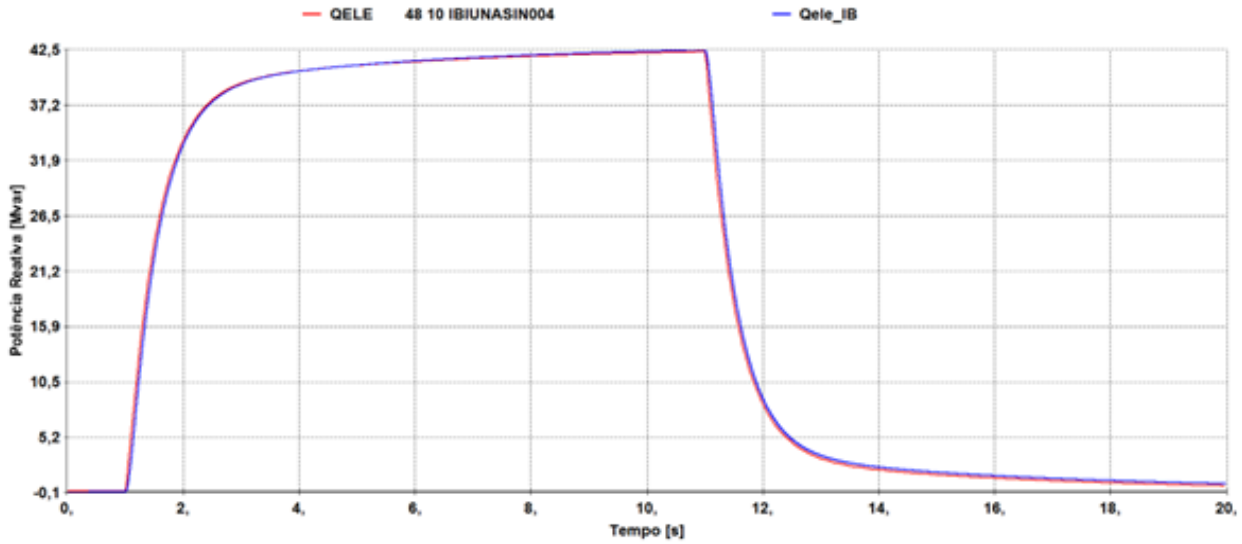

Figura 4-530 – Potência reativa

4.22.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

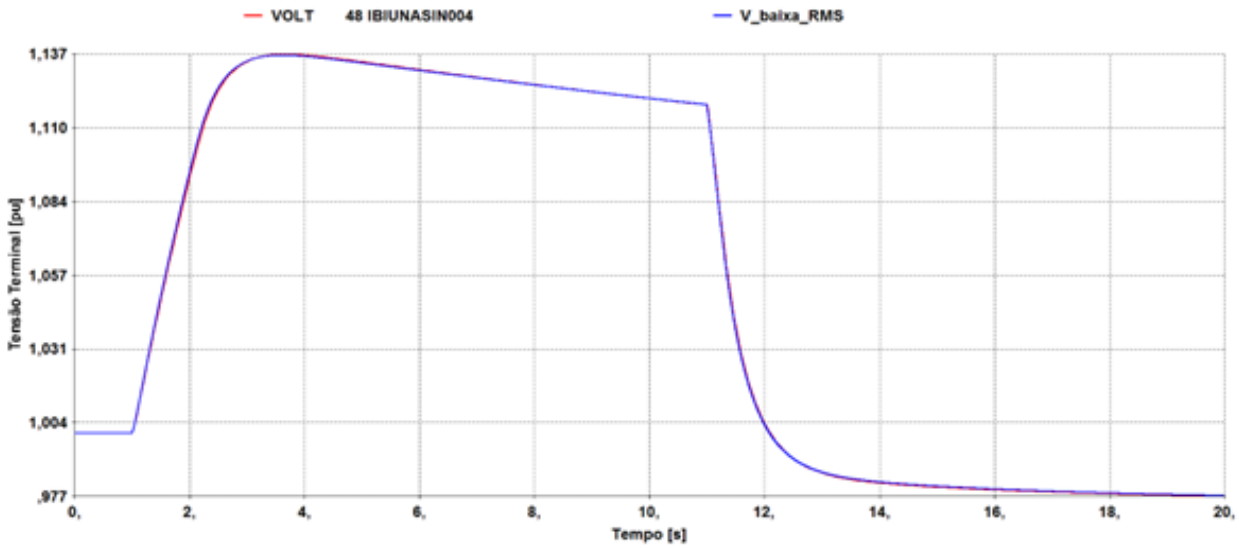

Figura 4-531 – Tensão terminal

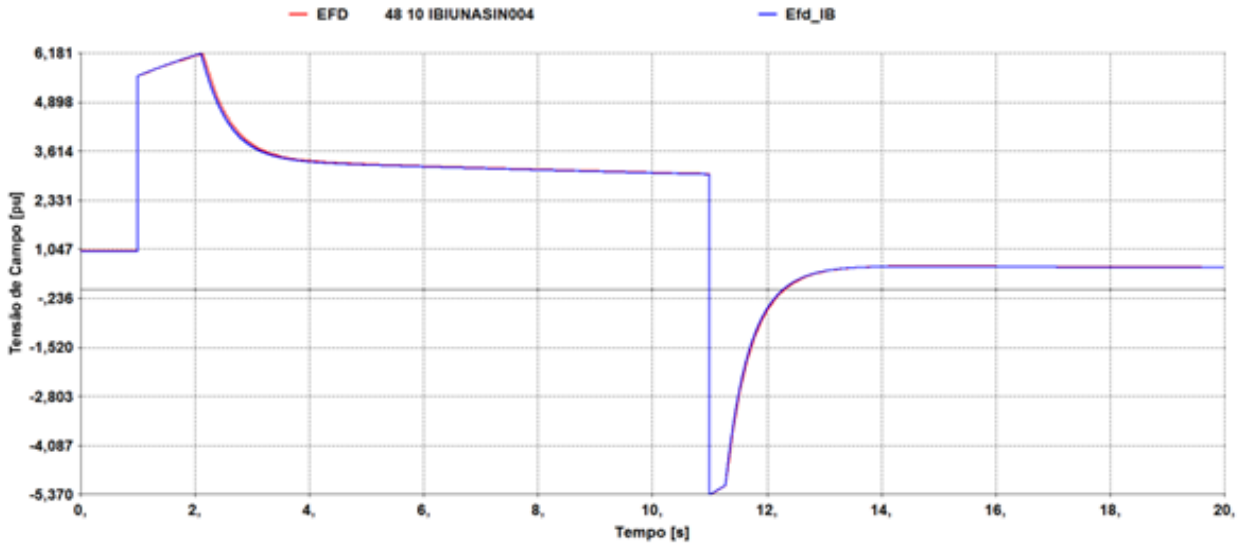

Figura 4-532 – Tensão de campo

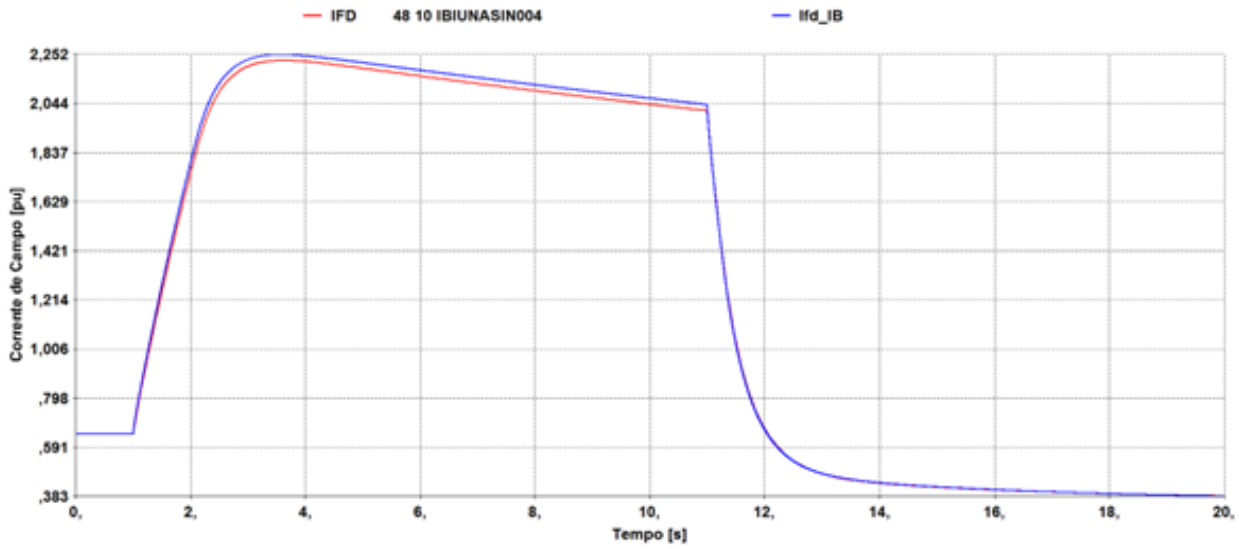

Figura 4-533 – Corrente de campo

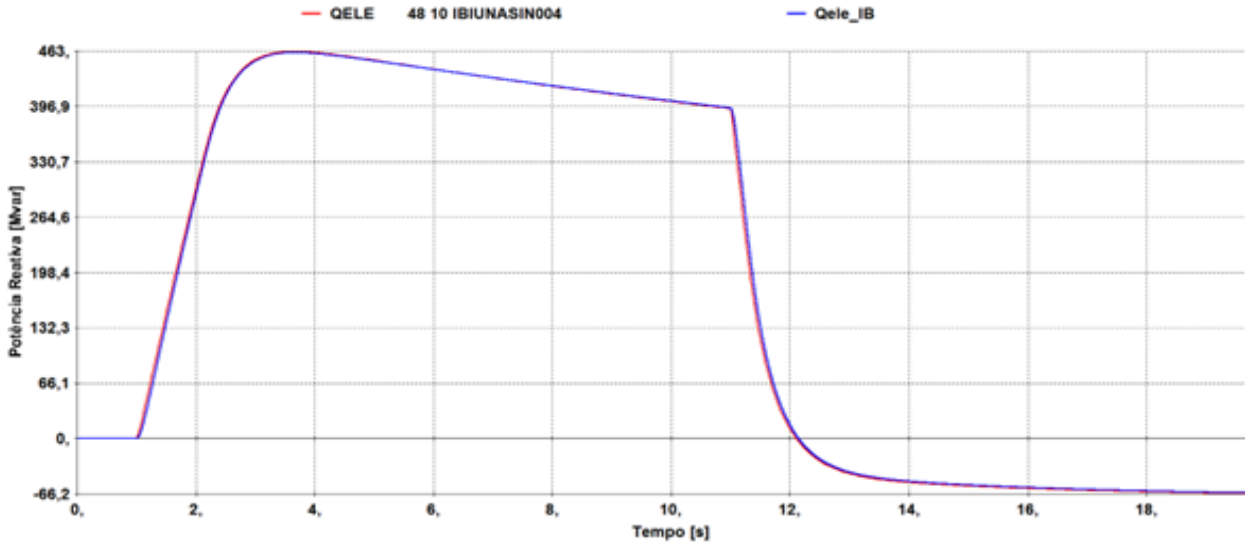

Figura 4-534 – Potência reativa

4.23 UTE BAIXADA FLUMINENSE – GÁS

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UTE Baixada Fluminense – Gás, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.23.1 Modelo da UTE Baixada Fluminense – Gás

A Tabela 4-67 apresenta os parâmetros da UTE Baixada Fluminense – Gás disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-67 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	193	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	182	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	24	I(KA)	8,953	
x'q (%)	43,5	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	18	H(s)	5,319	
xl(%)	13,5	D(pu)	0	
T'd(s)	7	Ra(pu)	0,003	
T'q(s)	0,56	xp(pu)	0,135	Reatância de Potier
T''d(s)	0,04	xd(pu)	1,93	
T''q(s)	0,081	xd_(pu)	0,24	x'd
Ra(%)	0,27	Td0_(s)	7	T'd
H(s)	5,319	xd__(pu)	0,18	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,04	T''d
S(MVA)	214	Xq(pu)	1,82	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,435	x'q
		Tq0_(s)	0,56	T'q
		xq__(pu)	0,18	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,081	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.23.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-68, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UTE Baixada Fluminense – Gás estão apresentados na Tabela 4-69. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-68, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-69. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-535.

Tabela 4-68 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UTE Baixada Fluminense – Gas	
Ag	**Y1**	0,006776
Bg	**Y2**	11,74681
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-69 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,807	0,800
0,989	0,950
1,028	0,975
1,071	1,000
1,138	1,033
1,223	1,067
1,33	1,100
1,944	1,200
3,709	1,300

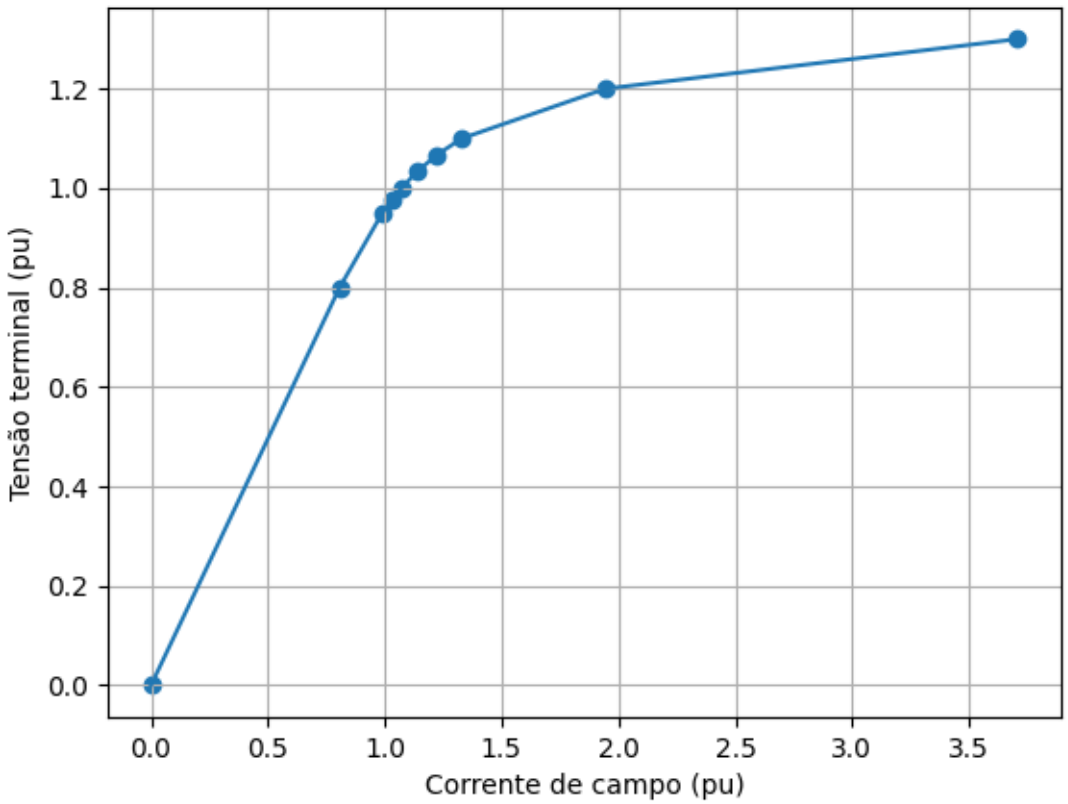

Figura 4-535 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.23.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.23.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.23.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.23.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

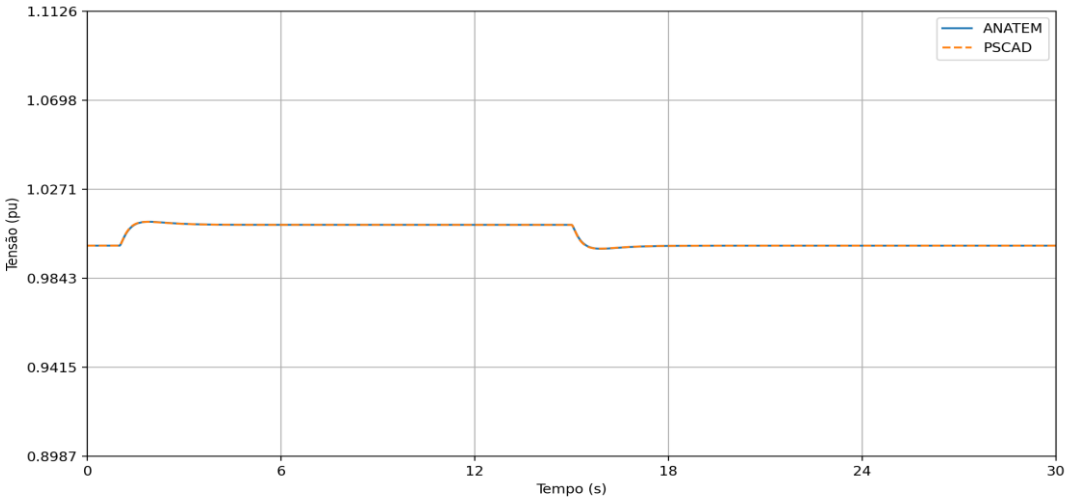

Figura 4-536 – Tensão terminal

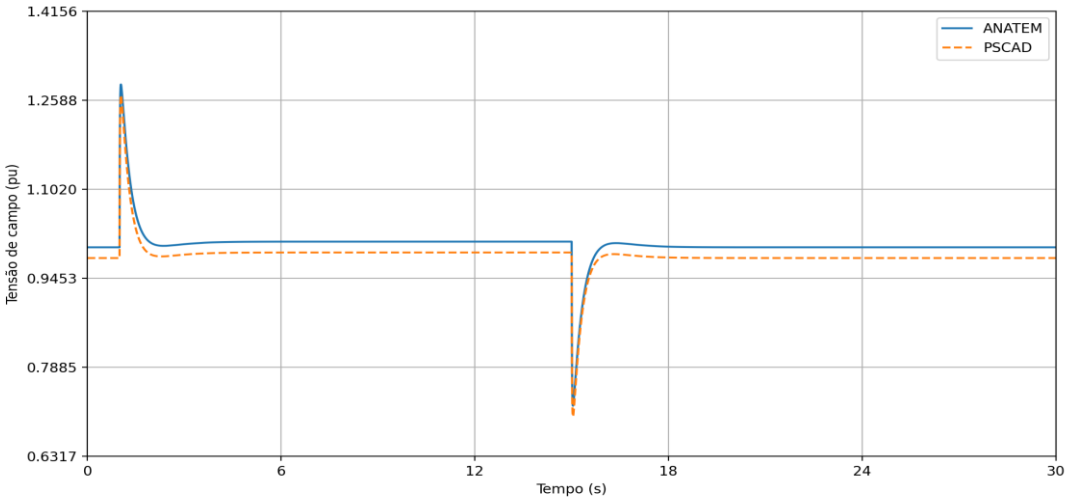

Figura 4-537 – Tensão de campo

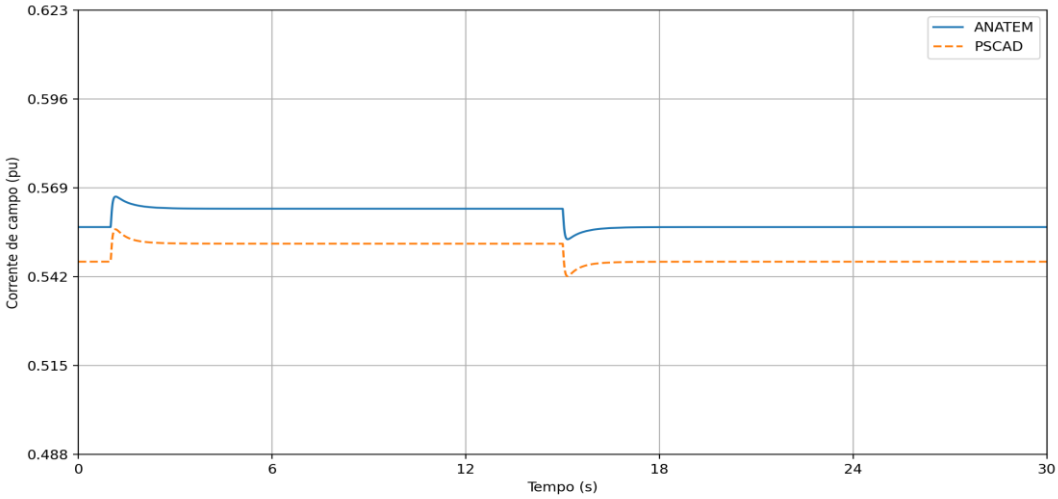

Figura 4-538 – Corrente de campo

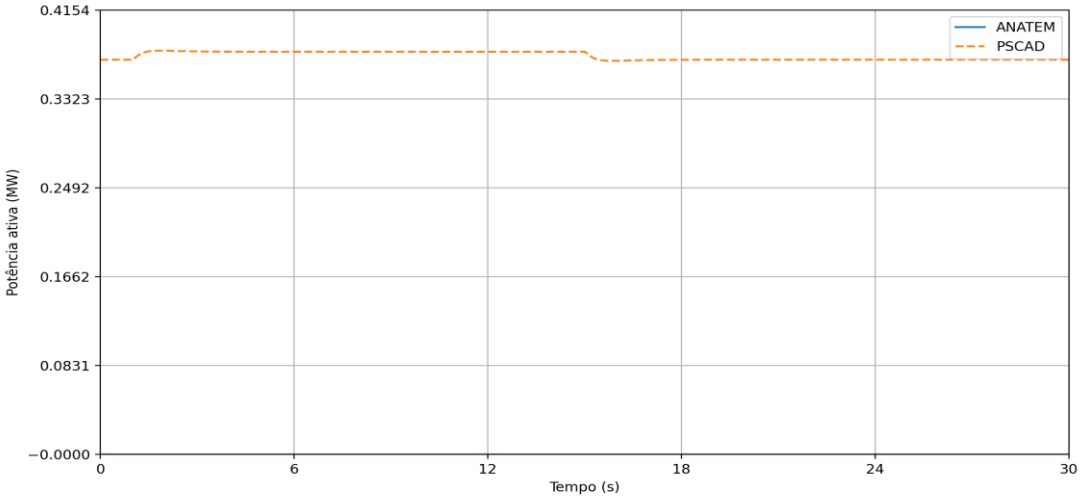

Figura 4-539 – Potência ativa

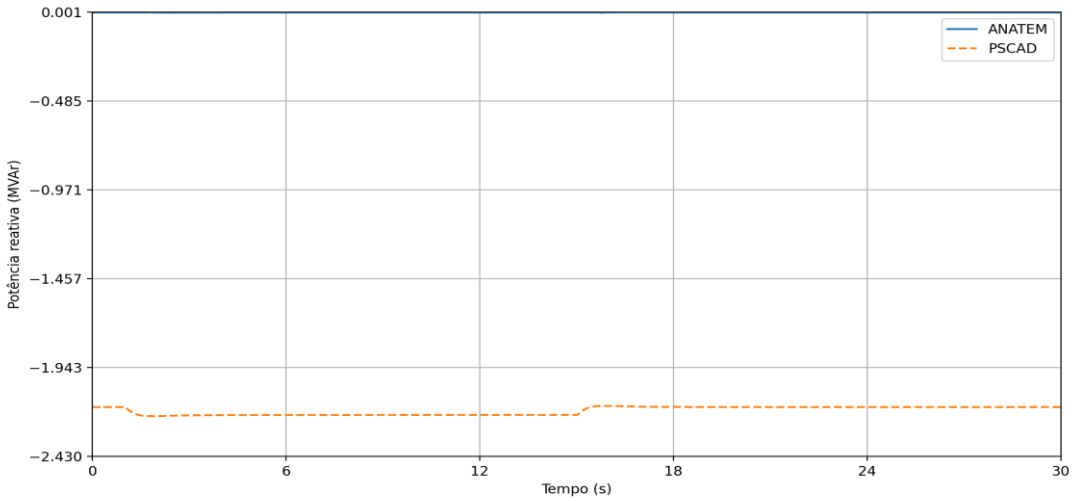

Figura 4-540 – Potência reativa

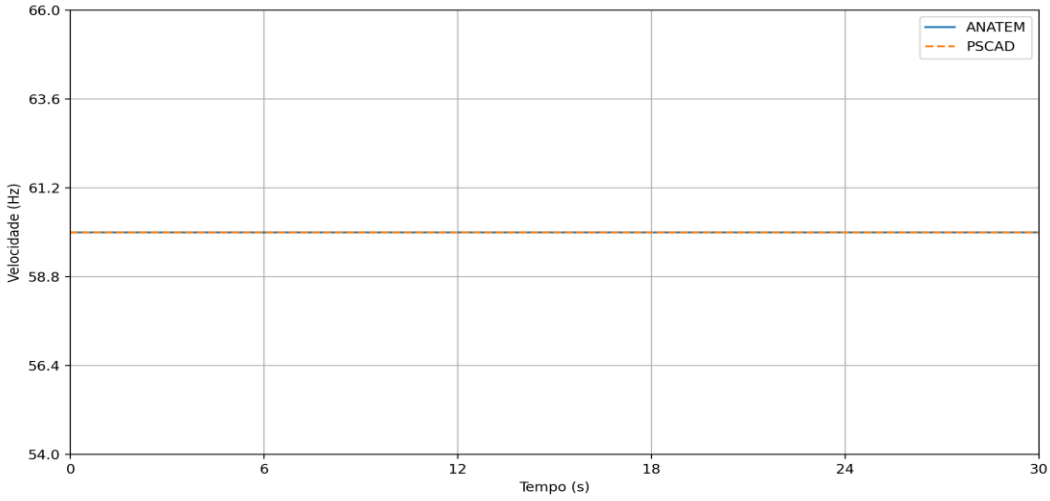

Figura 4-541 – Velocidade da máquina

4.23.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

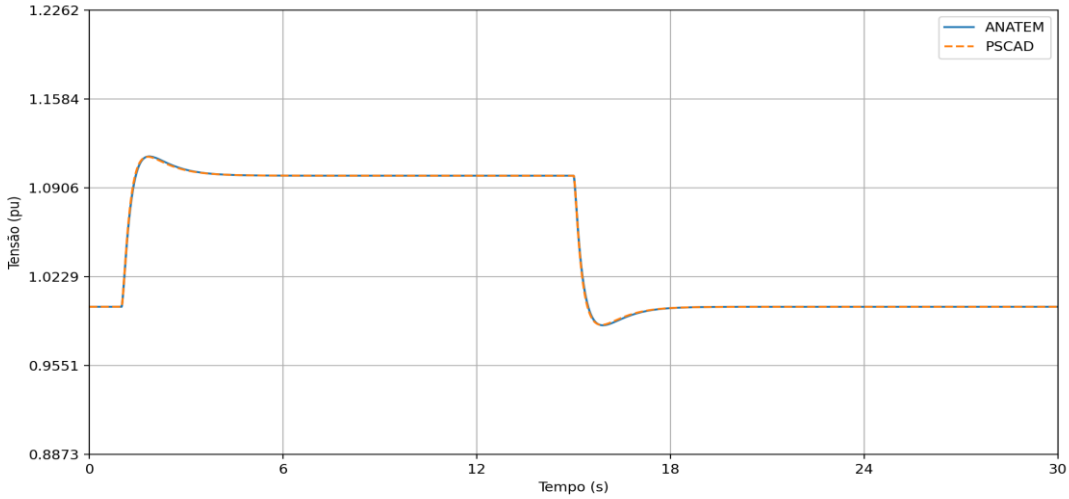

Figura 4-542 – Tensão terminal

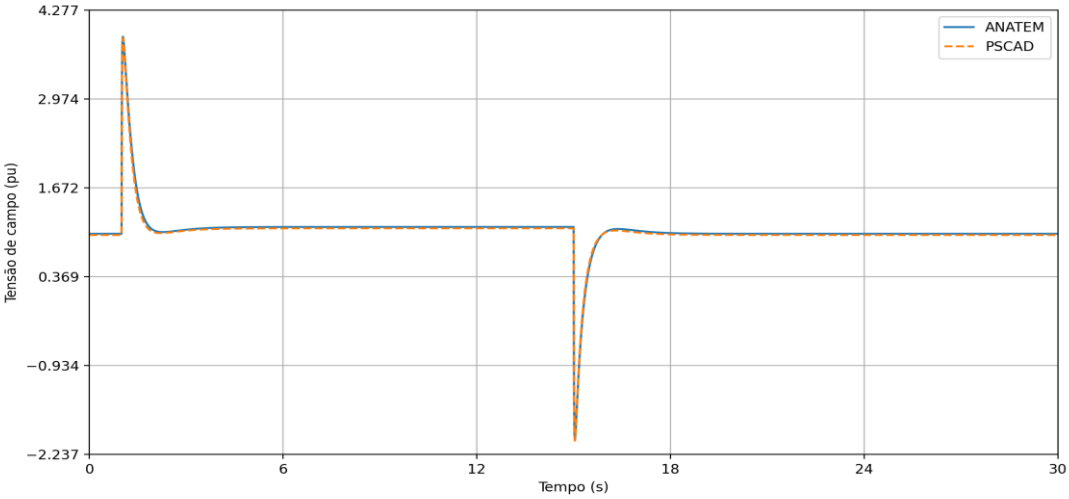

Figura 4-543 – Tensão de campo

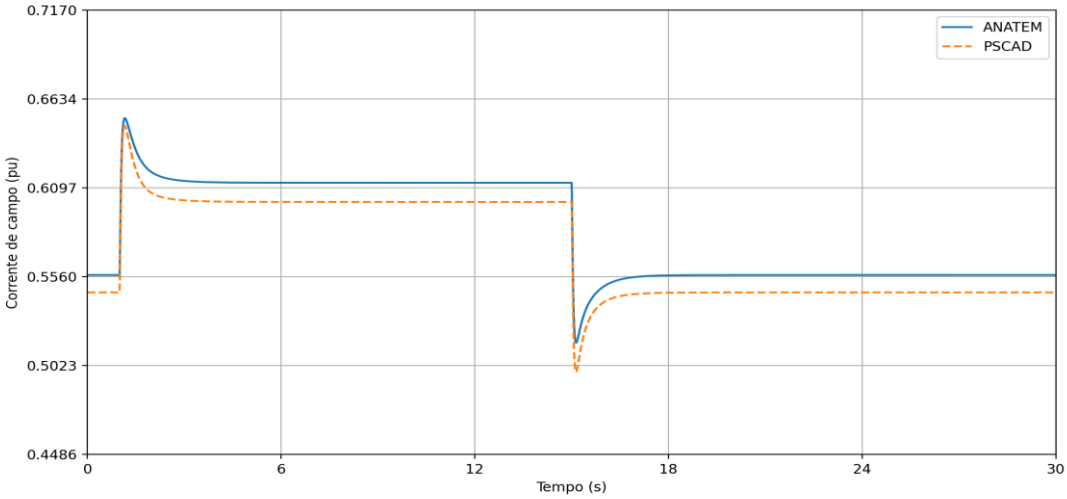

Figura 4-544 – Corrente de campo

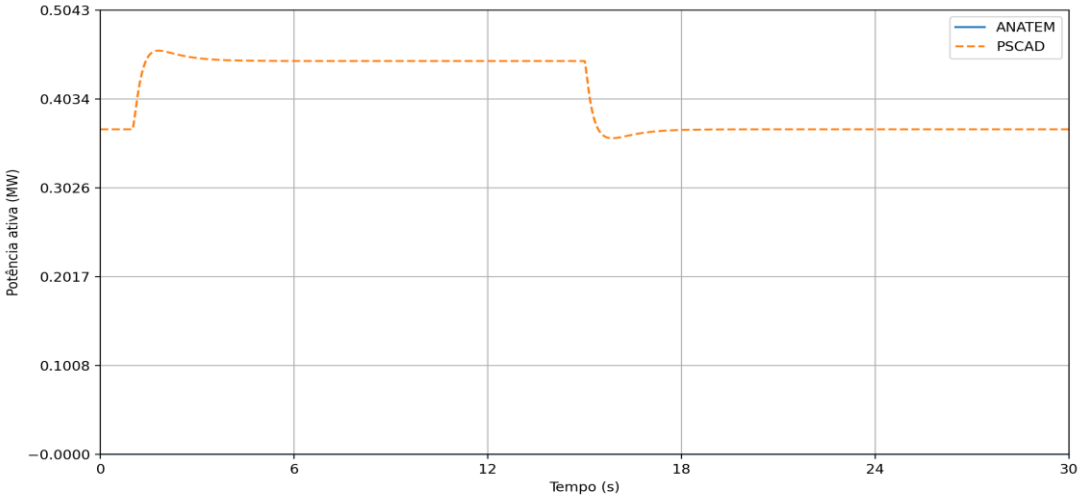

Figura 4-545 – Potência ativa

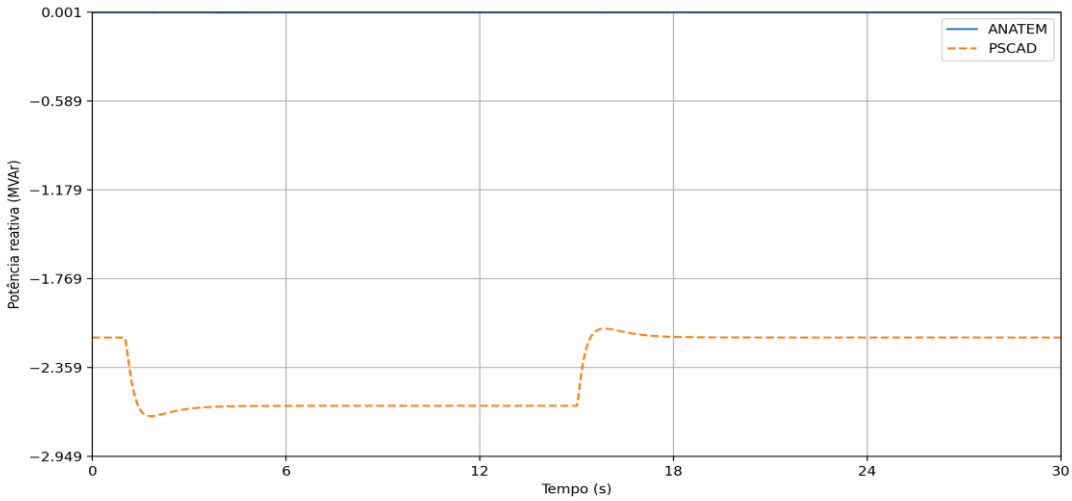

Figura 4-546 – Potência reativa

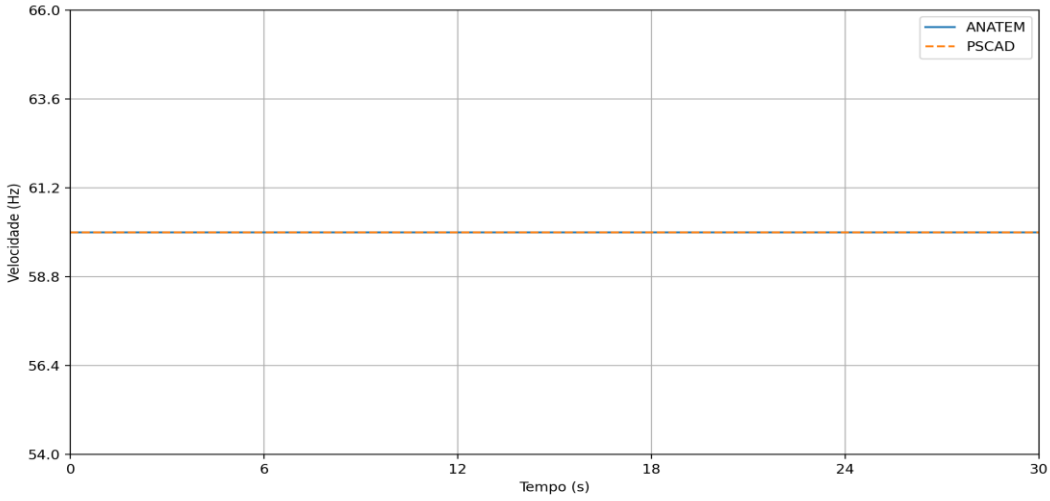

Figura 4-547 – Velocidade da máquina

4.23.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.23.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.23.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.23.4.3.

4.23.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

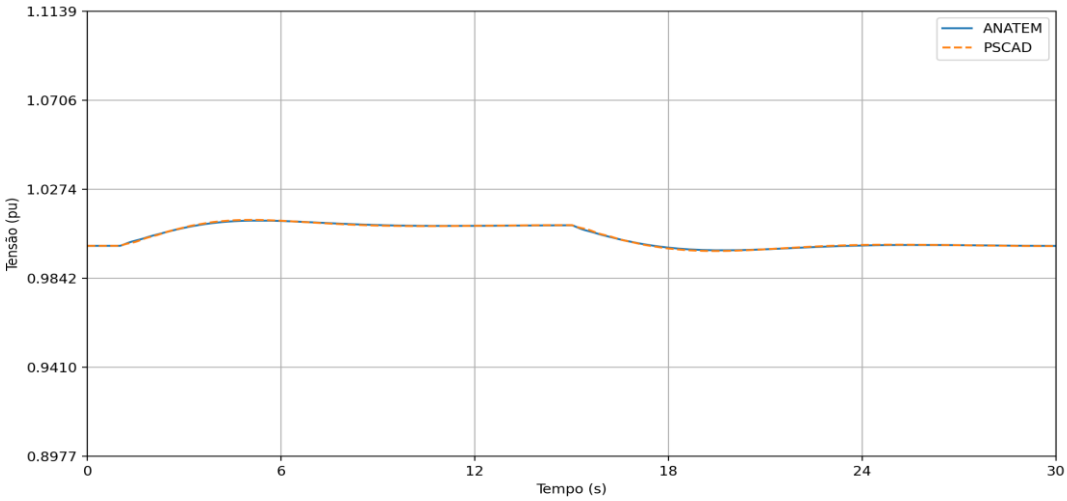

Figura 4-548 – Tensão terminal

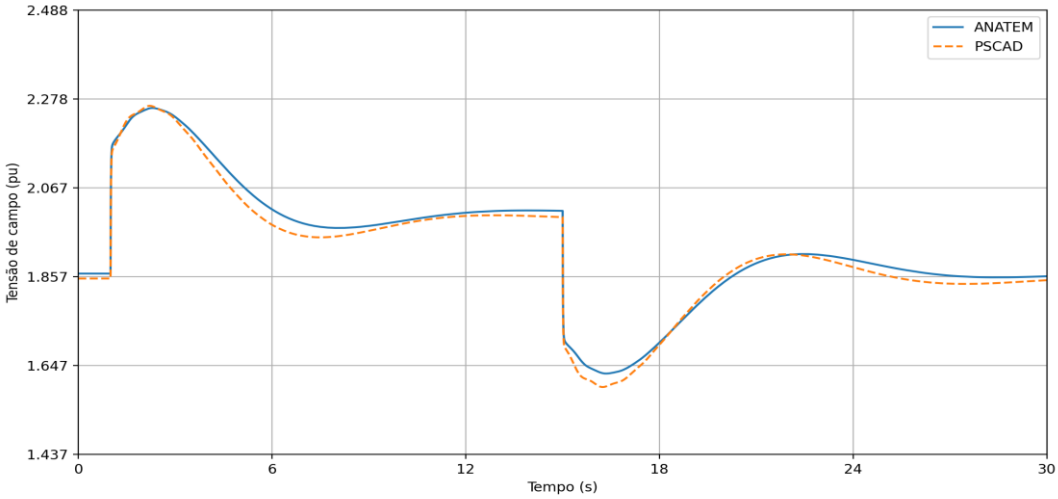

Figura 4-549 – Tensão de campo

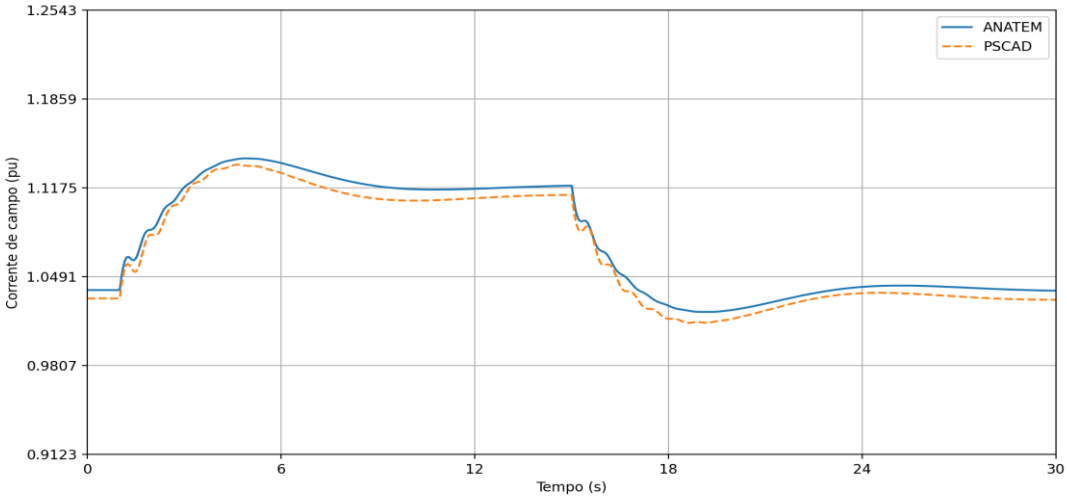

Figura 4-550 – Corrente de campo

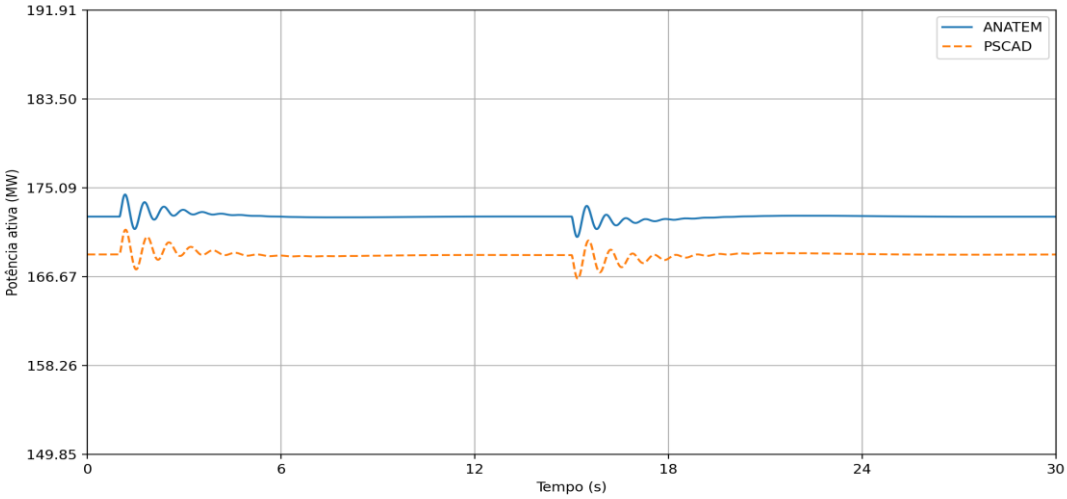

Figura 4-551 – Potência ativa

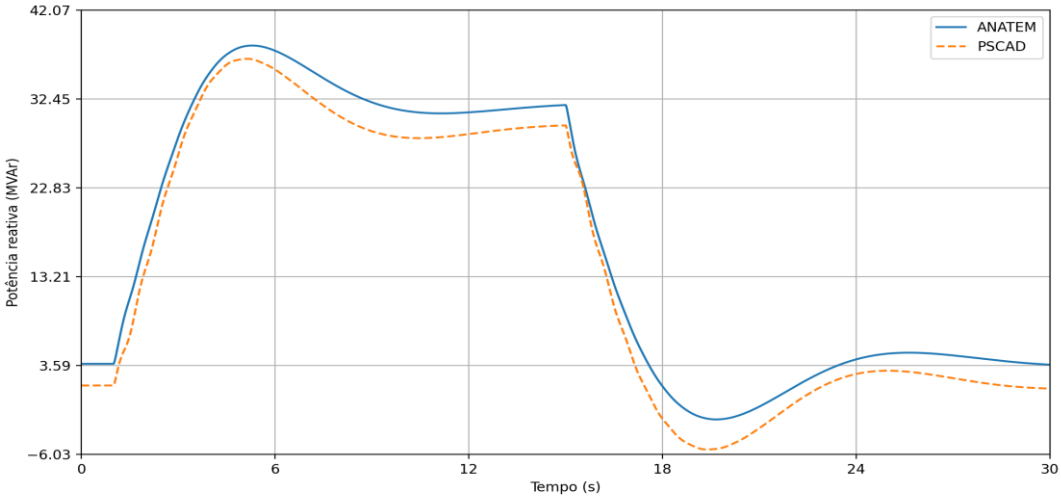

Figura 4-552 – Potência reativa

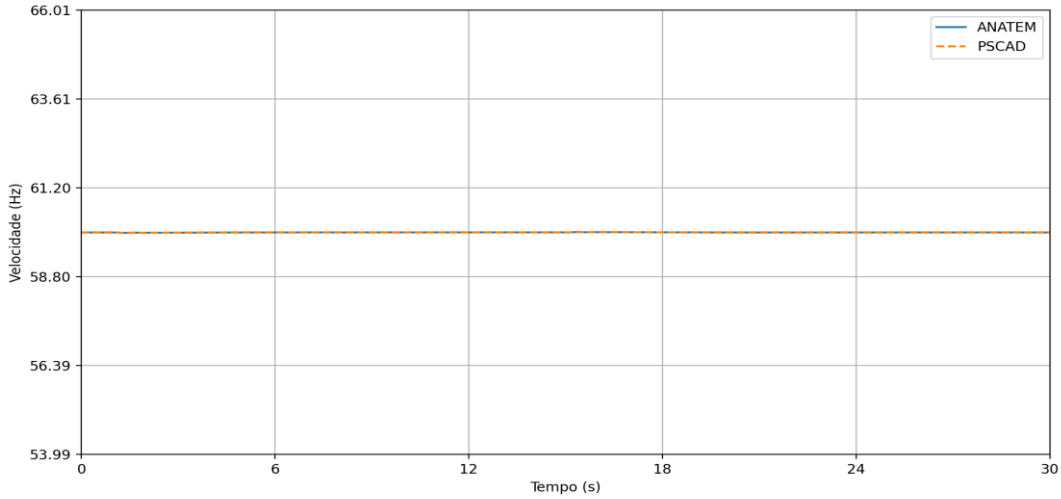

Figura 4-553 – Velocidade da máquina

4.23.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

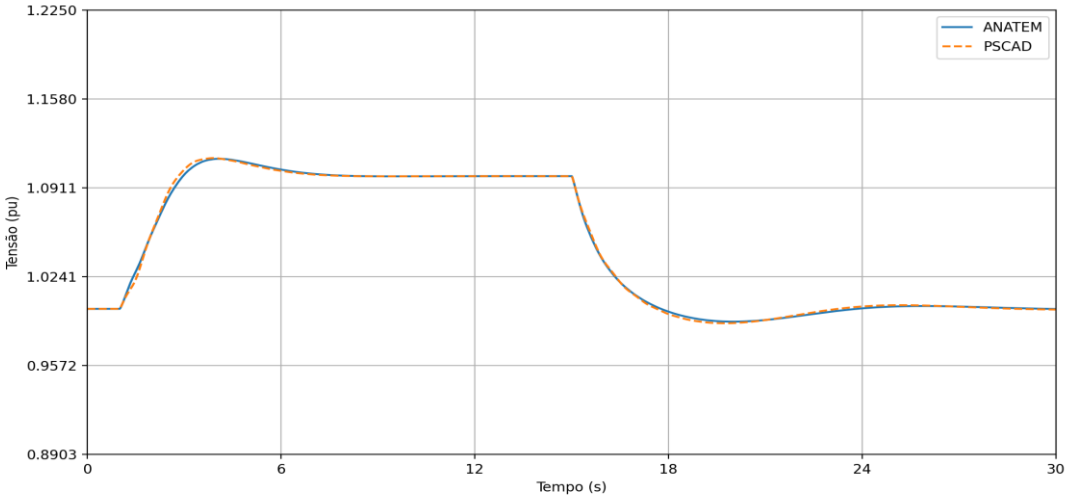

Figura 4-554 – Tensão terminal

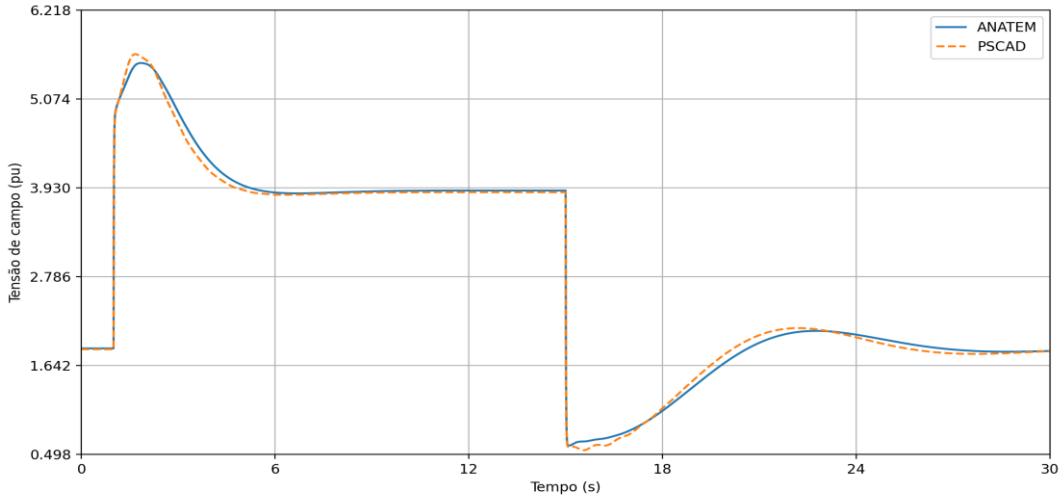

Figura 4-555 – Tensão de campo

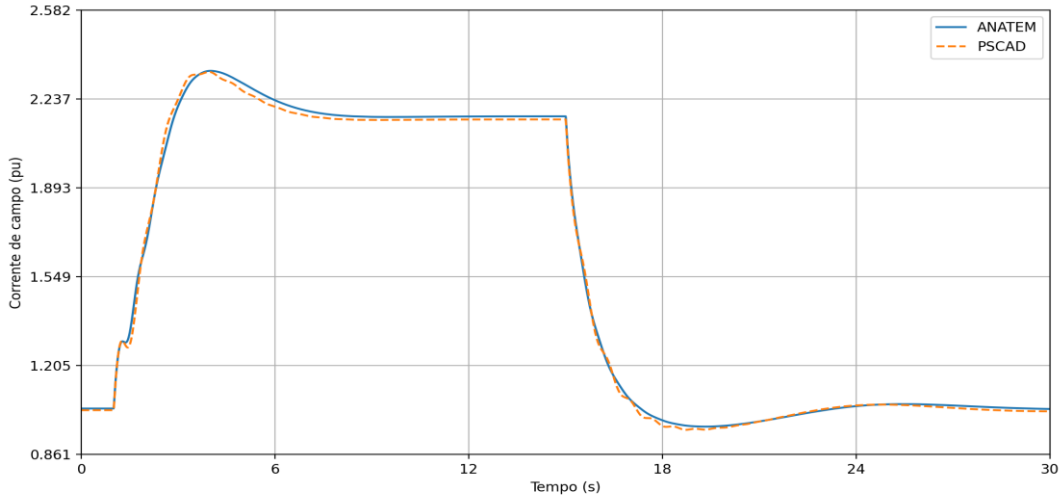

Figura 4-556 – Corrente de campo

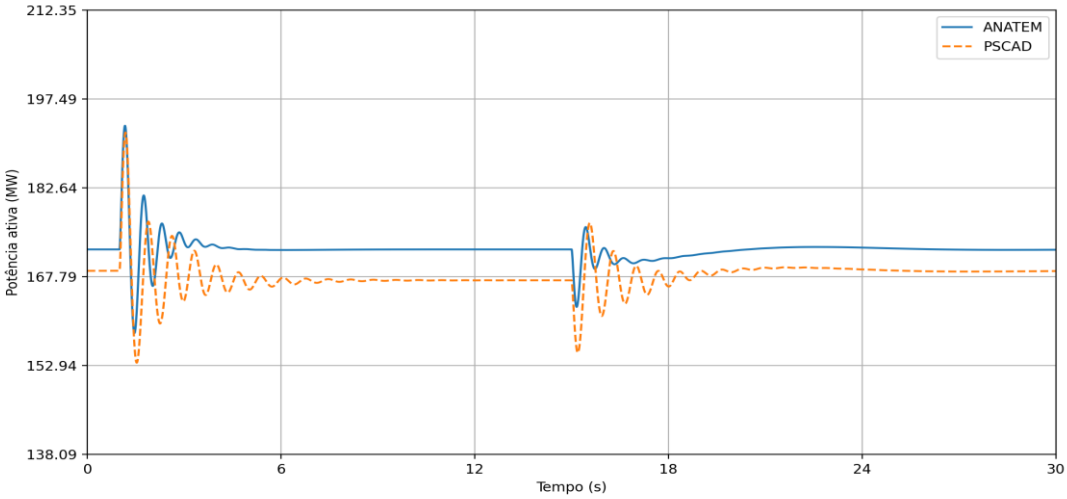

Figura 4-557 – Potência ativa

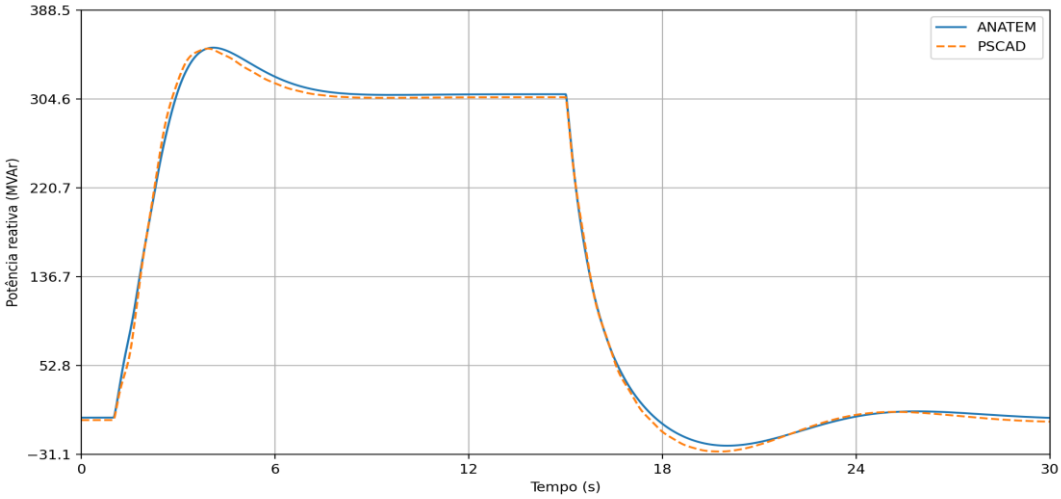

Figura 4-558 – Potência reativa

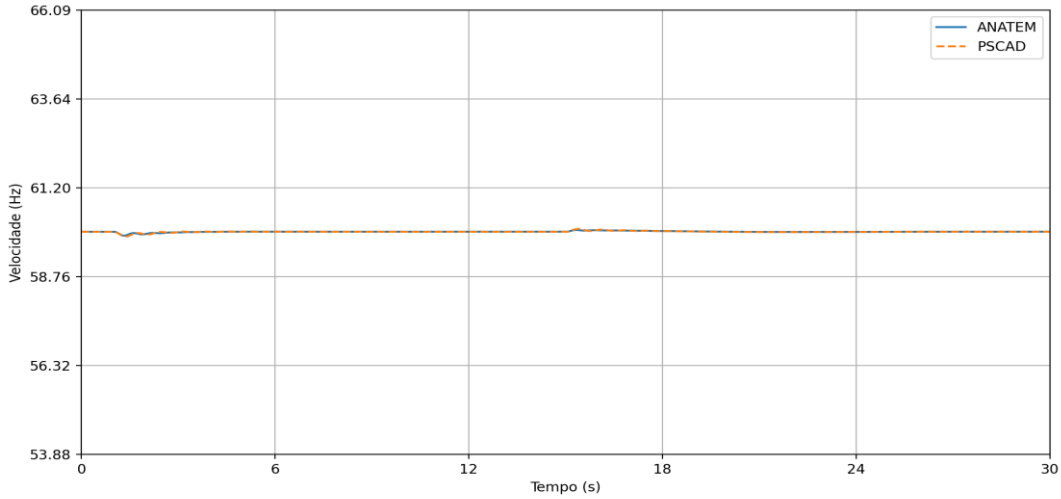

Figura 4-559 – Velocidade da máquina

4.23.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

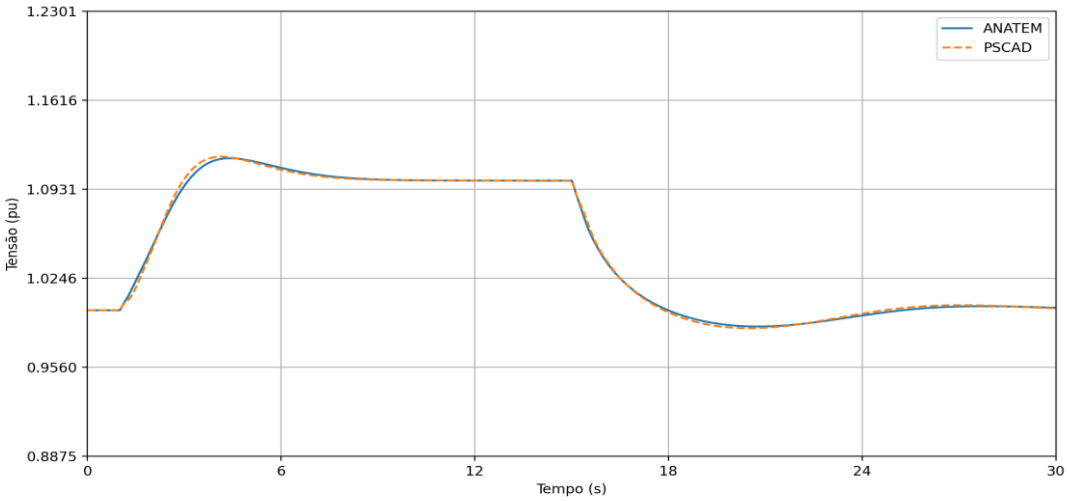

Figura 4-560 – Tensão terminal

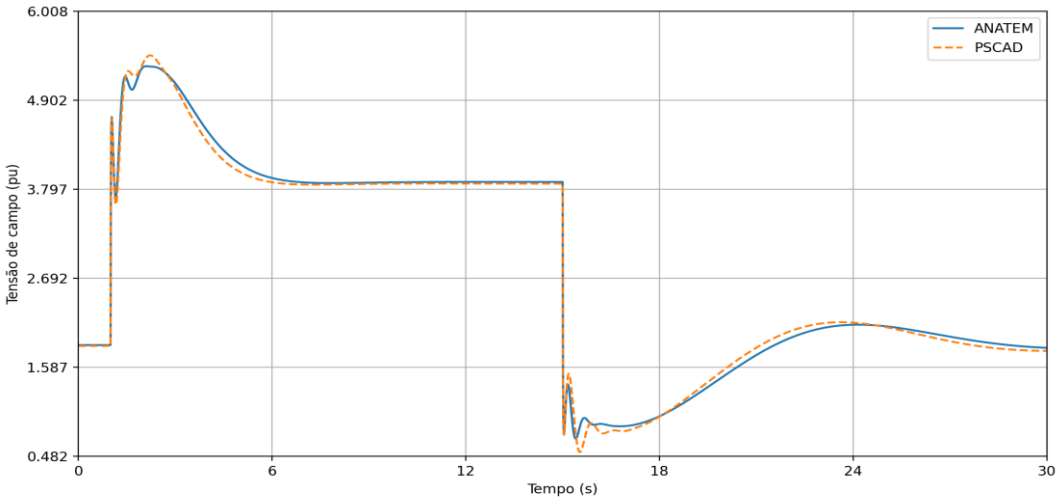

Figura 4-561 – Tensão de campo

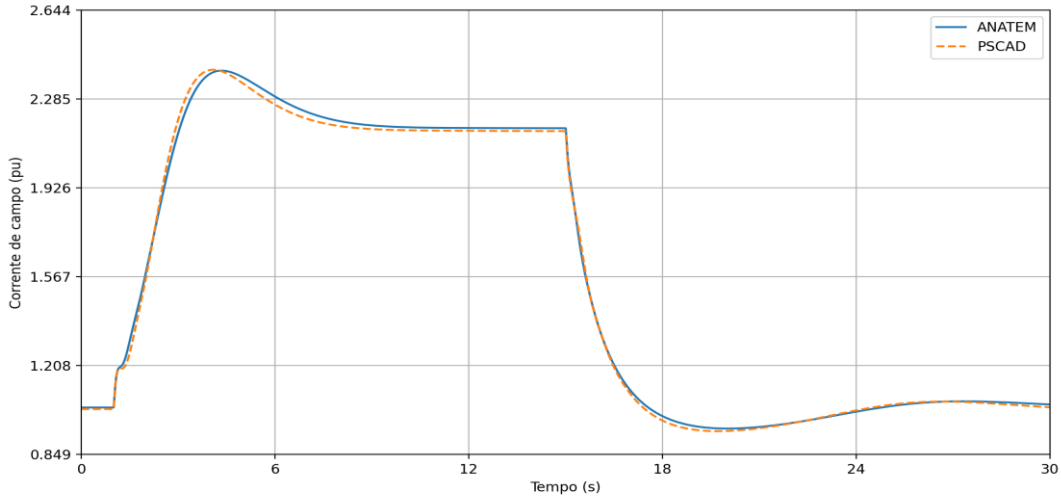

Figura 4-562 – Corrente de campo

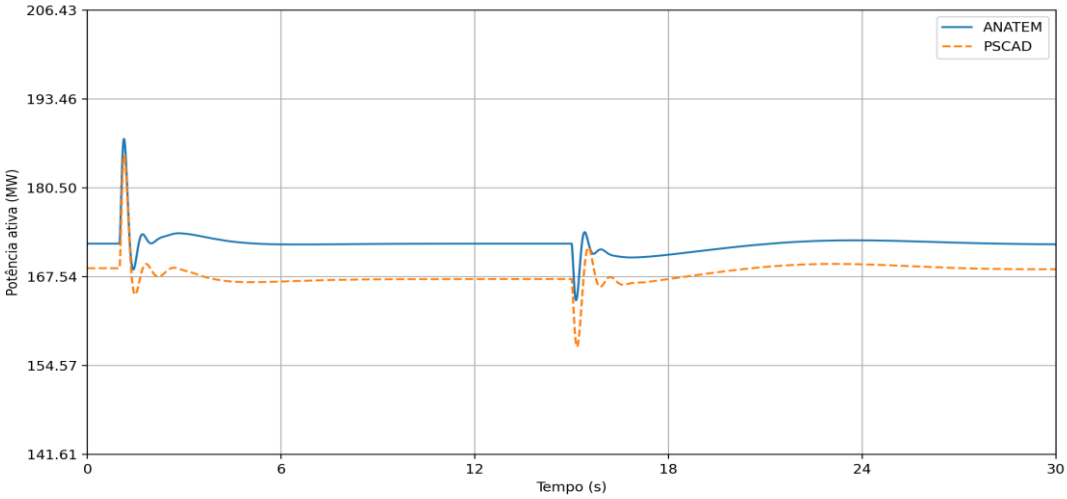

Figura 4-563 – Potência ativa

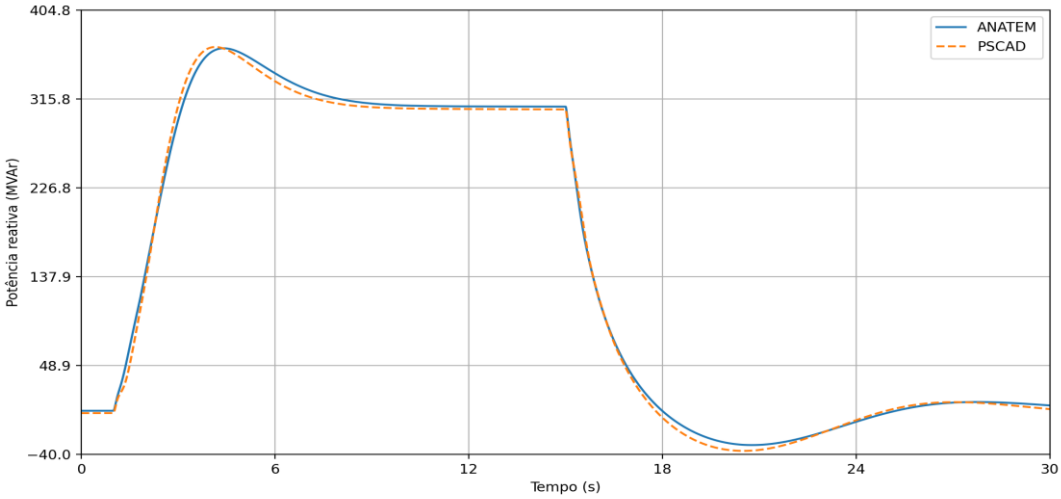

Figura 4-564 – Potência reativa

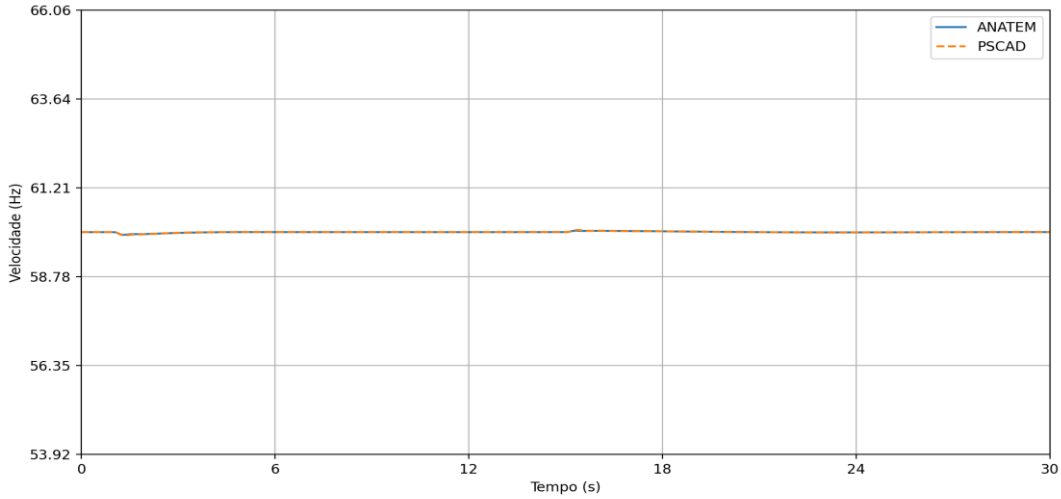

Figura 4-565 – Velocidade da máquina

4.24 UTE BAIXADA FLUMINENSE – VAPOR

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UTE Baixada Fluminense – Vapor, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.24.1 Modelo da UTE Baixada Fluminense – Vapor

A Tabela 4-70 apresenta os parâmetros da UTE Baixada Fluminense – Vapor disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-70 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	207	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	195	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	26	I(KA)	9,623	
x'q (%)	45,5	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	19,5	H(s)	4,39	
xl(%)	14,5	D(pu)	0	
T'd(s)	7	Ra(pu)	0,003	
T'q(s)	0,57	xp(pu)	0,145	Reatância de Potier
T''d(s)	0,04	xd(pu)	2,07	
T''q(s)	0,079	xd_(pu)	0,26	x'd
Ra(%)	0,29	Td0_(s)	7	T'd
H(s)	4,39	xd__(pu)	0,195	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,04	T''d
S(MVA)	230	Xq(pu)	1,95	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,455	x'q
		Tq0_(s)	0,57	T'q
		xq__(pu)	0,195	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,079	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.24.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-71, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UTE Baixada Fluminense – Vapor estão apresentados na Tabela 4-72. A partir dos parâmetros da Tabela 4-71, calcula-se os dados a serem

introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-72. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-566.

Tabela 4-71 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UTE Baixada Fluminense – Vapor	
Ag	**Y1**	0,006512
Bg	**Y2**	11,67688
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-72 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,807	0,800
0,988	0,950
1,025	0,975
1,067	1,000
1,132	1,033
1,214	1,067
1,316	1,100
1,895	1,200
3,535	1,300

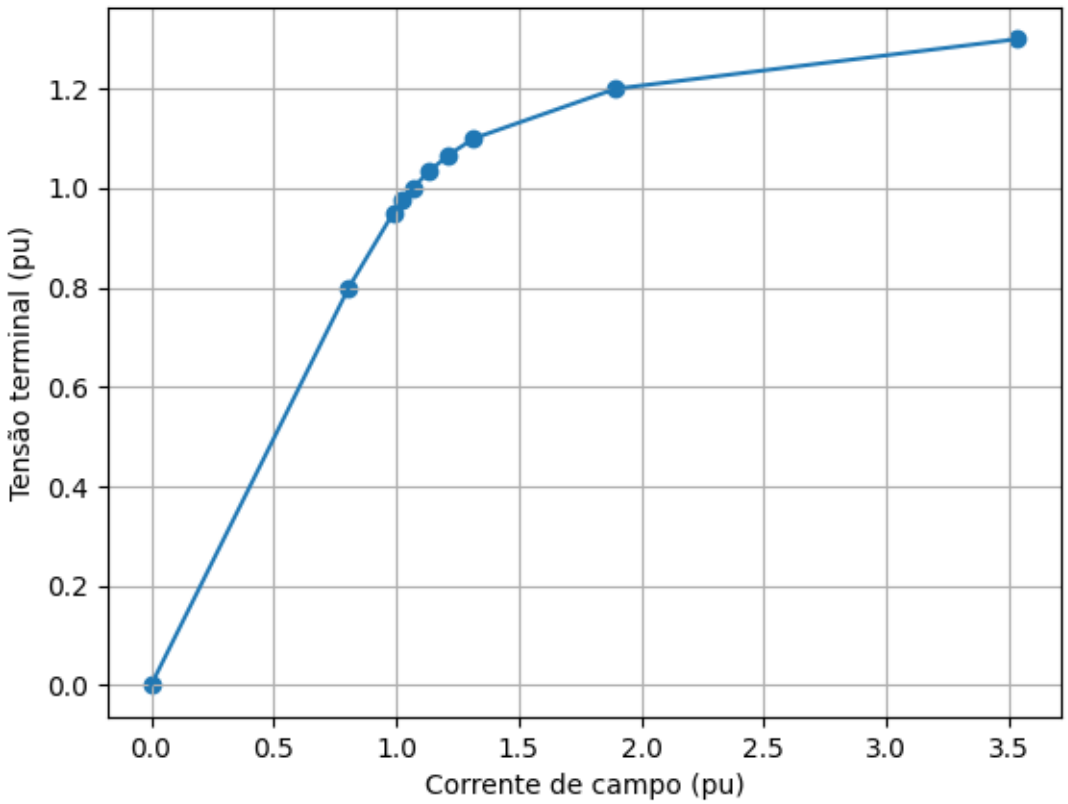

Figura 4-566 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.24.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.24.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.24.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.24.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

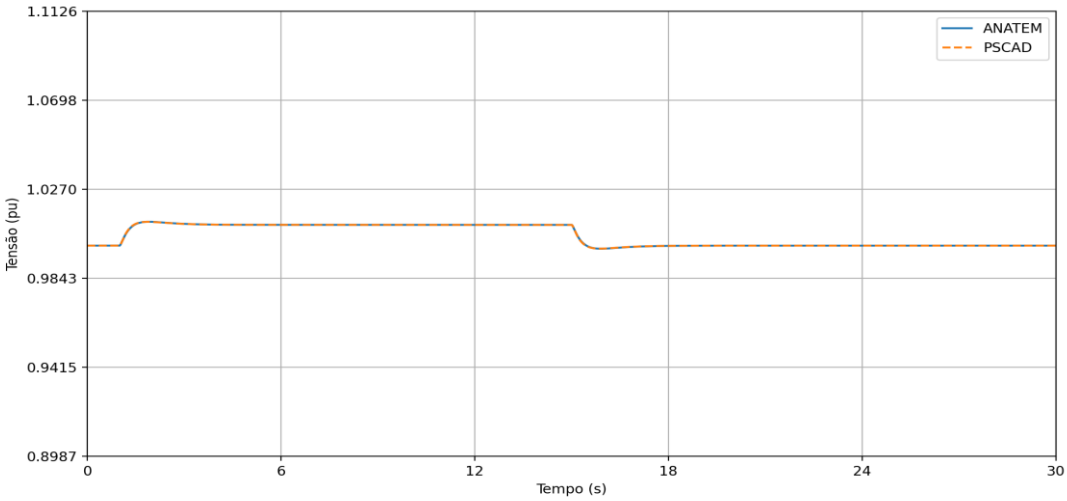

Figura 4-567 – Tensão terminal

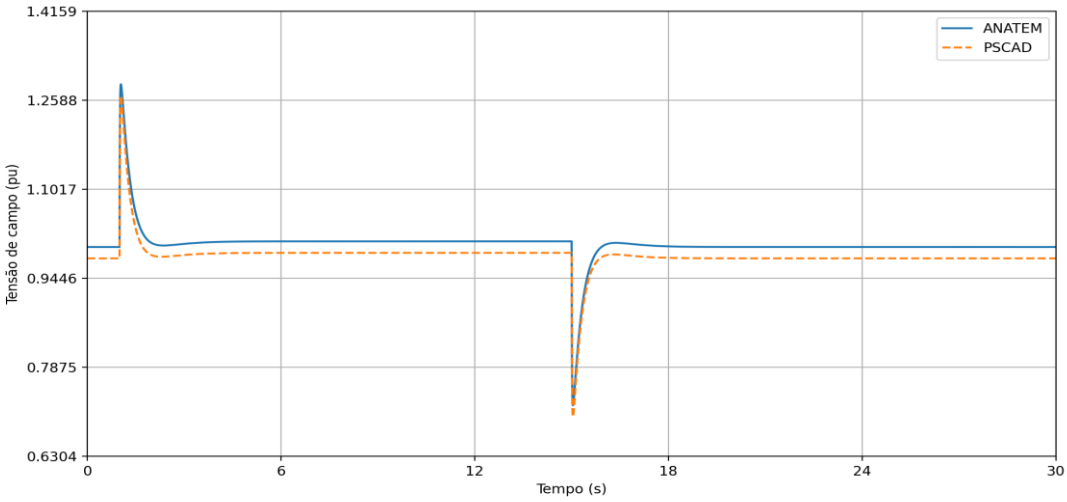

Figura 4-568 – Tensão de campo

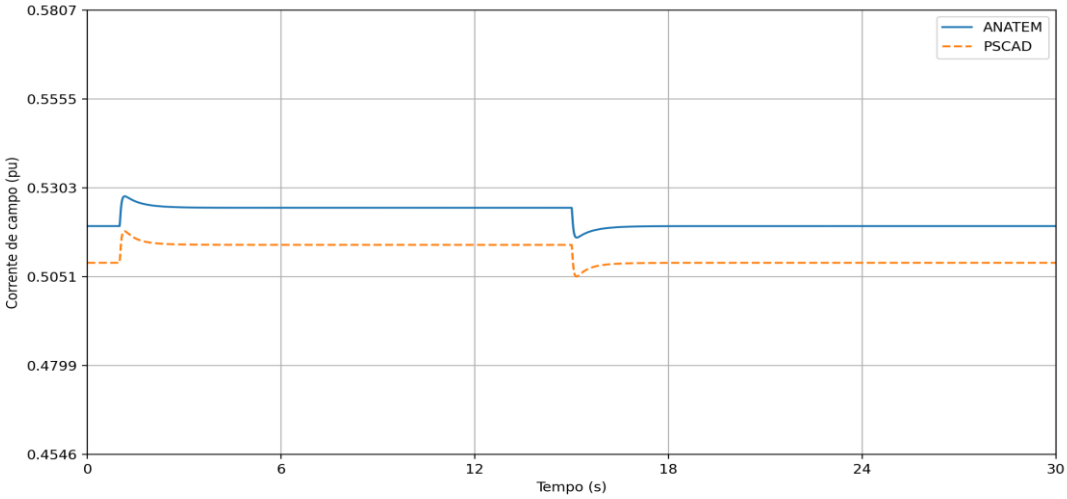

Figura 4-569 – Corrente de campo

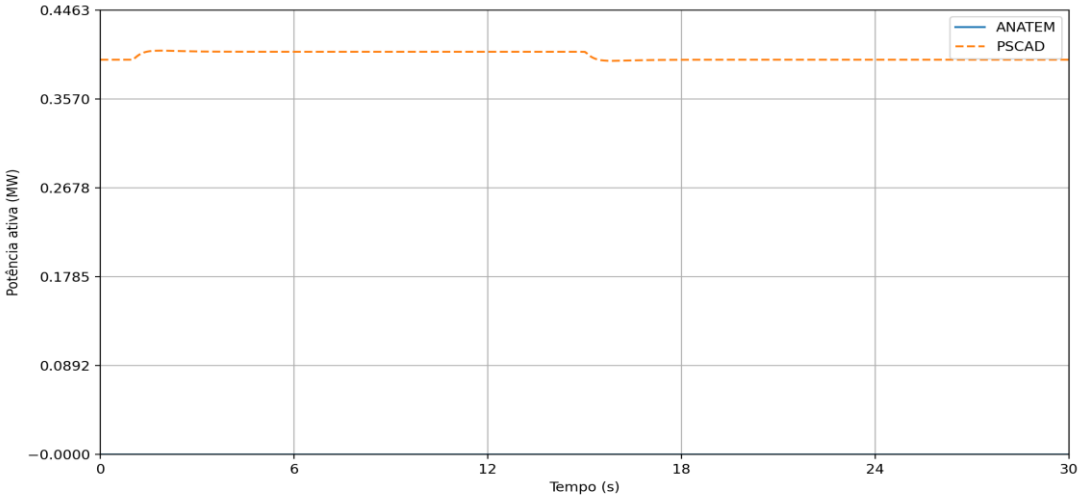

Figura 4-570 – Potência ativa

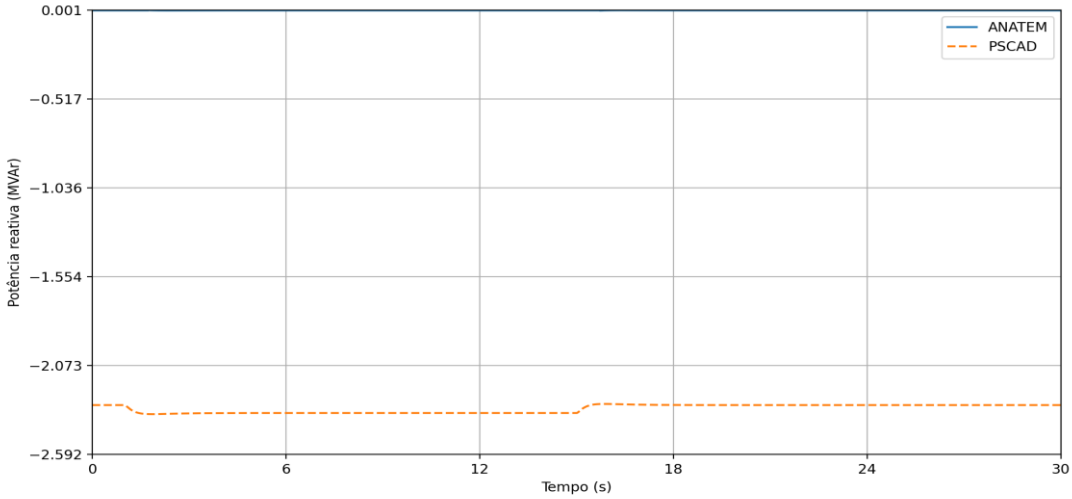

Figura 4-571 – Potência reativa

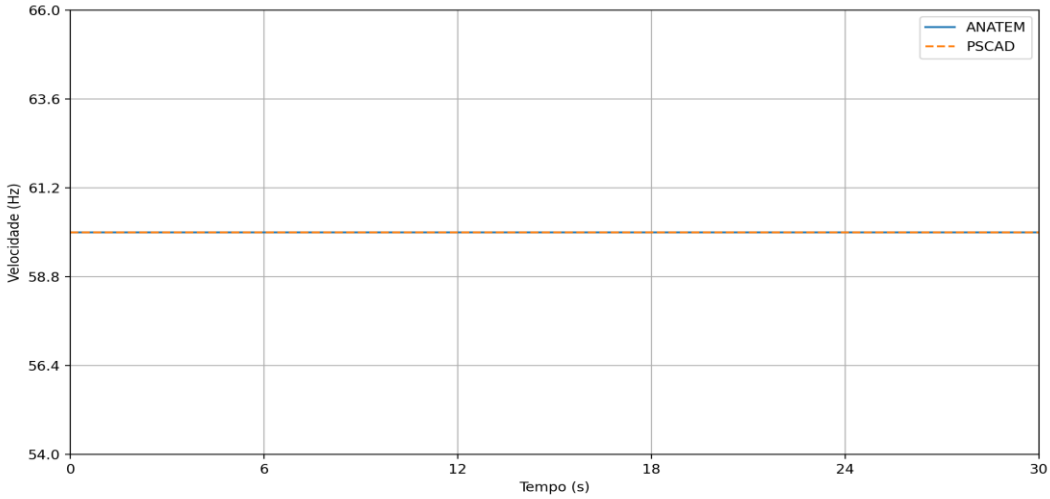

Figura 4-572 – Velocidade da máquina

4.24.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

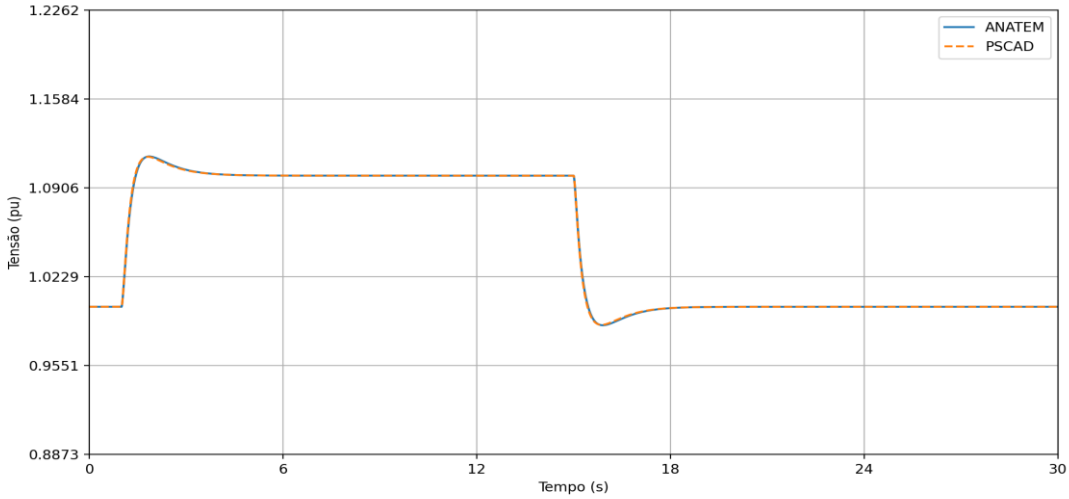

Figura 4-573 – Tensão terminal

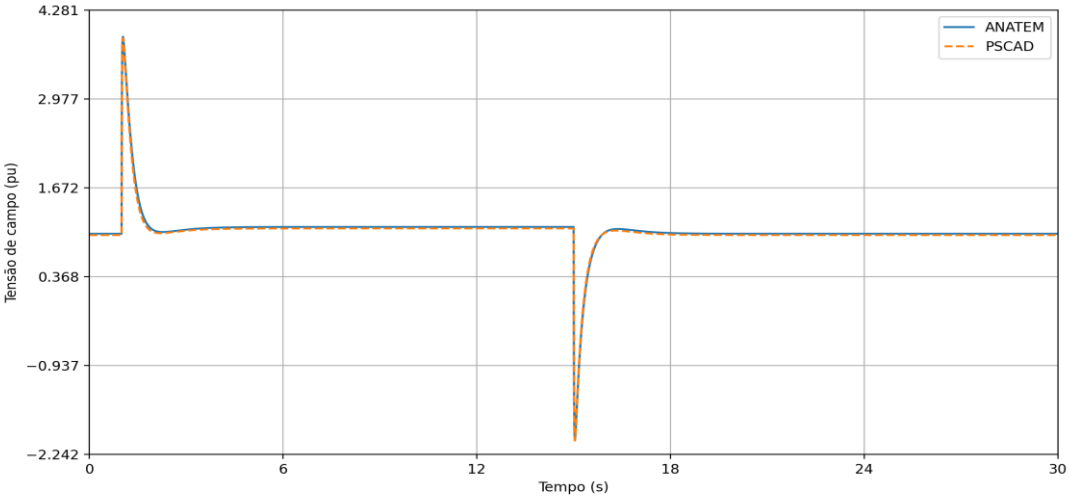

Figura 4-574 – Tensão de campo

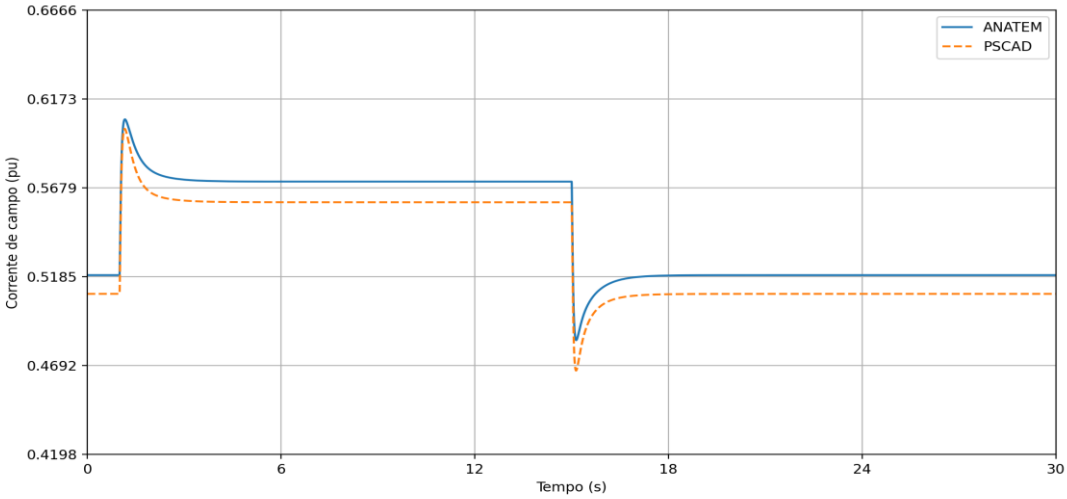

Figura 4-575 – Corrente de campo

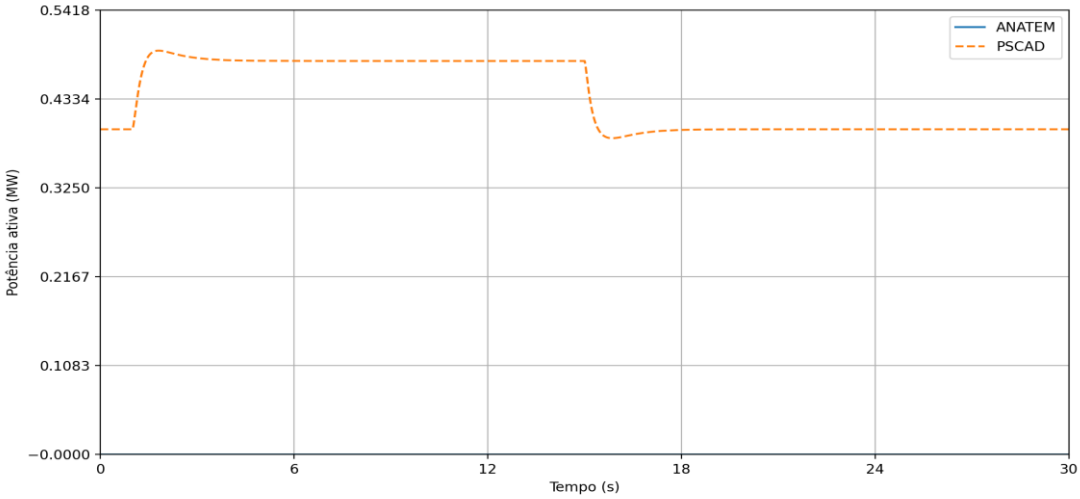

Figura 4-576 – Potência ativa

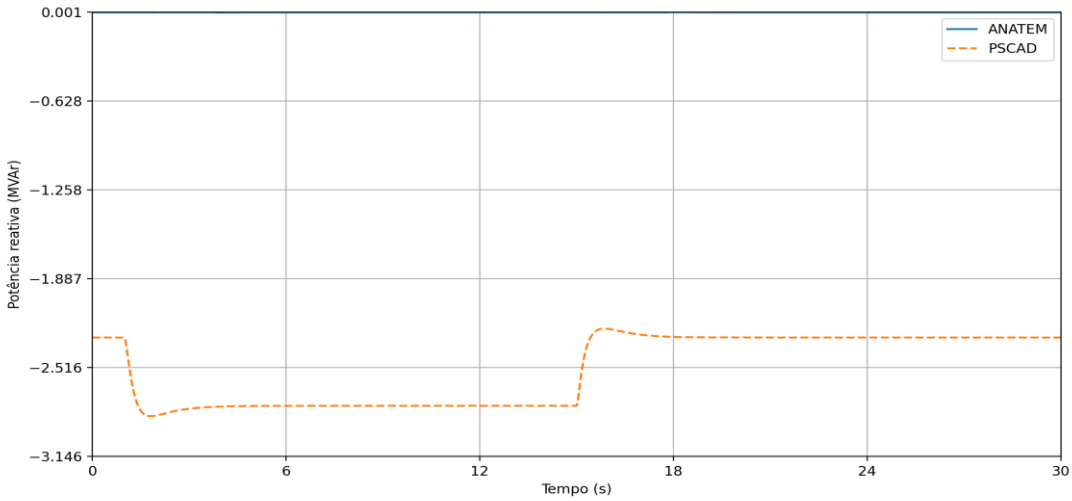

Figura 4-577 – Potência reativa

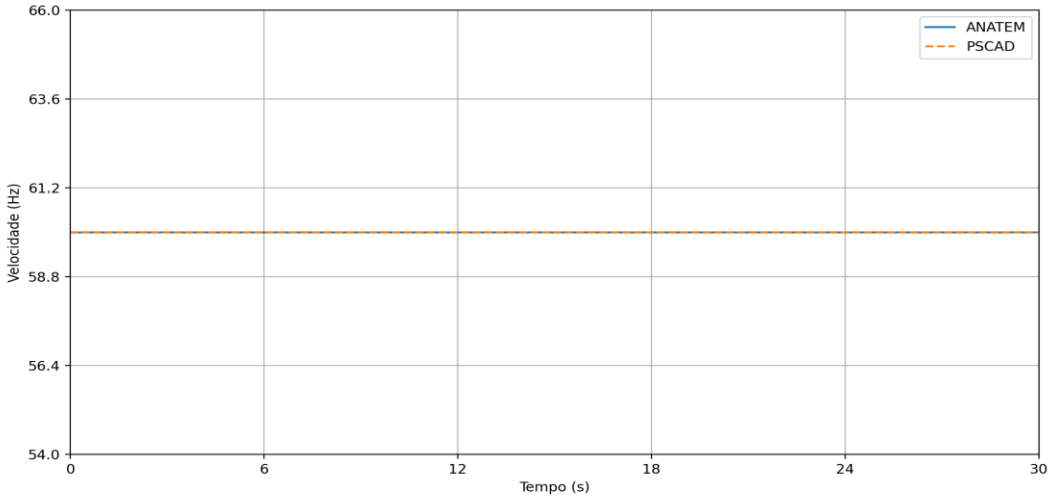

Figura 4-578 – Velocidade da máquina

4.24.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.24.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.24.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.24.4.3.

4.24.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

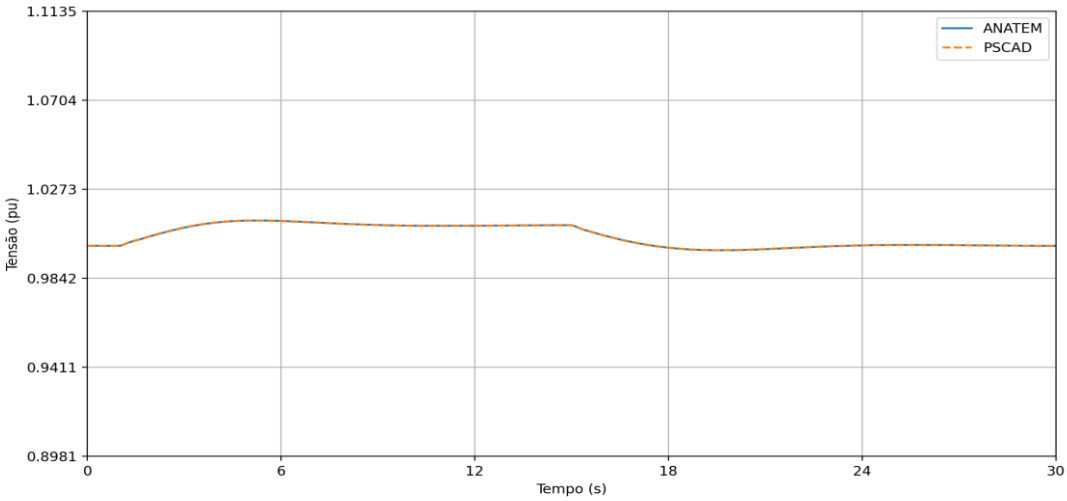

Figura 4-579 – Tensão terminal

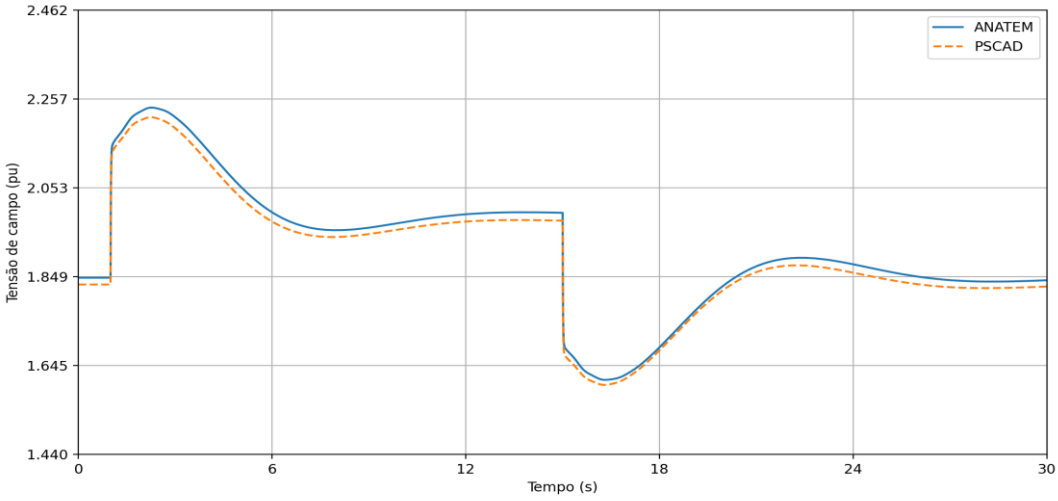

Figura 4-580 – Tensão de campo

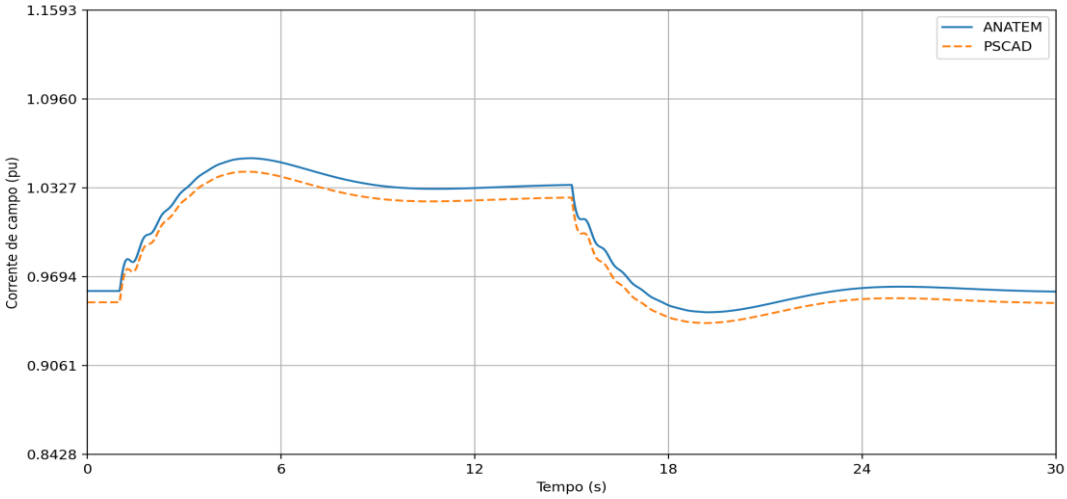

Figura 4-581 – Corrente de campo

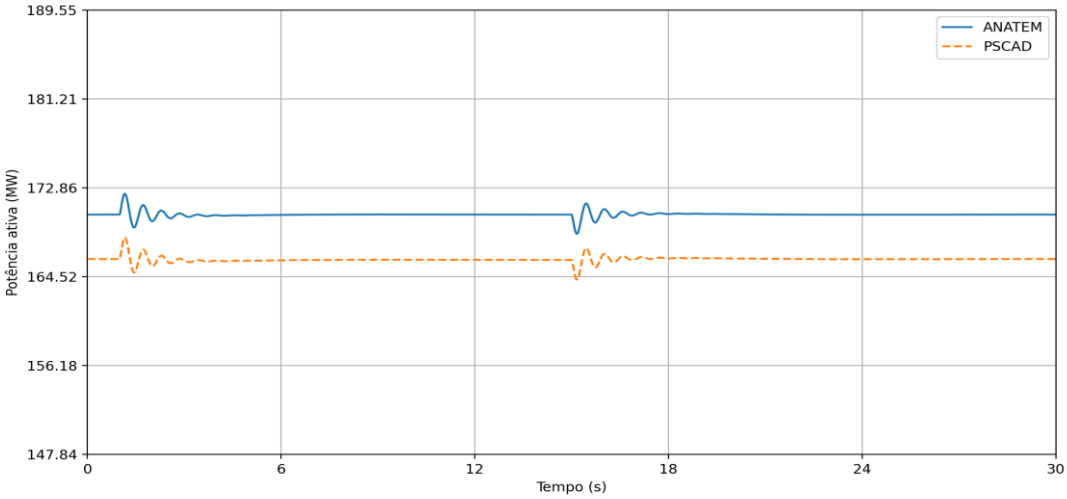

Figura 4-582 – Potência ativa

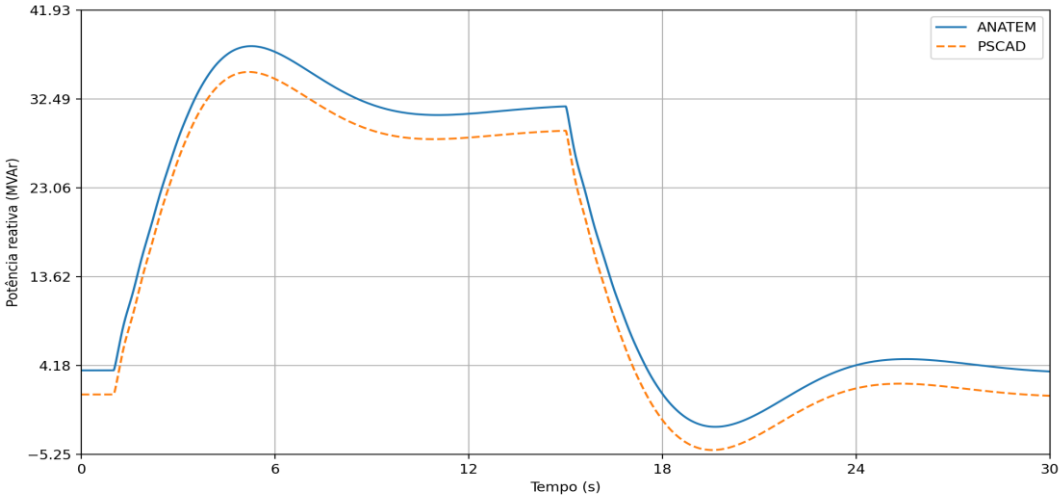

Figura 4-583 – Potência reativa

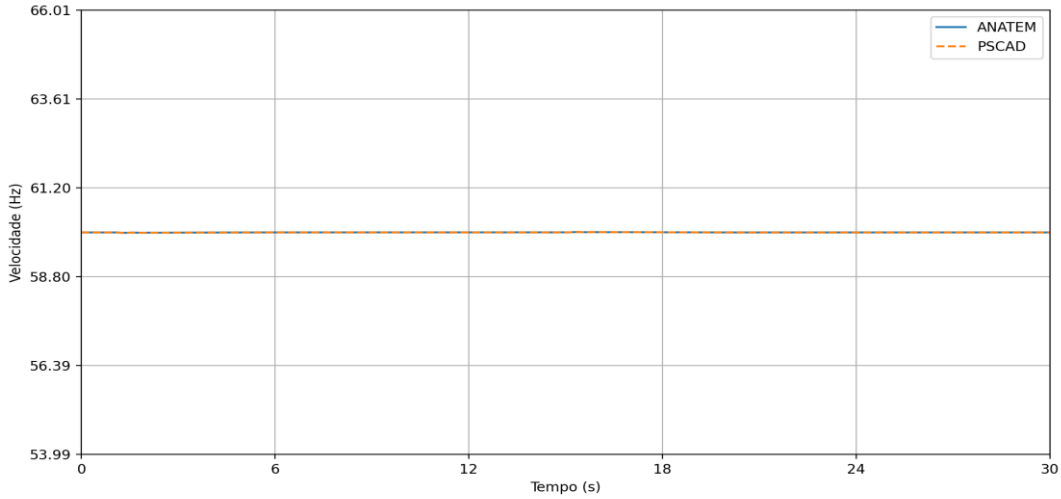

Figura 4-584 – Velocidade da máquina

4.24.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

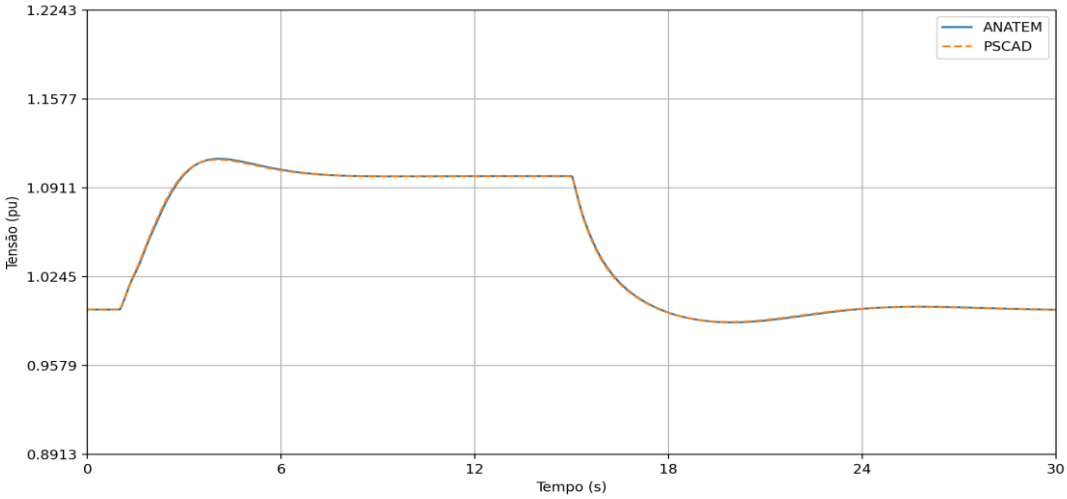

Figura 4-585 – Tensão terminal

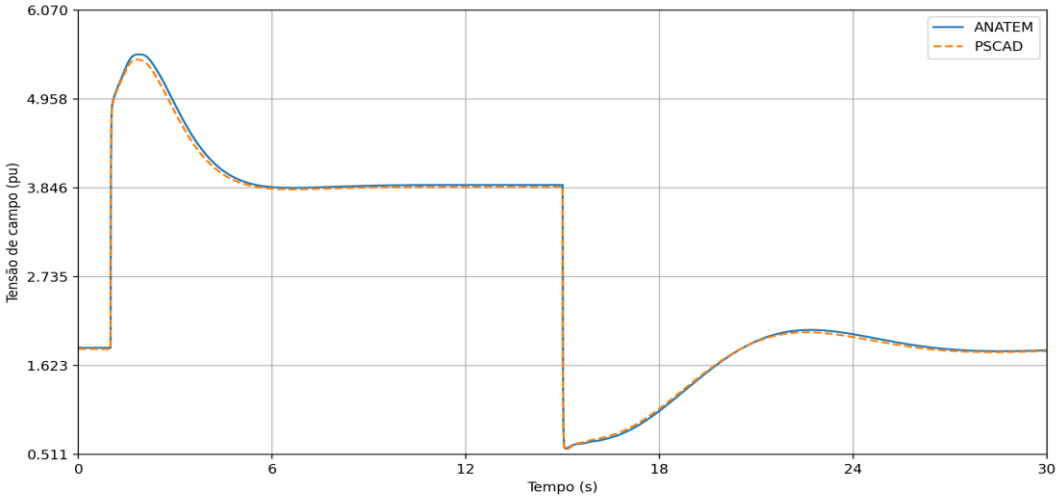

Figura 4-586 – Tensão de campo

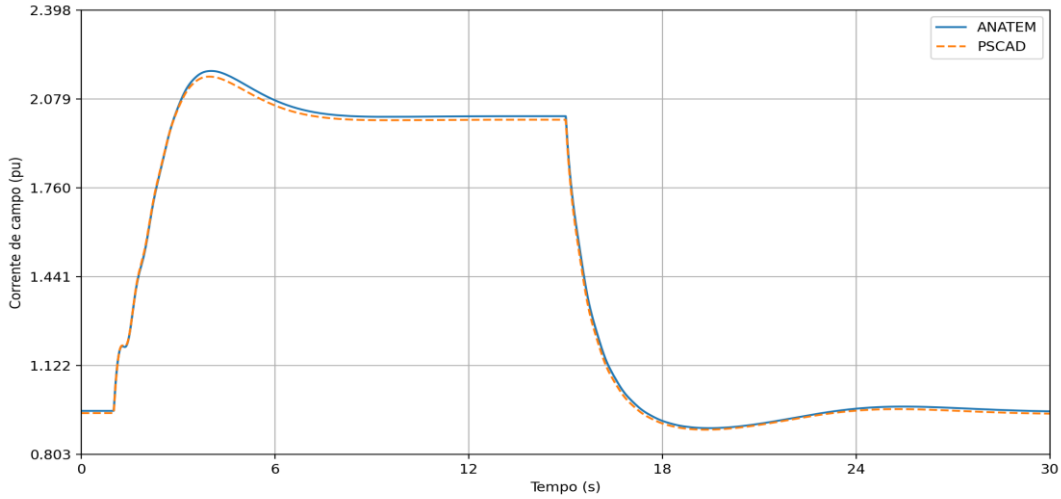

Figura 4-587 – Corrente de campo

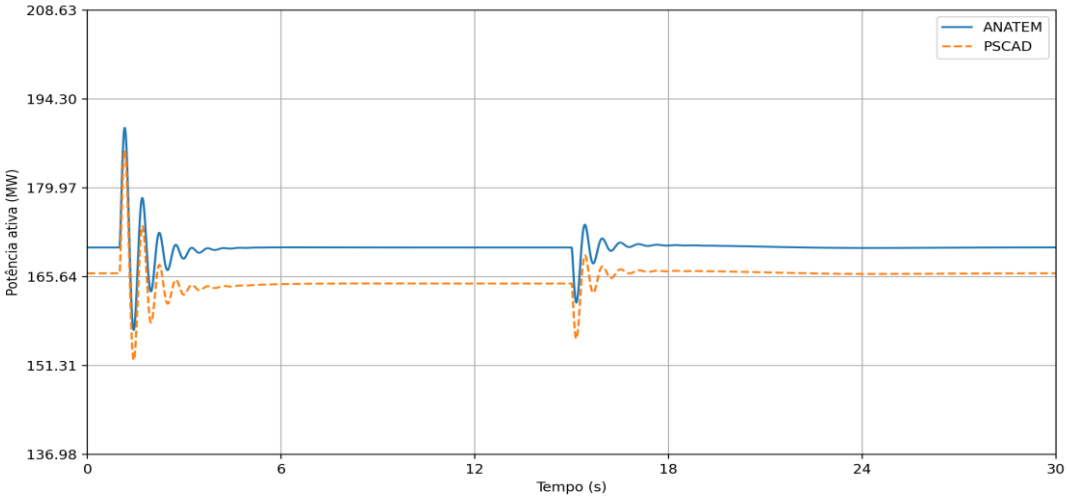

Figura 4-588 – Potência ativa

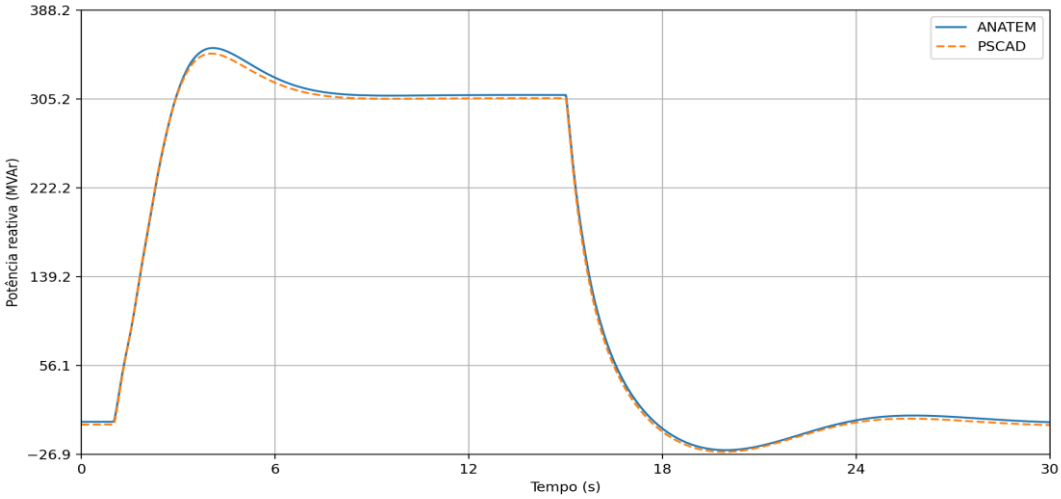

Figura 4-589 – Potência reativa

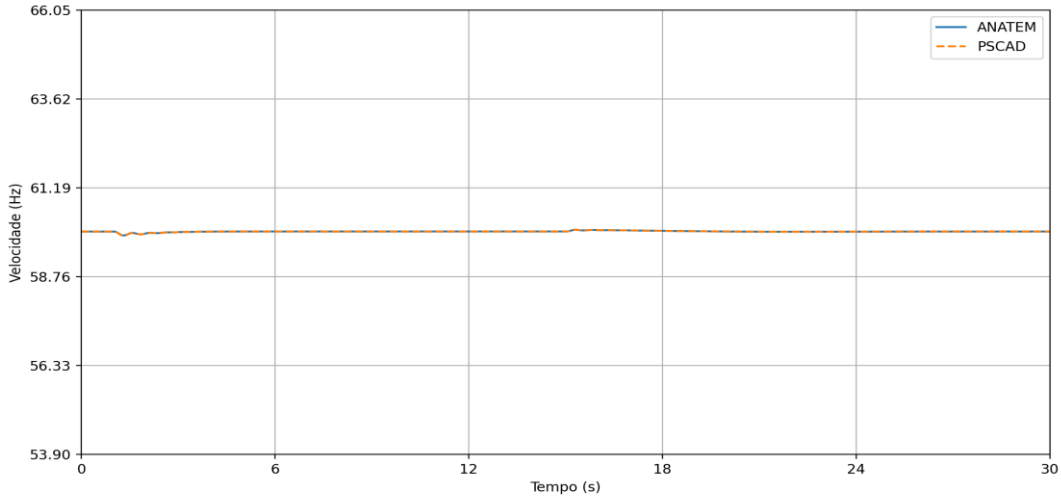

Figura 4-590 – Velocidade da máquina

4.24.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

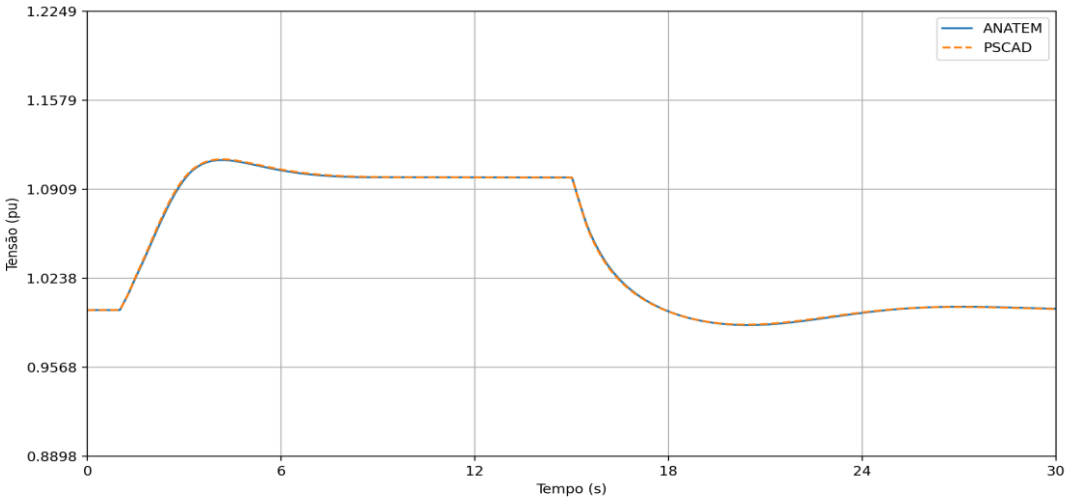

Figura 4-591 – Tensão terminal

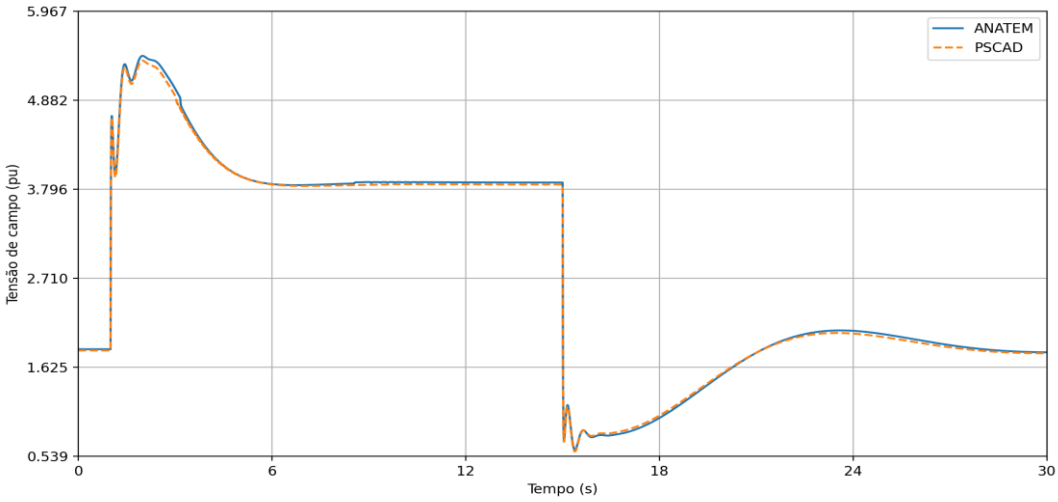

Figura 4-592 – Tensão de campo

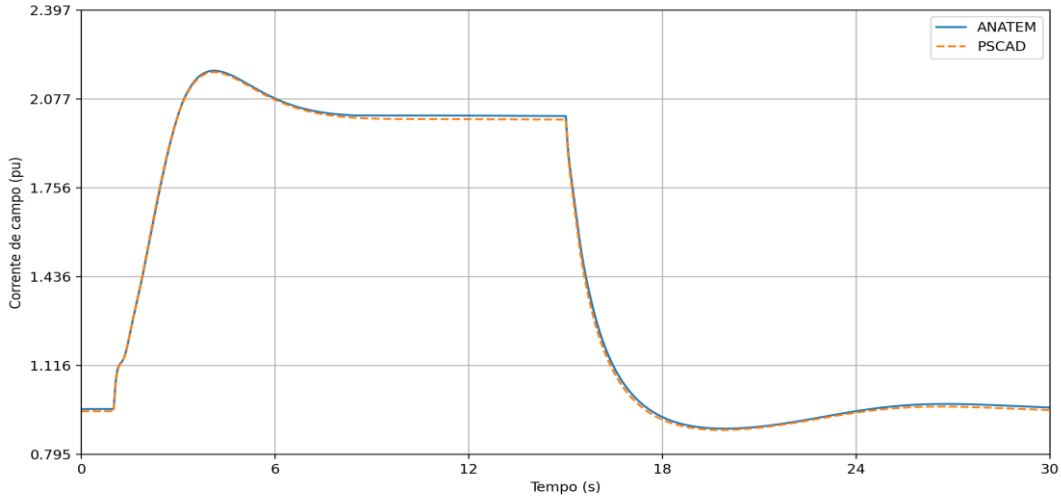

Figura 4-593 – Corrente de campo

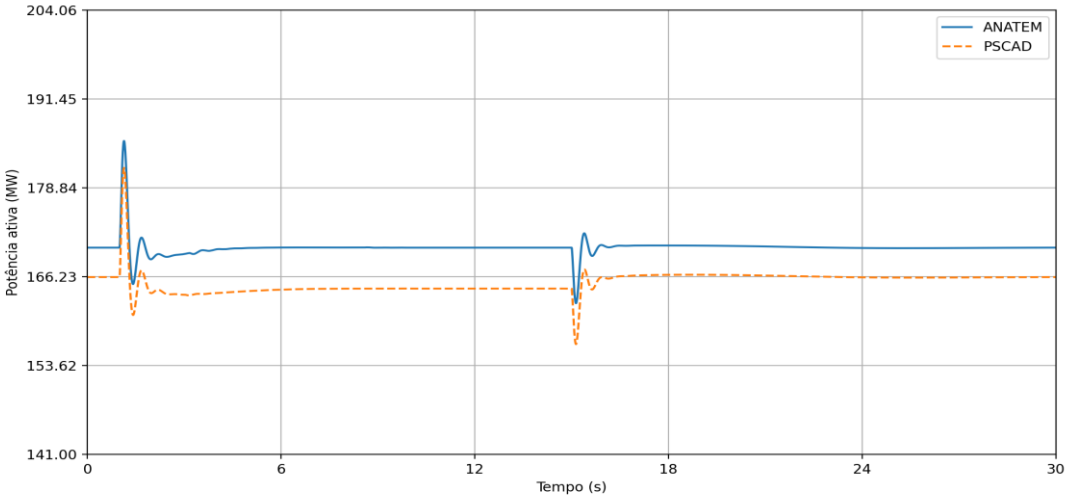

Figura 4-594 – Potência ativa

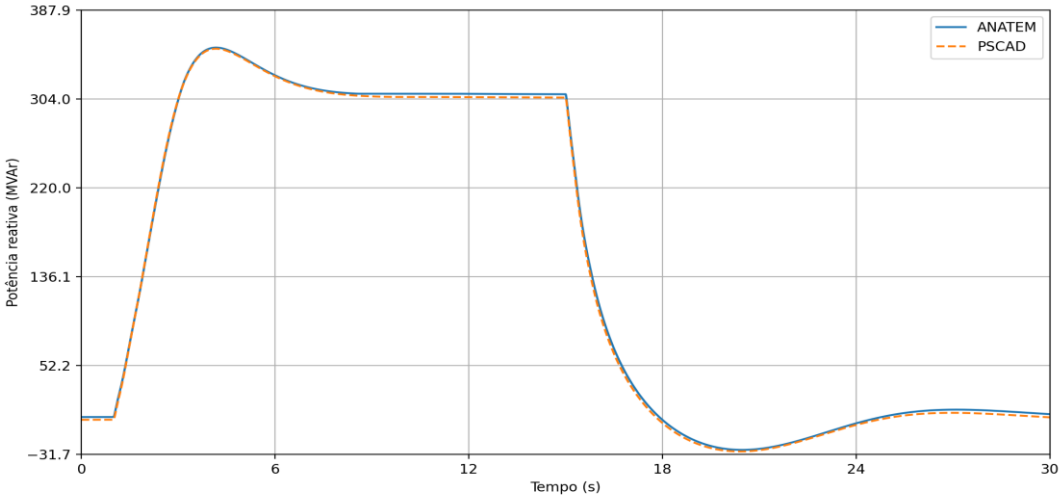

Figura 4-595 – Potência reativa

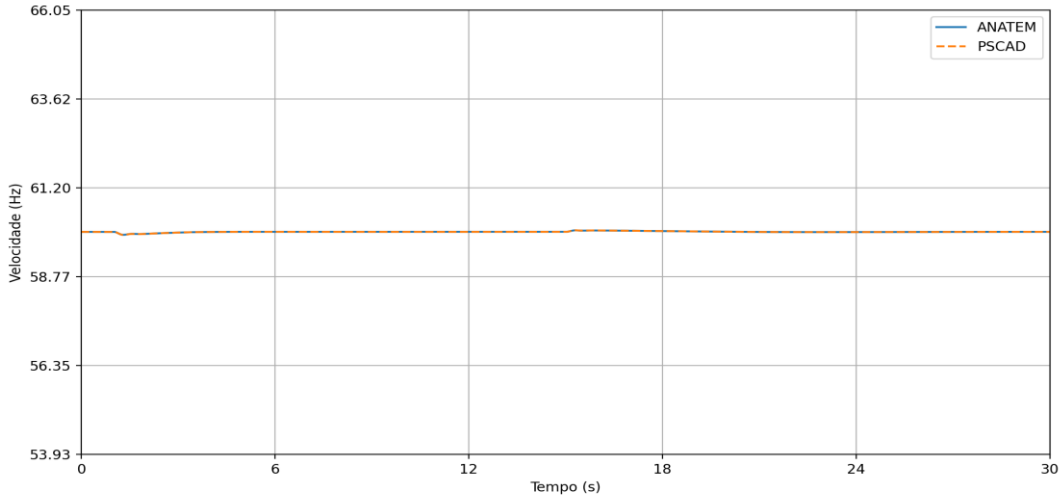

Figura 4-596 – Velocidade da máquina

4.25 UTE COMPANHIA SIDERURGICA DO ATLANTICO – VAPOR

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Vapor, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.25.1 Modelo da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Vapor

A Tabela 4-73 apresenta os parâmetros da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Vapor disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-73 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	171	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	163,9	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	25,8	I(KA)	16,212	
x'q (%)	42,6	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	19,9	H(s)	5,394	
xl(%)	17,2	D(pu)	0	
T'd(s)	5,12	Ra(pu)	0,003	
T'q(s)	0,15	xp(pu)	0,172	Reatância de Potier
T''d(s)	0,019	xd(pu)	1,71	
T''q(s)	0,029	xd_(pu)	0,258	x'd
Ra(%)	0,26	Td0_(s)	5,12	T'd
H(s)	5,394	xd__(pu)	0,199	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,019	T''d
S(MVA)	387,5	Xq(pu)	1,639	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,426	x'q
		Tq0_(s)	0,15	T'q
		xq__(pu)	0,199	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,029	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.25.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-74, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Vapor estão apresentados na Tabela 4-75. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-74, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-75. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-597.

Tabela 4-74 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Vapor	
Ag	**Y1**	0,0120069
Bg	**Y2**	6,551158
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-75 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,812	0,800
0,982	0,950
1,013	0,975
1,045	1,000
1,088	1,033
1,136	1,067
1,186	1,100
1,365	1,200
1,618	1,300

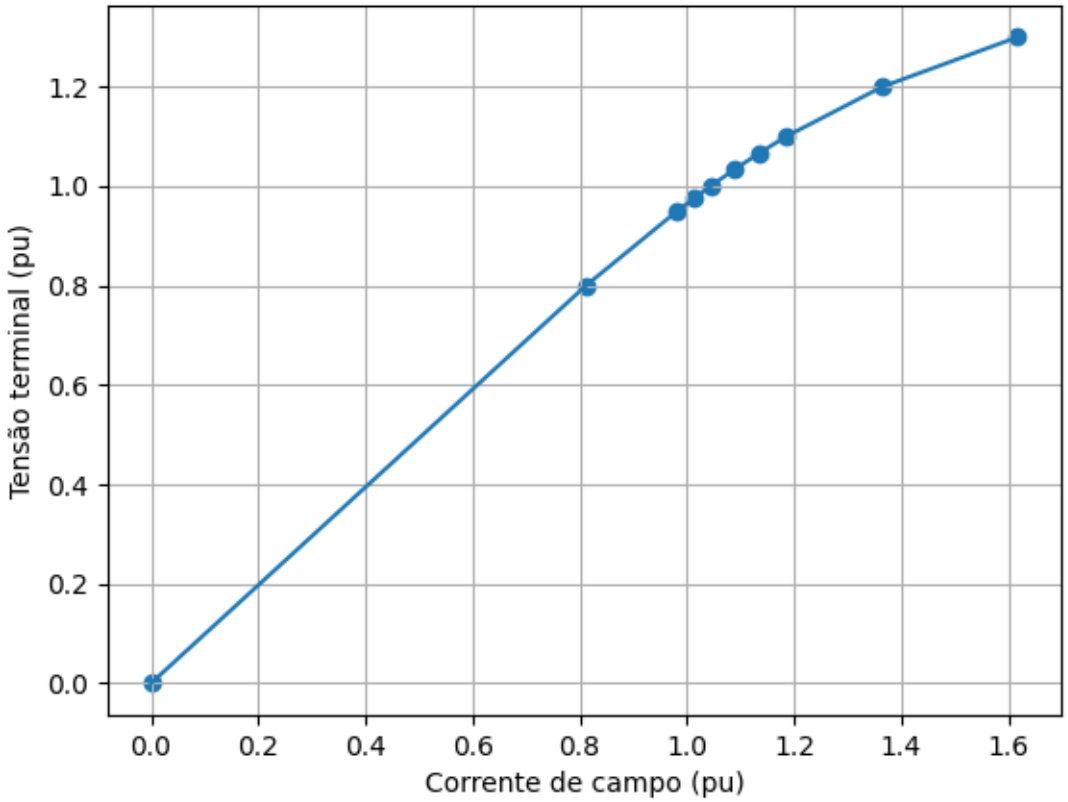

Figura 4-597 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.25.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.25.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.25.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.25.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

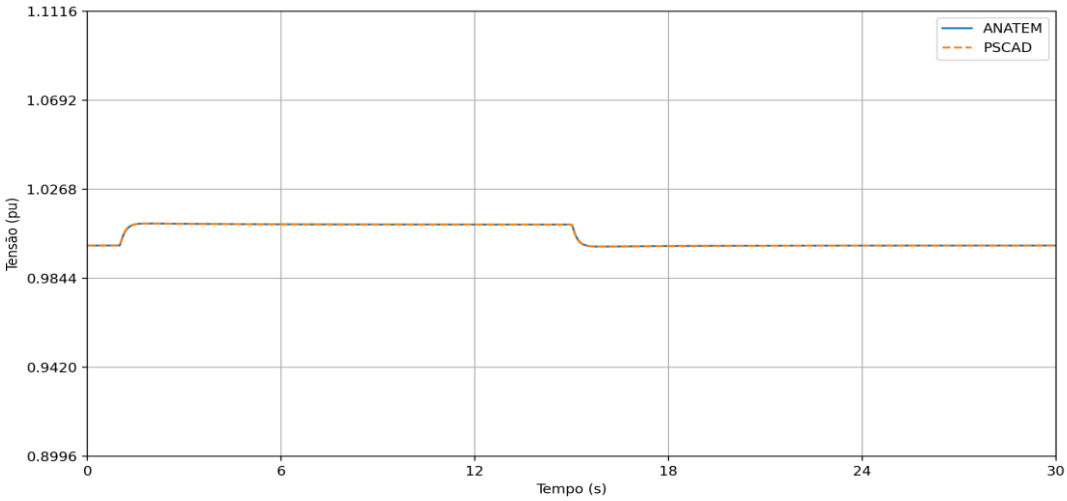

Figura 4-598 – Tensão terminal

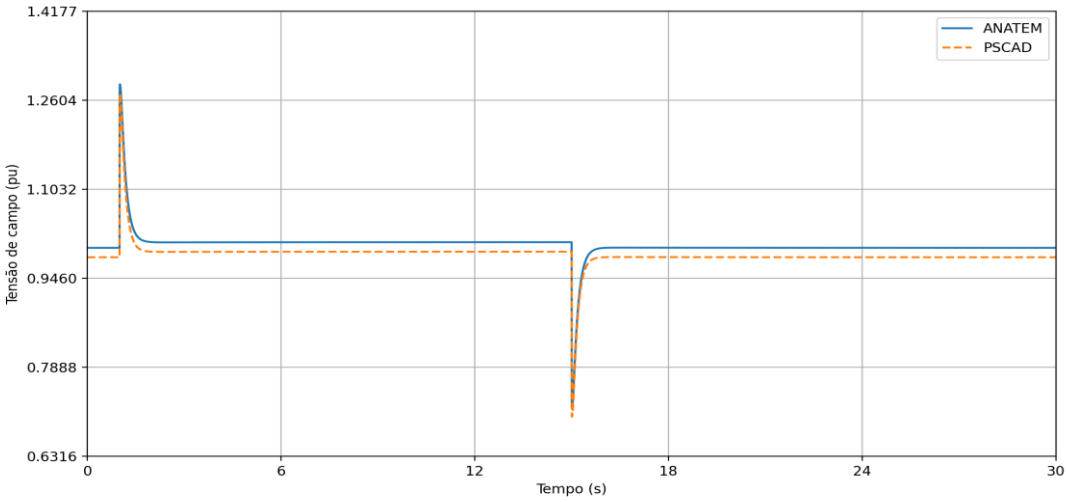

Figura 4-599 – Tensão de campo

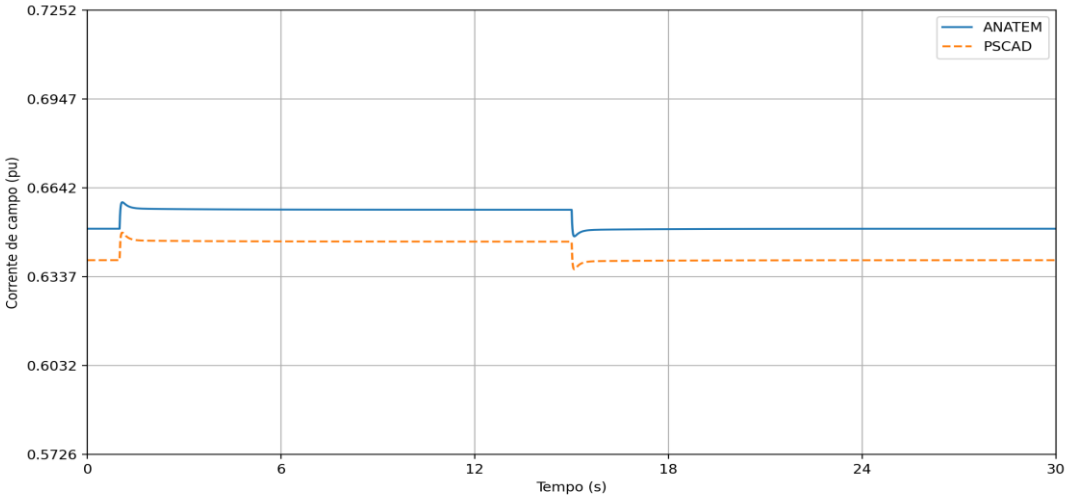

Figura 4-600 – Corrente de campo

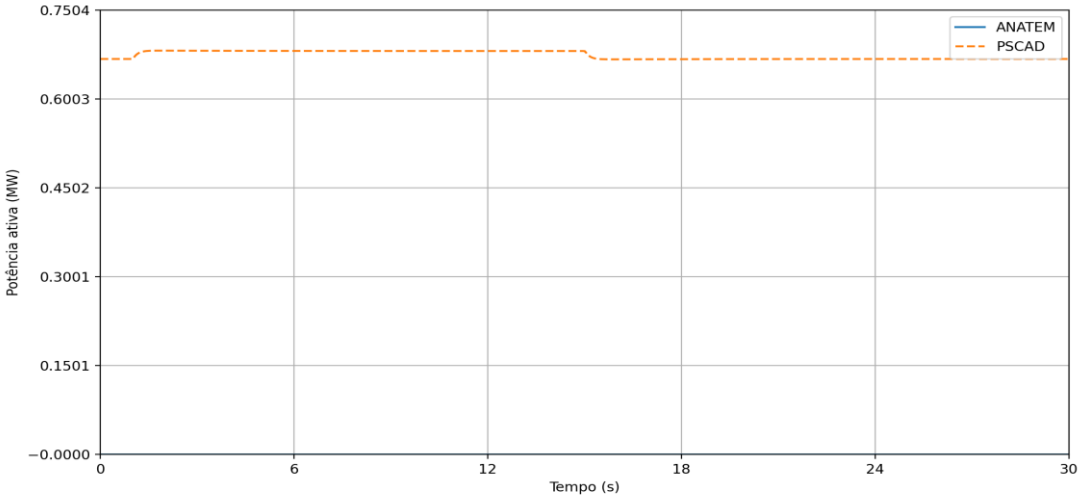

Figura 4-601 – Potência ativa

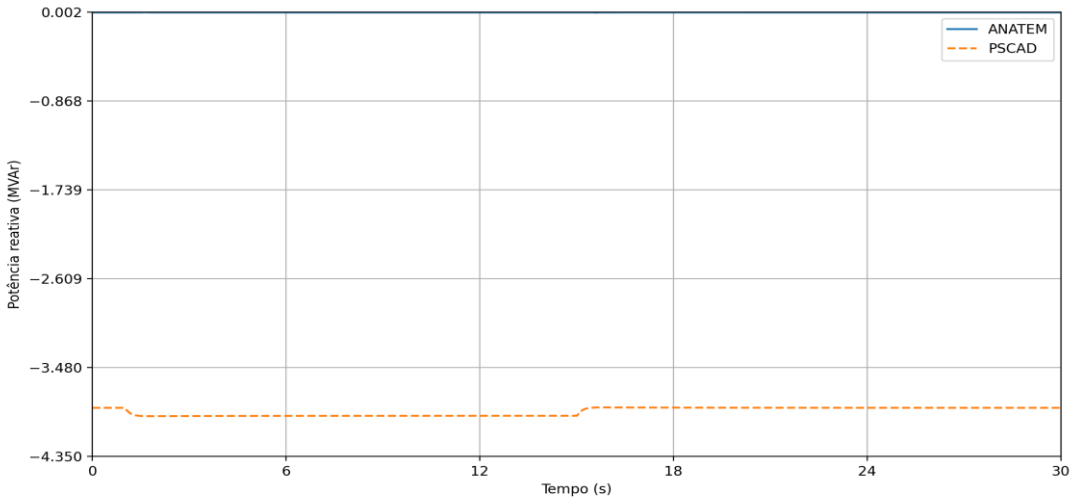

Figura 4-602 – Potência reativa

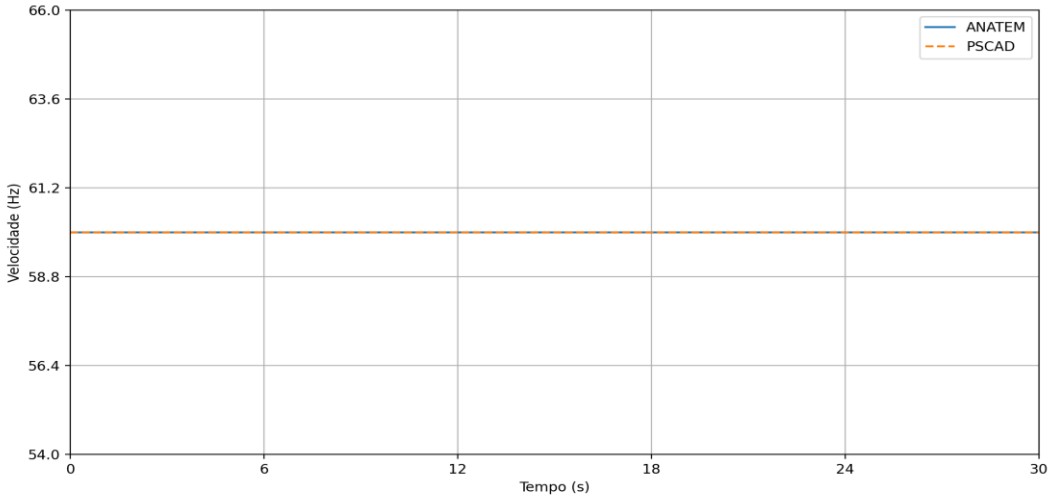

Figura 4-603 – Velocidade da máquina

4.25.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

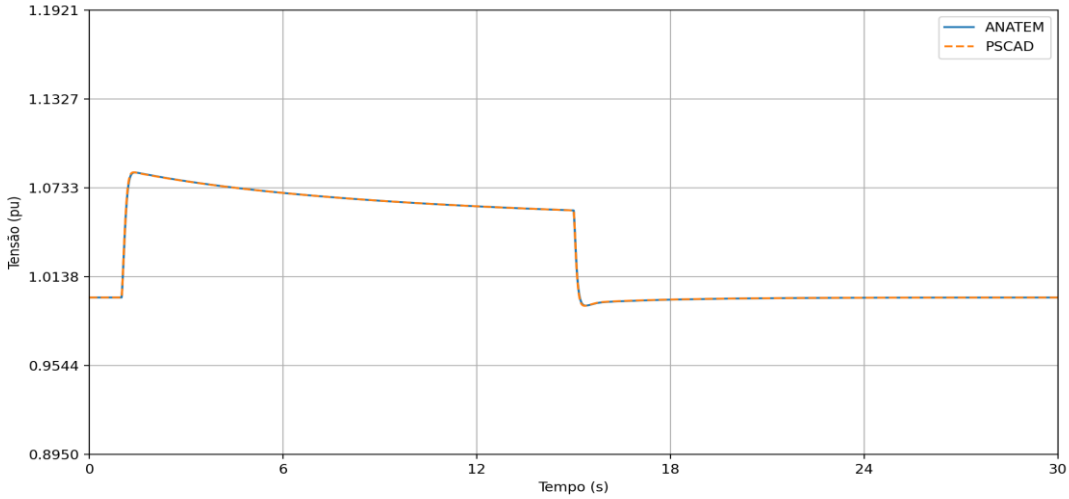

Figura 4-604 – Tensão terminal

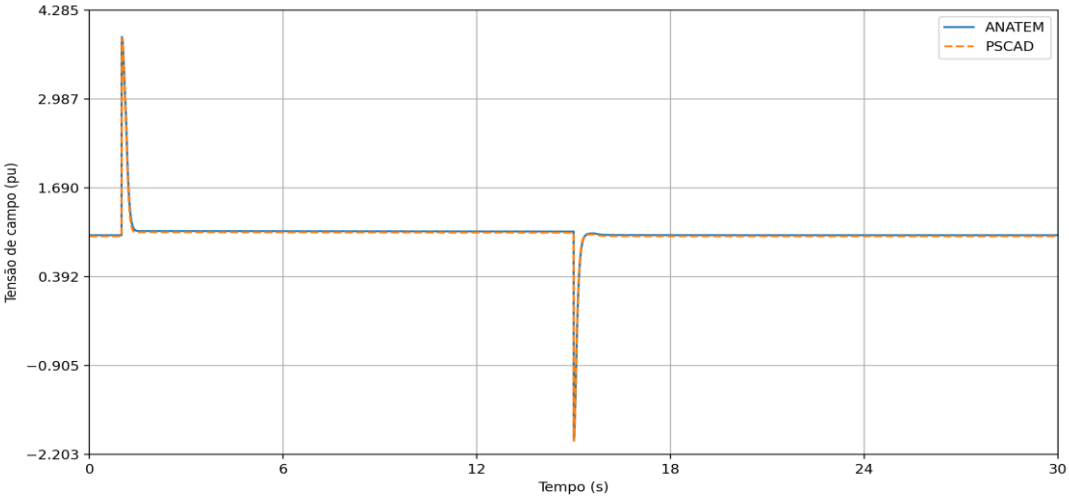

Figura 4-605 – Tensão de campo

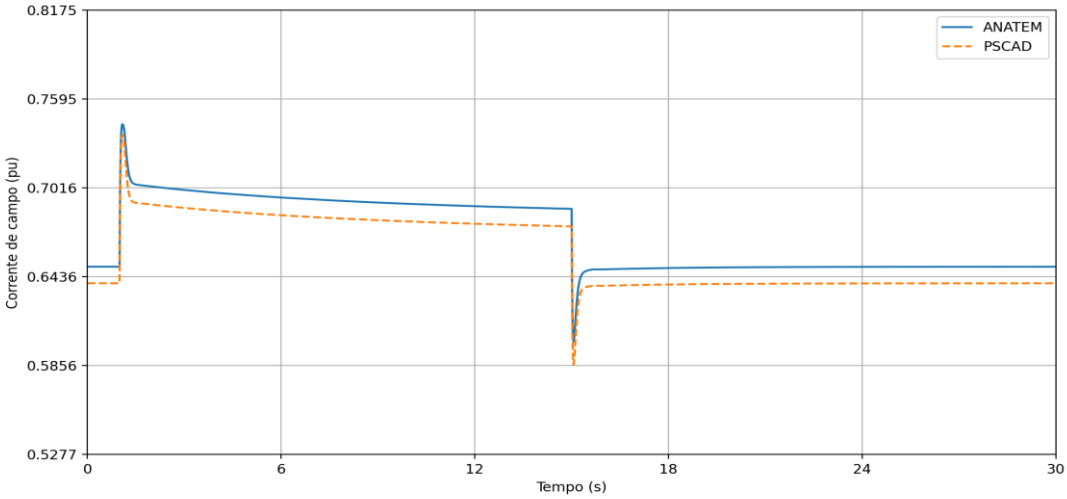

Figura 4-606 – Corrente de campo

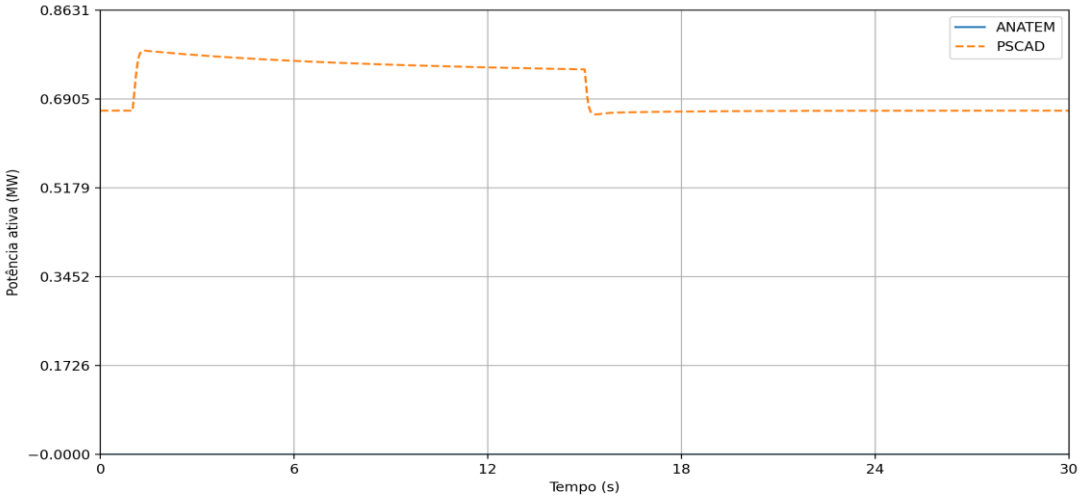

Figura 4-607 – Potência ativa

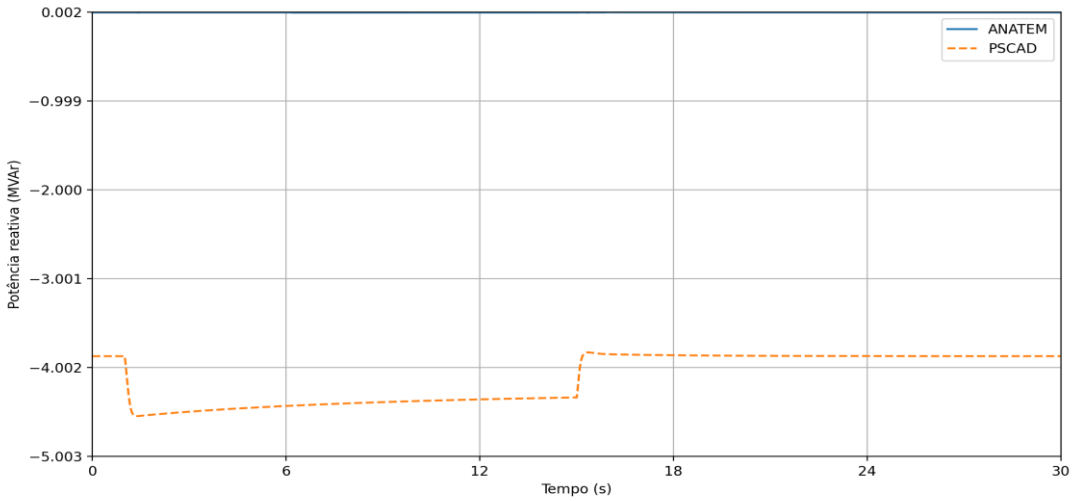

Figura 4-608 – Potência reativa

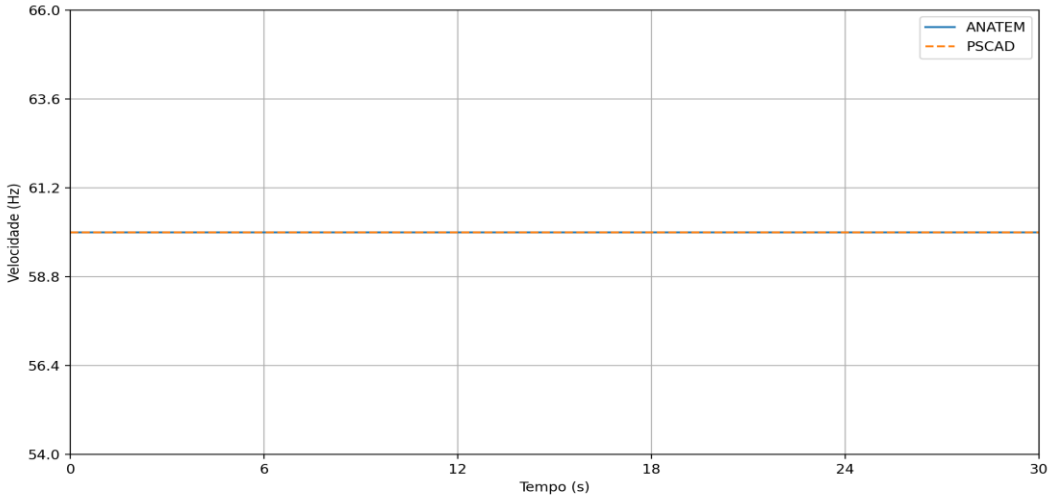

Figura 4-609 – Velocidade da máquina

4.25.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.25.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.25.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.25.4.3.

4.25.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

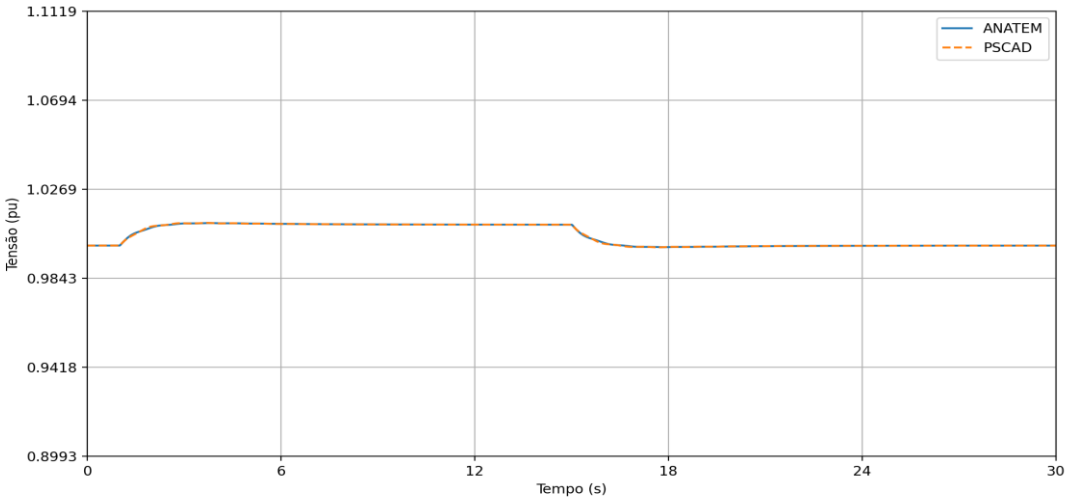

Figura 4-610 – Tensão terminal

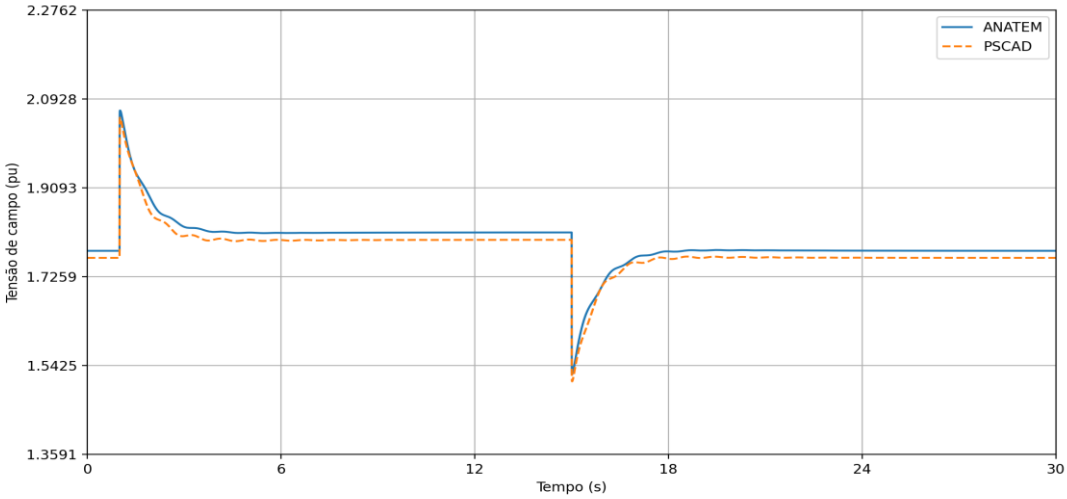

Figura 4-611 – Tensão de campo

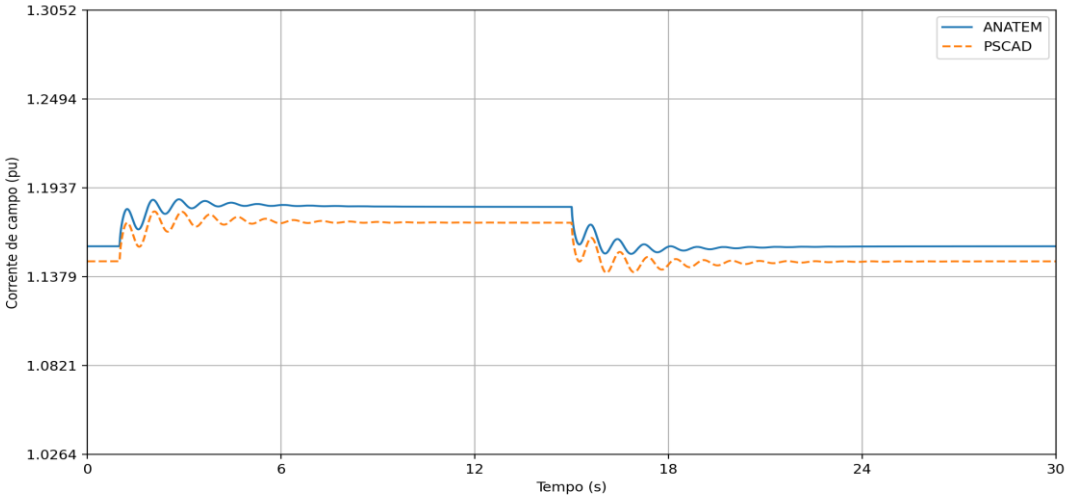

Figura 4-612 – Corrente de campo

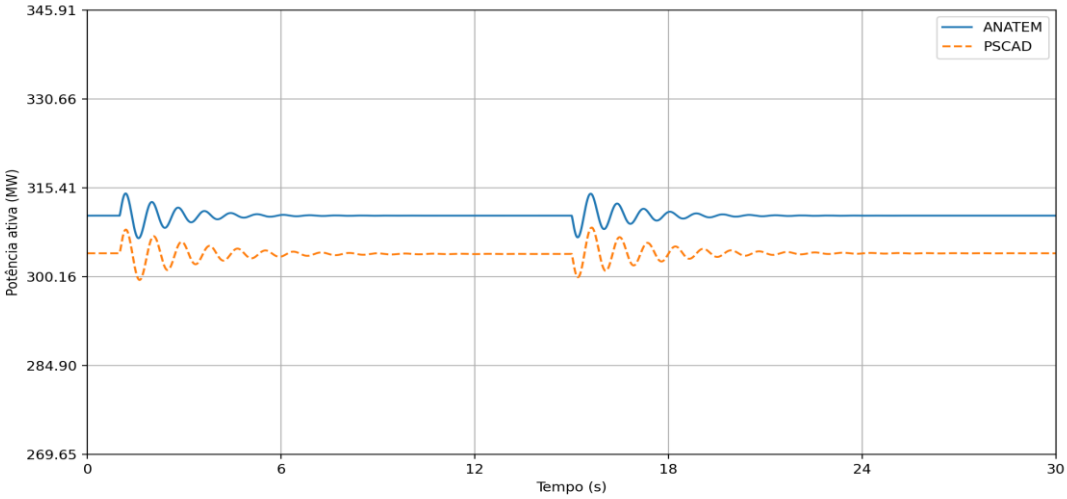

Figura 4-613 – Potência ativa

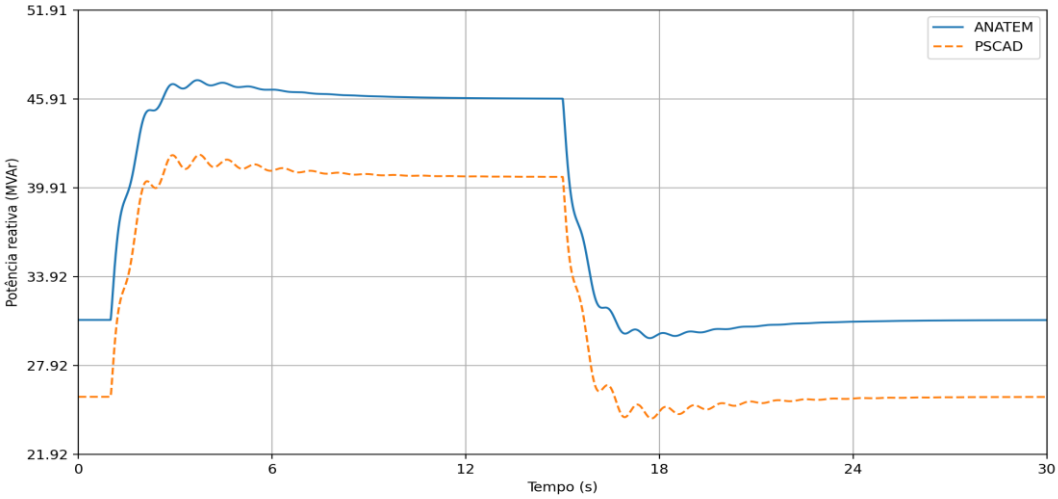

Figura 4-614 – Potência reativa

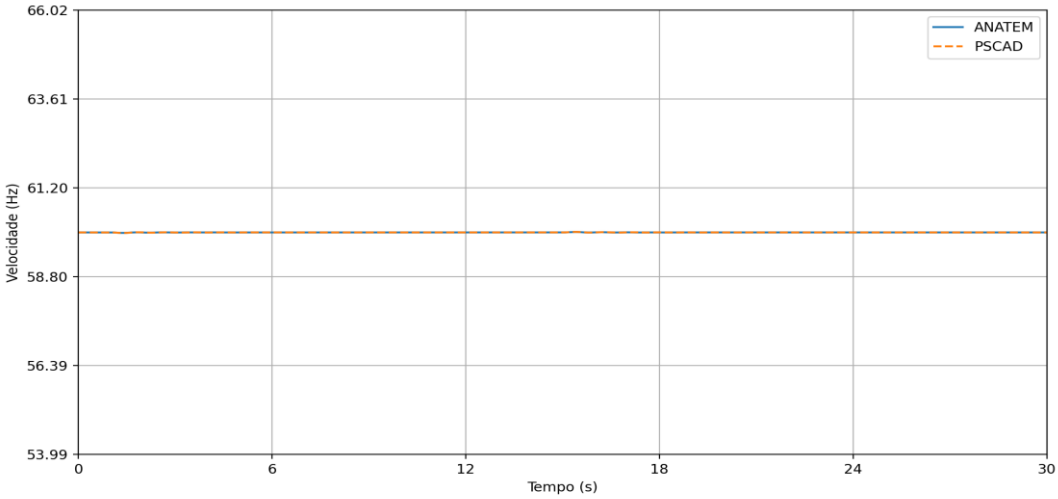

Figura 4-615 – Velocidade da máquina

4.25.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

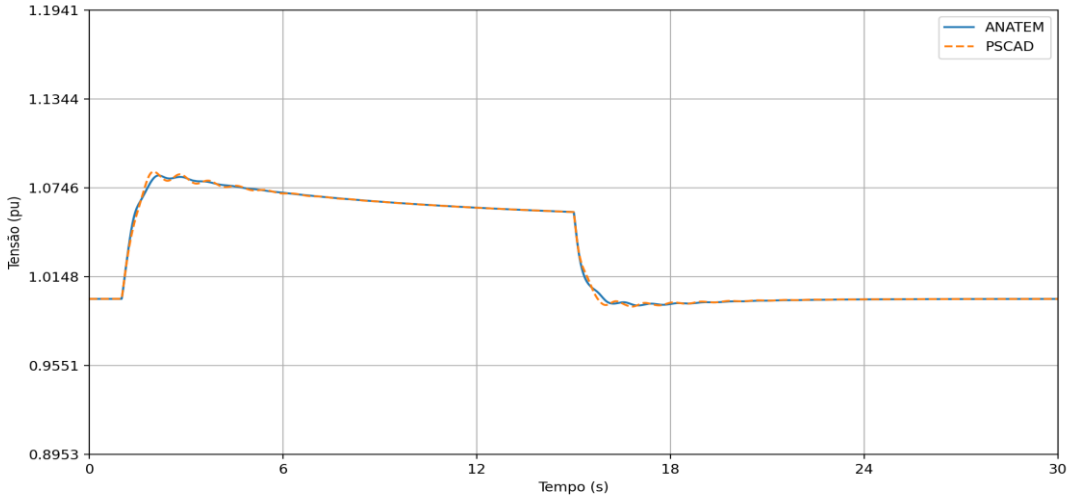

Figura 4-616 – Tensão terminal

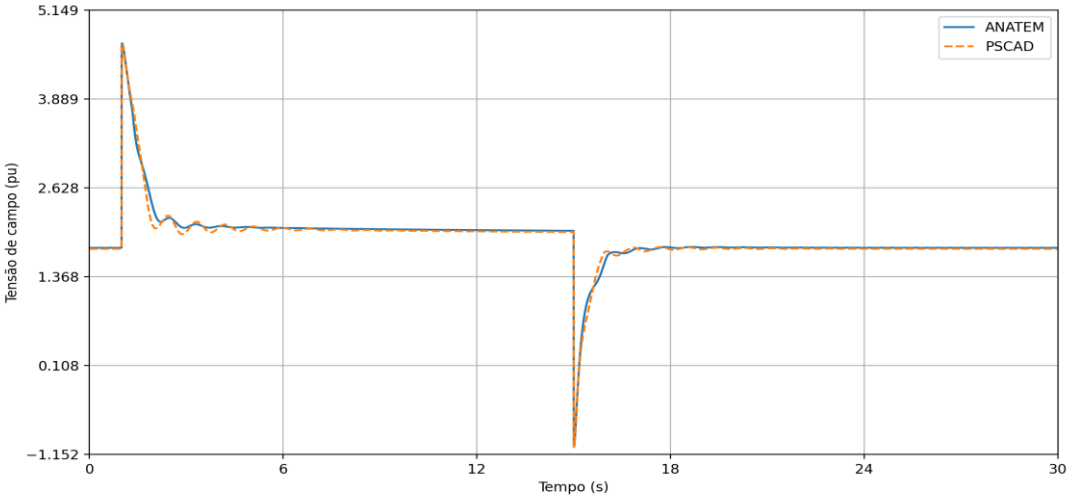

Figura 4-617 – Tensão de campo

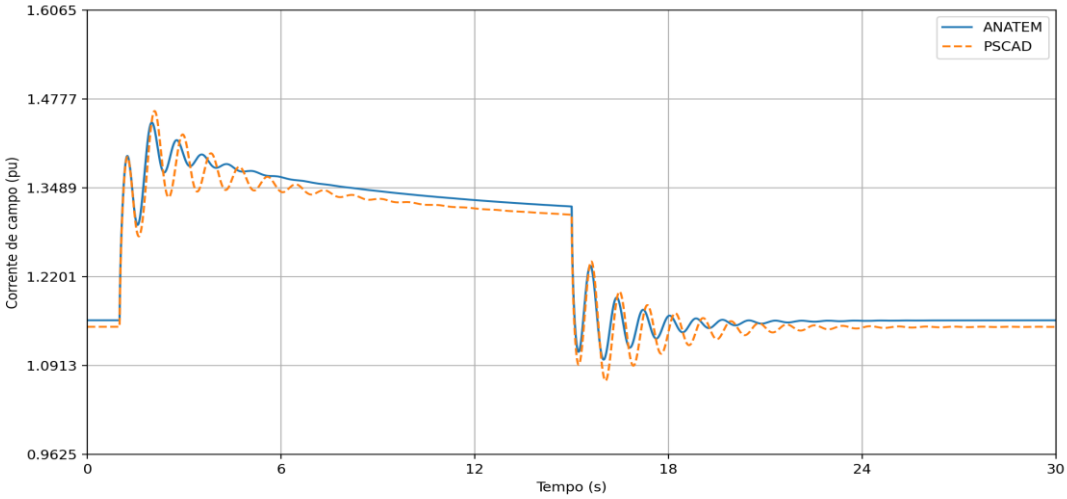

Figura 4-618 – Corrente de campo

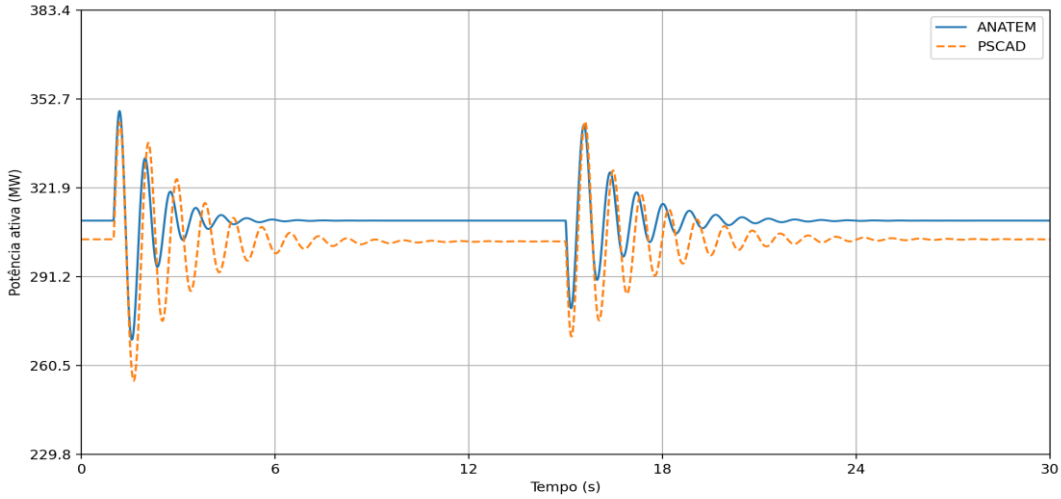

Figura 4-619 – Potência ativa

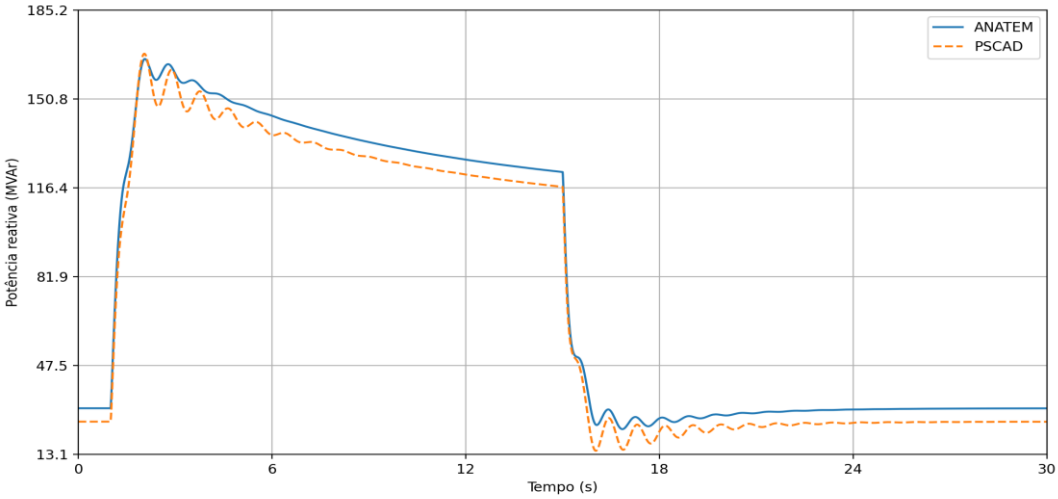

Figura 4-620 – Potência reativa

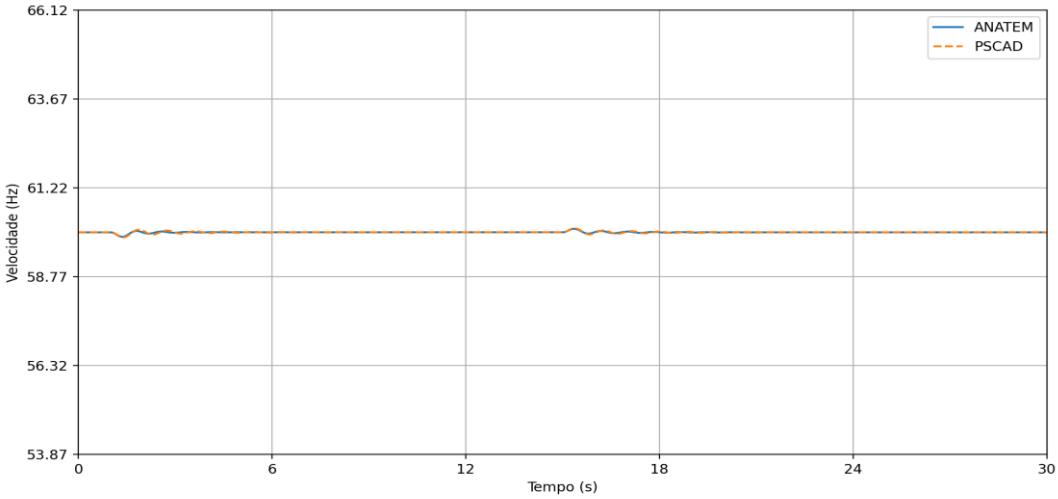

Figura 4-621 – Velocidade da máquina

4.25.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

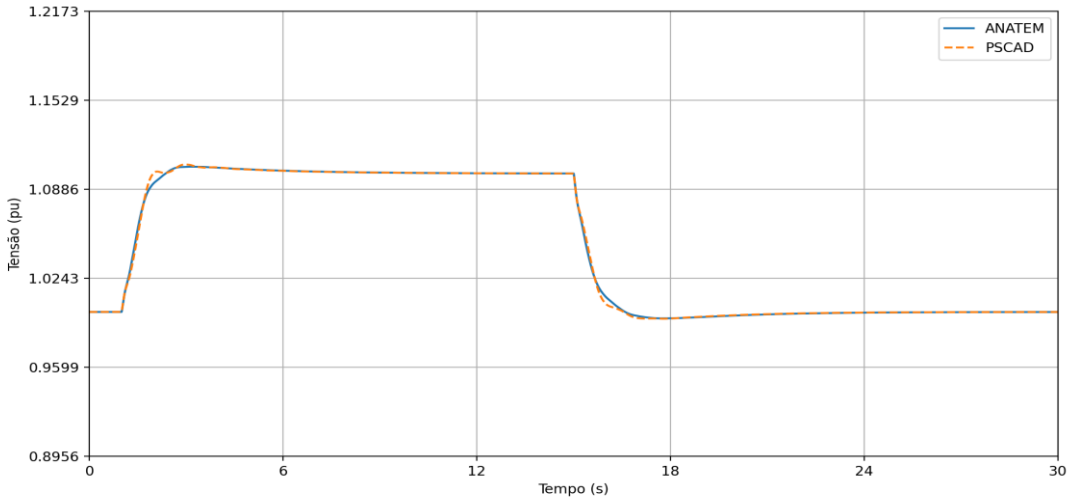

Figura 4-622 – Tensão terminal

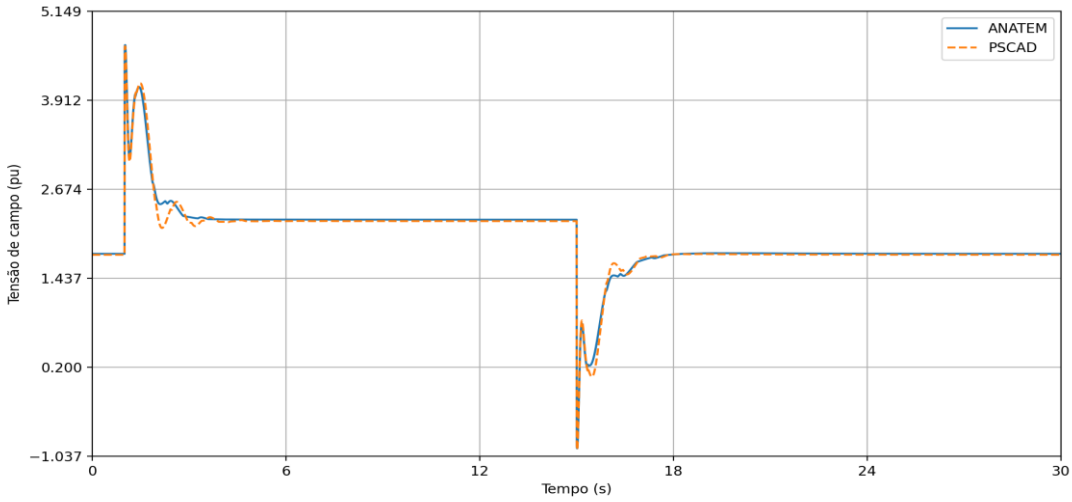

Figura 4-623 – Tensão de campo

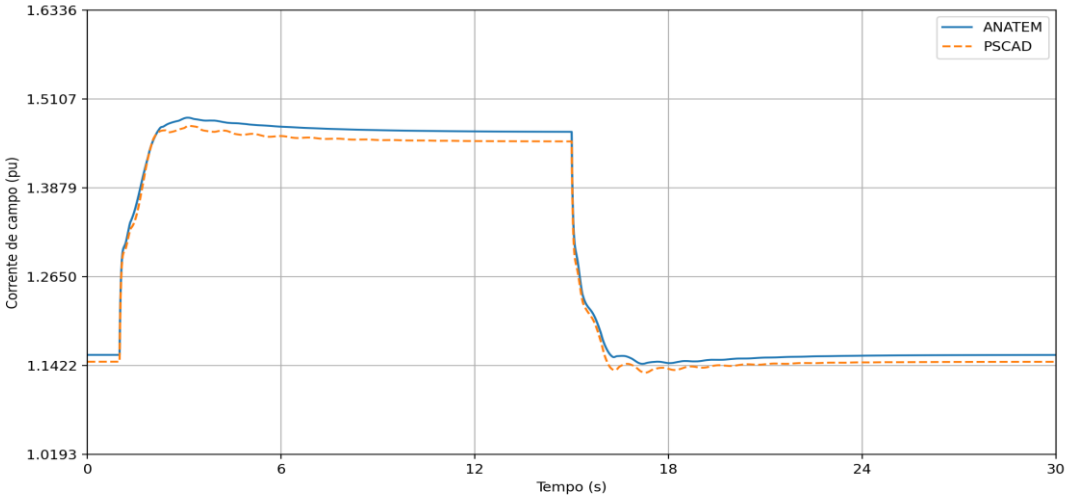

Figura 4-624 – Corrente de campo

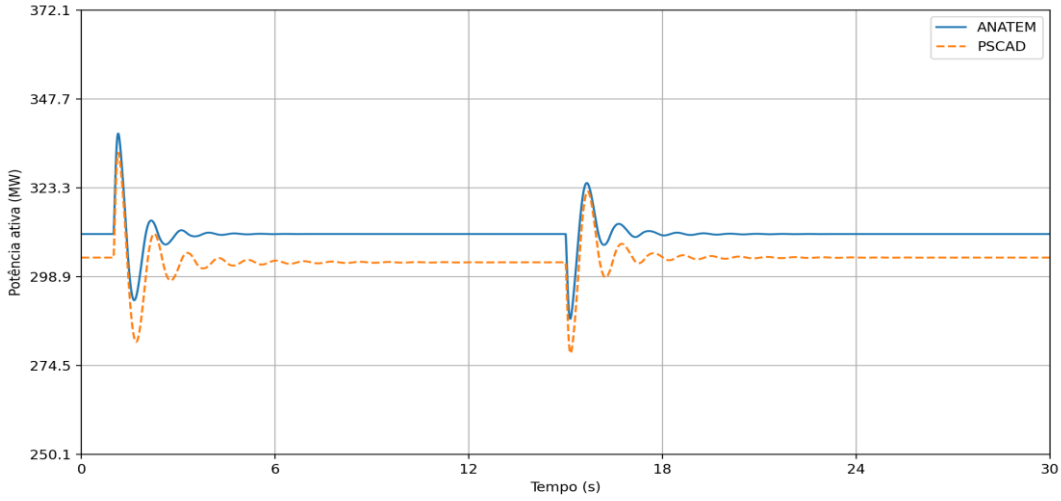

Figura 4-625 – Potência ativa

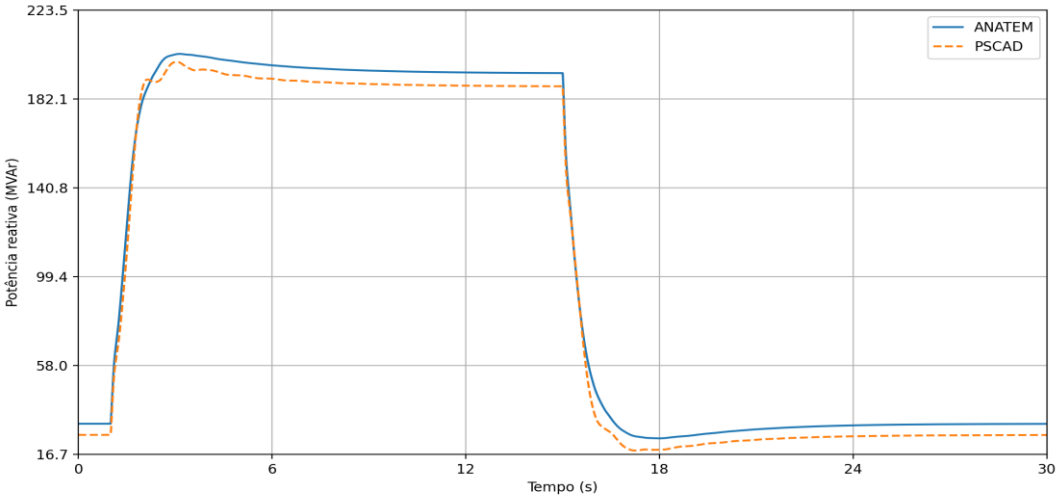

Figura 4-626 – Potência reativa

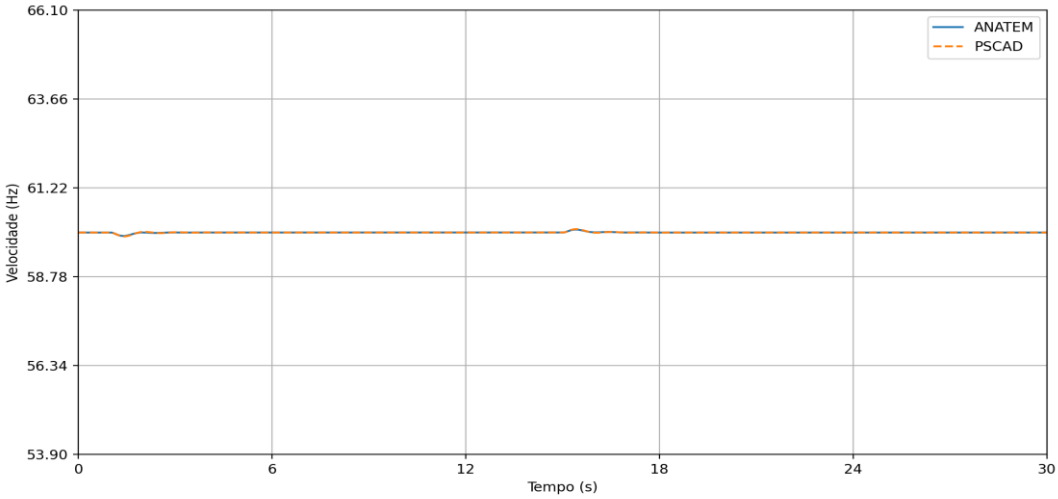

Figura 4-627 – Velocidade da máquina

4.26 UTE COMPANHIA SIDERURGICA DO ATLANTICO – GÁS GP10

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Gás GP10, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.26.1 Modelo da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Gás GP10

A Tabela 4-76 apresenta os parâmetros da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Gás GP10 disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-76 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	220	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	203,9	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	22,2	I(KA)	6,694	
x'q (%)	36,3	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	16,7	H(s)	8,795	
xl(%)	14,8	D(pu)	0	
T'd(s)	7,89	Ra(pu)	0,003	
T'q(s)	0,77	xp(pu)	0,148	Reatância de Potier
T''d(s)	0,018	xd(pu)	2,2	
T''q(s)	0,027	xd_(pu)	0,222	x'd
Ra(%)	0,25	Td0_(s)	7,89	T'd
H(s)	8,795	xd__(pu)	0,167	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,018	T''d
S(MVA)	160	Xq(pu)	2,039	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,363	x'q
		Tq0_(s)	0,77	T'q
		xq__(pu)	0,167	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,027	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.26.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-77, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Gás GP10 estão apresentados na Tabela 4-78. A partir dos parâmetros da Tabela 4-77, calcula-se os

dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-78. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-628.

Tabela 4-77 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Gás GP10	
Ag	**Y1**	0,0135002
Bg	**Y2**	7,752701
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-78 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,814	0,800
0,993	0,950
1,027	0,975
1,064	1,000
1,115	1,033
1,174	1,067
1,238	1,100
1,5	1,200
1,951	1,300

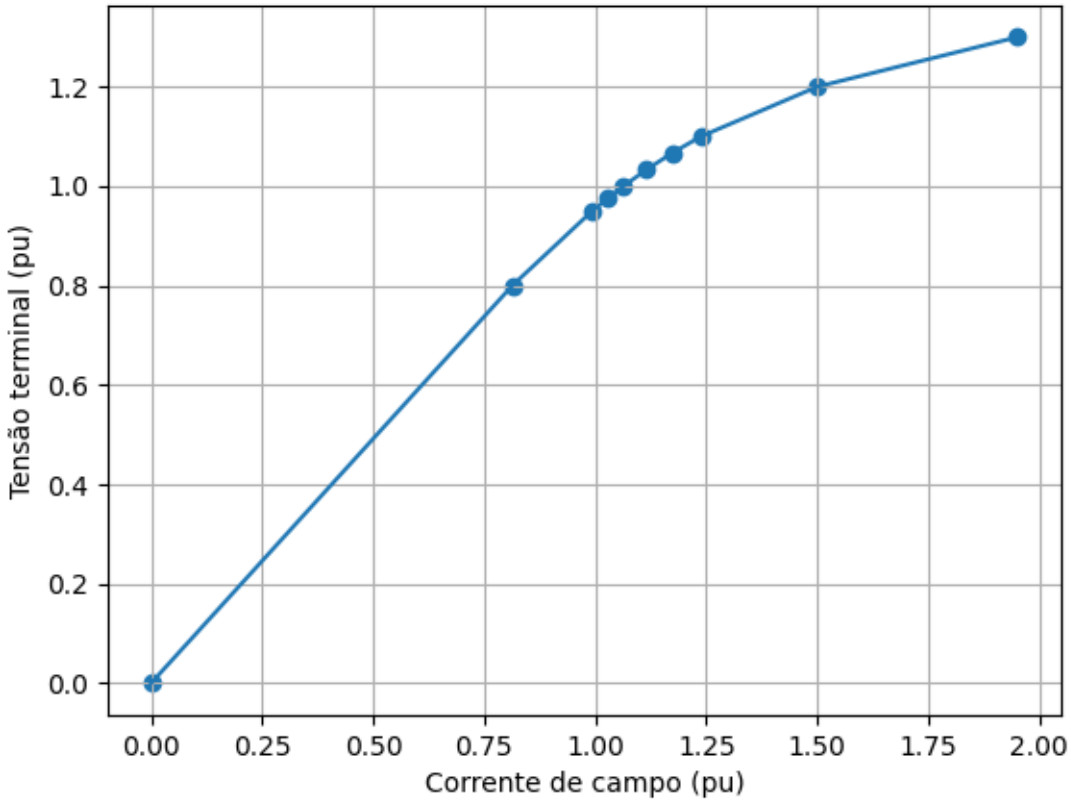

Figura 4-628 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.26.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.26.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.26.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.26.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

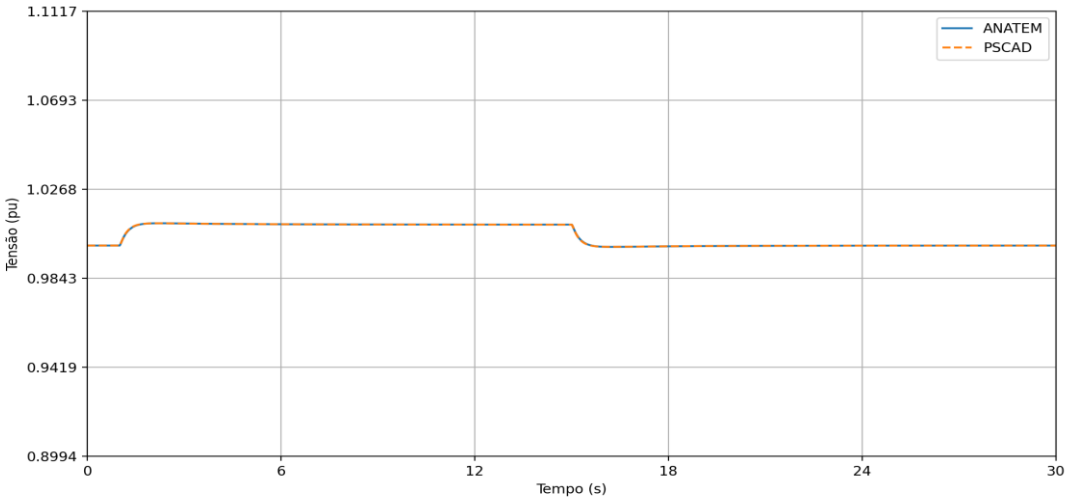

Figura 4-629 – Tensão terminal

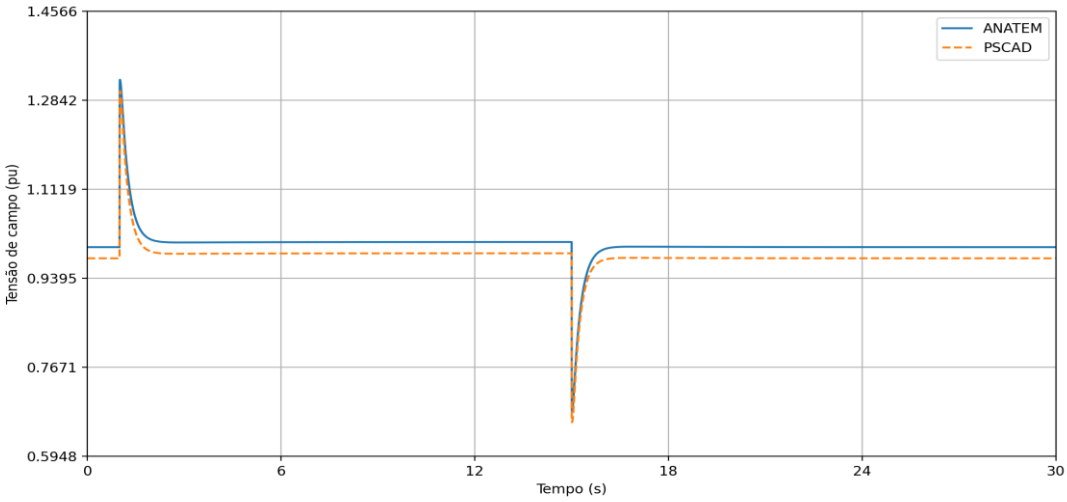

Figura 4-630 – Tensão de campo

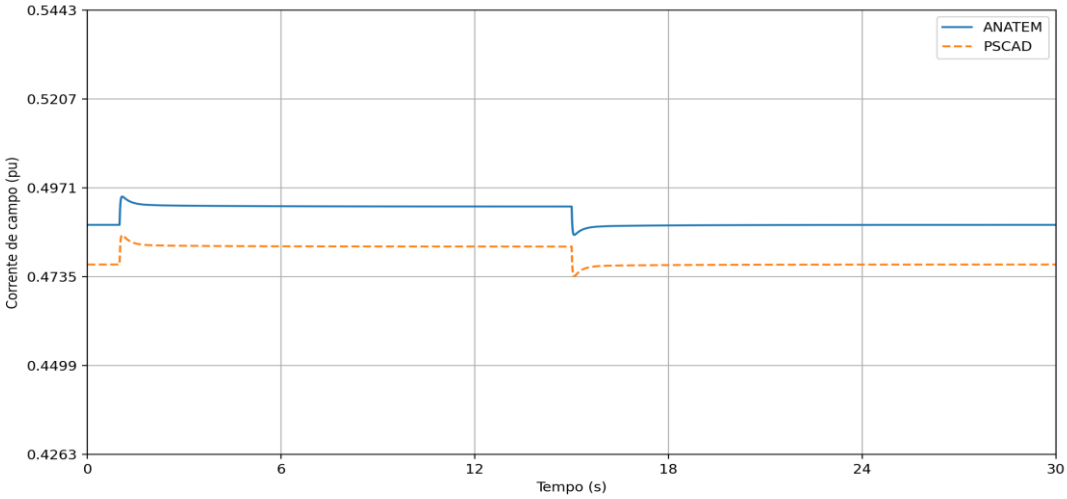

Figura 4-631 – Corrente de campo

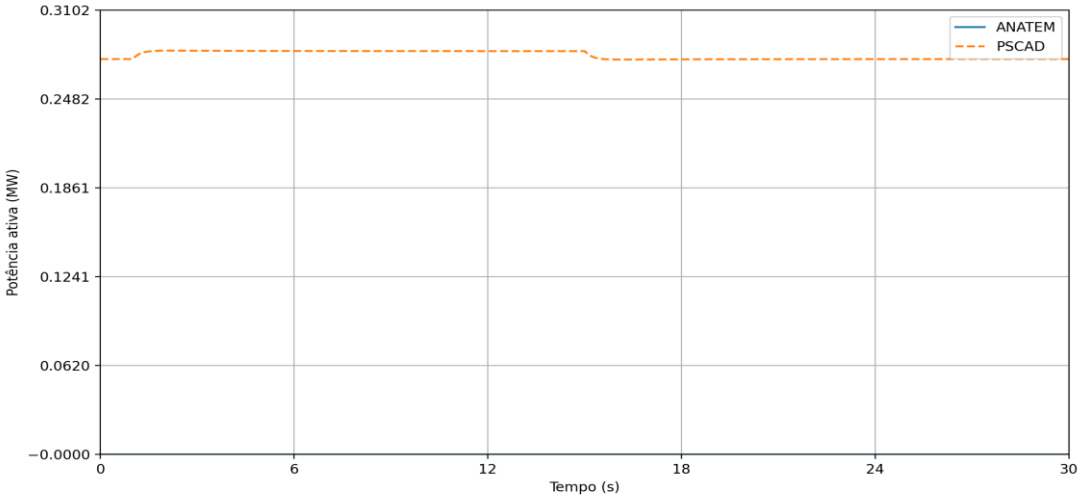

Figura 4-632 – Potência ativa

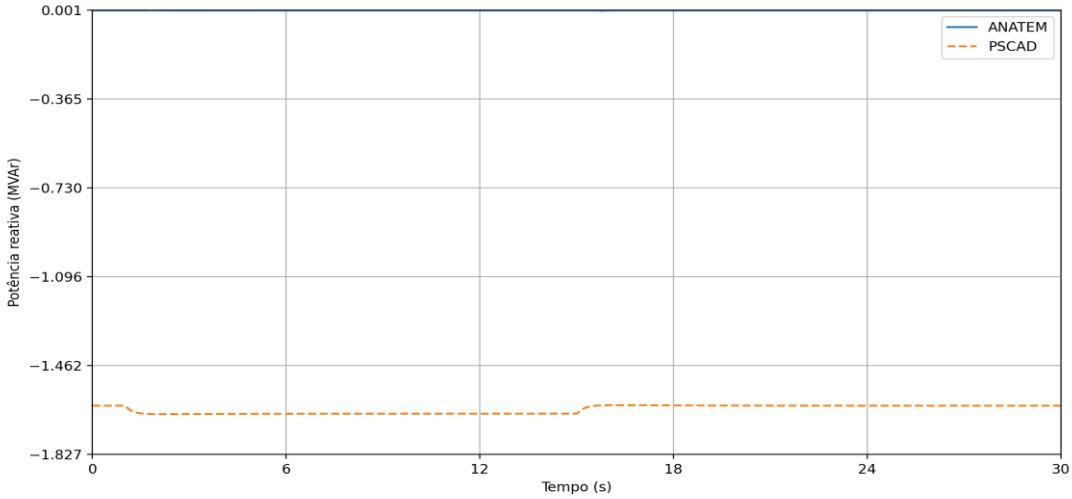

Figura 4-633 – Potência reativa

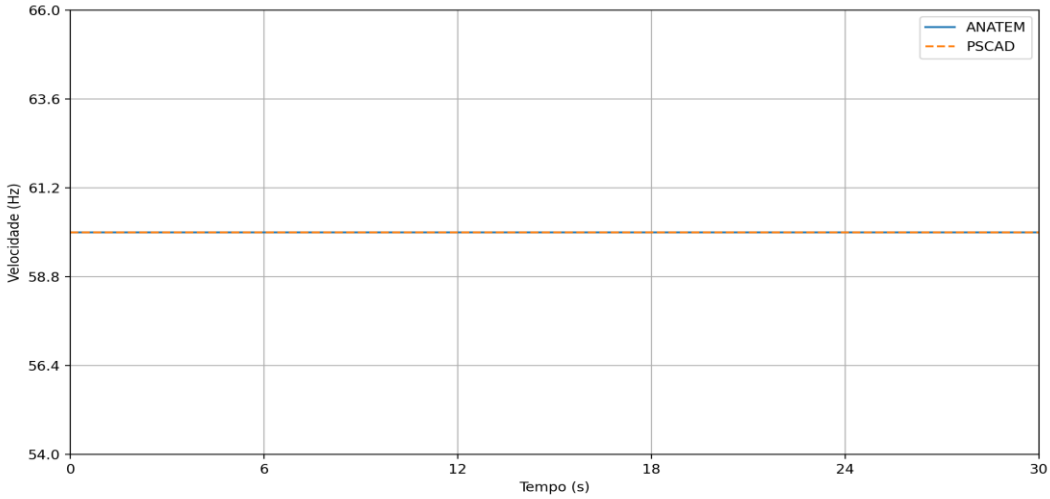

Figura 4-634 – Velocidade da máquina

4.26.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

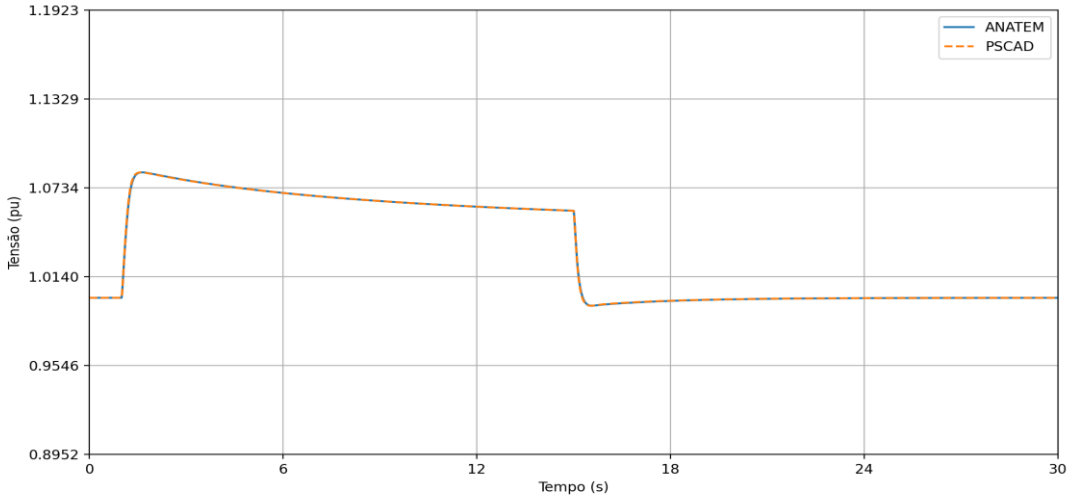

Figura 4-635 – Tensão terminal

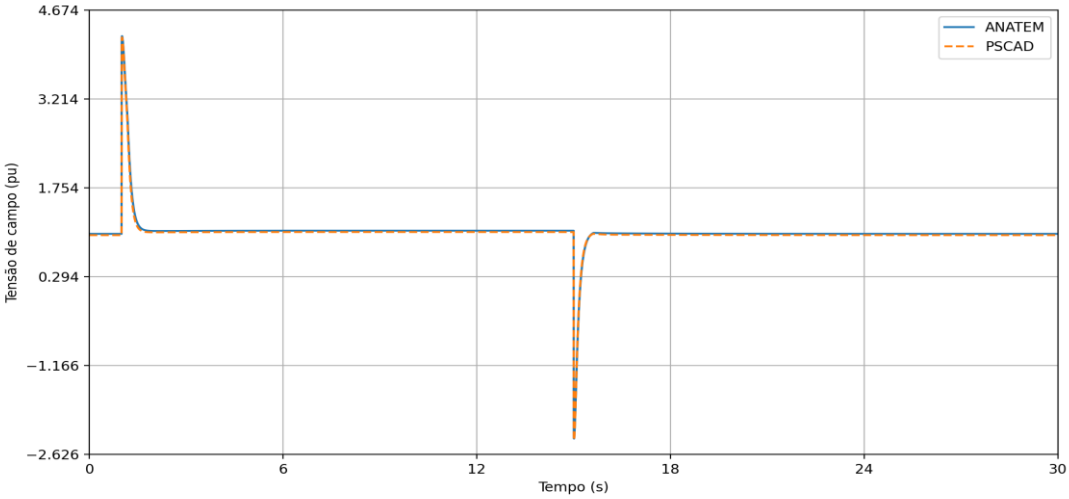

Figura 4-636 – Tensão de campo

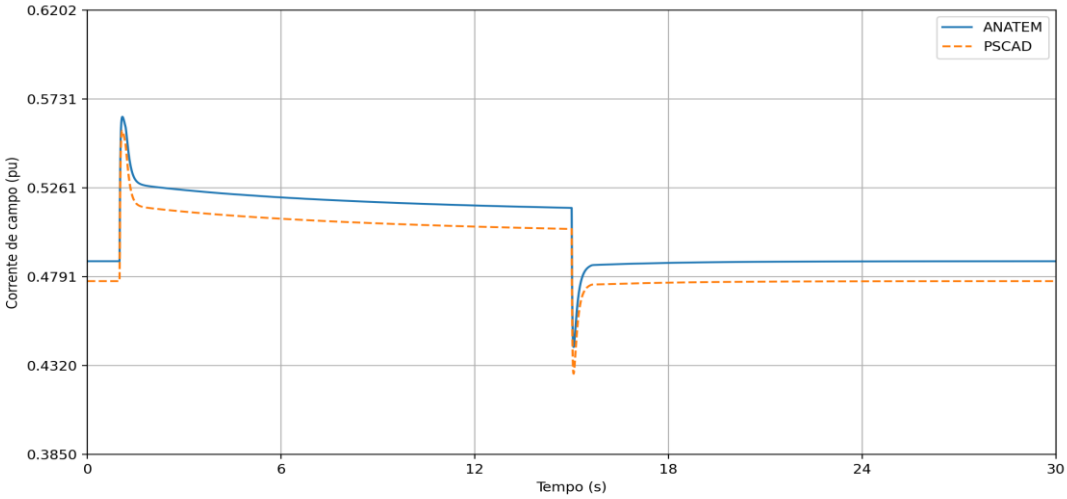

Figura 4-637 – Corrente de campo

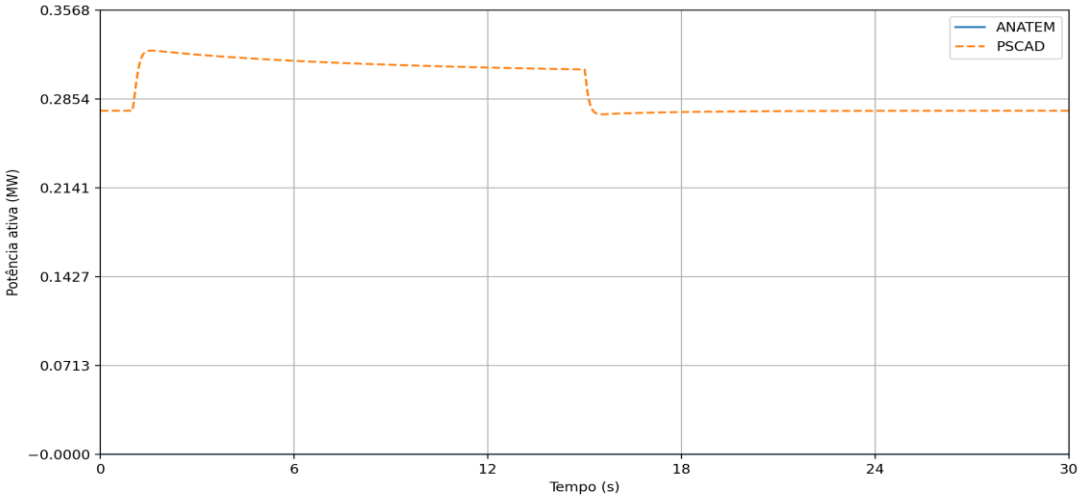

Figura 4-638 – Potência ativa

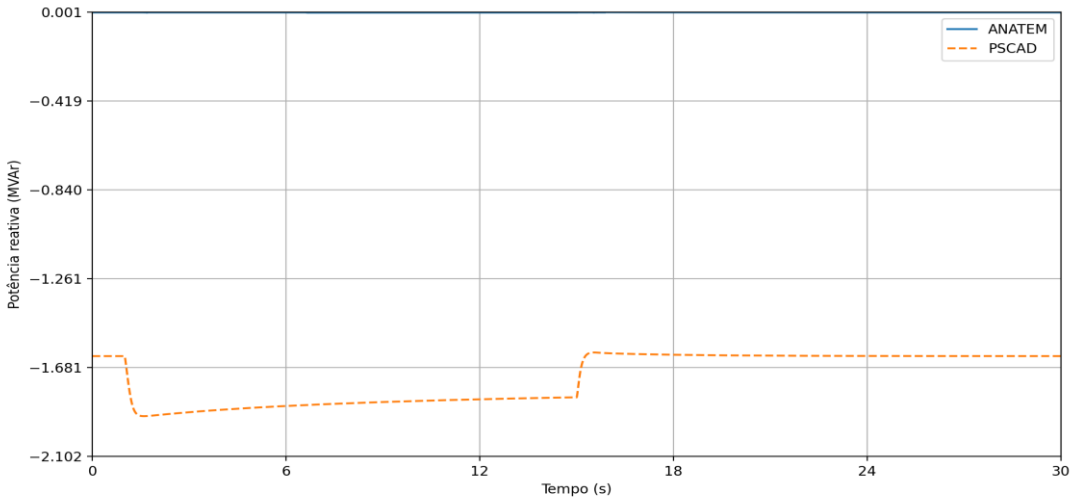

Figura 4-639 – Potência reativa

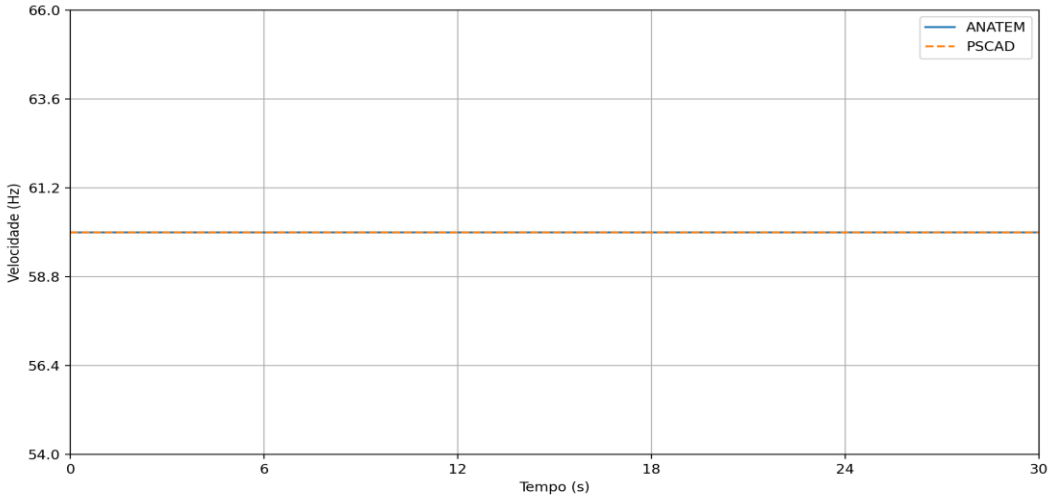

Figura 4-640 – Velocidade da máquina

4.26.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.26.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.26.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.26.4.3.

4.26.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

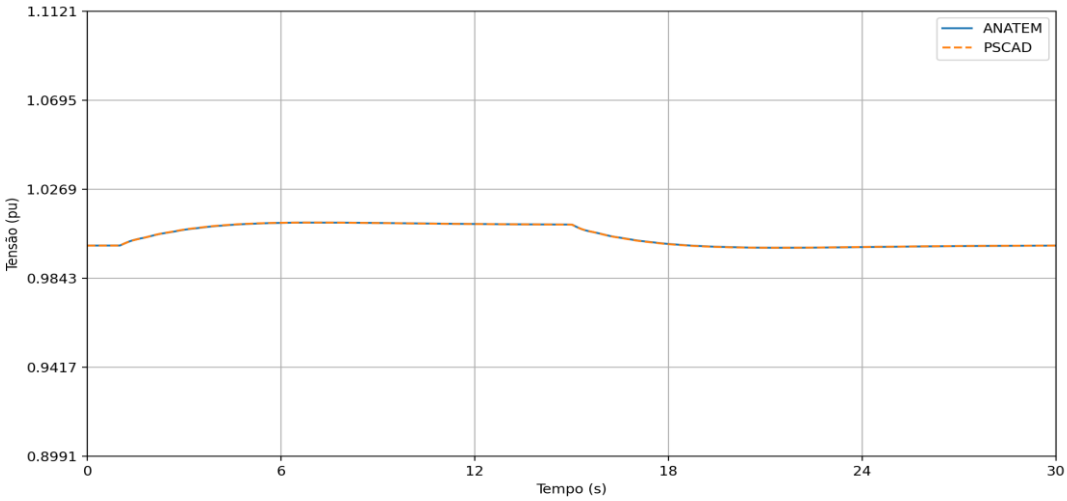

Figura 4-641 – Tensão terminal

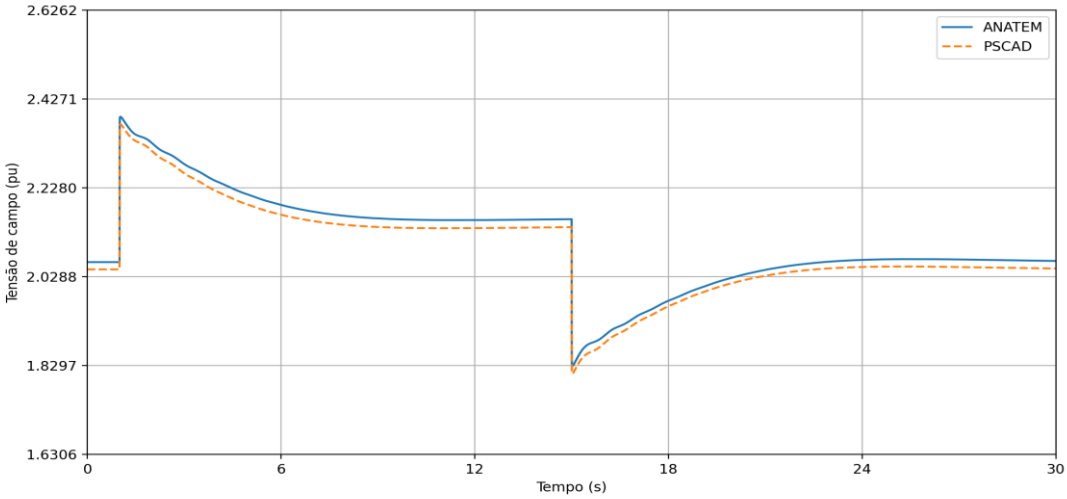

Figura 4-642 – Tensão de campo

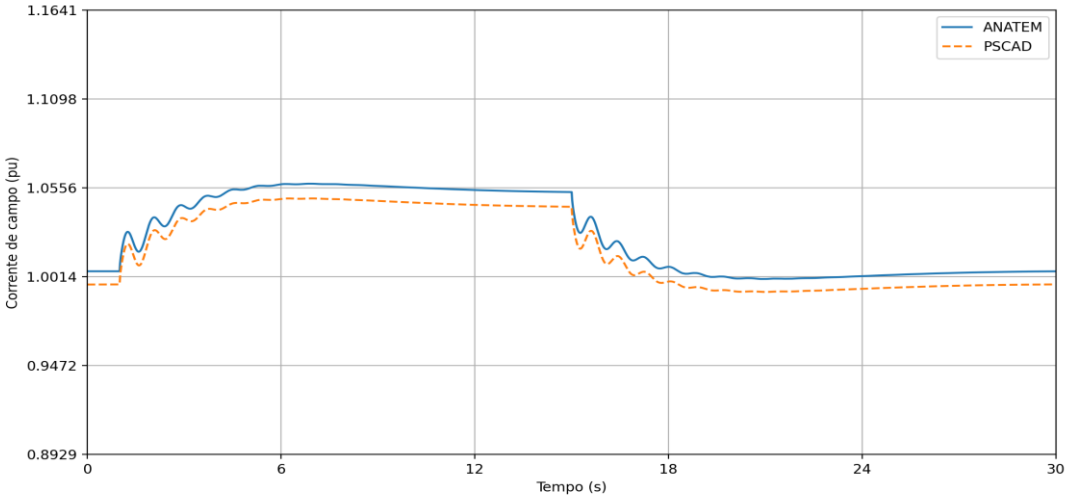

Figura 4-643 – Corrente de campo

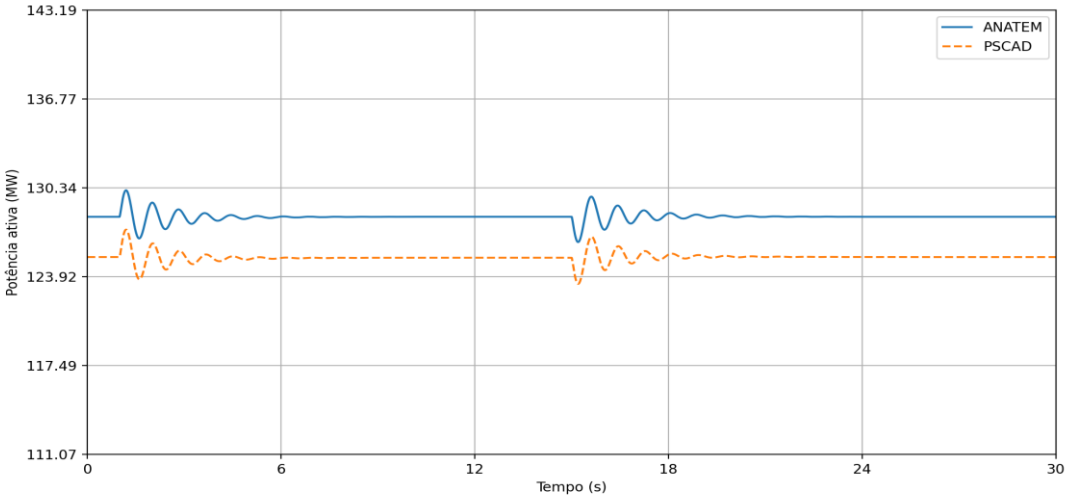

Figura 4-644 – Potência ativa

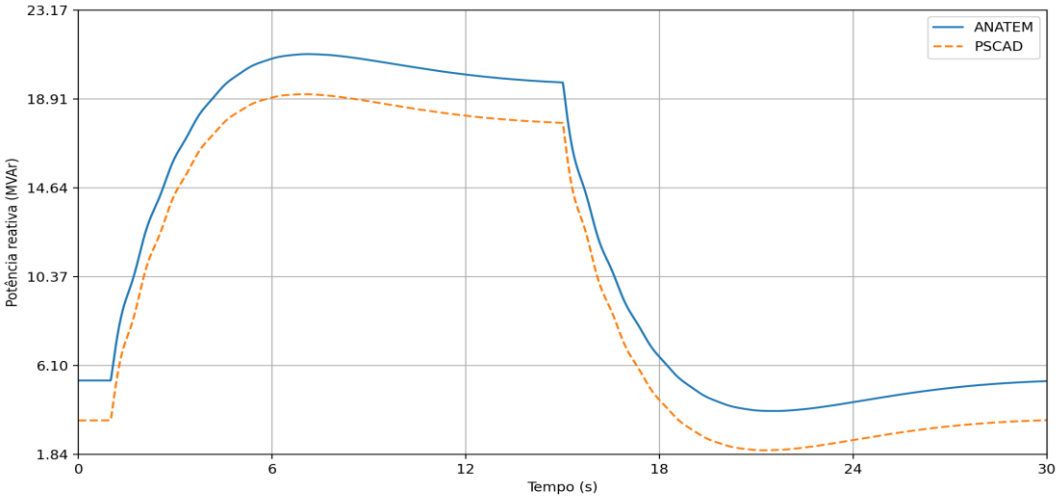

Figura 4-645 – Potência reativa

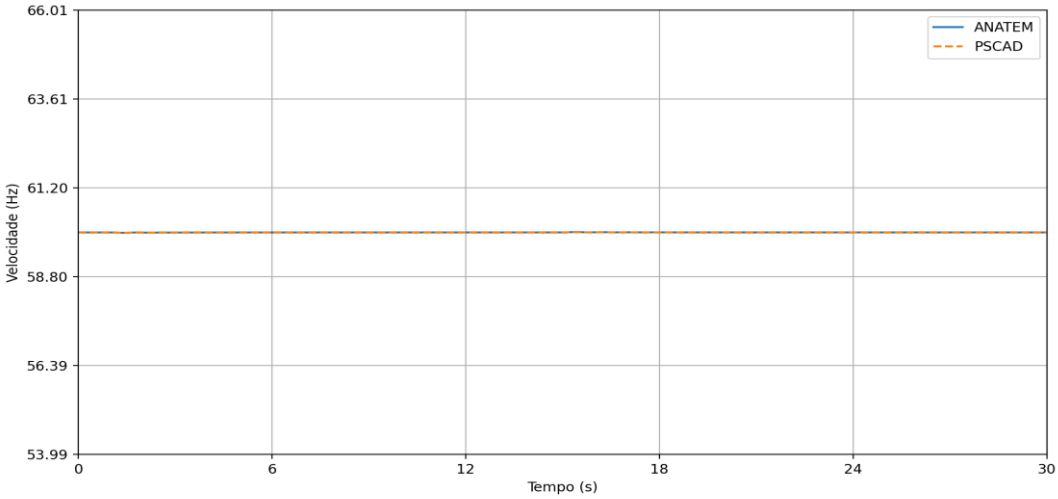

Figura 4-646 – Velocidade da máquina

4.26.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

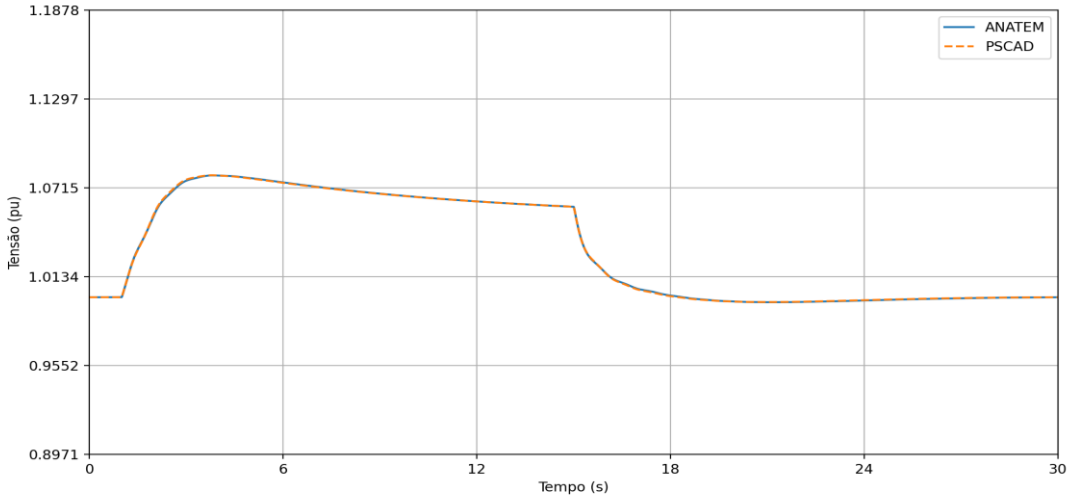

Figura 4-647 – Tensão terminal

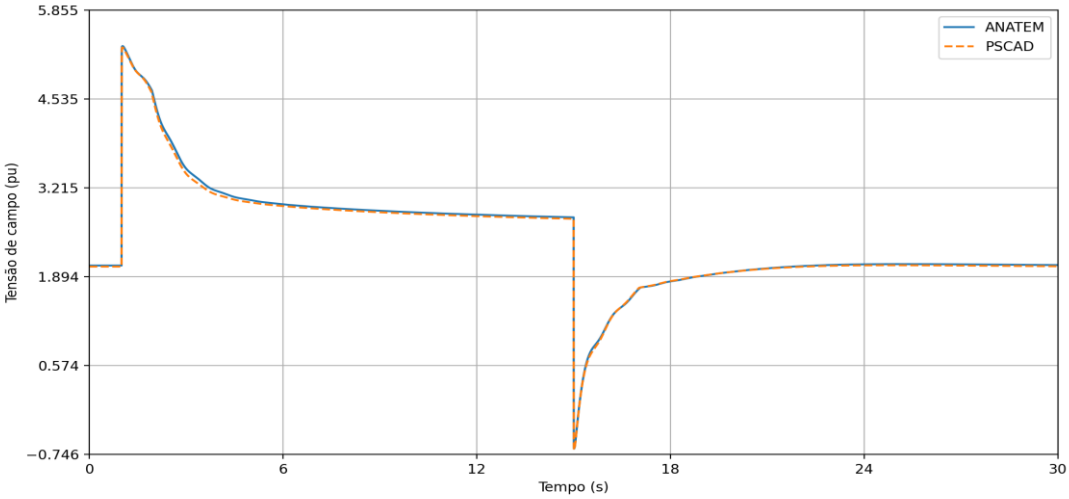

Figura 4-648 – Tensão de campo

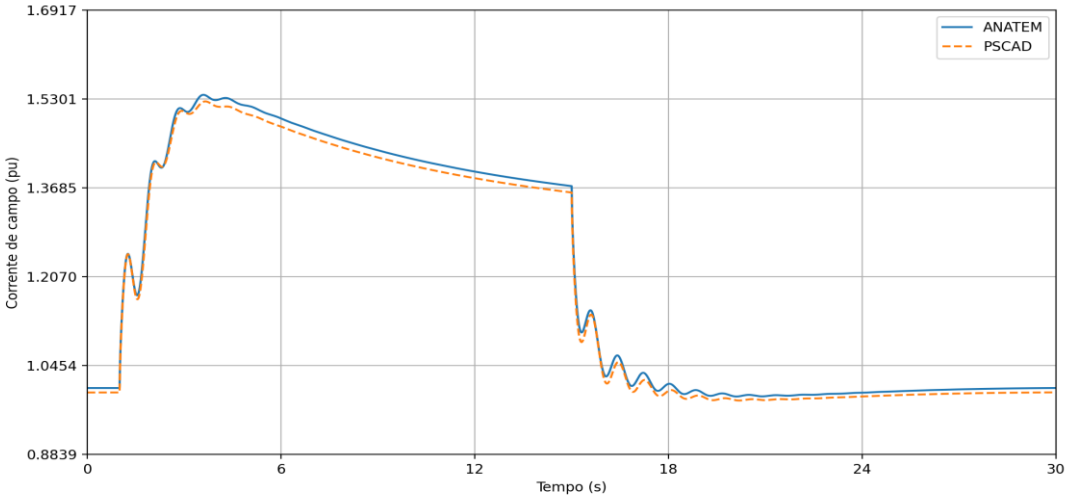

Figura 4-649 – Corrente de campo

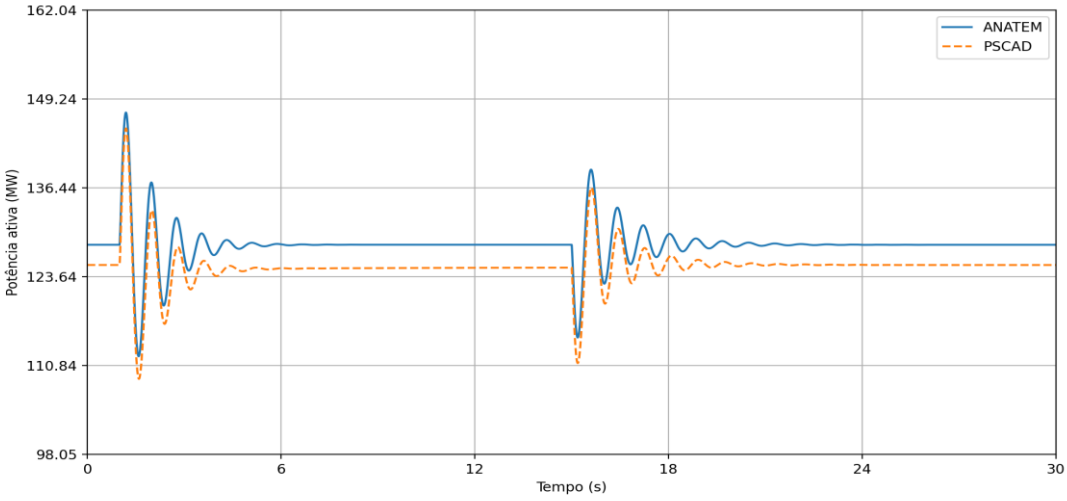

Figura 4-650 – Potência ativa

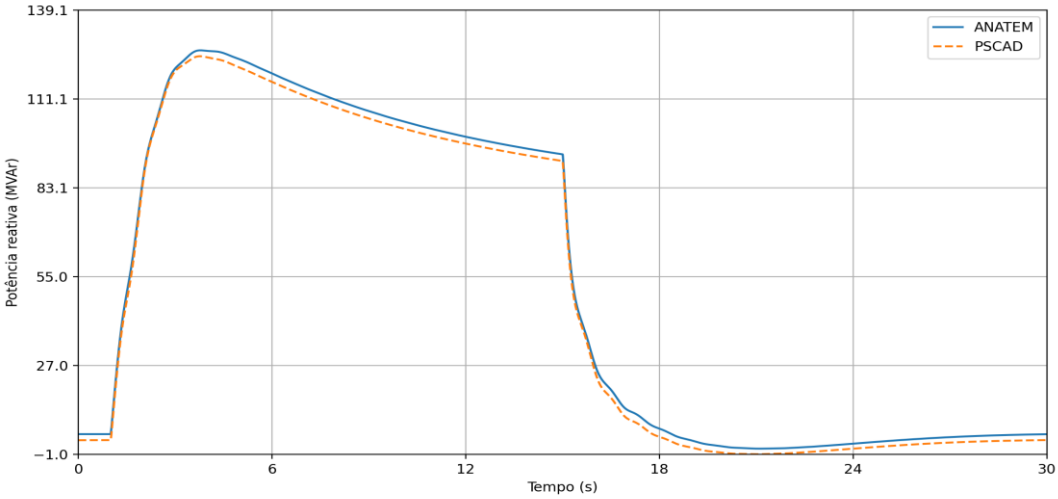

Figura 4-651 – Potência reativa

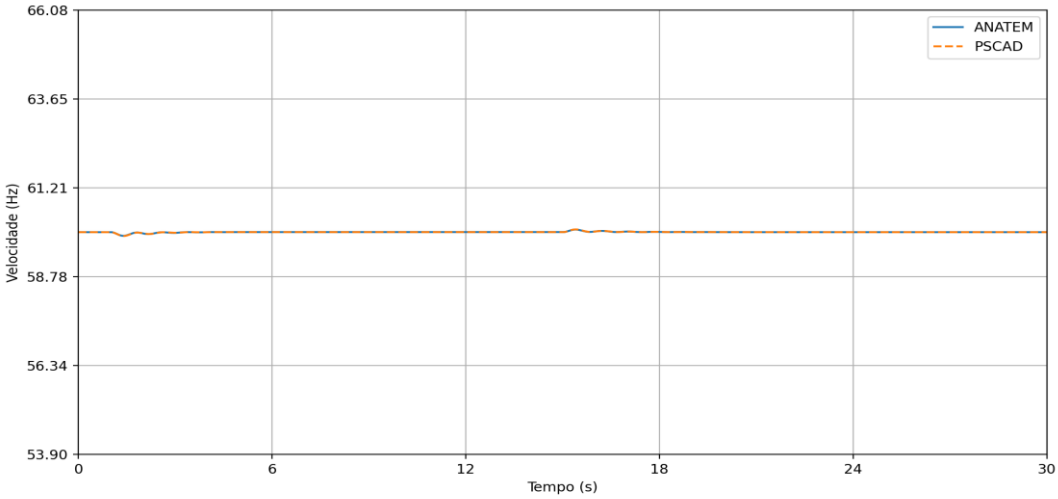

Figura 4-652 – Velocidade da máquina

4.26.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

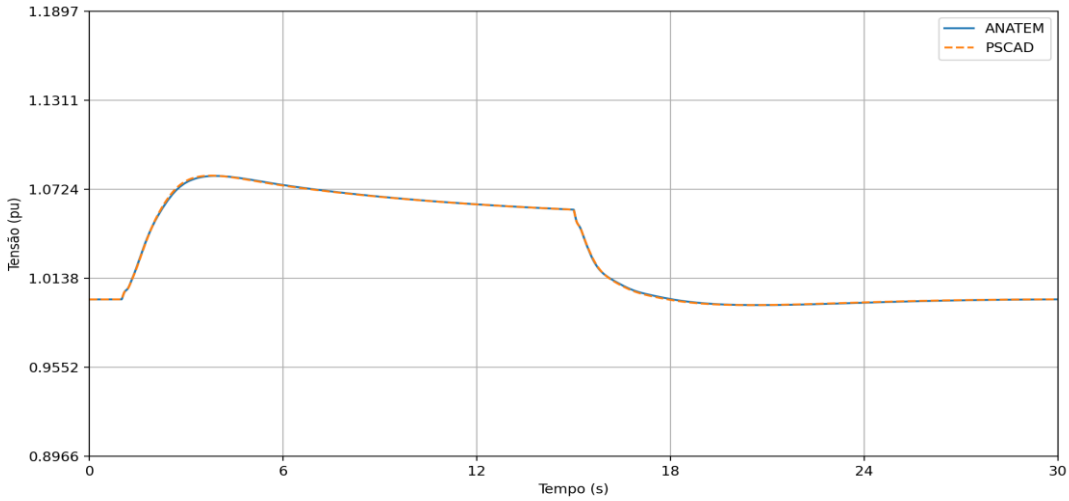

Figura 4-653 – Tensão terminal

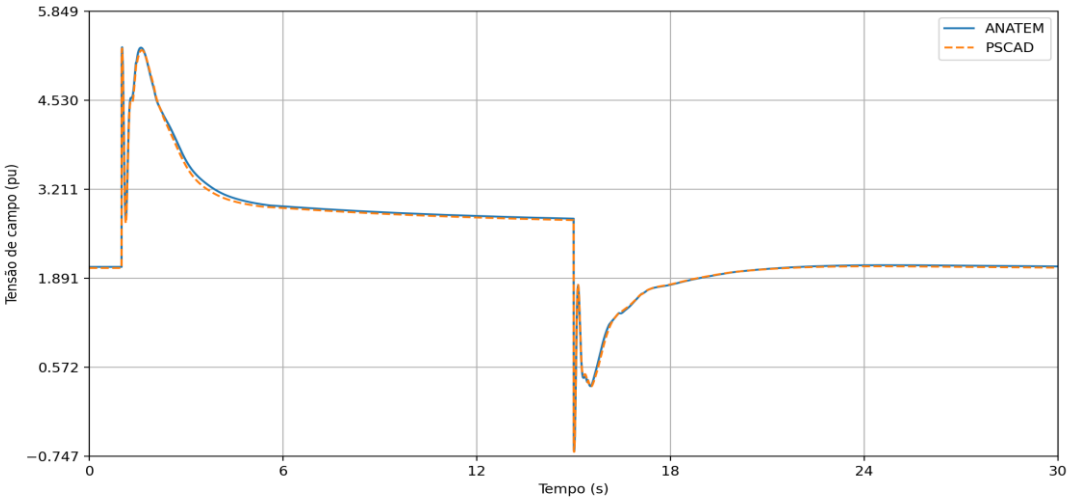

Figura 4-654 – Tensão de campo

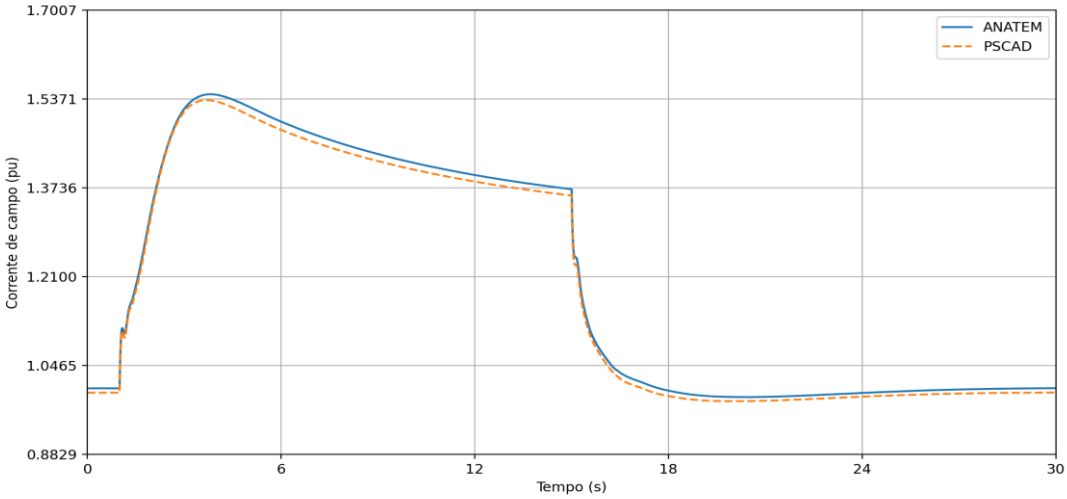

Figura 4-655 – Corrente de campo

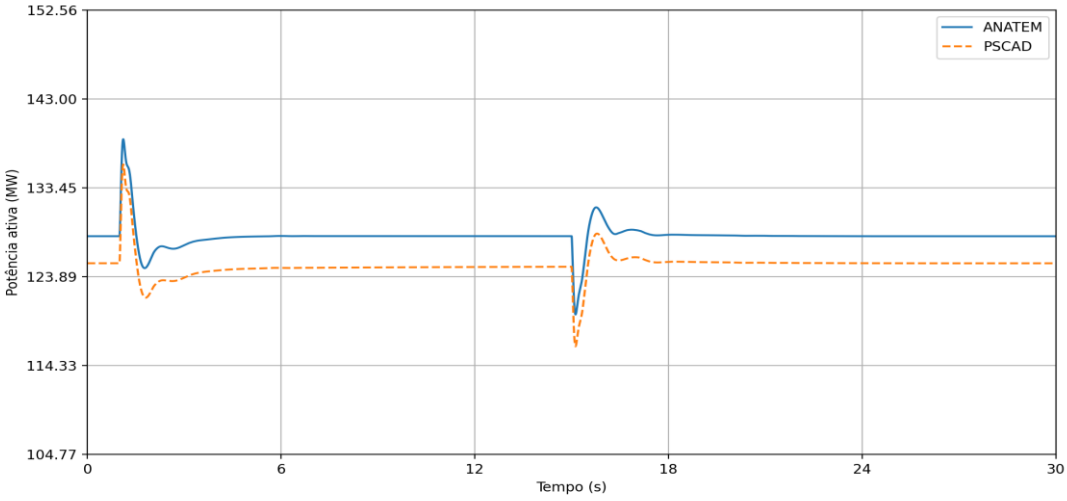

Figura 4-656 – Potência ativa

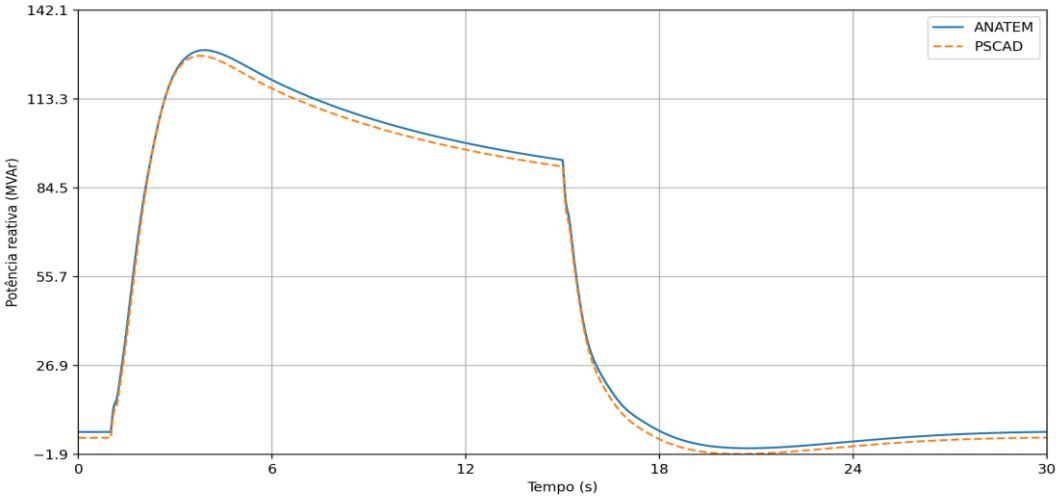

Figura 4-657 – Potência reativa

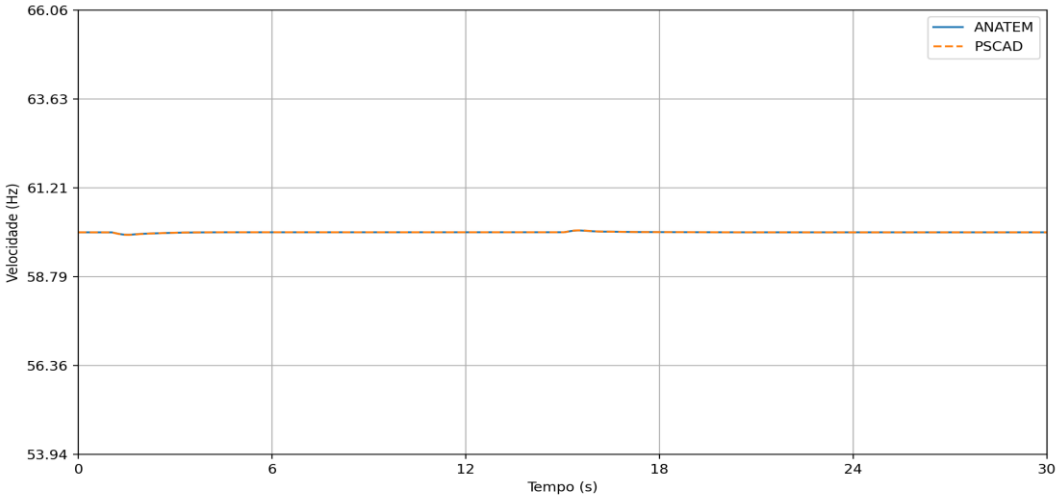

Figura 4-658 – Velocidade da máquina

4.27 UTE COMPANHIA SIDERURGICA DO ATLANTICO – GÁS GP20

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Gás GP20, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.27.1 Modelo da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Gás GP20

A Tabela 4-79 apresenta os parâmetros da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Gás GP20 disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-79 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	220	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	203,9	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	22,2	I(KA)	6,694	
x'q (%)	36,3	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	16,7	H(s)	8,795	
xl(%)	14,8	D(pu)	0	
T'd(s)	7,89	Ra(pu)	0,003	
T'q(s)	0,77	xp(pu)	0,148	Reatância de Potier
T''d(s)	0,018	xd(pu)	2,2	
T''q(s)	0,027	xd_(pu)	0,222	x'd
Ra(%)	0,25	Td0_(s)	7,89	T'd
H(s)	8,795	xd__(pu)	0,167	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,018	T''d
S(MVA)	160	Xq(pu)	2,039	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,363	x'q
		Tq0_(s)	0,77	T'q
		xq__(pu)	0,167	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,027	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.27.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-80, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Gás GP20 estão apresentados na Tabela 4-81. A partir dos parâmetros da Tabela 4-80, calcula-se os

dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-81. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-659.

Tabela 4-80 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UTE Companhia Siderúrgica do Atlântico – Gás GP20	
Ag	**Y1**	0,0135002
Bg	**Y2**	7,752701
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-81 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,814	0,800
0,993	0,950
1,027	0,975
1,064	1,000
1,115	1,033
1,174	1,067
1,238	1,100
1,5	1,200
1,951	1,300

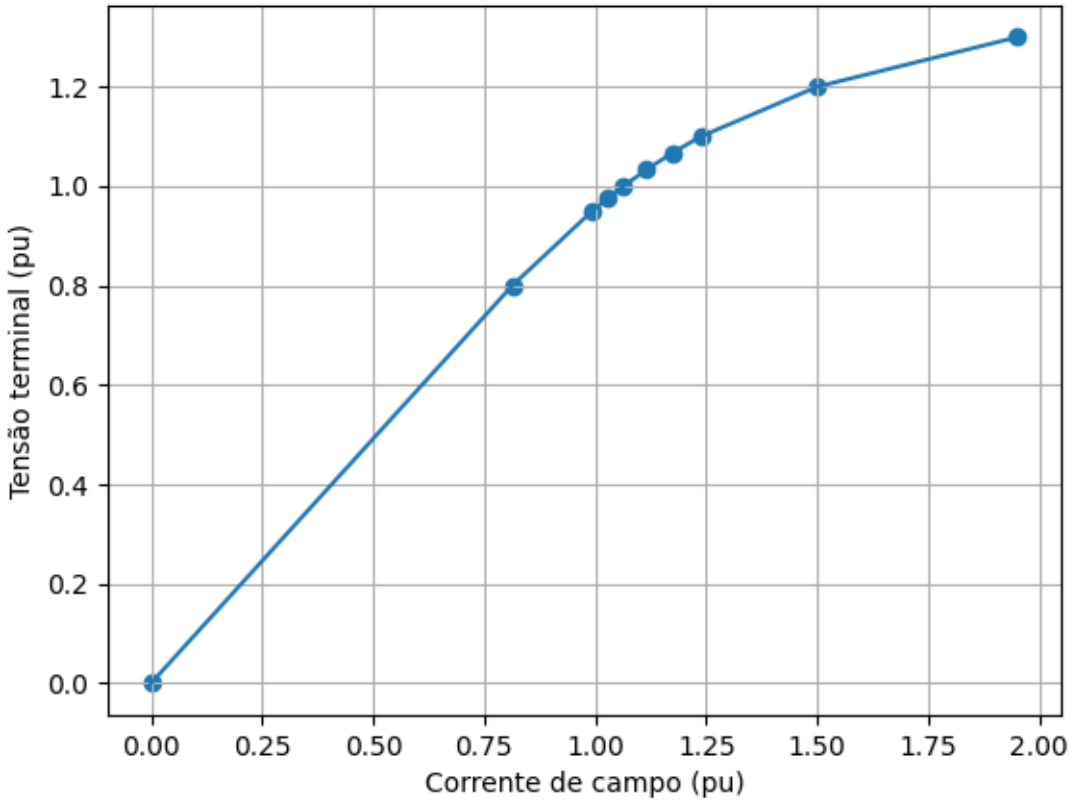

Figura 4-659 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.27.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.27.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.27.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.27.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

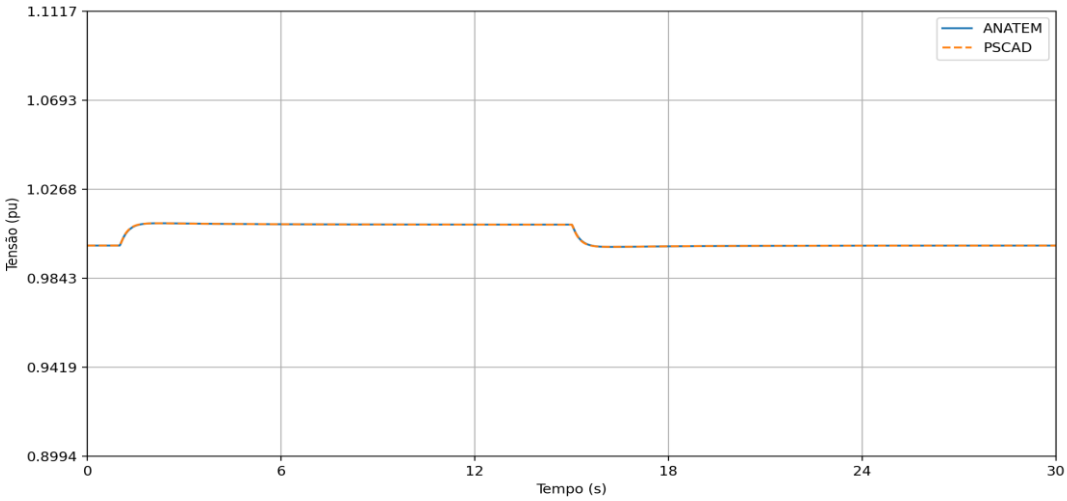

Figura 4-660 – Tensão terminal

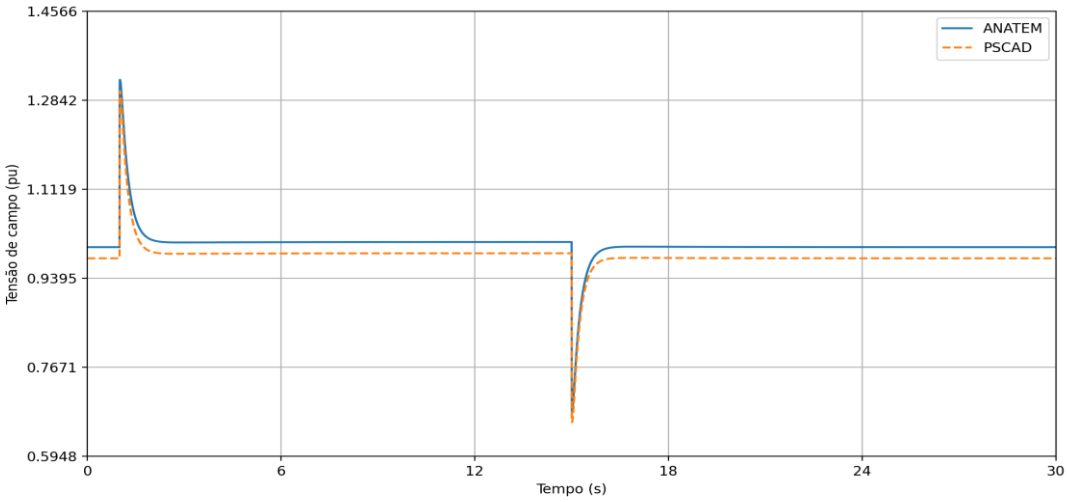

Figura 4-661 – Tensão de campo

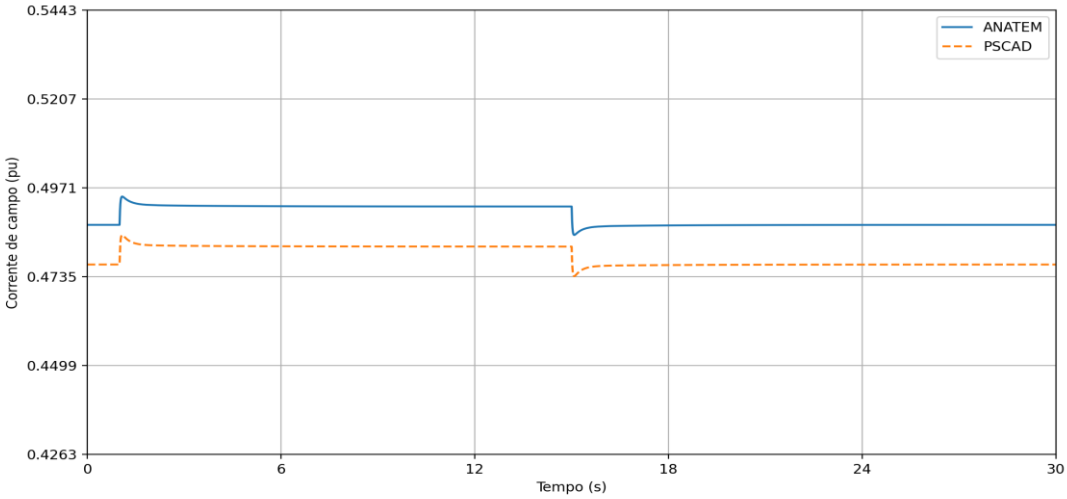

Figura 4-662 – Corrente de campo

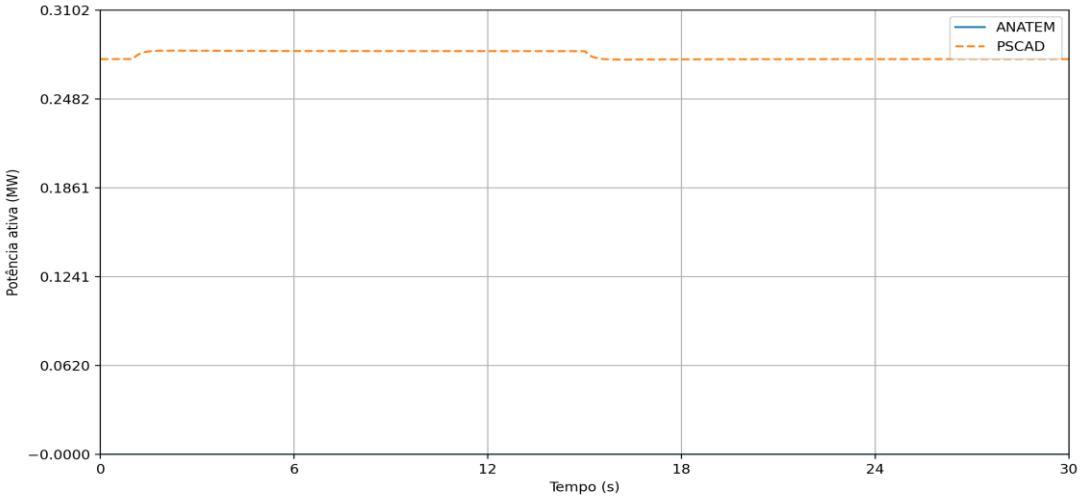

Figura 4-663 – Potência ativa

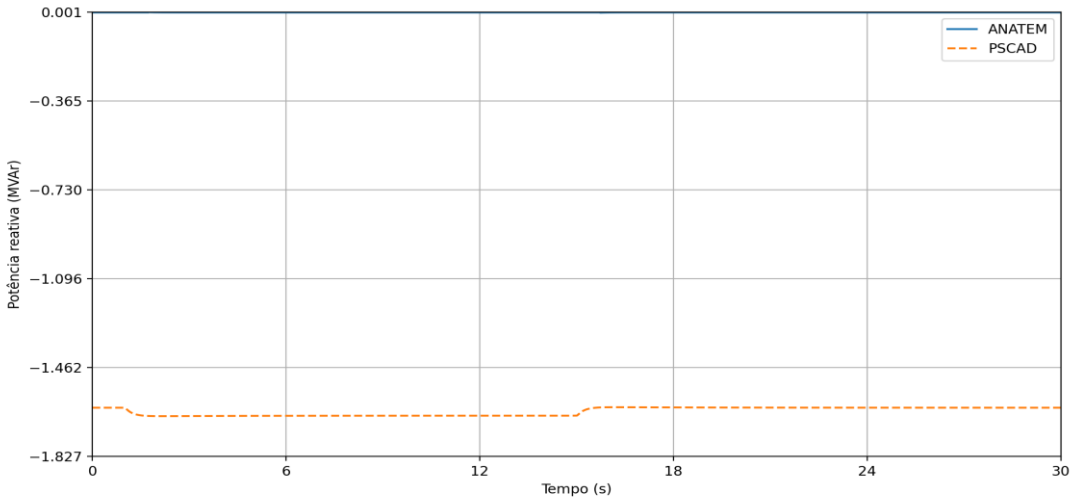

Figura 4-664 – Potência reativa

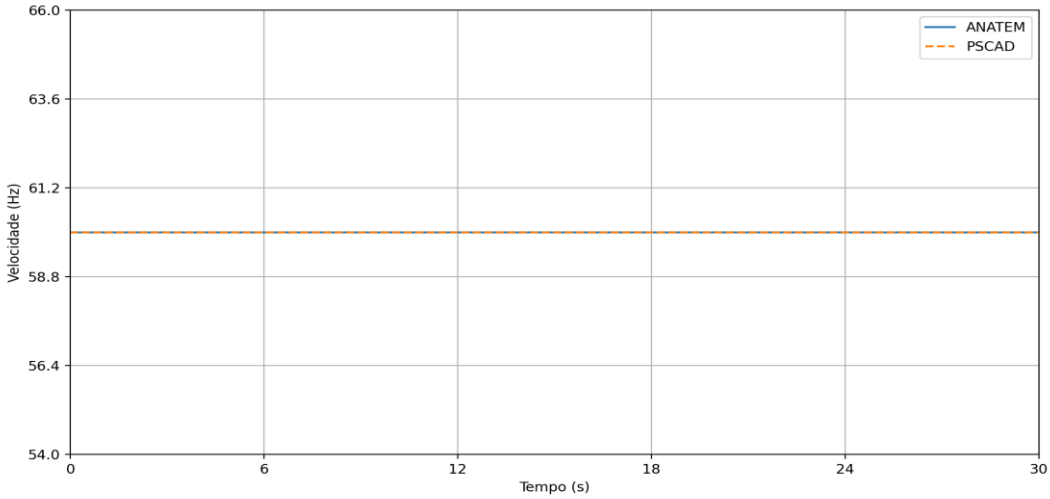

Figura 4-665 – Velocidade da máquina

4.27.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

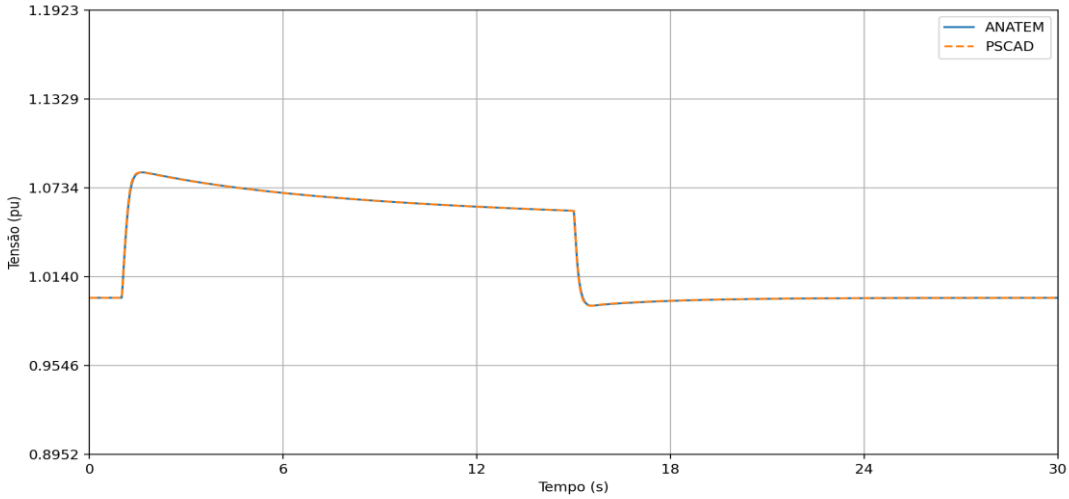

Figura 4-666 – Tensão terminal

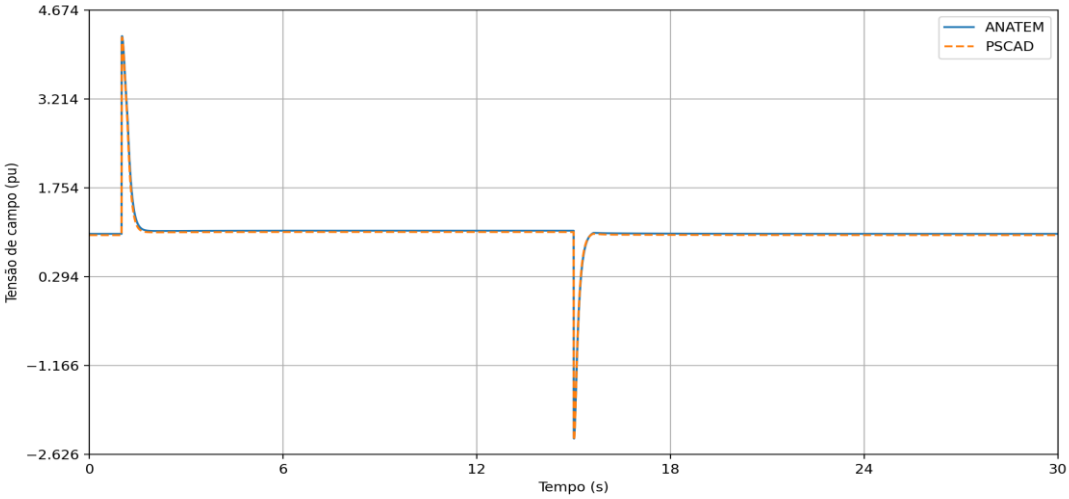

Figura 4-667 – Tensão de campo

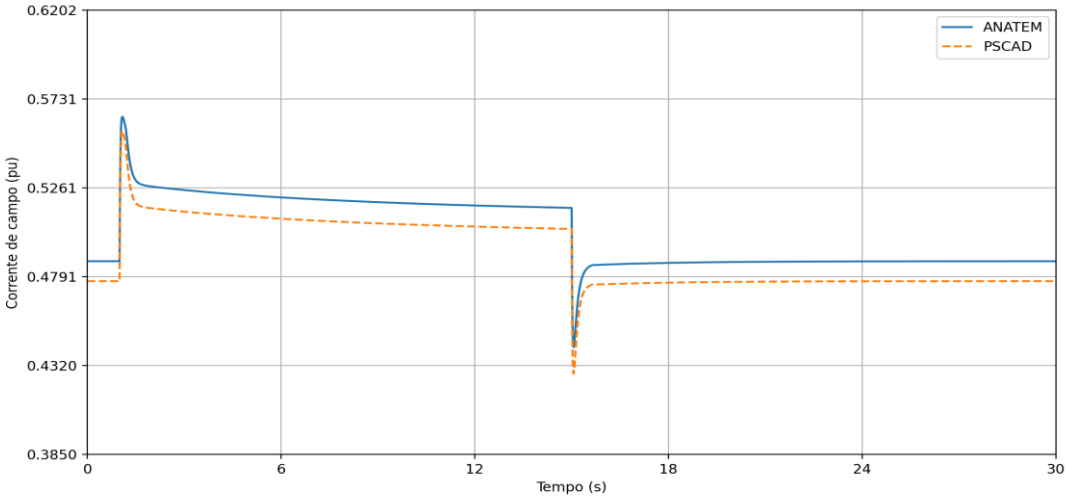

Figura 4-668 – Corrente de campo

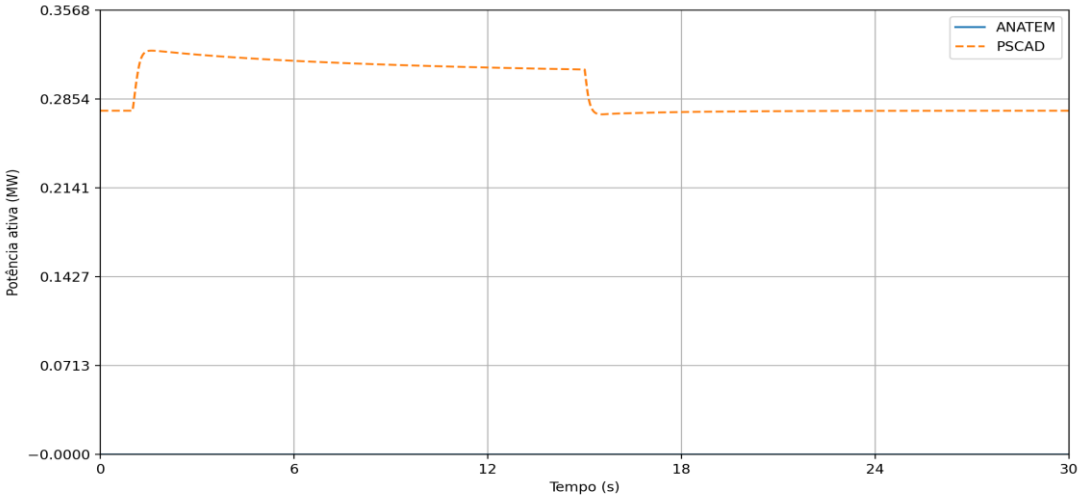

Figura 4-669 – Potência ativa

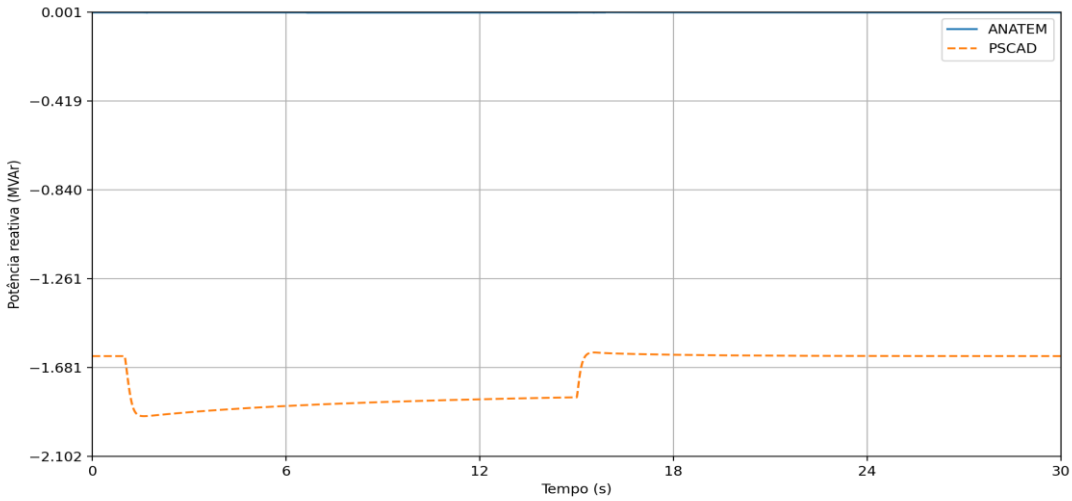

Figura 4-670 – Potência reativa

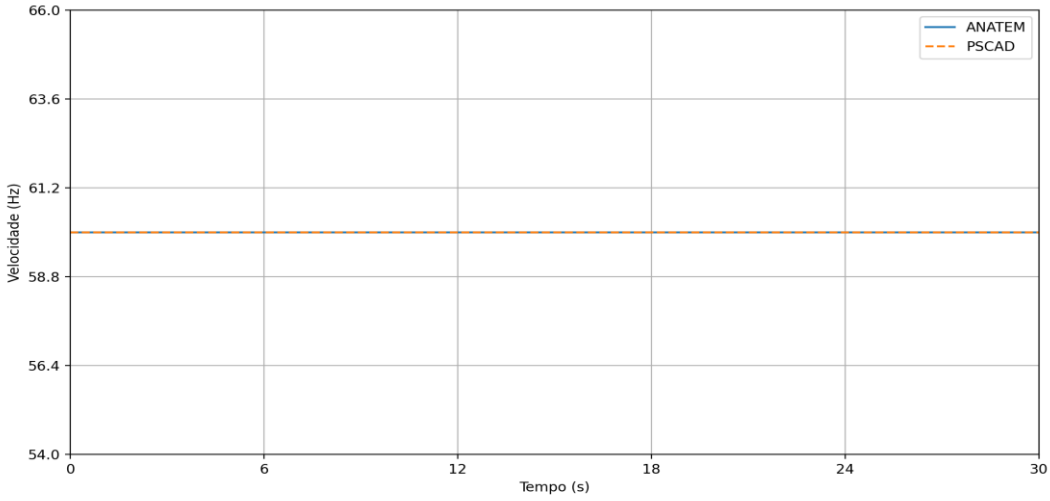

Figura 4-671 – Velocidade da máquina

4.27.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.27.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.27.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.27.4.3.

4.27.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

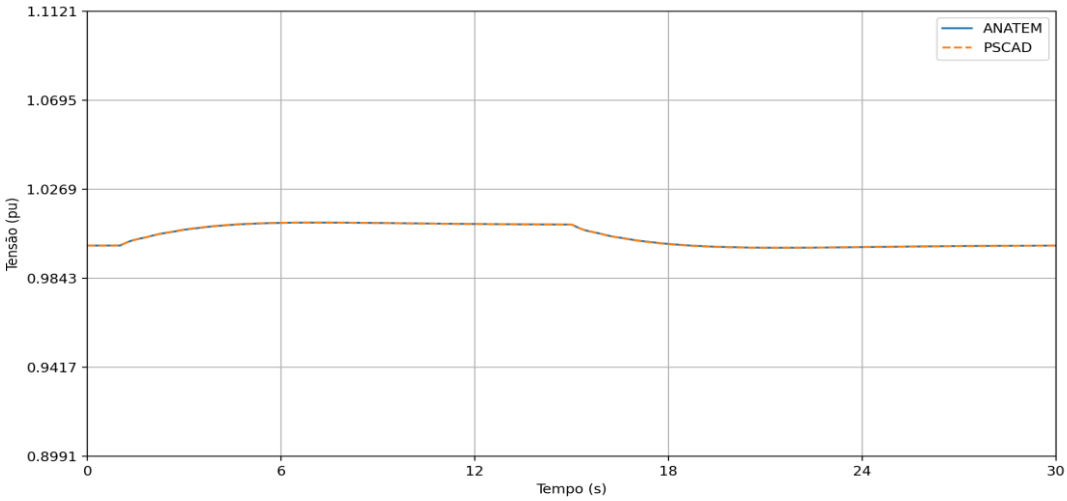

Figura 4-672 – Tensão terminal

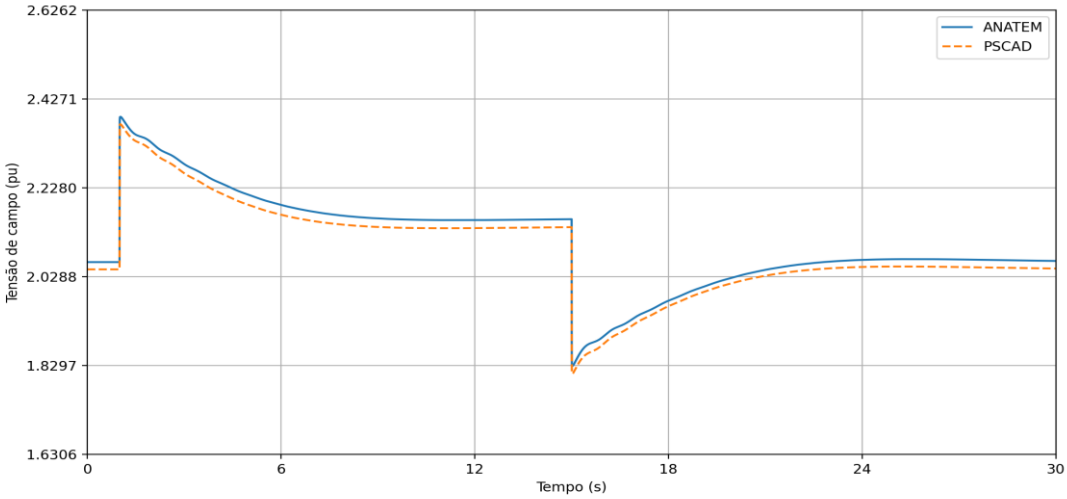

Figura 4-673 – Tensão de campo

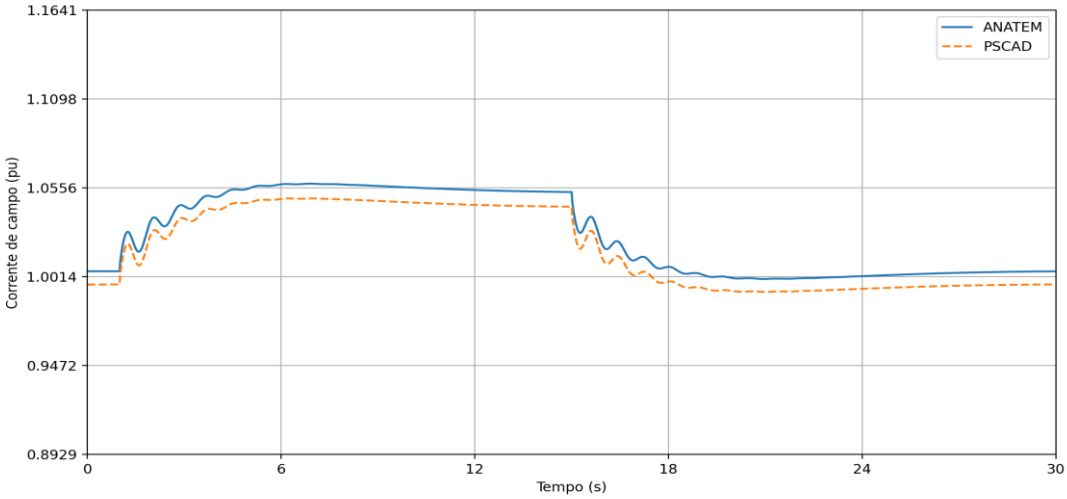

Figura 4-674 – Corrente de campo

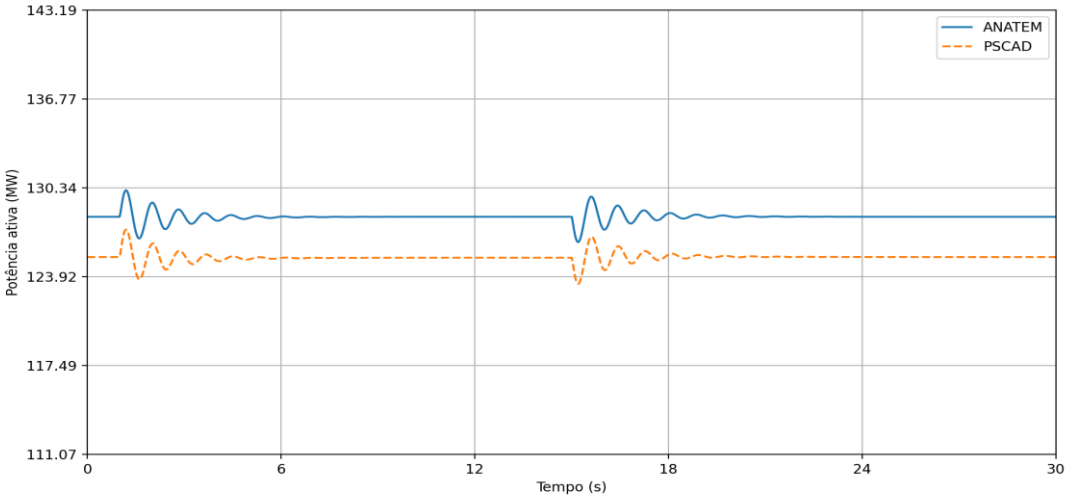

Figura 4-675 – Potência ativa

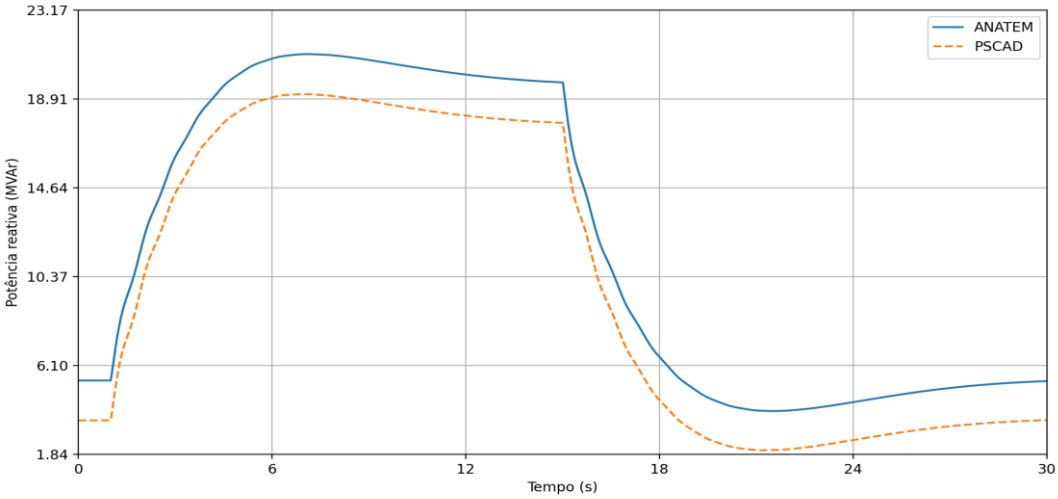

Figura 4-676 – Potência reativa

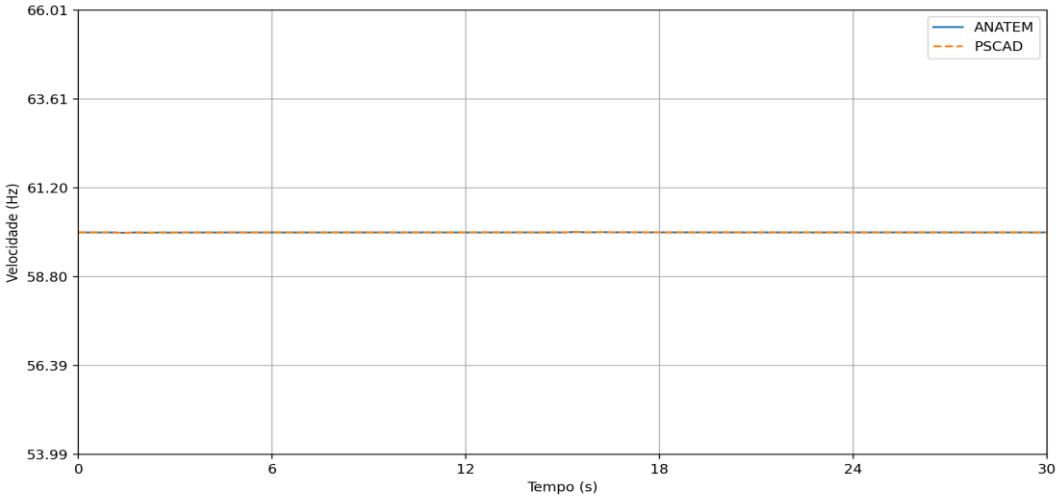

Figura 4-677 – Velocidade da máquina

4.27.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

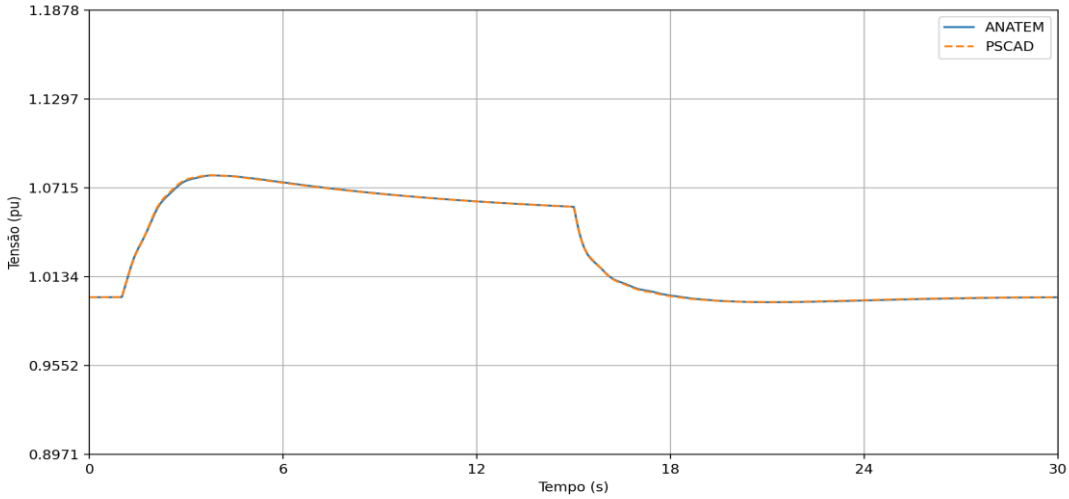

Figura 4-678 – Tensão terminal

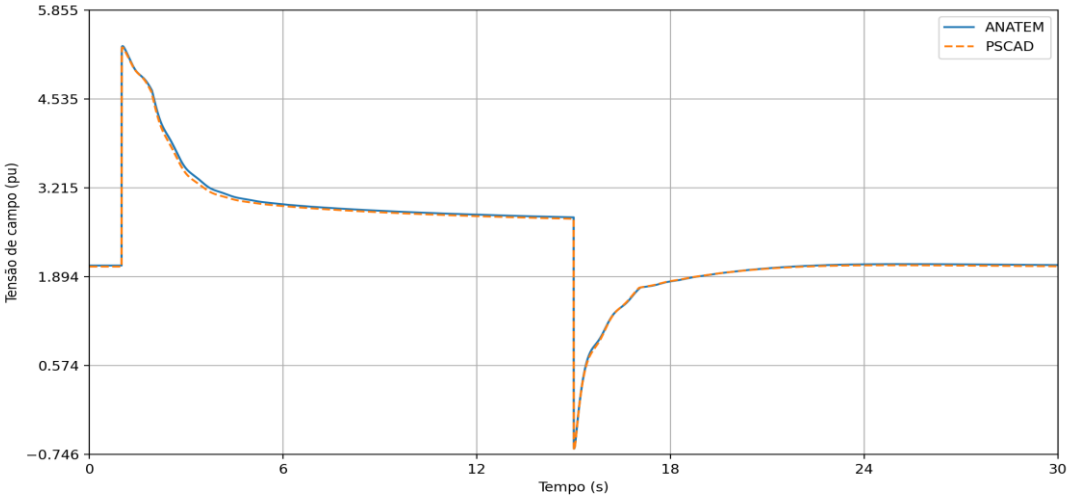

Figura 4-679 – Tensão de campo

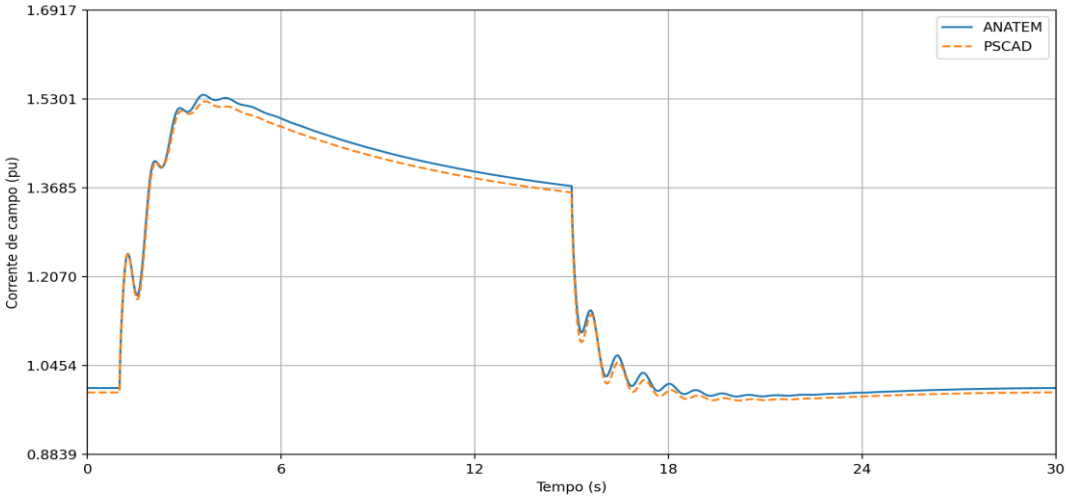

Figura 4-680 – Corrente de campo

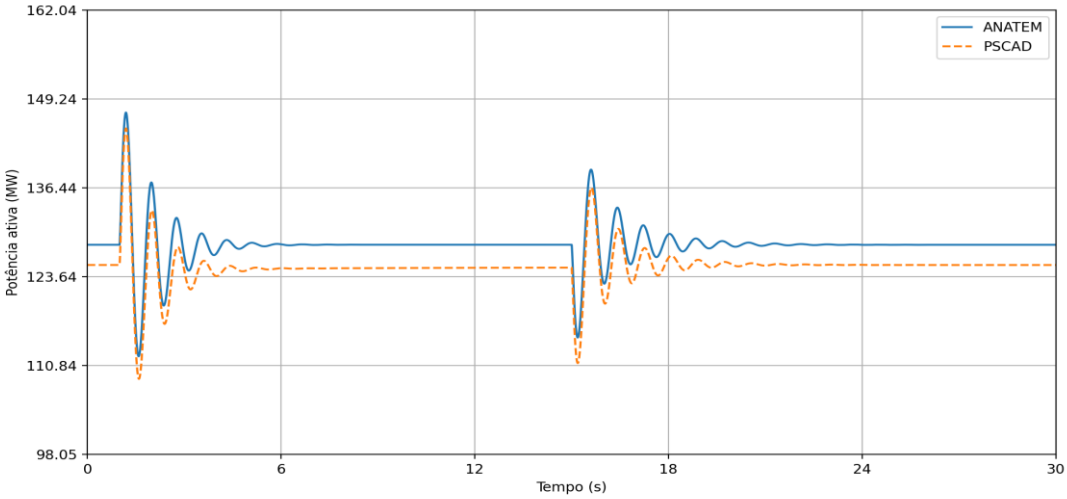

Figura 4-681 – Potência ativa

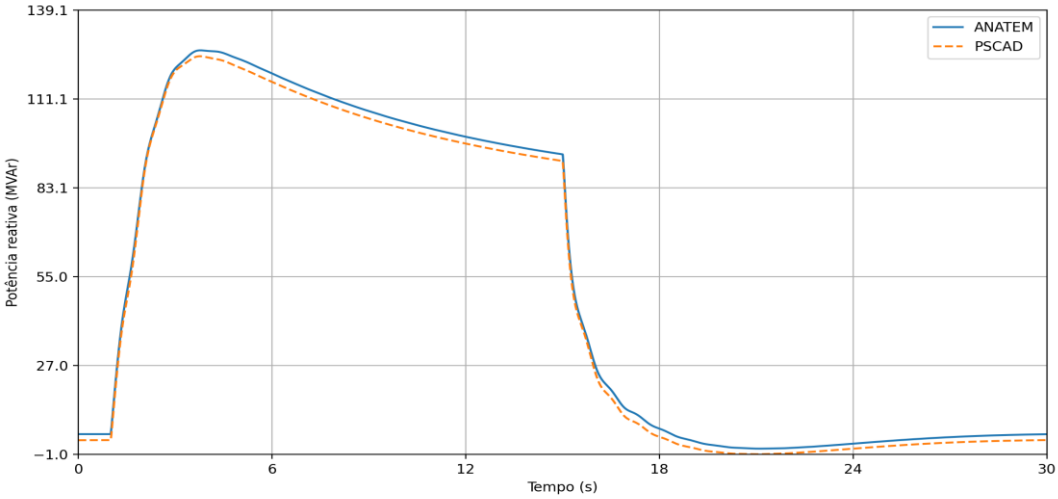

Figura 4-682 – Potência reativa

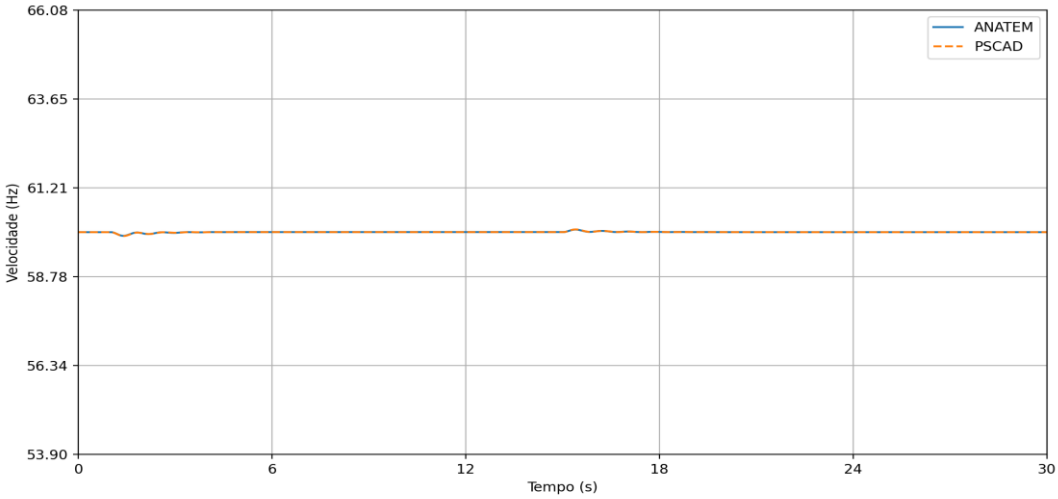

Figura 4-683 – Velocidade da máquina

4.27.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

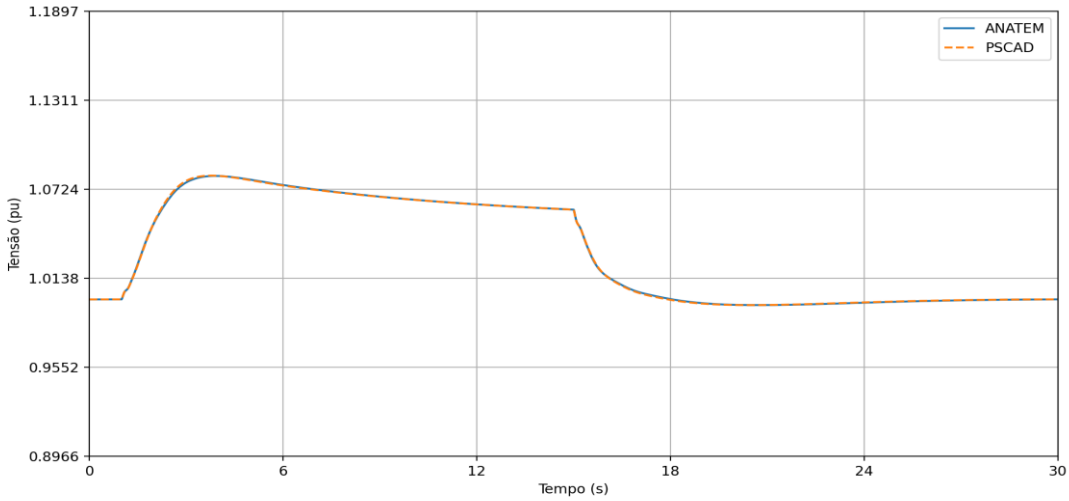

Figura 4-684 – Tensão terminal

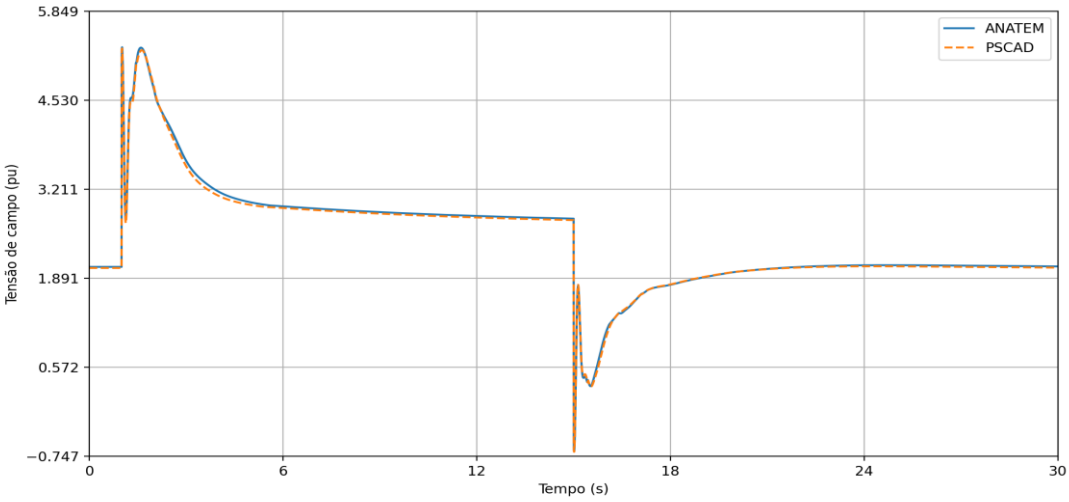

Figura 4-685 – Tensão de campo

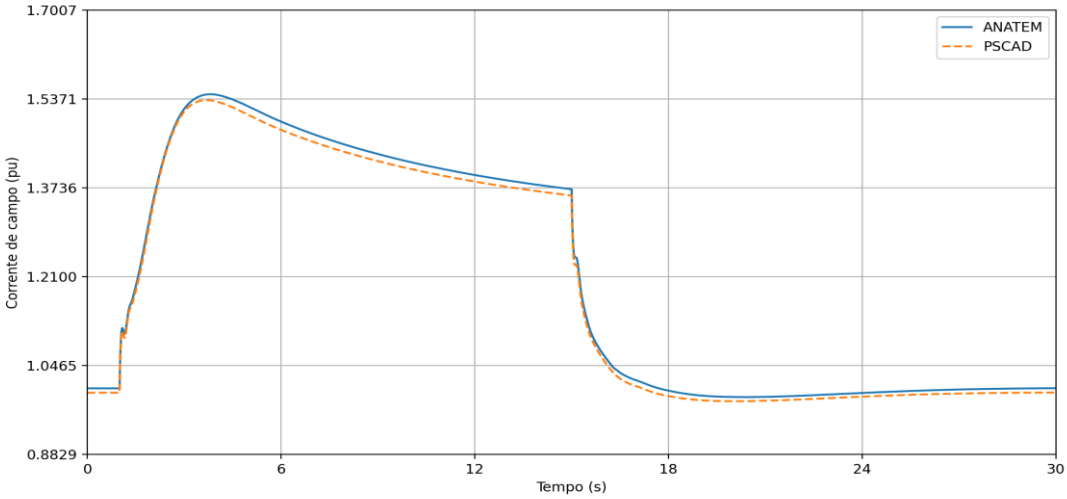

Figura 4-686 – Corrente de campo

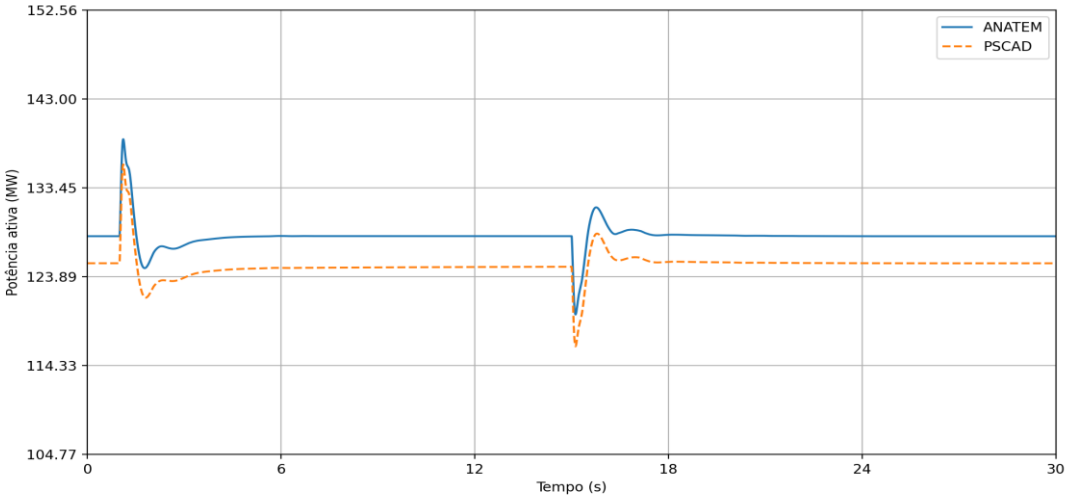

Figura 4-687 – Potência ativa

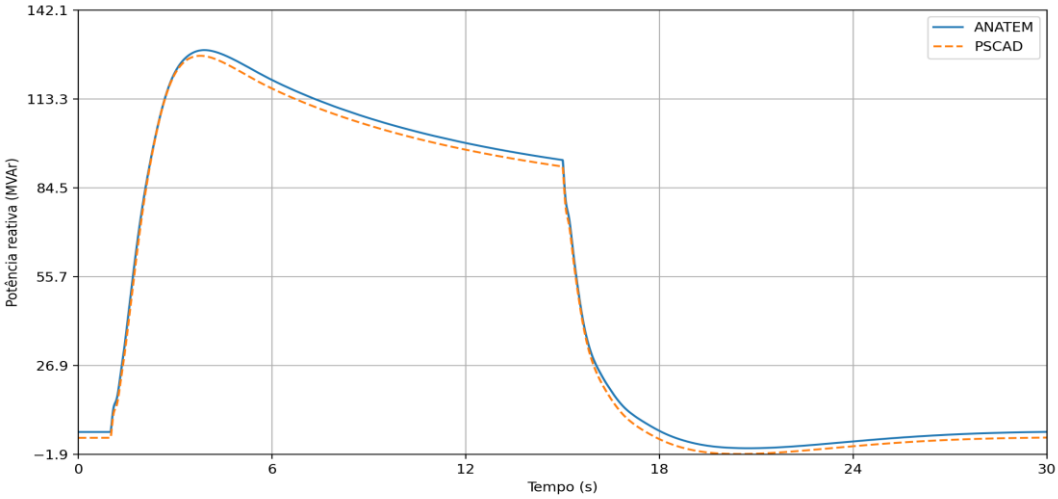

Figura 4-688 – Potência reativa

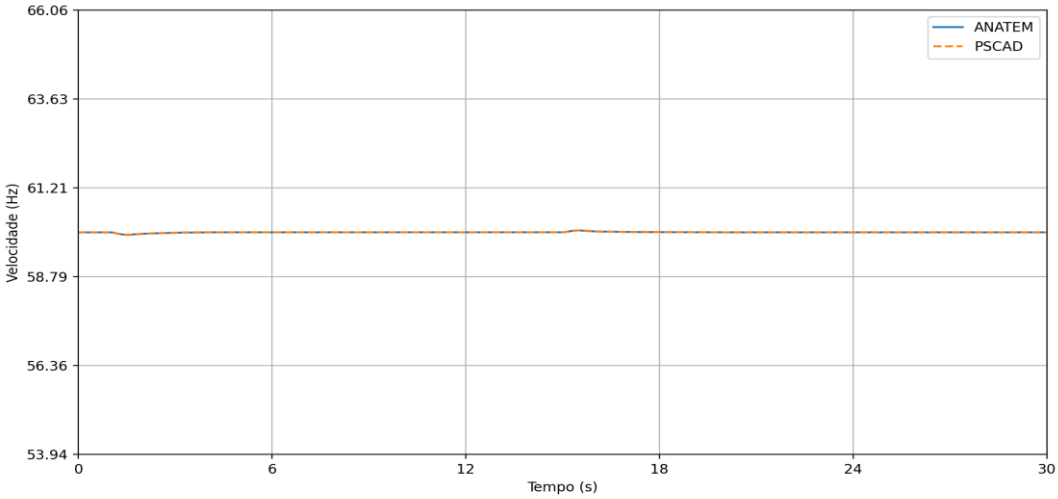

Figura 4-689 – Velocidade da máquina

4.28 CS ESTREITO

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Estreito, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.28.1 Modelo do CS Estreito

A Tabela 4-82 apresenta os parâmetros do CS Estreito disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-82 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	111	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	93	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	25	I(KA)	12,551	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	22	H(s)	2,2	
xl(%)	12	D(pu)	0,1	
T'd(s)	6	Ra(pu)	0,002	
		xp(pu)	0,12	Reatância de Potier
T''d(s)	0,25	xd(pu)	1,11	
T''q(s)	0,41	xd_(pu)	0,25	x'd
Ra(%)	0,18	Td0_(s)	6	T'd
H(s)	2,2	xd__(pu)	0,22	x''d
D(pu)	0,1	Td0__(s)	0,25	T''d
S(MVA)	300	Xq(pu)	0,93	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,22	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,41	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.28.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-83, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Estreito estão apresentados na Tabela 4-84. A

partir dos parâmetros da Tabela 4-83, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-84. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-690.

Tabela 4-83 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Estreito	
Ag	**Y1**	0,0172
Bg	**Y2**	6,0267
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-84 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,817	0,800
0,992	0,950
1,024	0,975
1,057	1,000
1,103	1,033
1,153	1,067
1,205	1,100
1,392	1,200
1,65	1,300

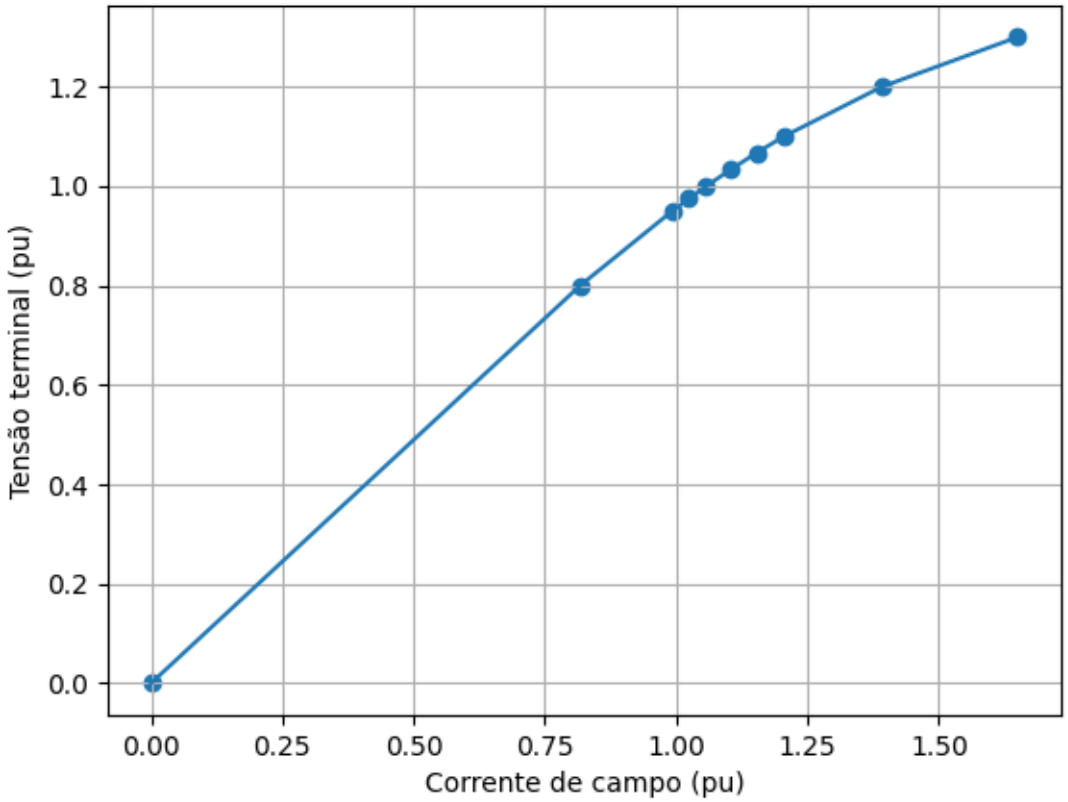

Figura 4-690 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.28.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.28.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.28.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.28.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

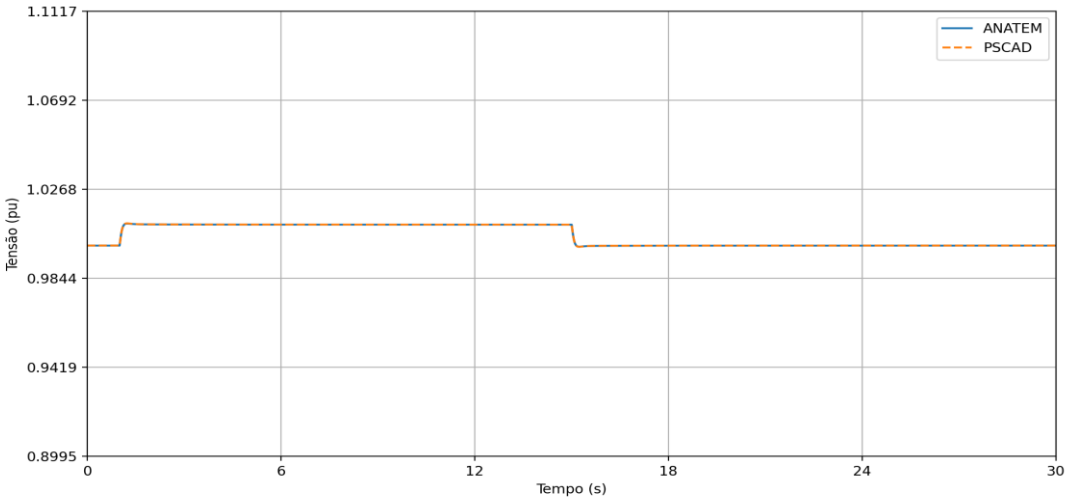

Figura 4-691 – Tensão terminal

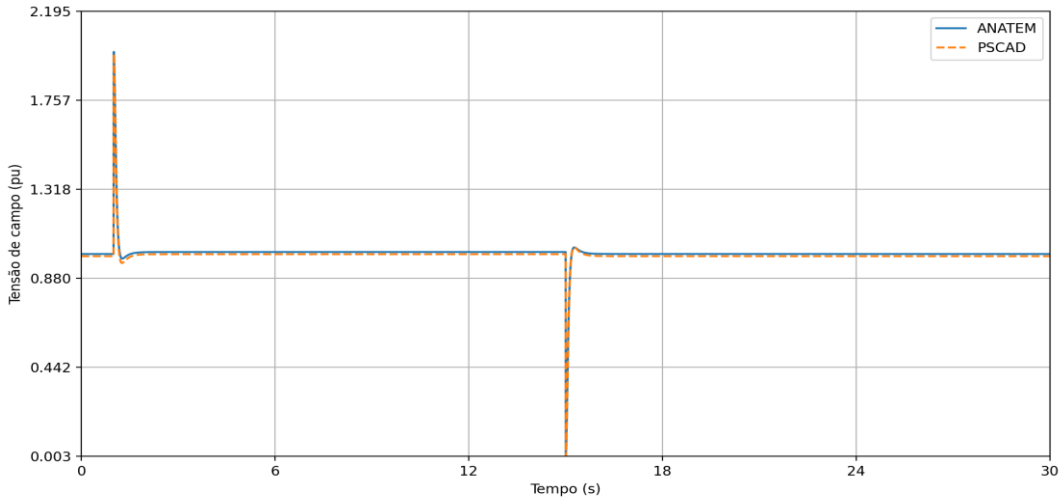

Figura 4-692 – Tensão de campo

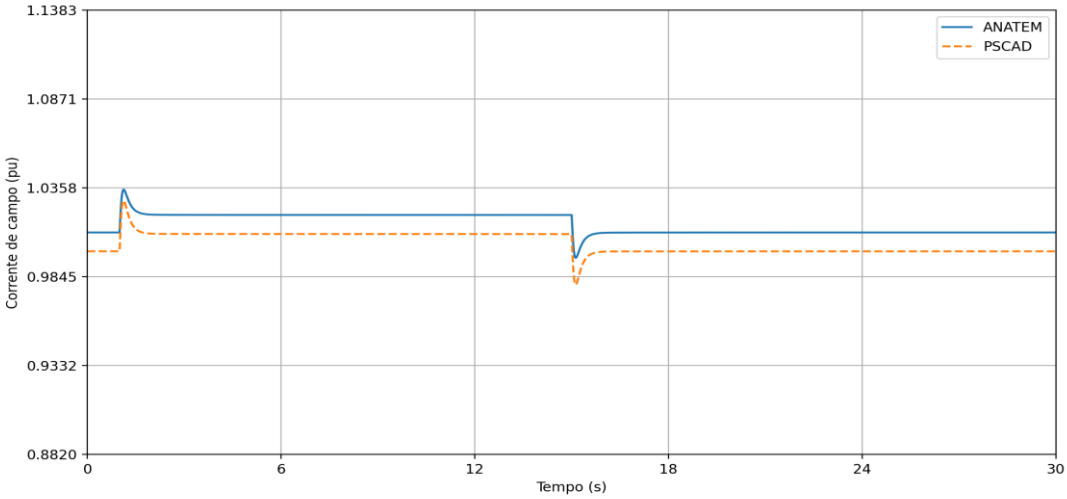

Figura 4-693 – Corrente de campo

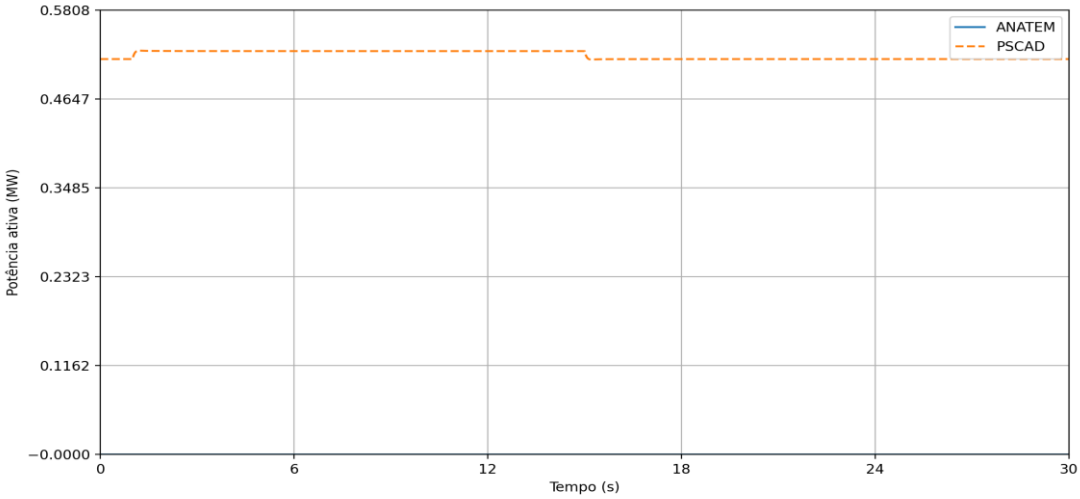

Figura 4-694 – Potência ativa

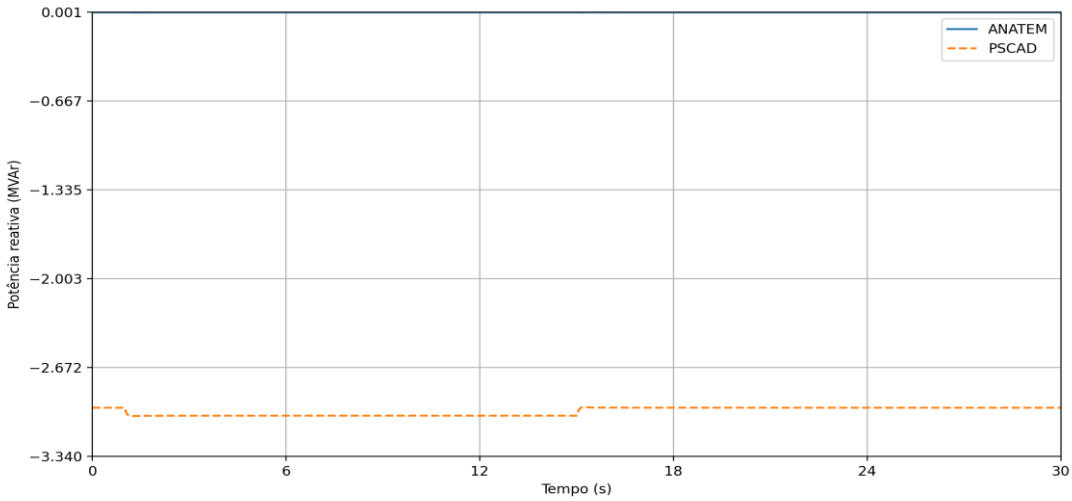

Figura 4-695 – Potência reativa

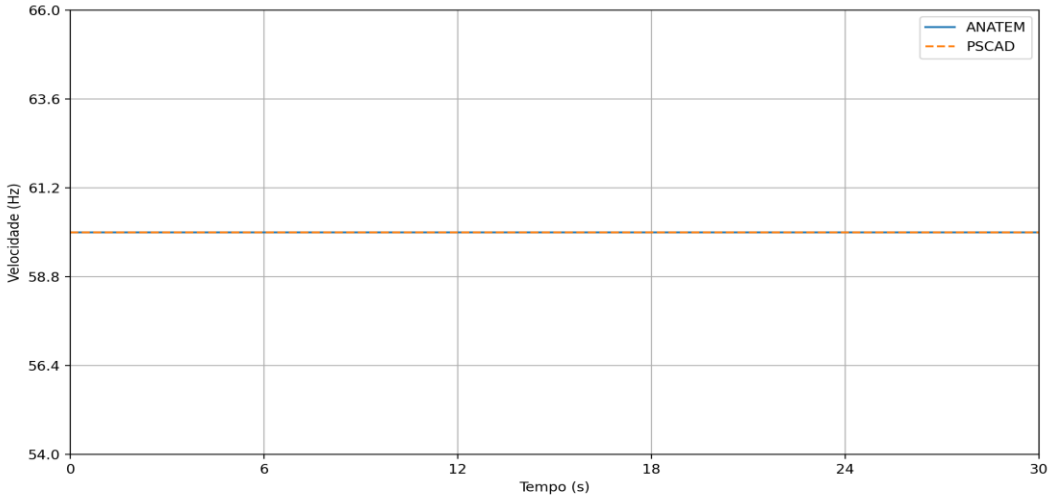

Figura 4-696 – Velocidade da máquina

4.28.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

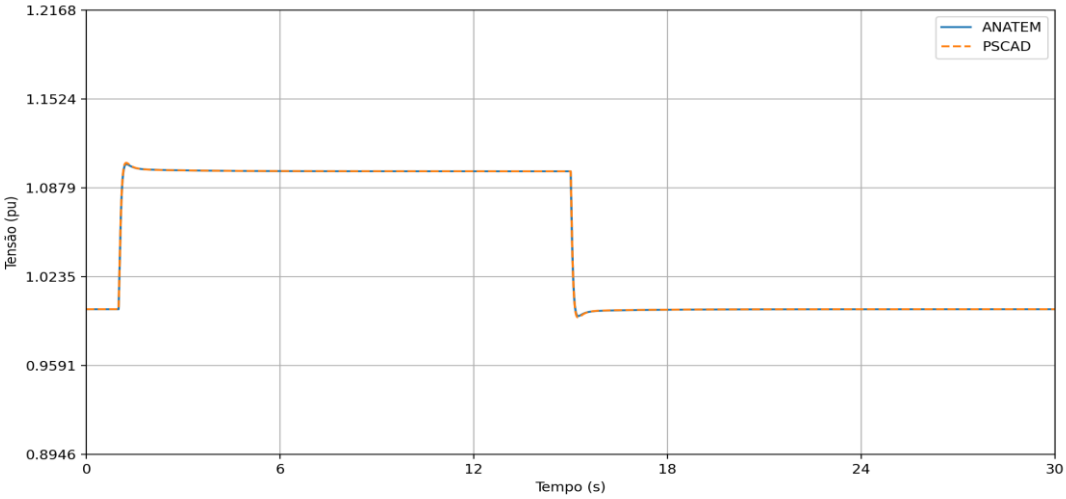

Figura 4-697 – Tensão terminal

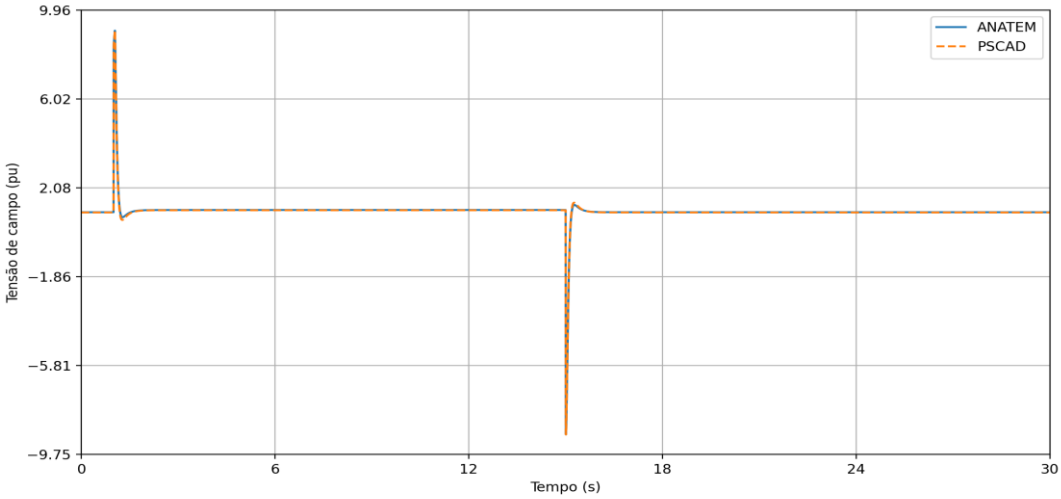

Figura 4-698 – Tensão de campo

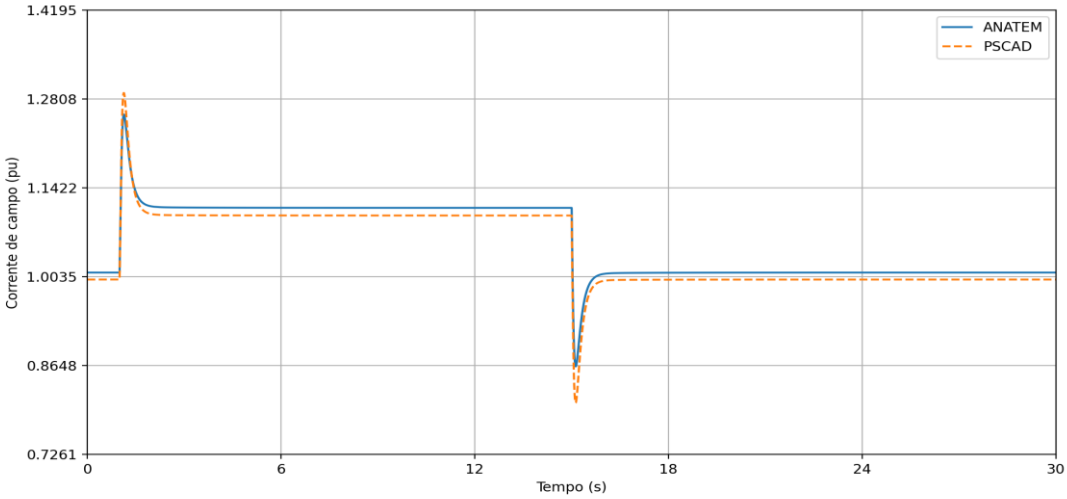

Figura 4-699 – Corrente de campo

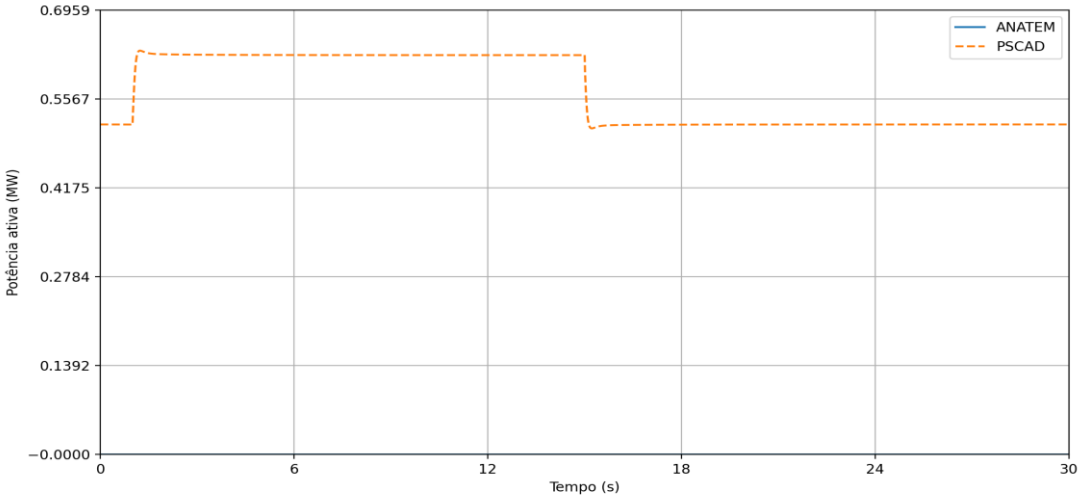

Figura 4-700 – Potência ativa

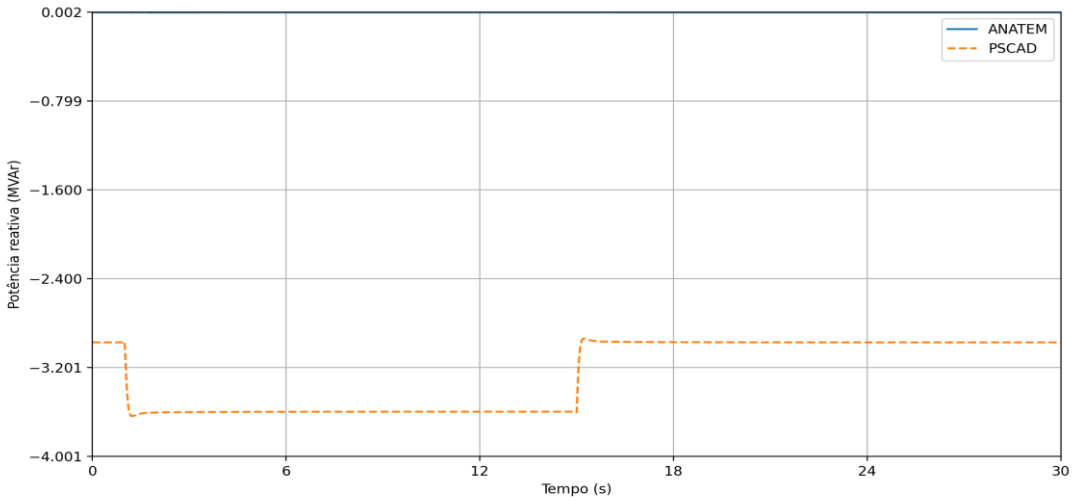

Figura 4-701 – Potência reativa

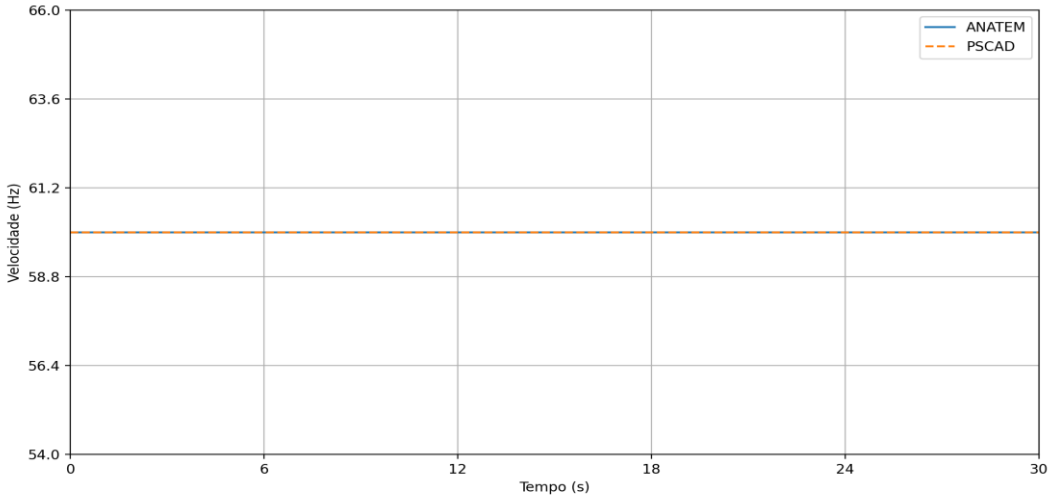

Figura 4-702 – Velocidade da máquina

4.28.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.28.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.28.4.2.

4.28.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

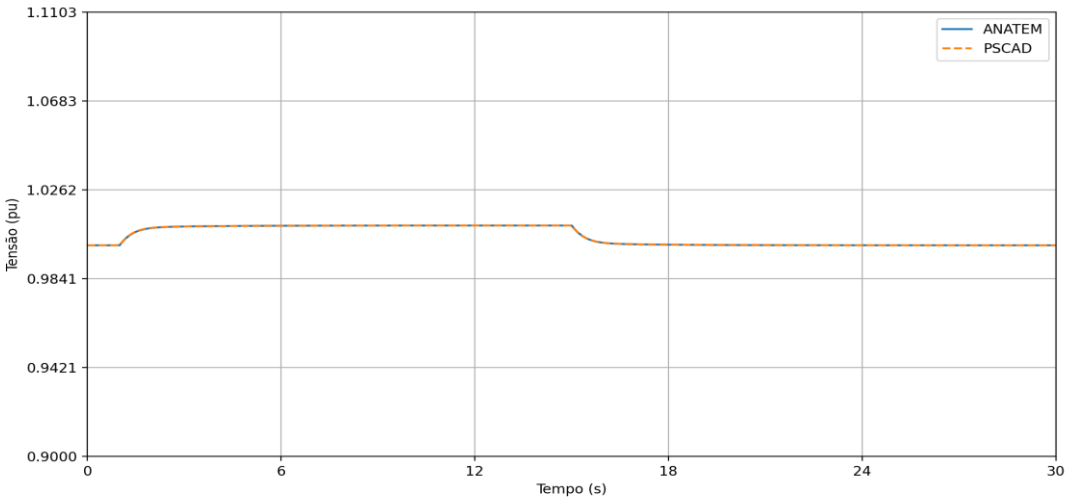

Figura 4-703 – Tensão terminal

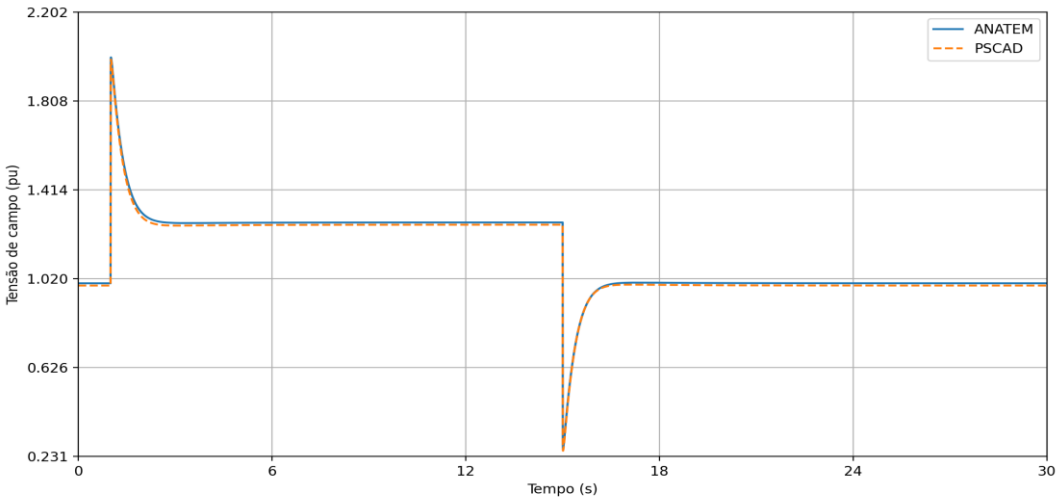

Figura 4-704 – Tensão de campo

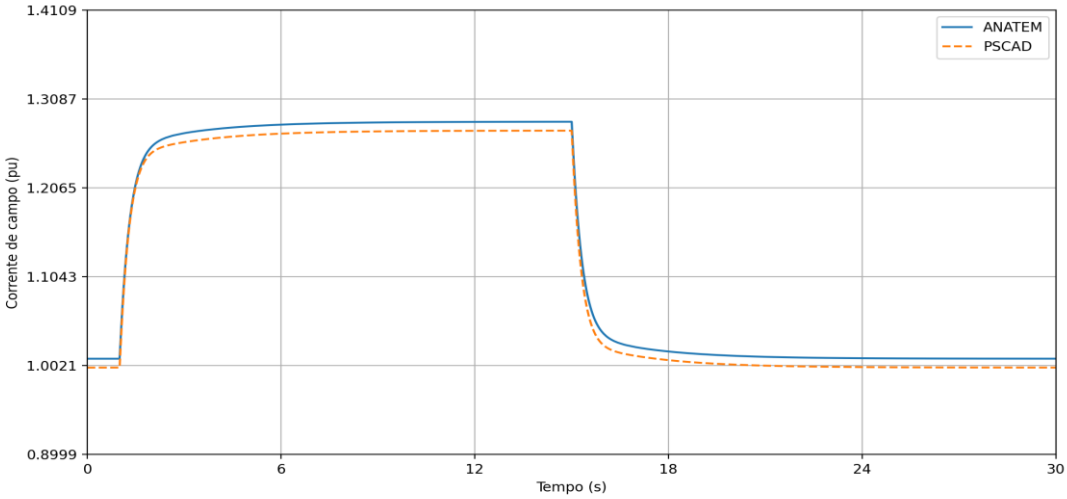

Figura 4-705 – Corrente de campo

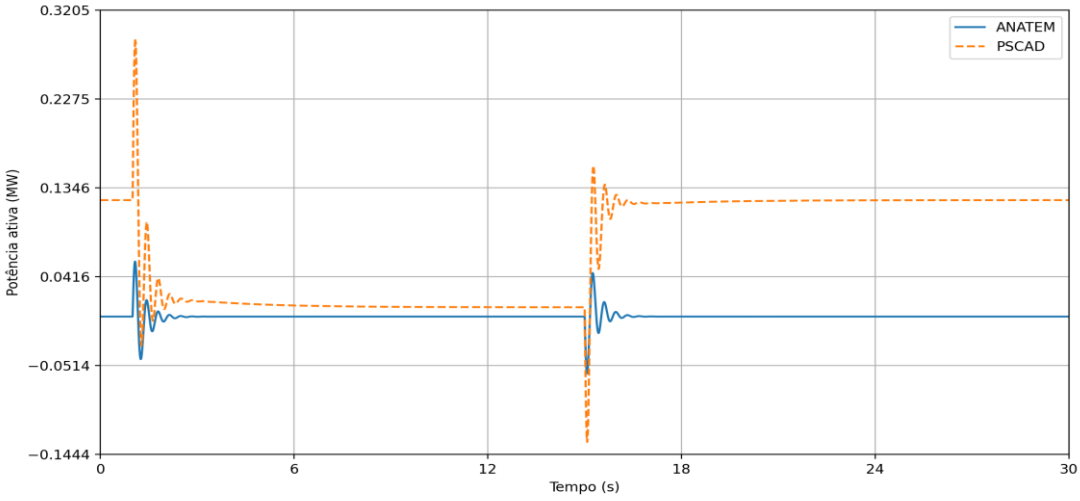

Figura 4-706 – Potência ativa

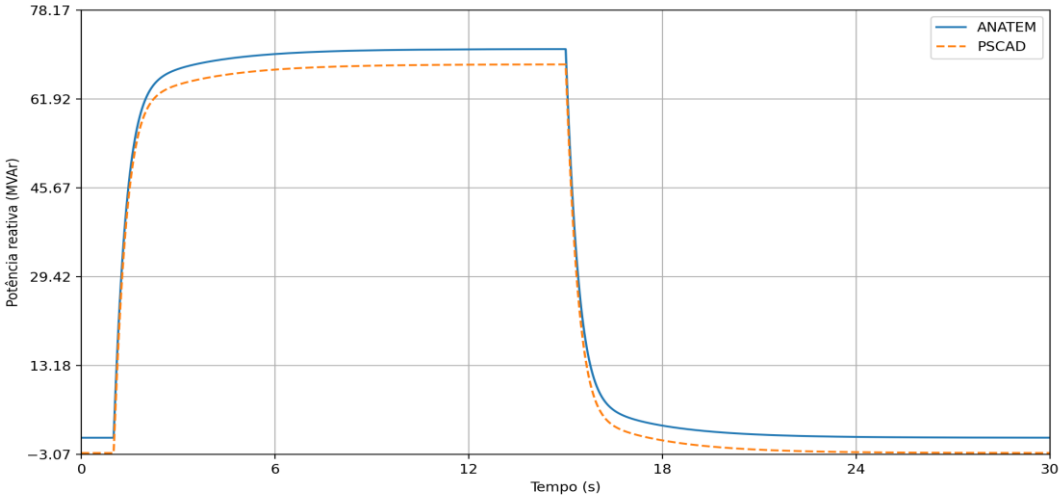

Figura 4-707 – Potência reativa

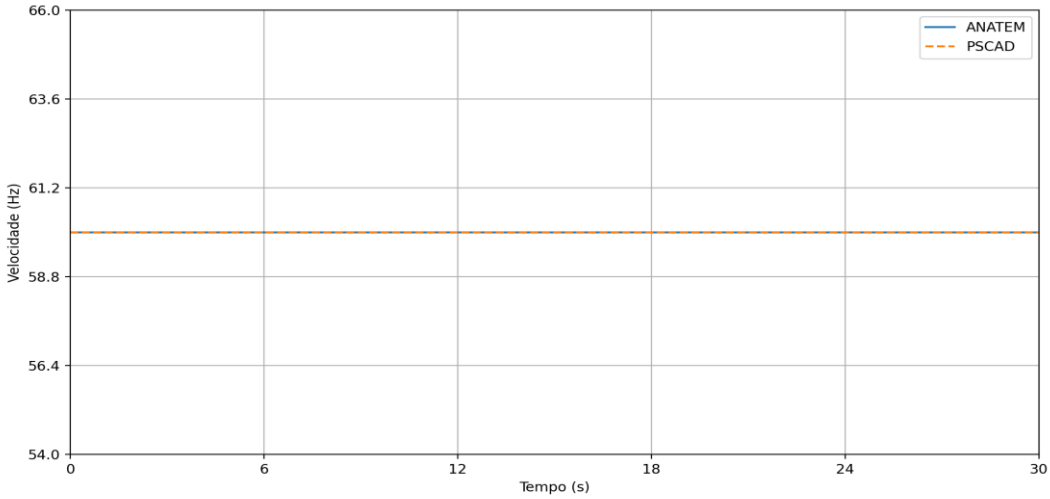

Figura 4-708 – Velocidade da máquina

4.28.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

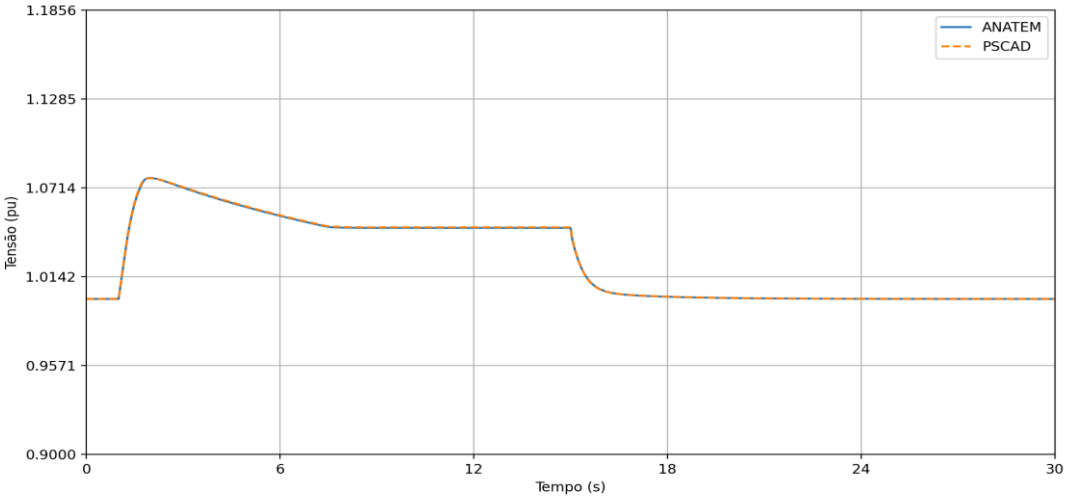

Figura 4-709 – Tensão terminal

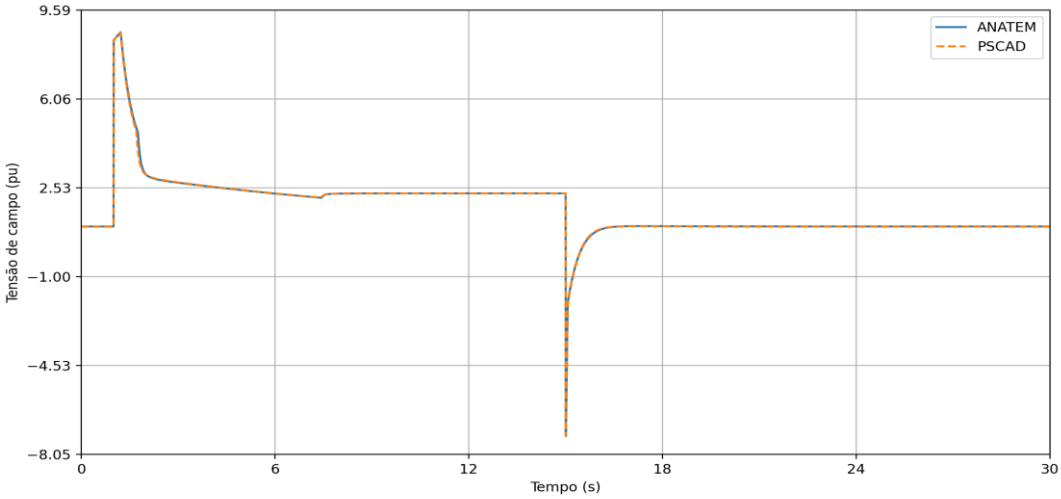

Figura 4-710 – Tensão de campo

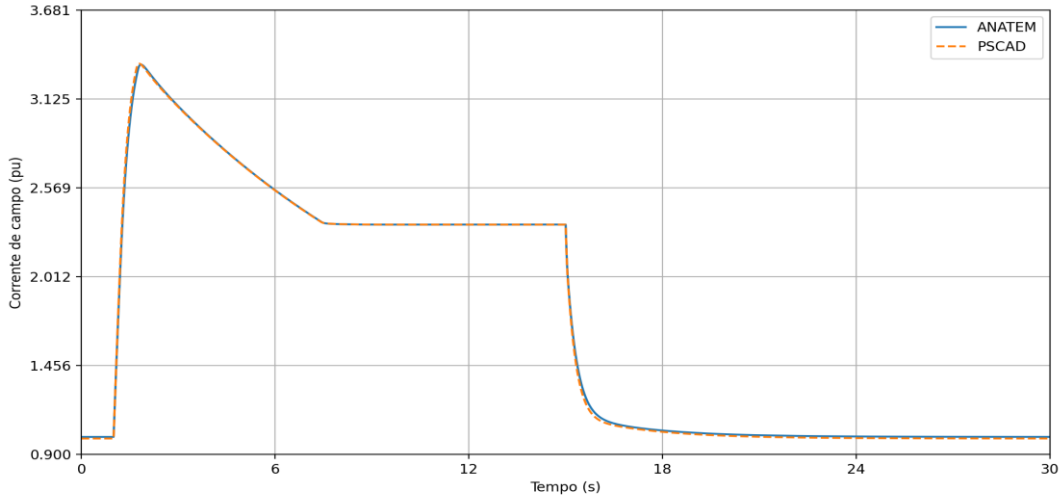

Figura 4-711 – Corrente de campo

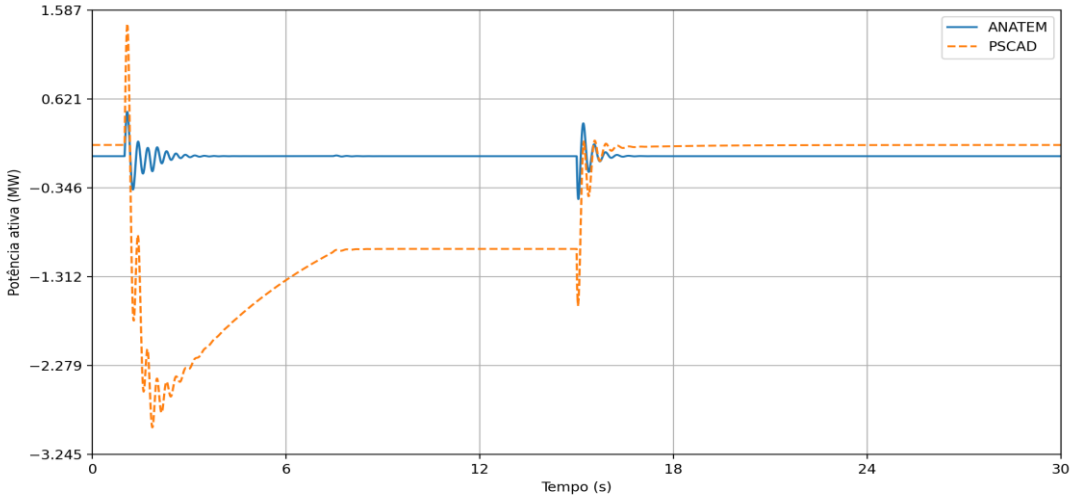

Figura 4-712 – Potência ativa

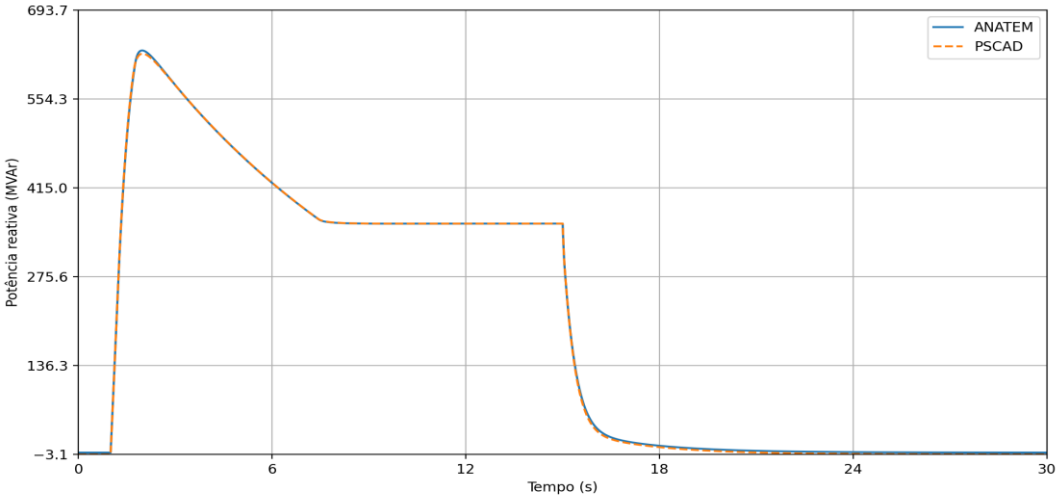

Figura 4-713 – Potência reativa

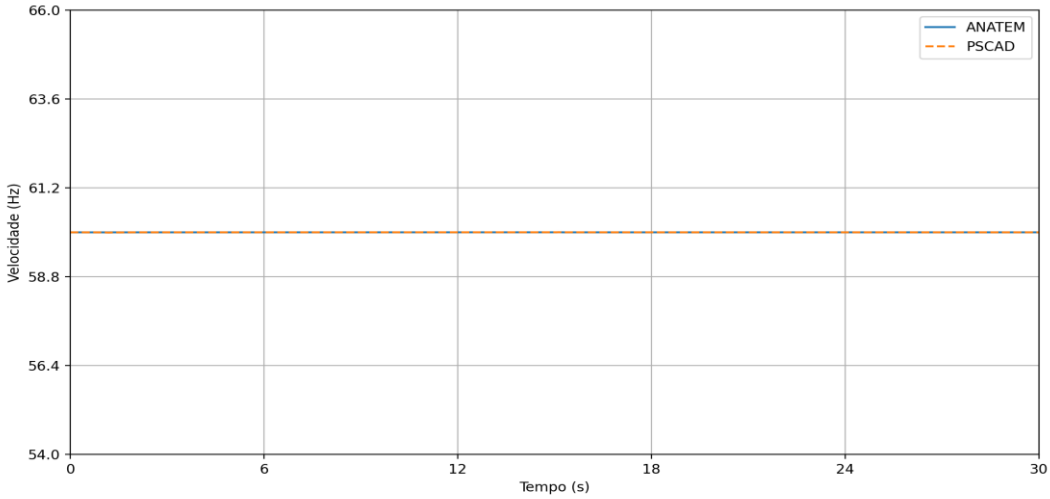

Figura 4-714 – Velocidade da máquina

4.29 UHE BELO MONTE

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UHE Belo Monte, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão e velocidade, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.29.1 Modelo da UHE Belo Monte

A Tabela 4-85 apresenta os parâmetros da UHE Belo Monte disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-85 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	97,1	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	67,8	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	32,2	I(KA)	28,407	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	27	H(s)	4,779	
xl(%)	19	D(pu)	0,1	
T'd(s)	7,55	Ra(pu)	0,002	
		xp(pu)	0,19	Reatância de Potier
T''d(s)	0,12	xd(pu)	0,971	
T''q(s)	0,21	xd_(pu)	0,322	x'd
Ra(%)	0,17	Td0_(s)	7,55	T'd
H(s)	4,779	xd__(pu)	0,27	x''d
D(pu)	0,1	Td0__(s)	0,12	T''d
S(MVA)	679	Xq(pu)	0,678	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,27	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,21	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.29.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-86, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UHE Belo Monte estão apresentados na Tabela 4-87. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-86, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-87. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-715.

Tabela 4-86 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UHE Belo Monte	
Ag	**Y1**	0,0185
Bg	**Y2**	7,9873
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-87 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,819	0,800
1,011	0,950
1,05	0,975
1,091	1,000
1,152	1,033
1,223	1,067
1,303	1,100
1,652	1,200
2,304	1,300

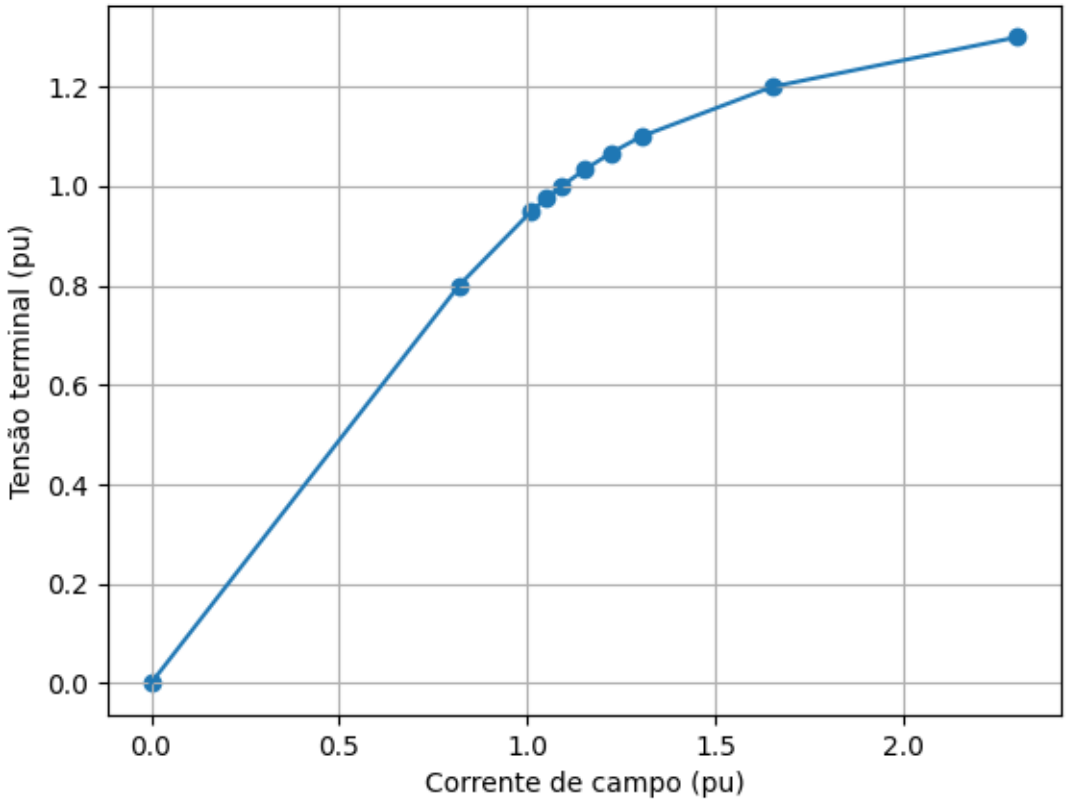

Figura 4-715 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.29.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.29.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.29.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.29.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

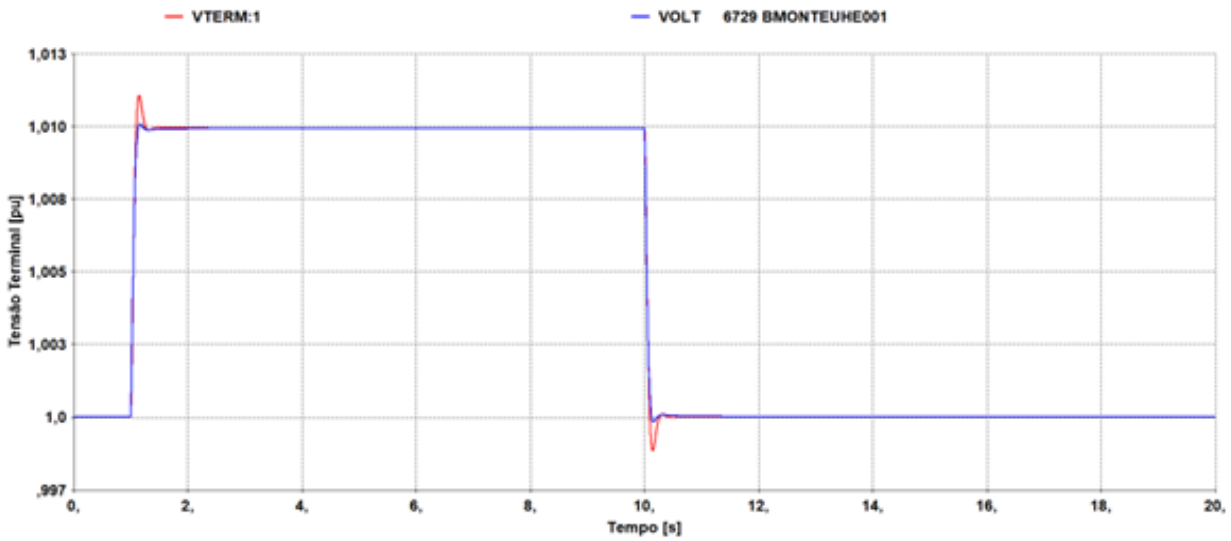

Figura 4-716 – Tensão terminal

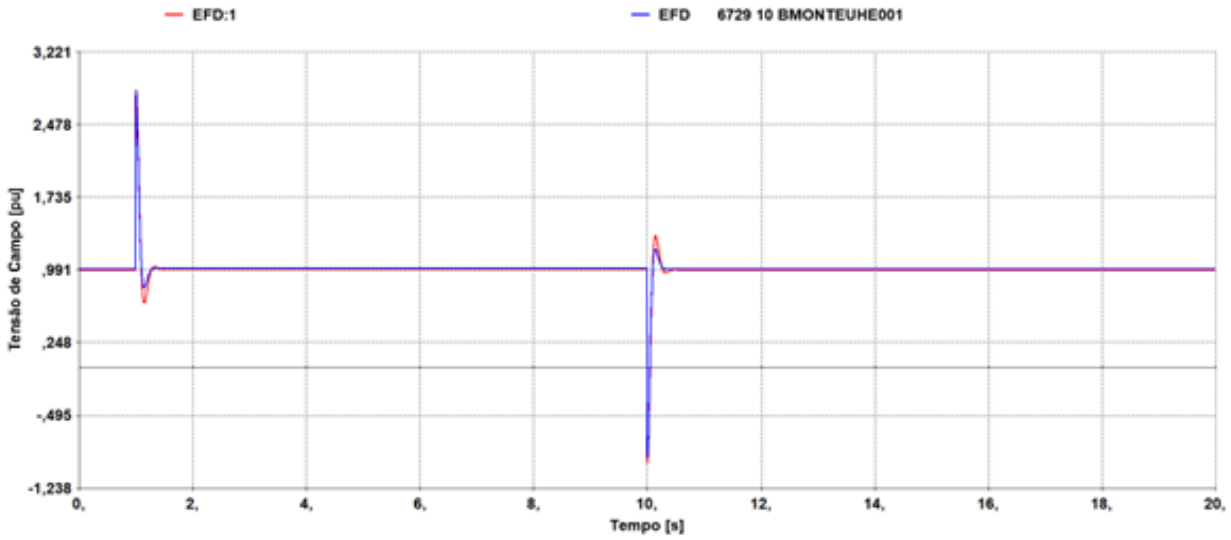

Figura 4-717 – Tensão de campo

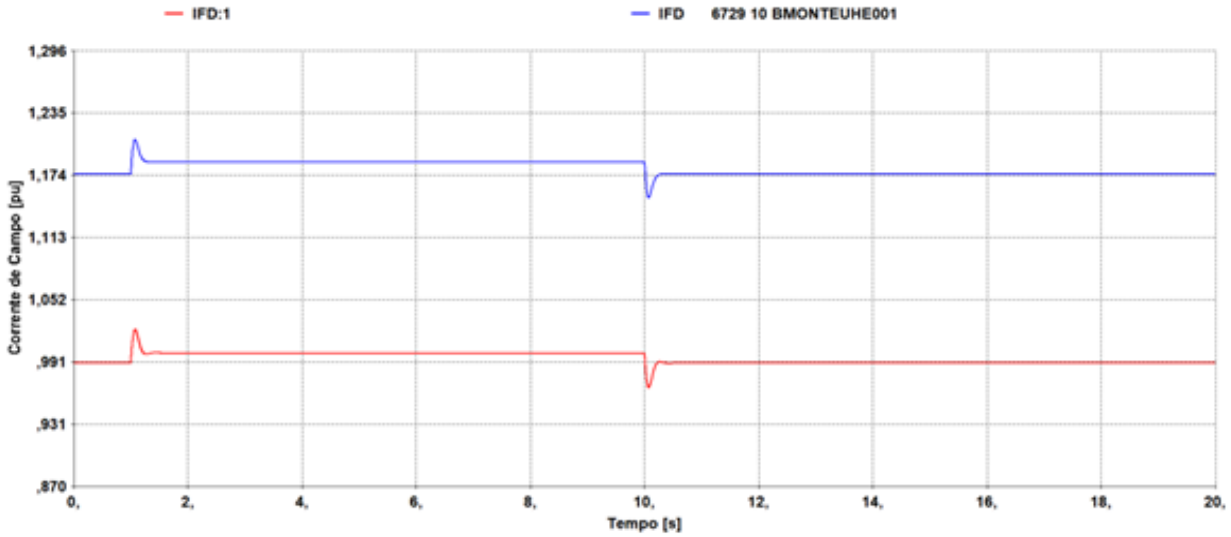

Figura 4-718 – Corrente de campo

4.29.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

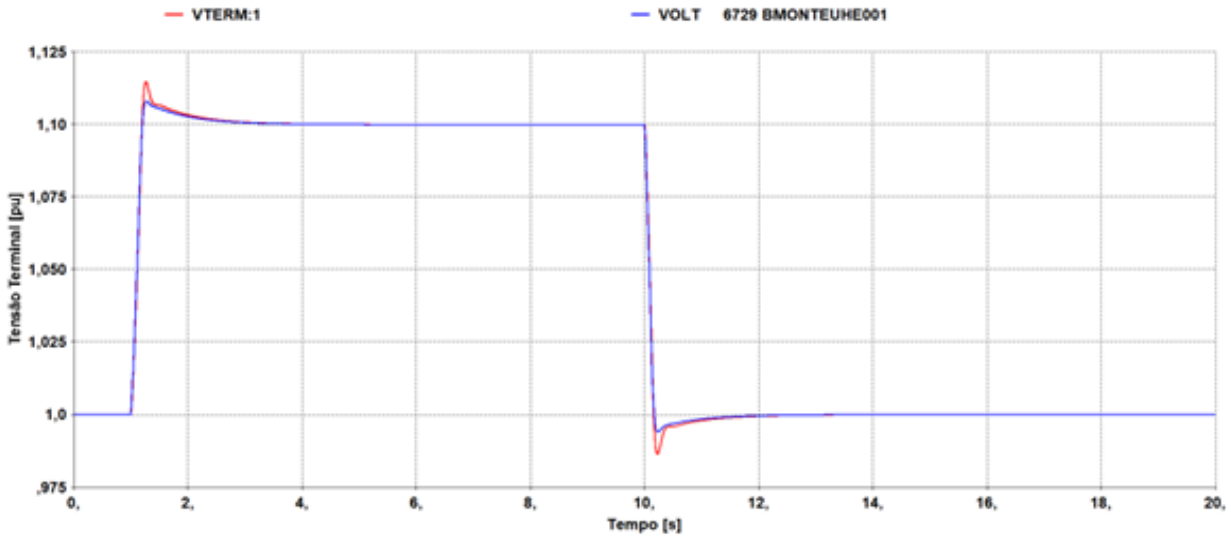

Figura 4-719 – Tensão terminal

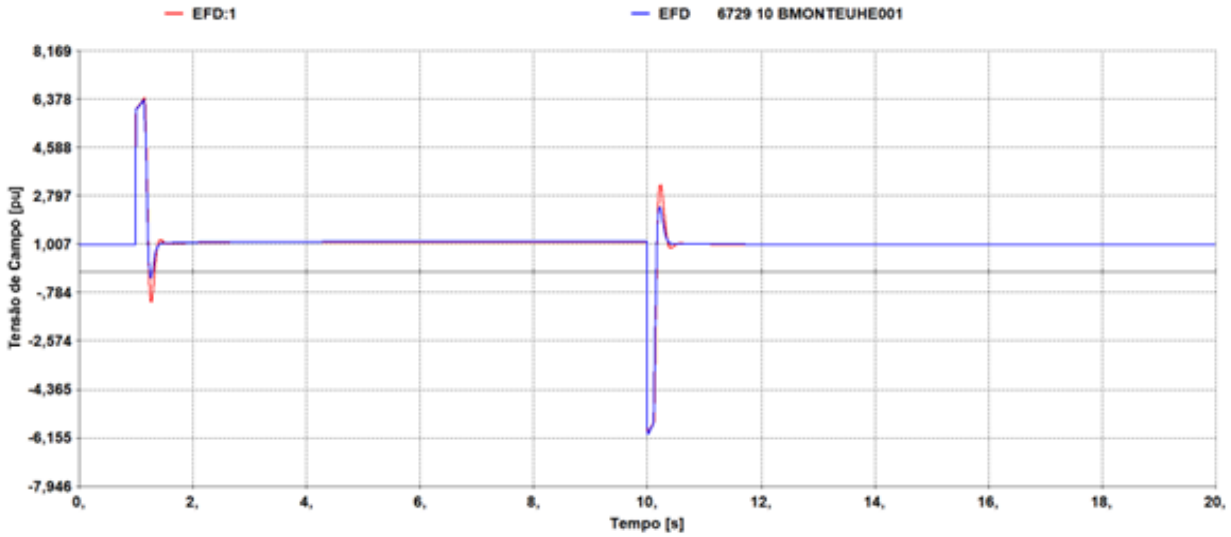

Figura 4-720 – Tensão de campo

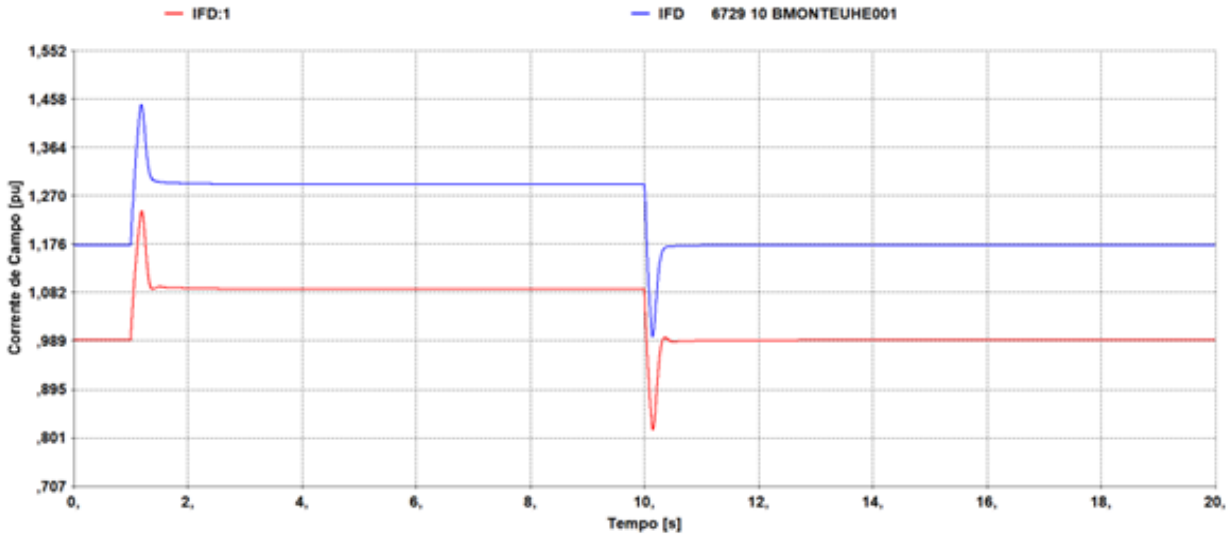

Figura 4-721 – Corrente de campo

4.29.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.29.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.29.4.2.

4.29.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

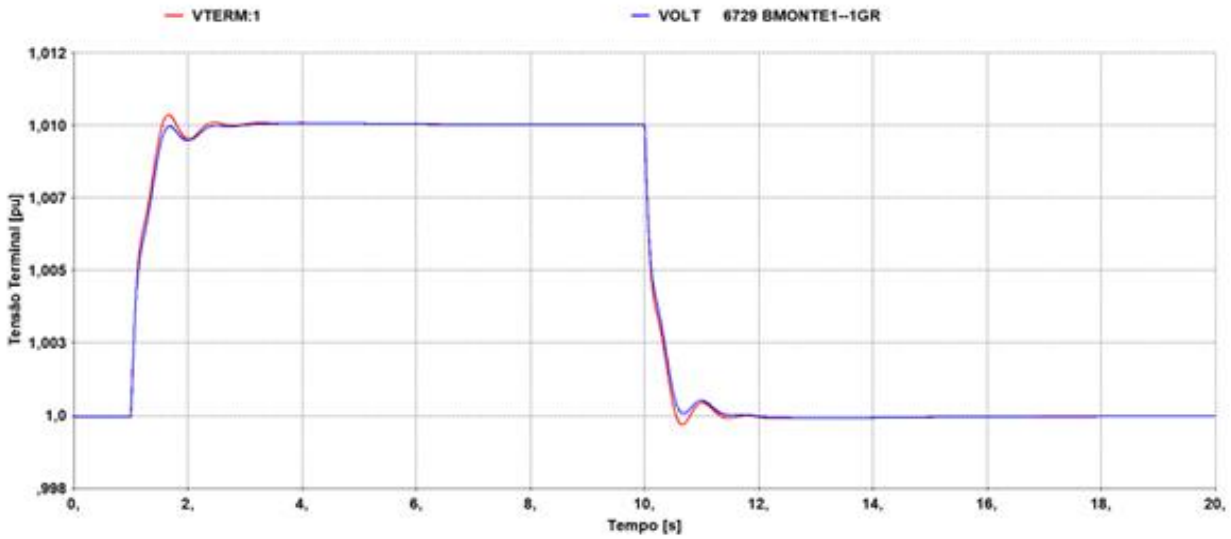

Figura 4-722 – Tensão terminal

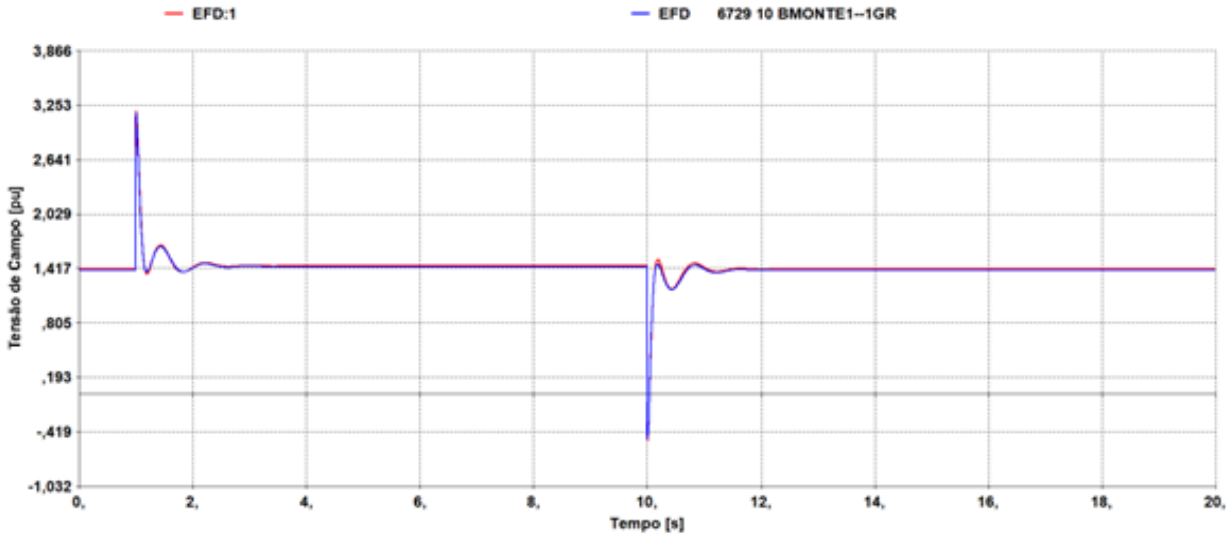

Figura 4-723 – Tensão de campo

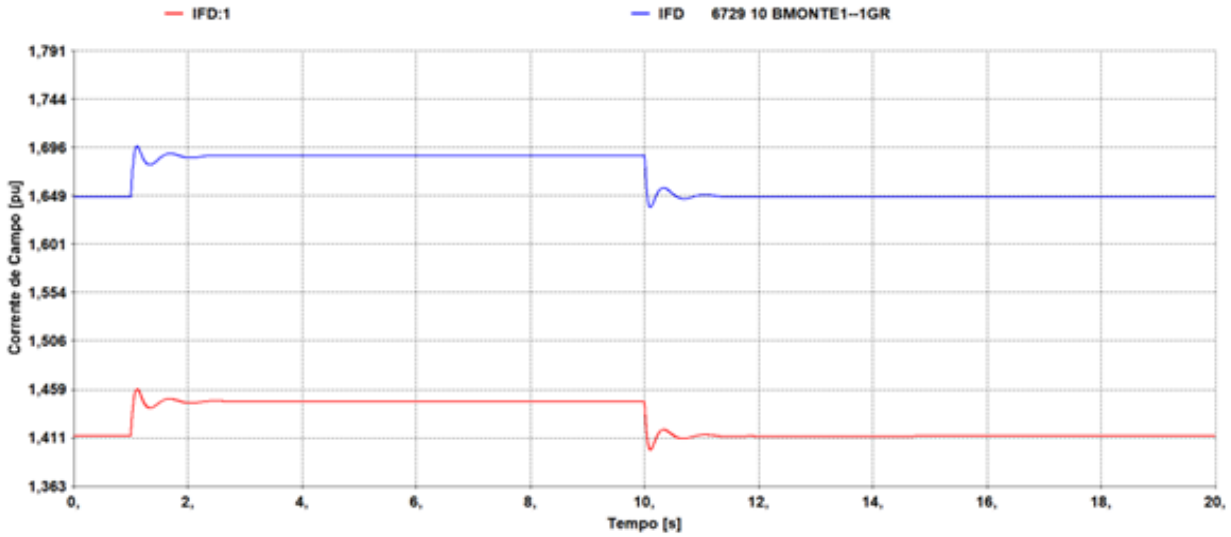

Figura 4-724 – Corrente de campo

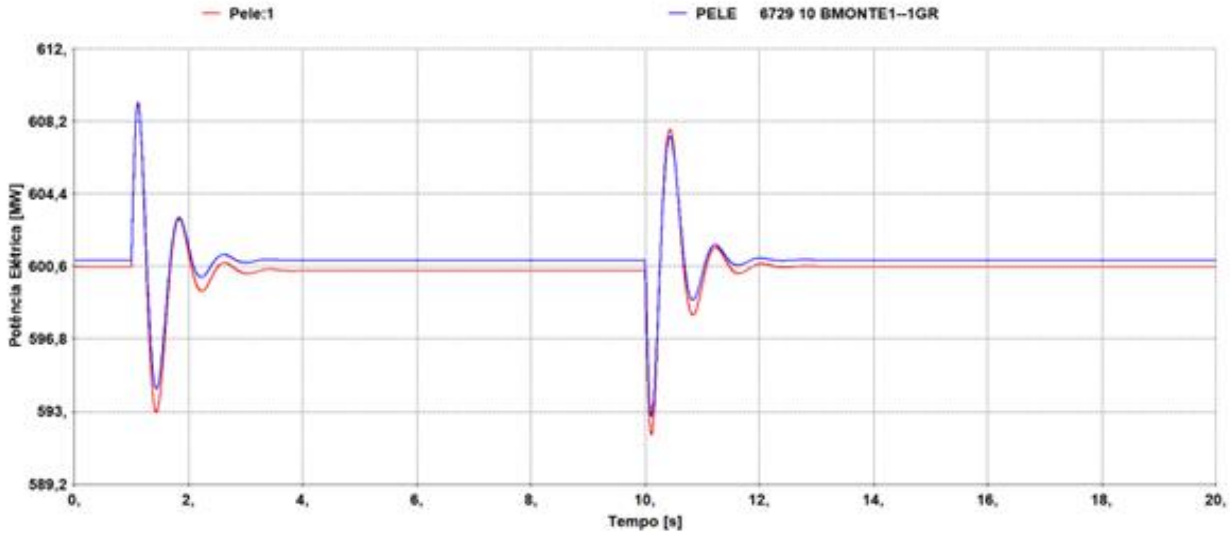

Figura 4-725 – Potência ativa

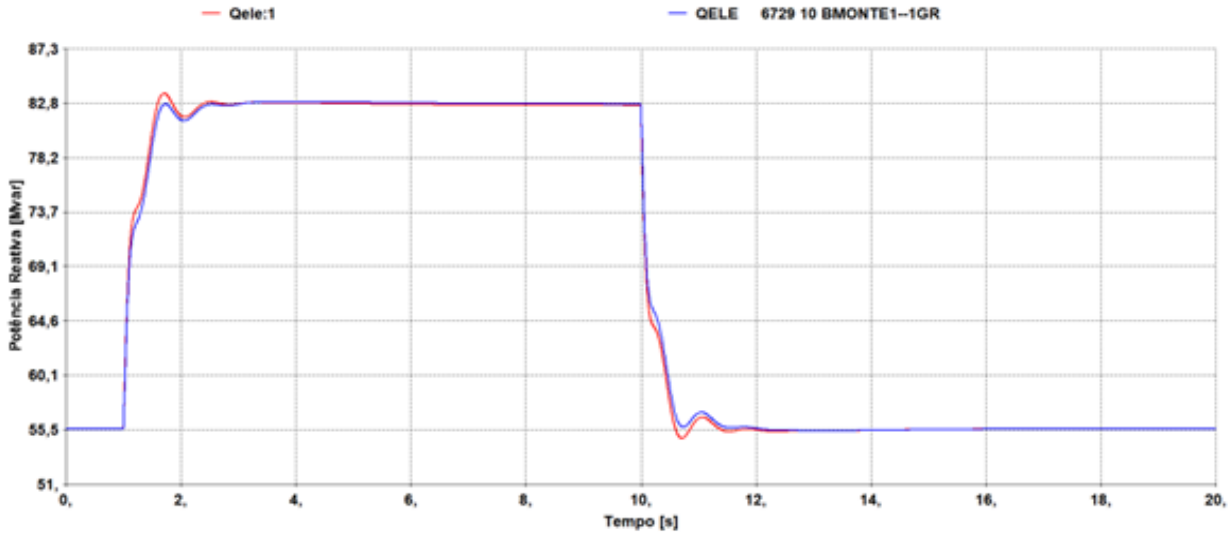

Figura 4-726 – Potência reativa

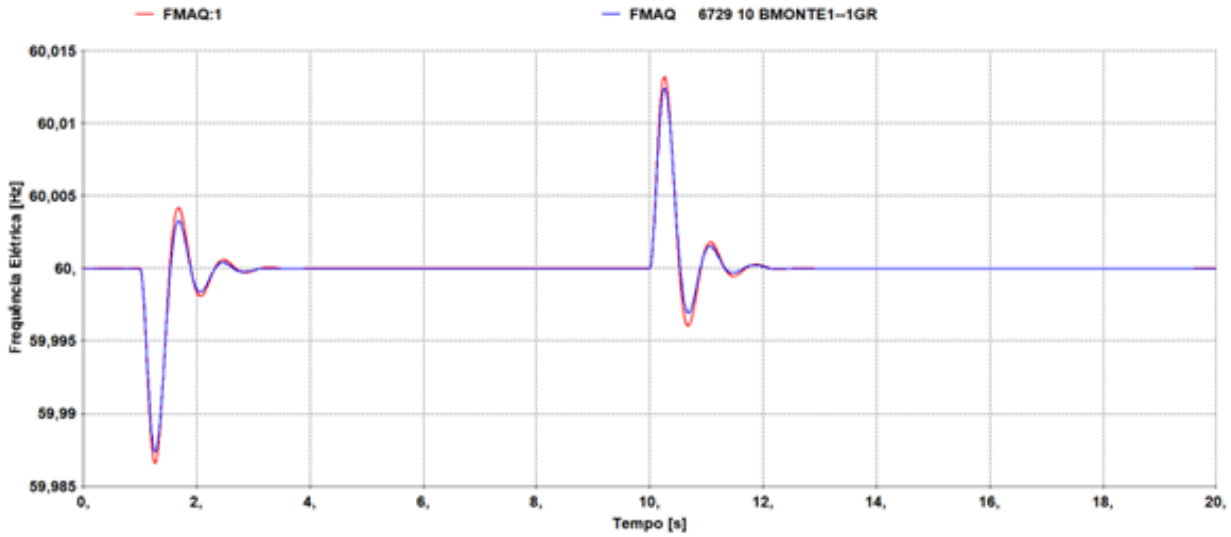

Figura 4-727 – Velocidade da máquina

4.29.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

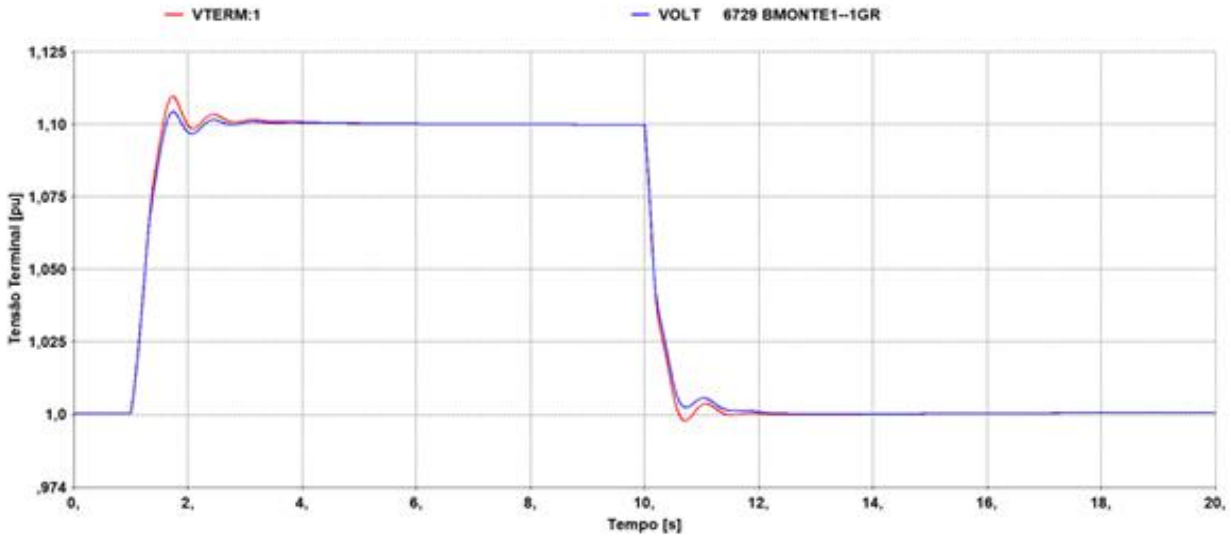

Figura 4-728 – Tensão terminal

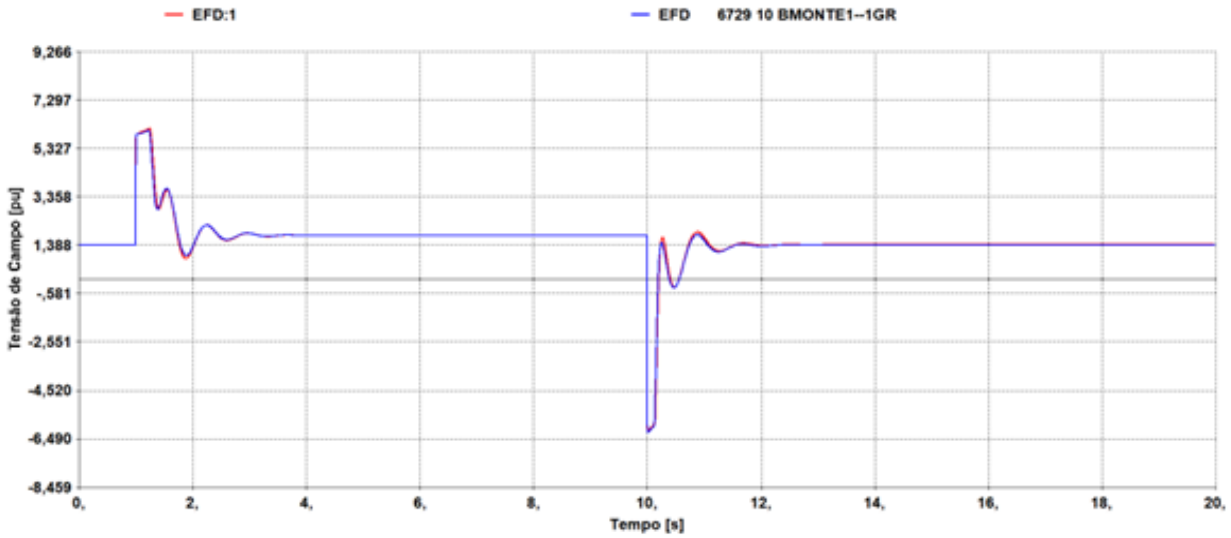

Figura 4-729 – Tensão de campo

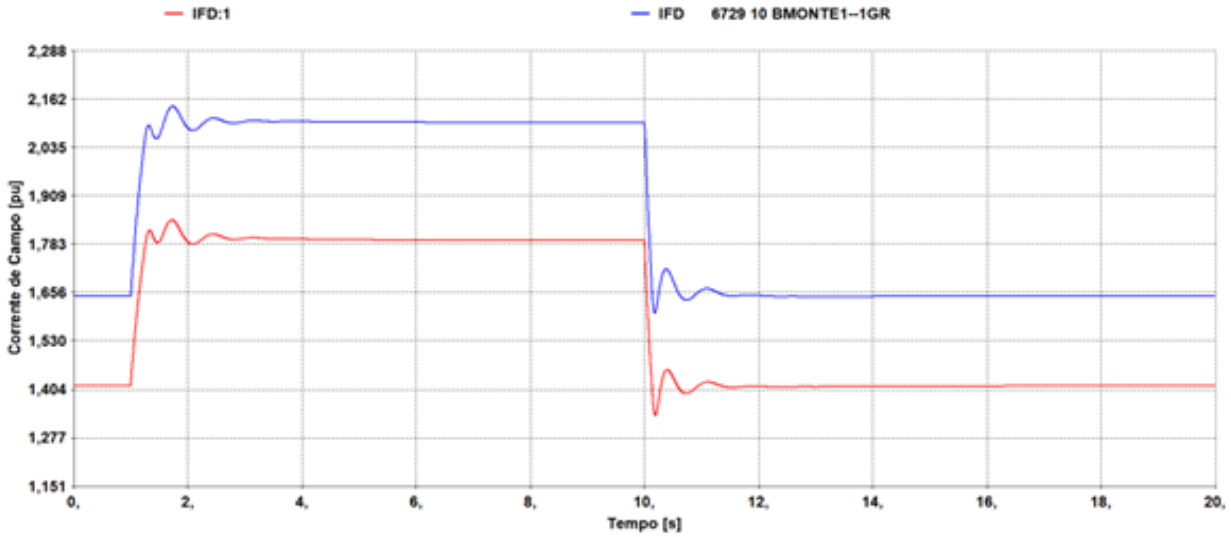

Figura 4-730 – Corrente de campo

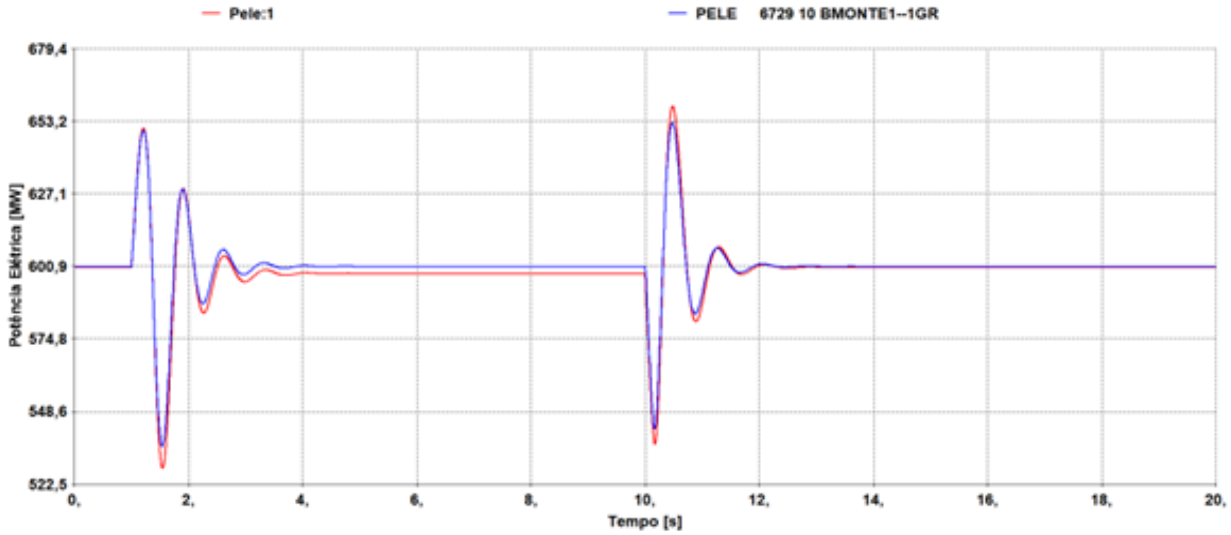

Figura 4-731 – Potência ativa

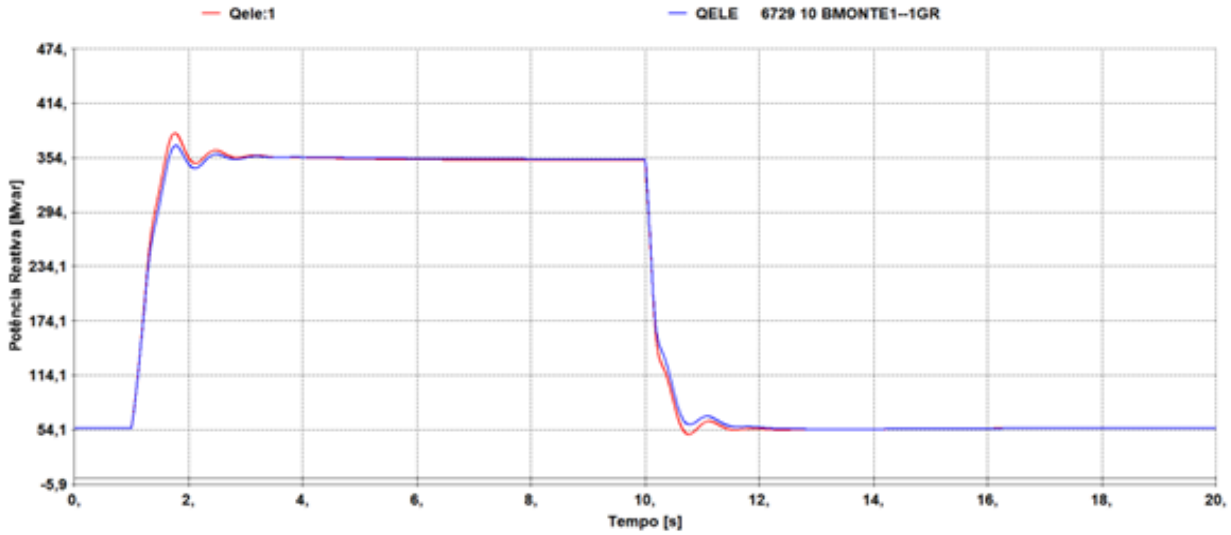

Figura 4-732 – Potência reativa

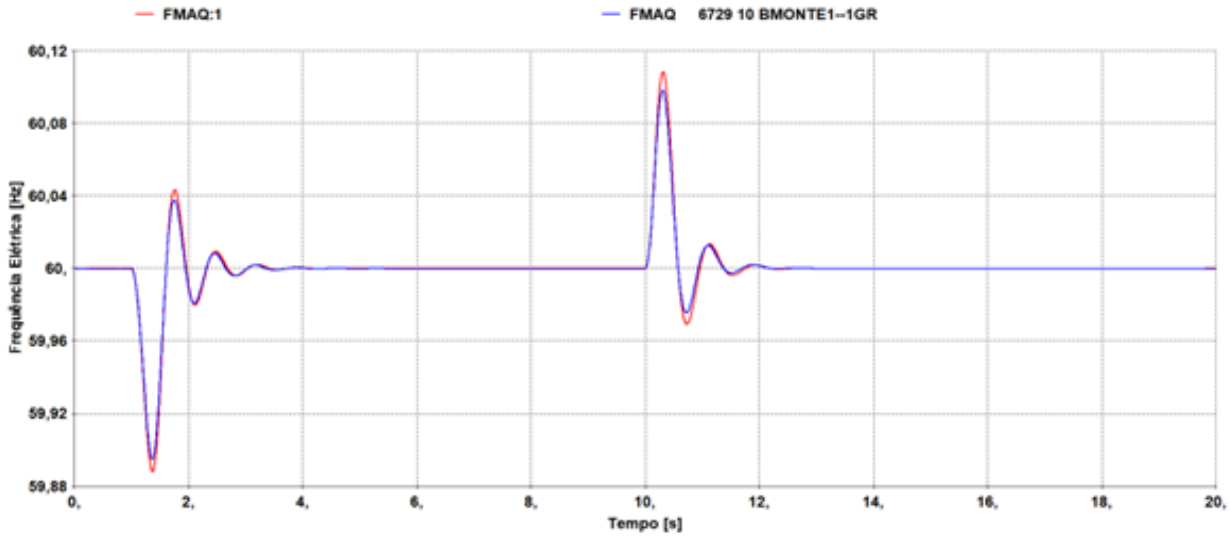

Figura 4-733 – Velocidade da máquina

4.30 CS TERMINAL RIO

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Terminal Rio, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

Os resultados apresentados na comparação do compensador síncrono de terminal Rio são promissores. No entanto, algumas comparações não apresentaram boa aderência, contudo os resultados podem ser considerados adequados de serem utilizados no modelo completo, uma vez que os resultados apresentados no PSCAD são condizentes com o funcionamento de compensadores síncronos em geral.

4.30.1 Modelo do CS Terminal Rio

A Tabela 4-88 apresenta os parâmetros do CS Terminal Rio disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-88 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	113	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	104	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	33	I(KA)	6,276	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	19	H(s)	2,181	
xl(%)	19	D(pu)	0	
T'd(s)	3,6	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,19	Reatância de Potier
T''d(s)	0,021	xd(pu)	1,13	
T''q(s)	0,11	xd_(pu)	0,33	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	3,6	T'd
H(s)	2,181	xd__(pu)	0,19	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,021	T''d
S(MVA)	150	Xq(pu)	1,04	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,19	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,11	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.30.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-89, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Terminal Rio estão apresentados na Tabela 4-90,. A partir dos parâmetros da Tabela 4-89, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-90. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-734.

Tabela 4-89 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Terminal Rio	
Ag	**Y1**	0,0115912
Bg	**Y2**	6,439272
Cg	**X1**	0,7

Tabela 4-90 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,822	0,800
1,008	0,950
1,043	0,975
1,08	1,000
1,132	1,033
1,19	1,067
1,252	1,100
1,49	1,200
1,852	1,300

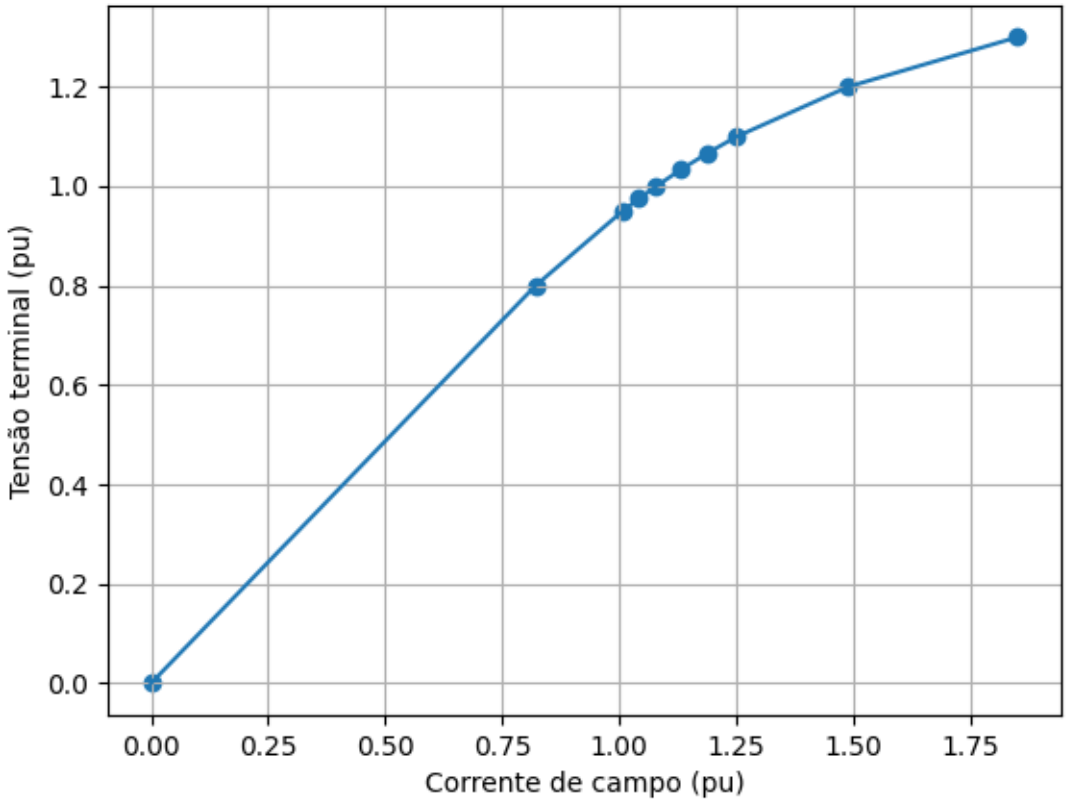

Figura 4-734 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.30.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.30.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.30.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.30.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

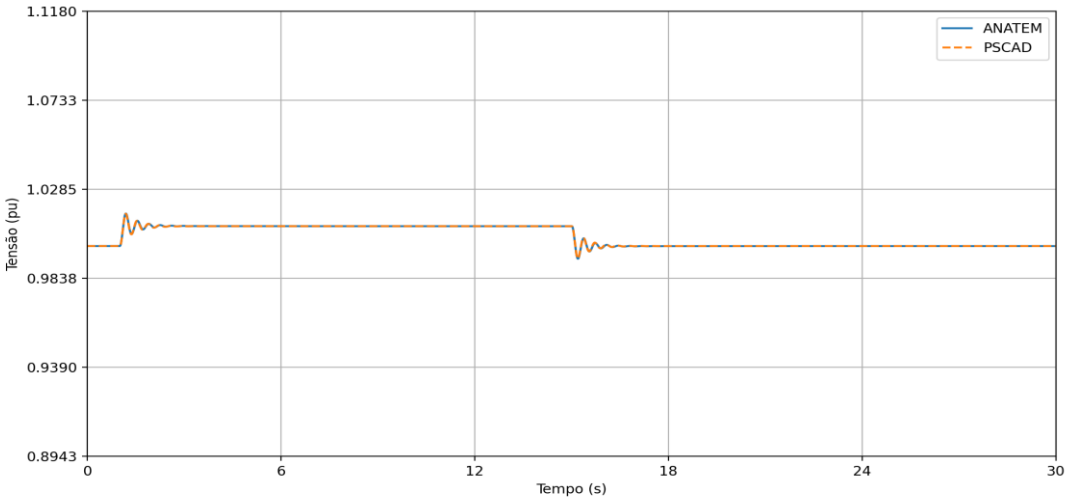

Figura 4-735 – Tensão terminal

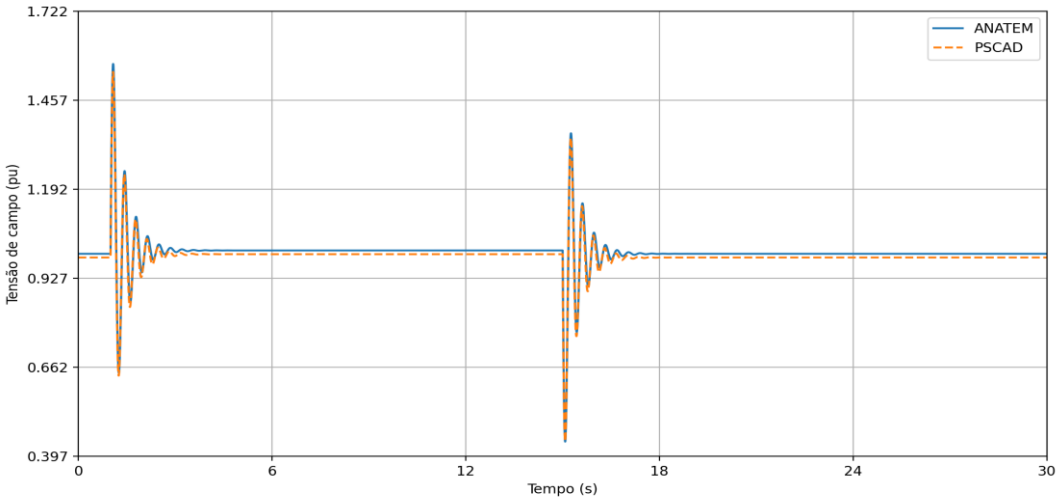

Figura 4-736 – Tensão de campo

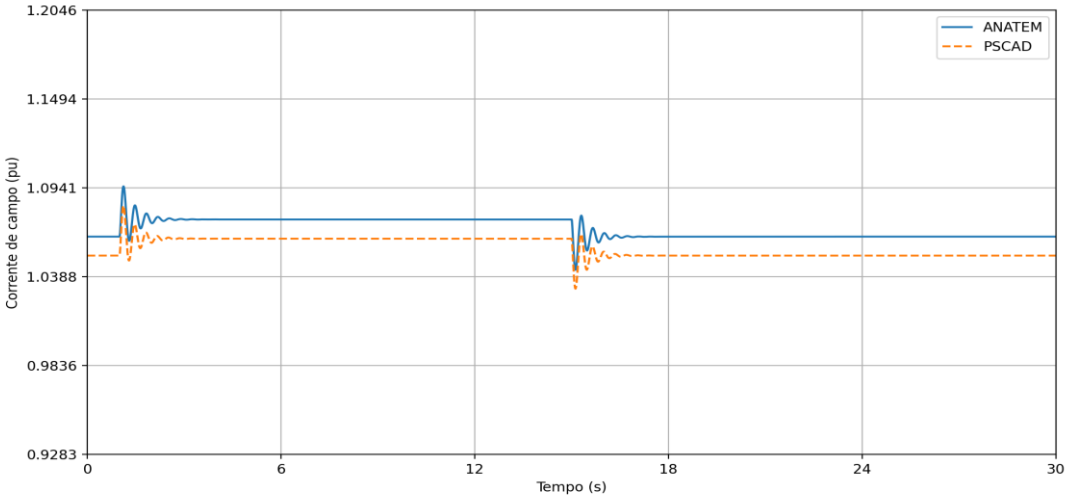

Figura 4-737 – Corrente de campo

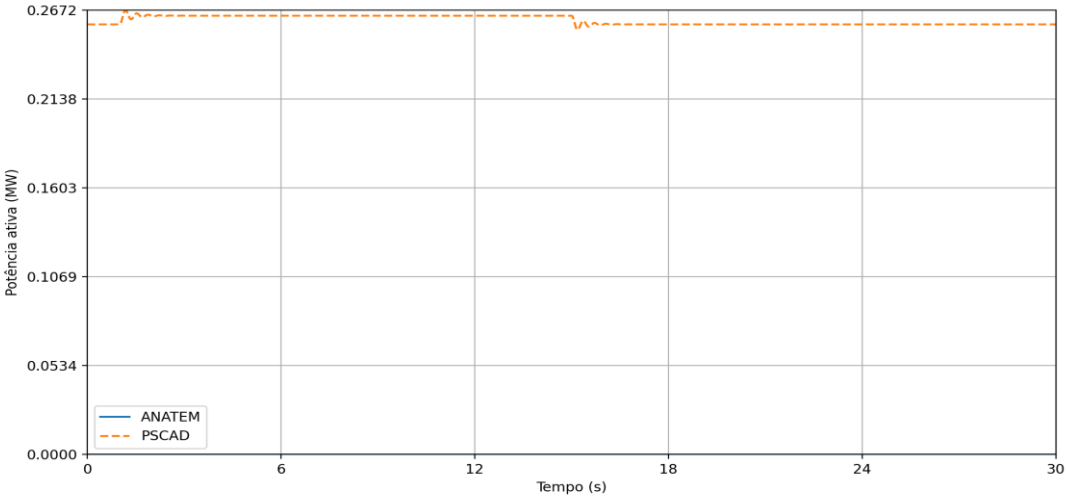

Figura 4-738 – Potência ativa

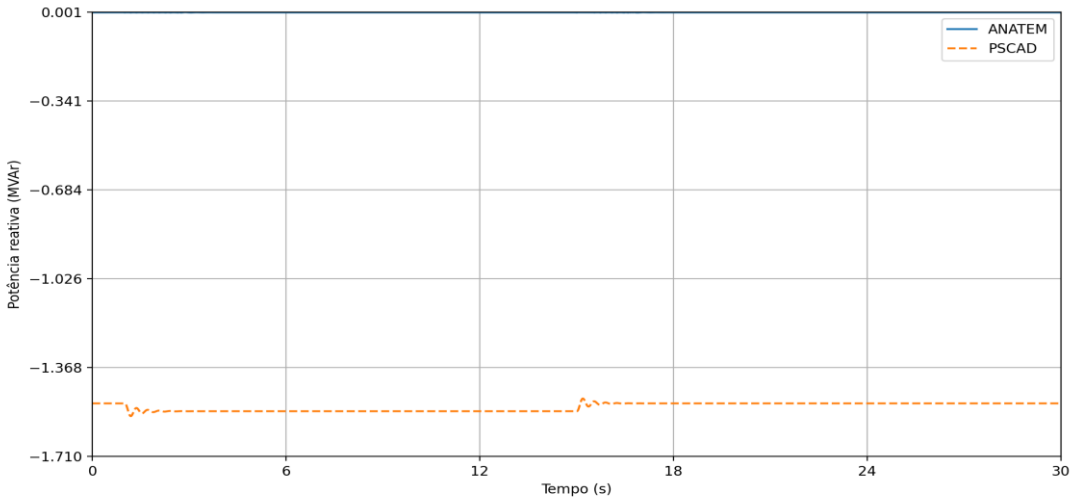

Figura 4-739 – Potência reativa

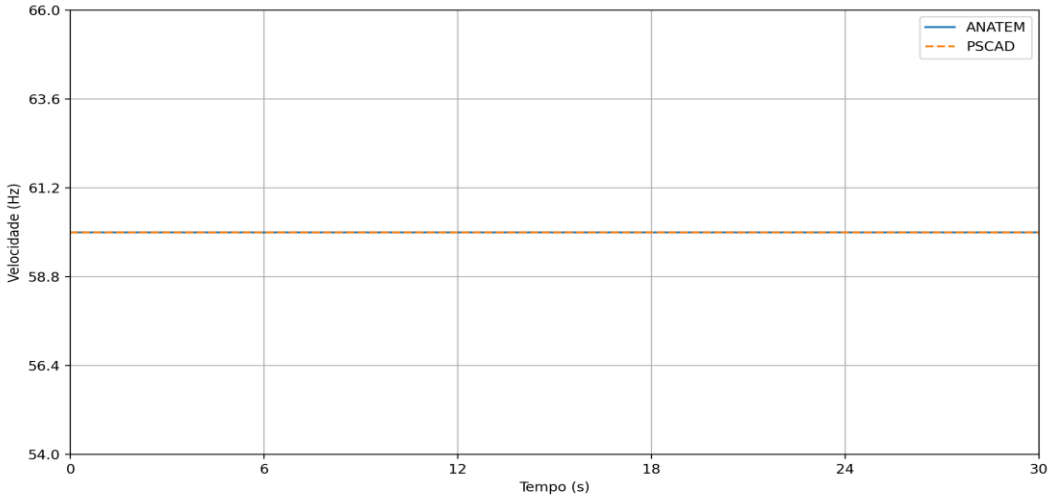

Figura 4-740 – Velocidade da máquina

4.30.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

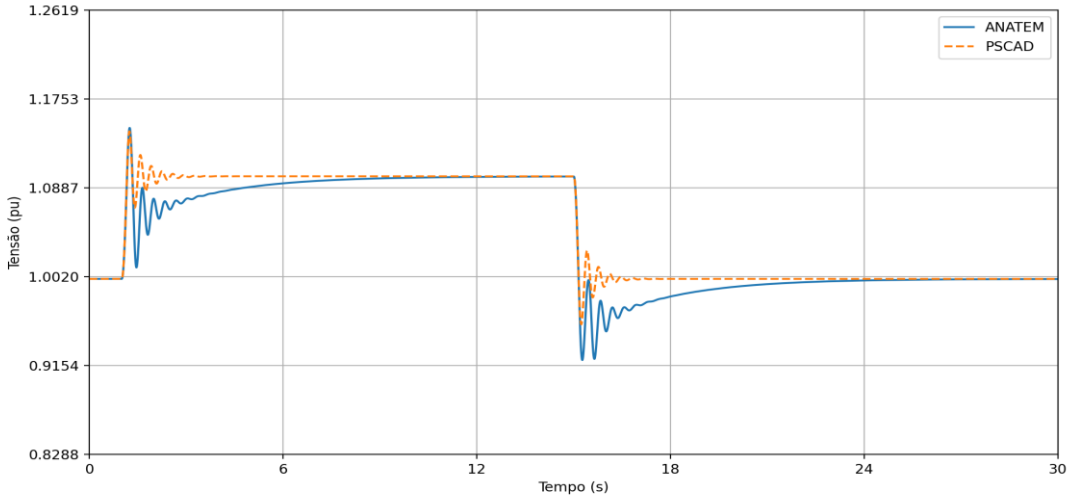

Figura 4-741 – Tensão terminal

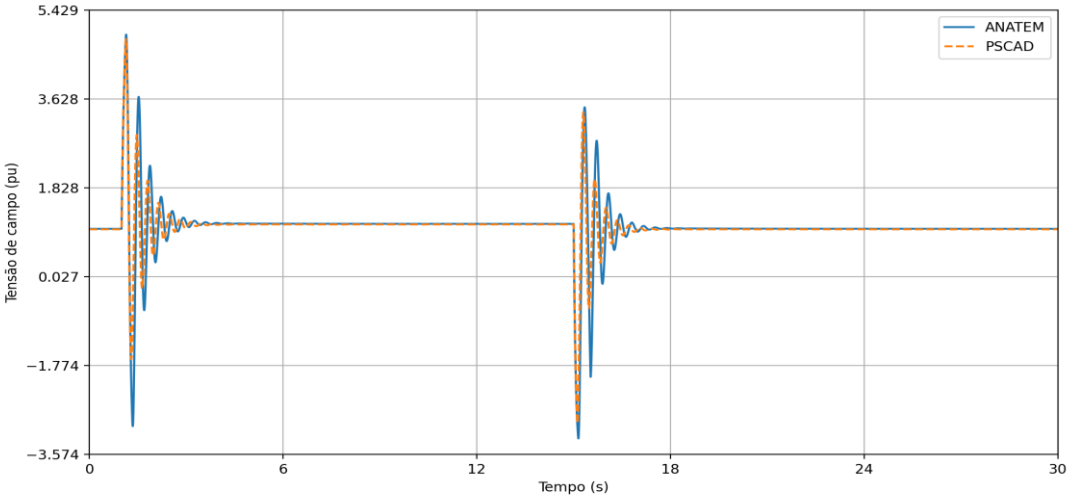

Figura 4-742 – Tensão de campo

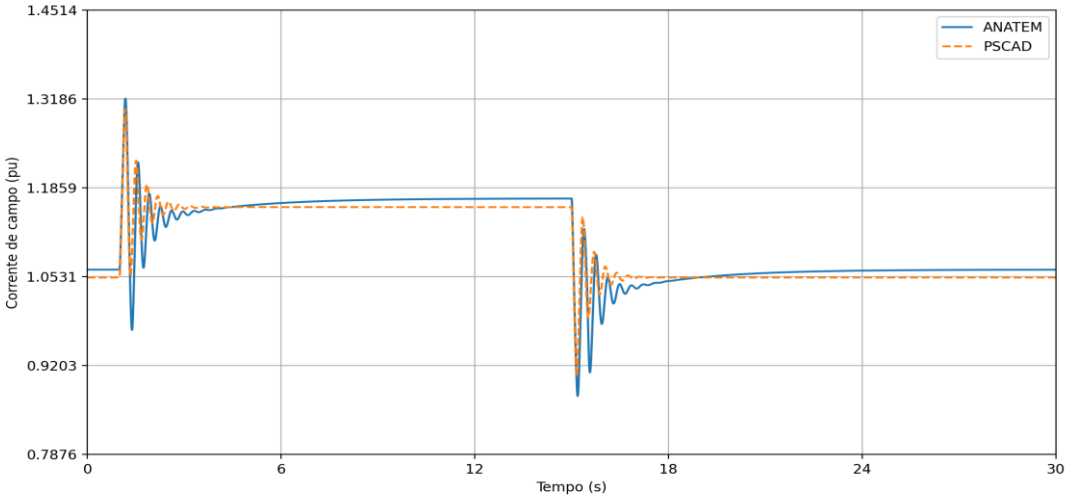

Figura 4-743 – Corrente de campo

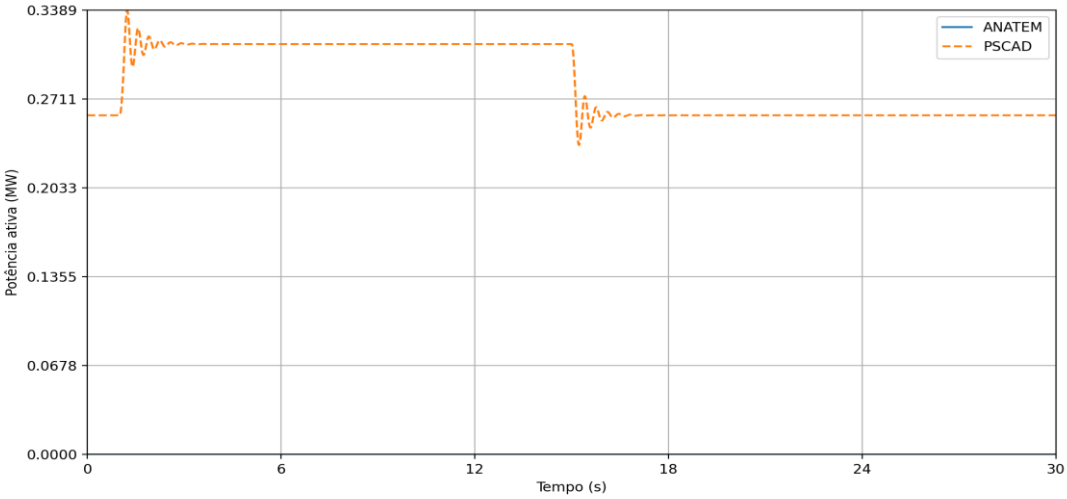

Figura 4-744 – Potência ativa

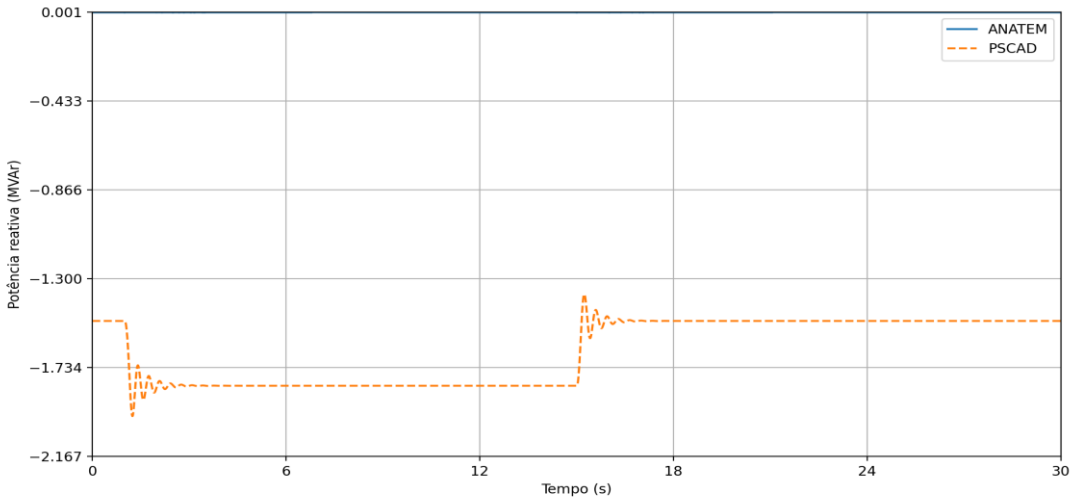

Figura 4-745 – Potência reativa

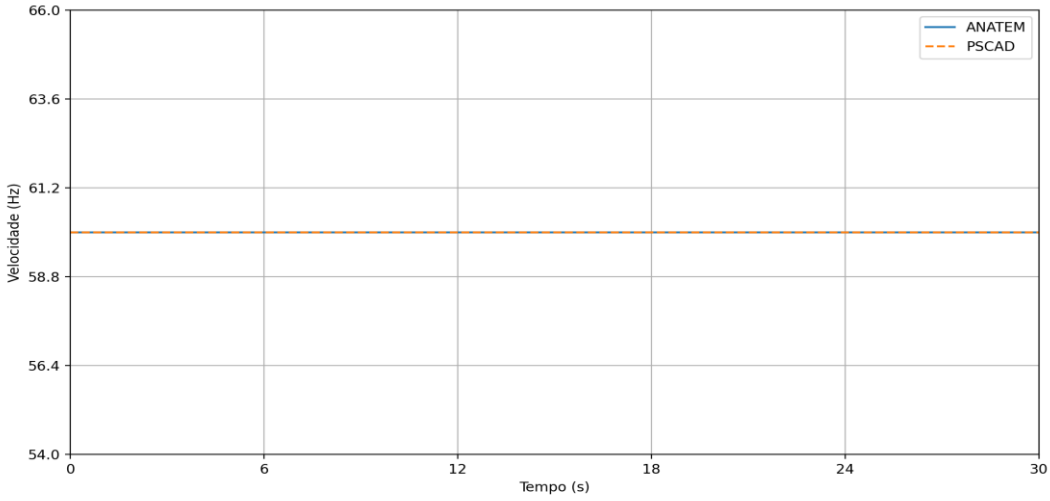

Figura 4-746 – Velocidade da máquina

4.30.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.30.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.30.4.2.

4.30.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

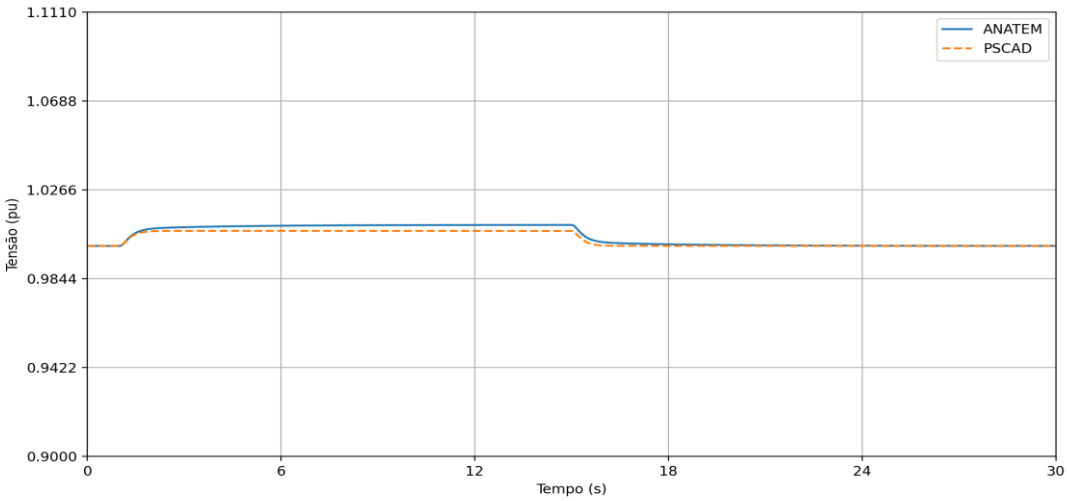

Figura 4-747 – Tensão terminal

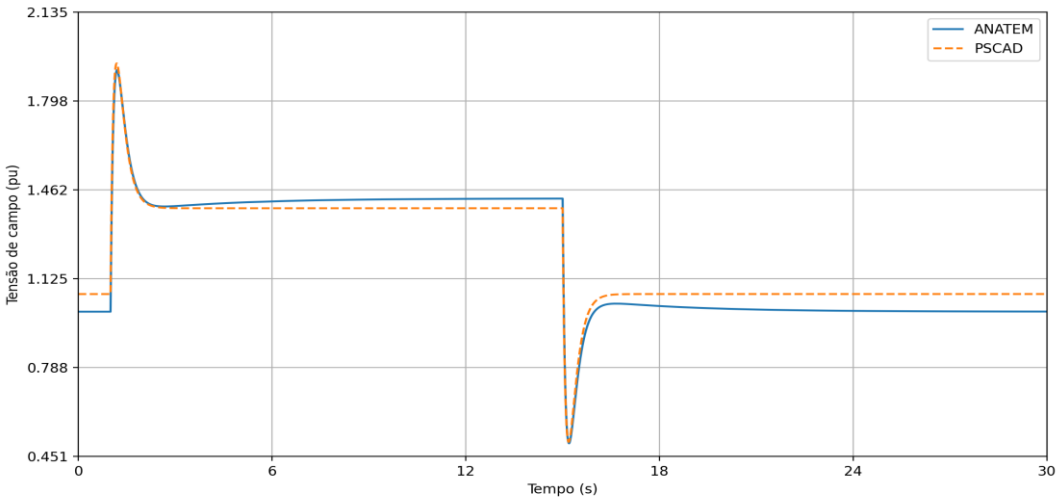

Figura 4-748 – Tensão de campo

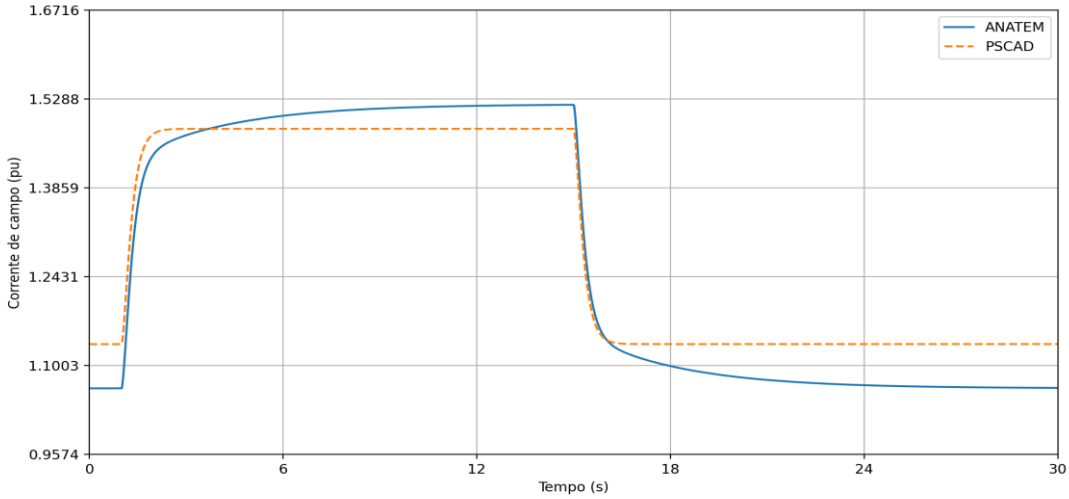

Figura 4-749 – Corrente de campo

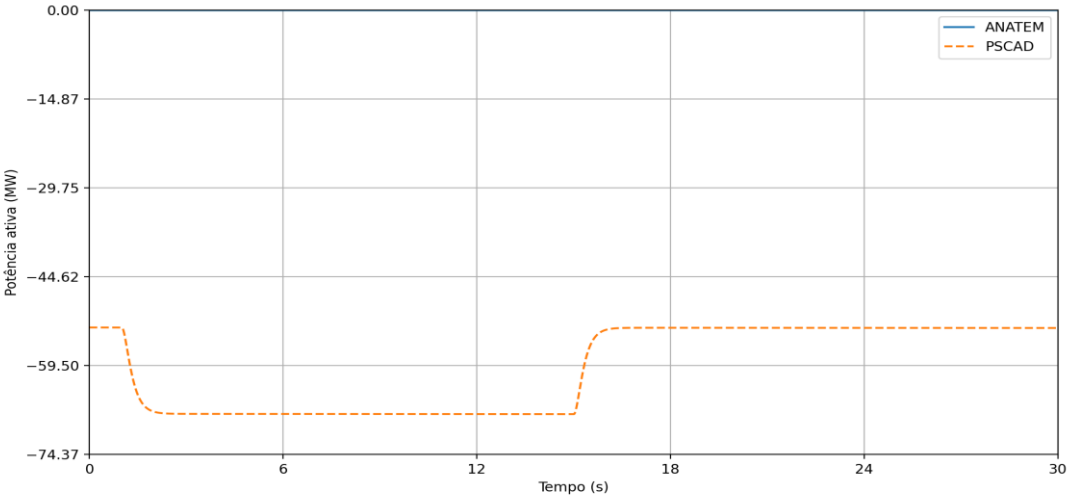

Figura 4-750 – Potência ativa

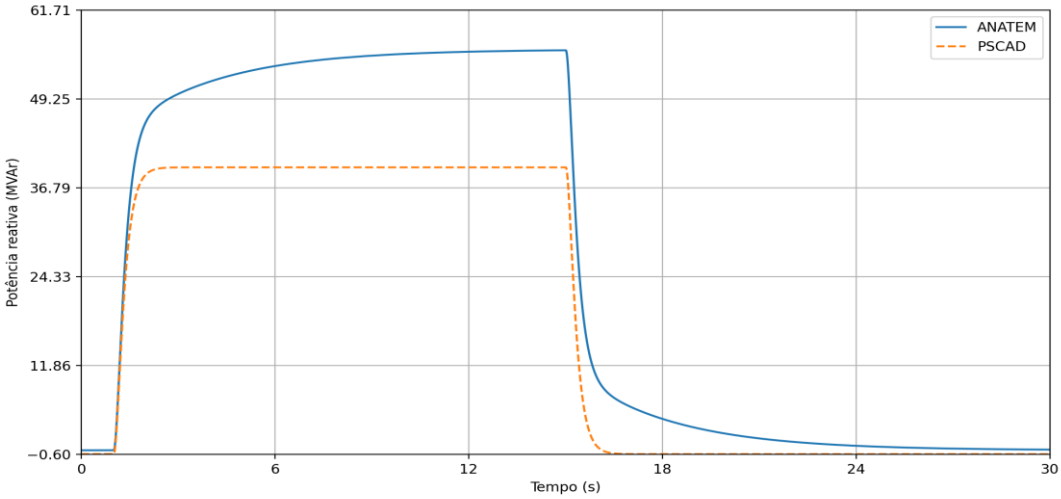

Figura 4-751 – Potência reativa

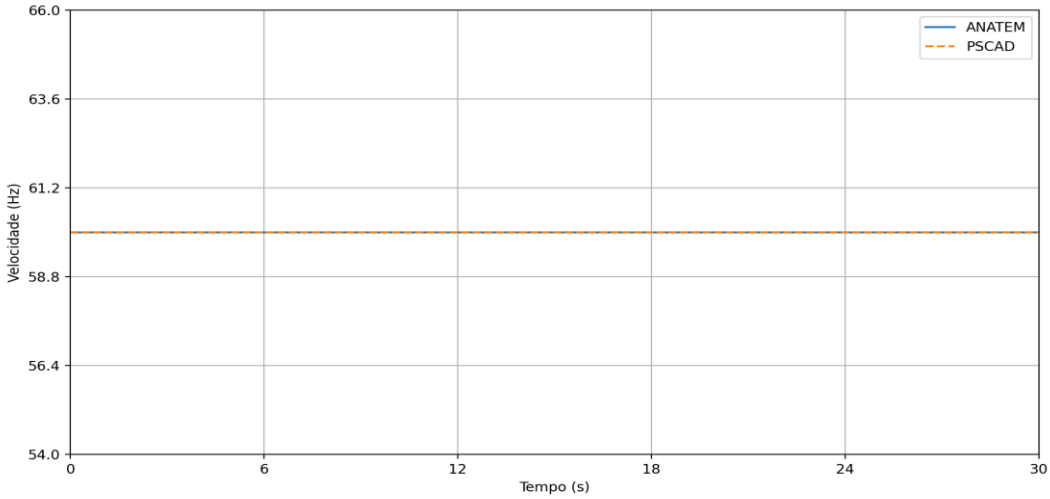

Figura 4-752 – Velocidade da máquina

4.30.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

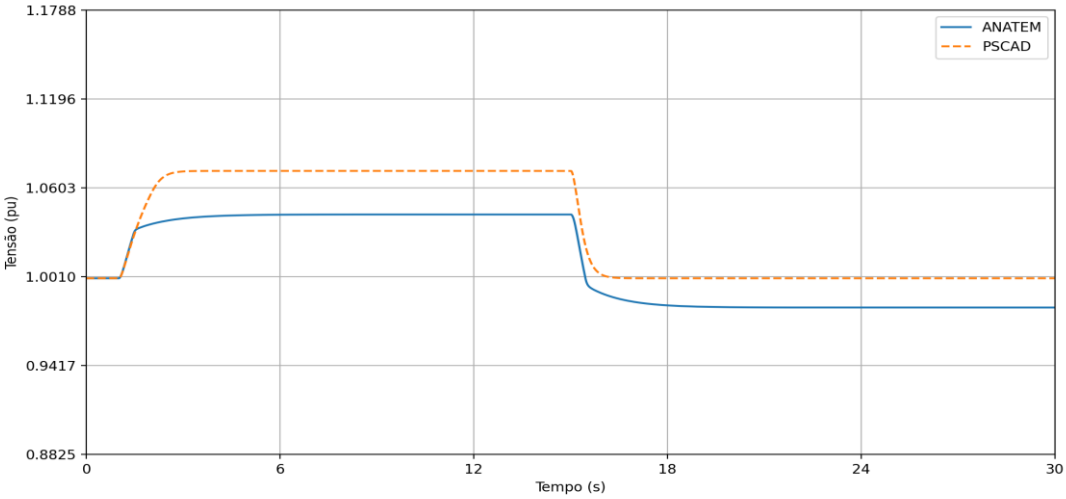

Figura 4-753 – Tensão terminal

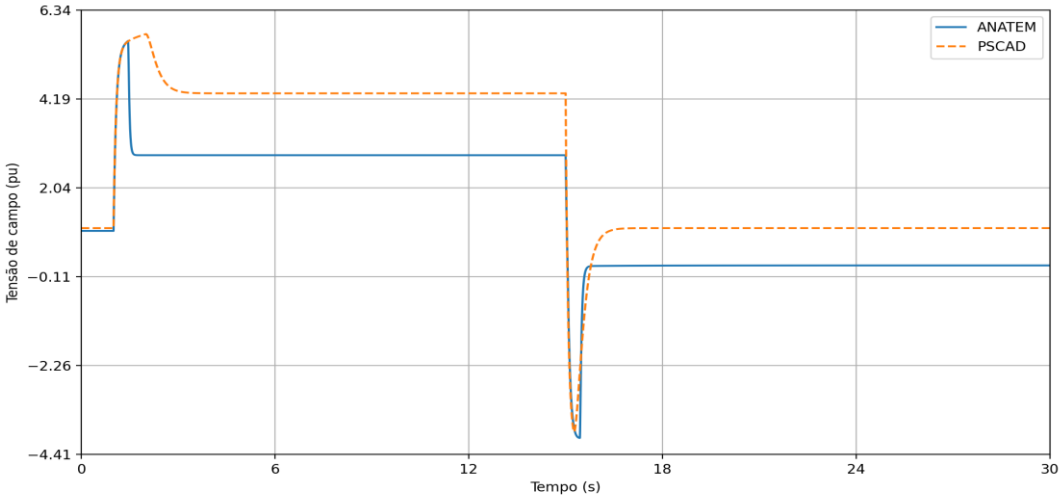

Figura 4-754 – Tensão de campo

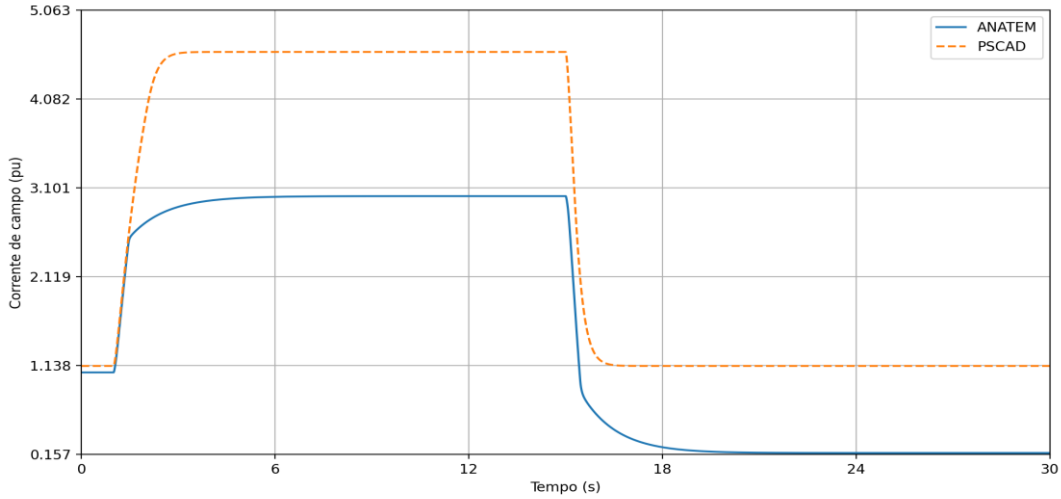

Figura 4-755 – Corrente de campo

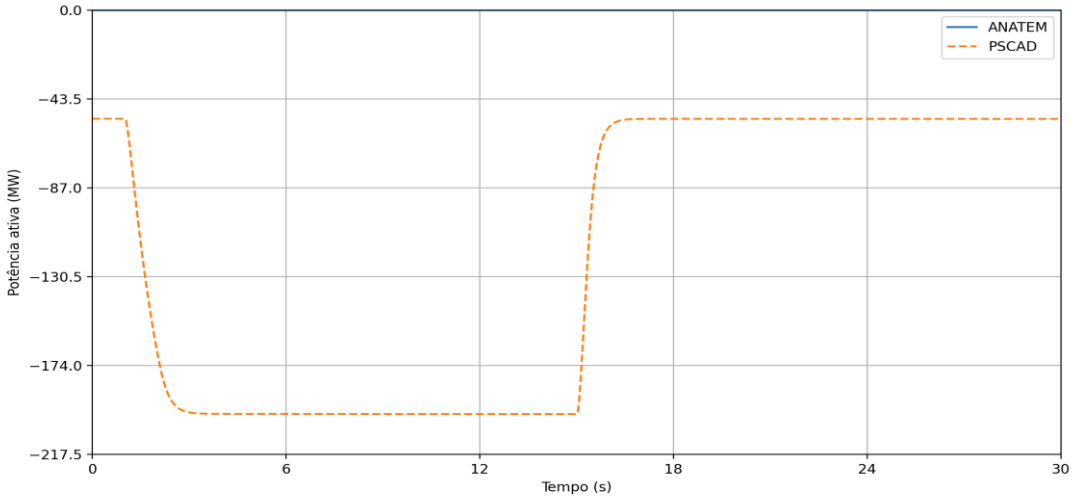

Figura 4-756 – Potência ativa

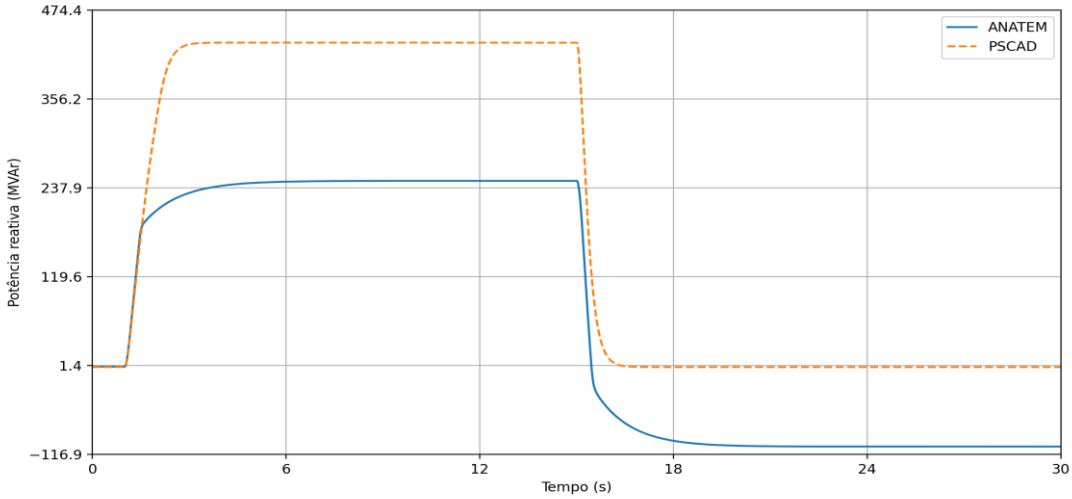

Figura 4-757 – Potência reativa

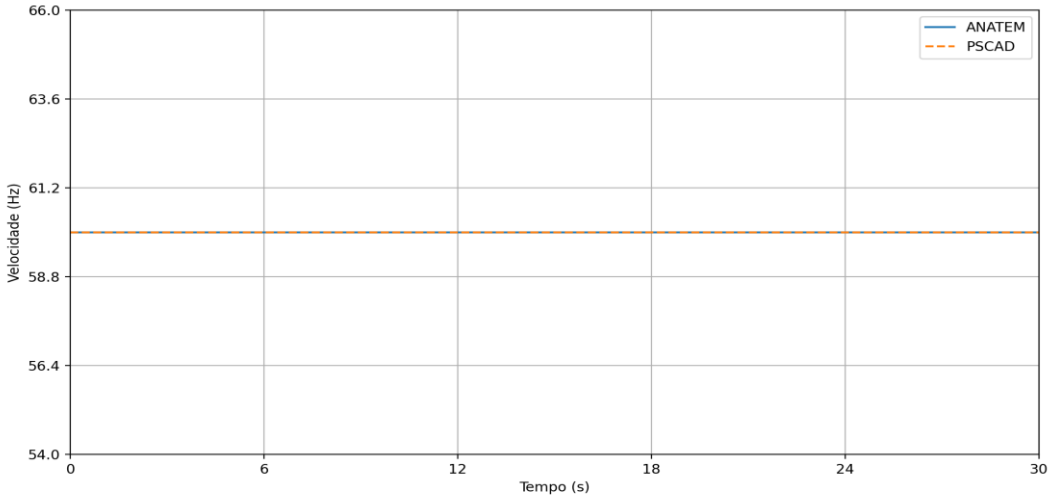

Figura 4-758 – Velocidade da máquina

4.31 CS BELO MONTE

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Belo Monte, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão e velocidade, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

Os resultados obtidos com o modelo em vazio apresentaram boa aderência na comparação ANATEM e PSCAD conforme apresentado na seção 4.31.3. No entanto, os resultados em carga, apresentados na seção 4.31.4 não apresentaram boa aderência, isso se deve ao fato do controle do compensador síncrono de Belo Monte ser do tipo controle em cascata, na qual a malha interna é do tipo controle de corrente. E como os processos a serem controlados, máquina síncrona conectada via impedância de curto à barra infinita, possuem modelos diferentes em ambos os programas, os resultados são levemente diferentes. Contudo, o modelo PSCAD pode ser considerado validado e apropriado para utilização no modelo completo da rede.

4.31.1 Modelo do CS Belo Monte

A Tabela 4-91 apresenta os parâmetros do CS Belo Monte disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-91 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	94	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	69	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	31	I(KA)	28,407	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	22	H(s)	4,685	
xl(%)	14	D(pu)	0,1	
T'd(s)	8,853	Ra(pu)	0,002	
		xp(pu)	0,14	Reatância de Potier
T''d(s)	0,1	xd(pu)	0,94	
T''q(s)	0,12	xd_(pu)	0,31	x'd
Ra(%)	0,15	Td0_(s)	8,853	T'd
H(s)	4,685	xd__(pu)	0,22	x''d
D(pu)	0,1	Td0__(s)	0,1	T''d
S(MVA)	679	Xq(pu)	0,69	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,22	x''q = x''d

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
		Tq0__(s)	0,12	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.31.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-92, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Belo Monte estão apresentados na Tabela 4-93. A partir dos parâmetros da Tabela 4-92, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-93. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-759.

Tabela 4-92 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Belo Monte	
Ag	**Y1**	0,0231
Bg	**Y2**	7,5154
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-93 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,823	0,800
1,021	0,950
1,061	0,975
1,104	1,000
1,166	1,033
1,239	1,067
1,32	1,100
1,667	1,200
2,29	1,300

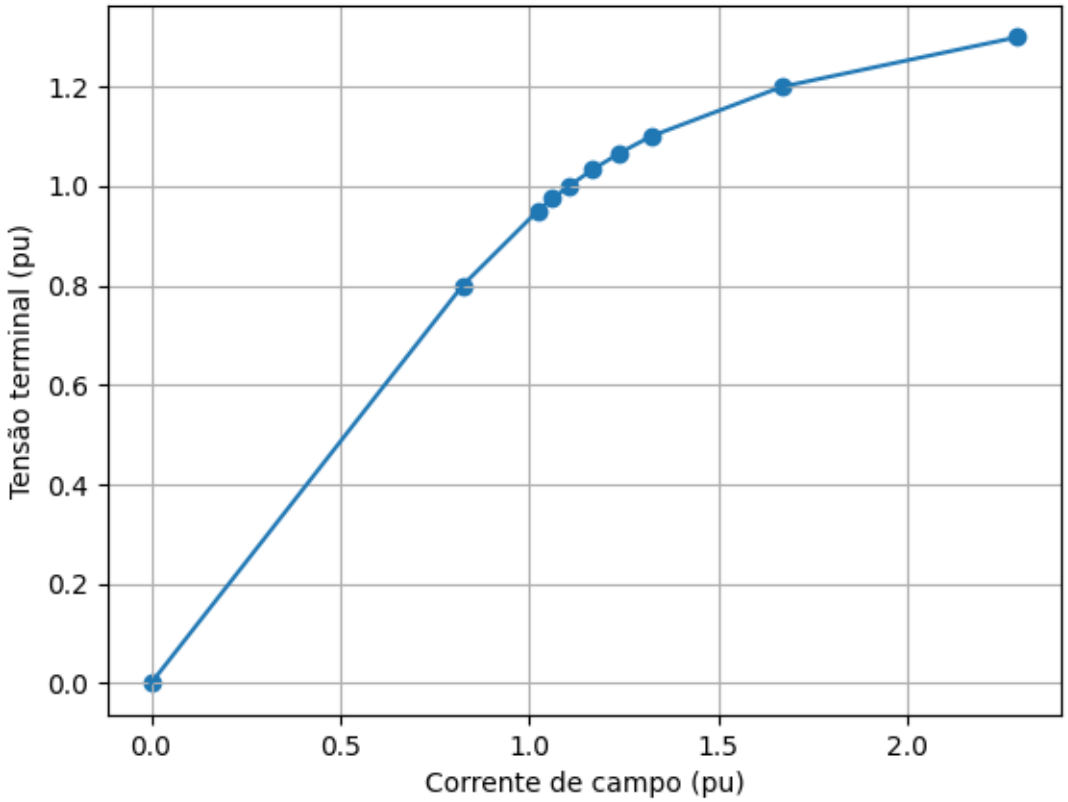

Figura 4-759 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.31.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.31.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.31.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.31.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

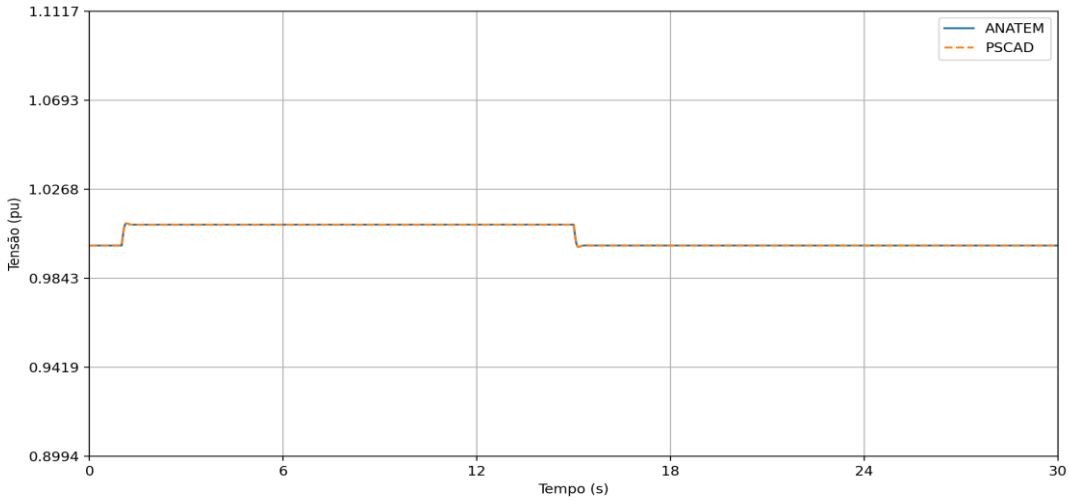

Figura 4-760 – Tensão terminal

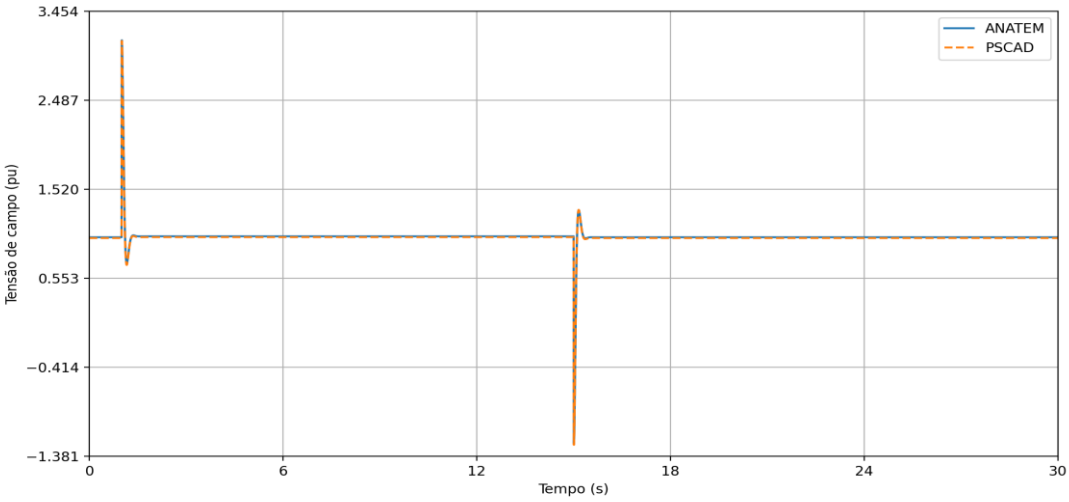

Figura 4-761 – Tensão de campo

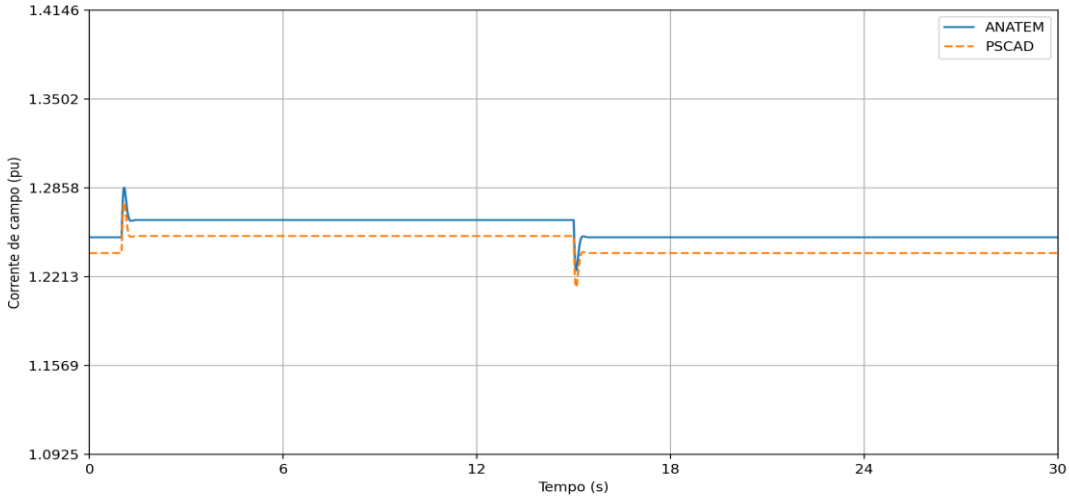

Figura 4-762 – Corrente de campo

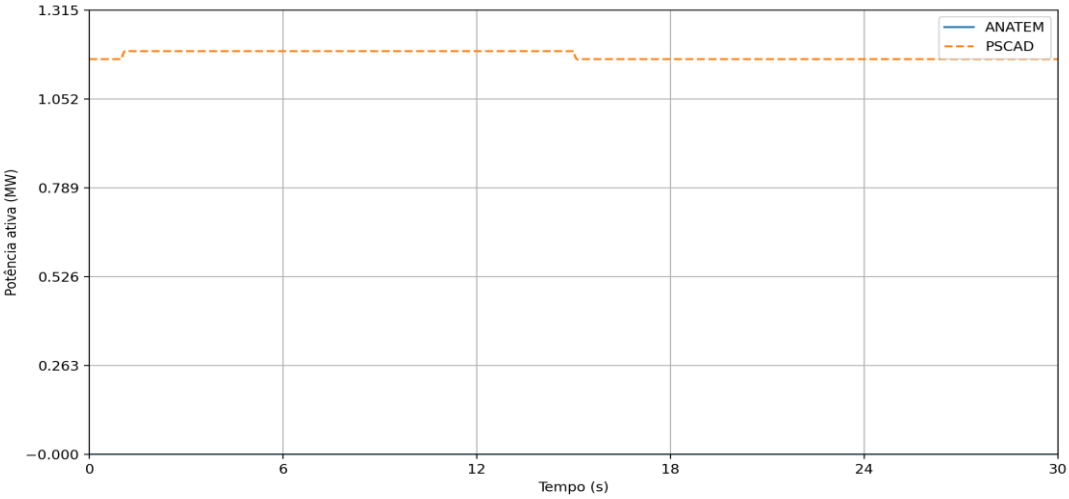

Figura 4-763 – Potência ativa

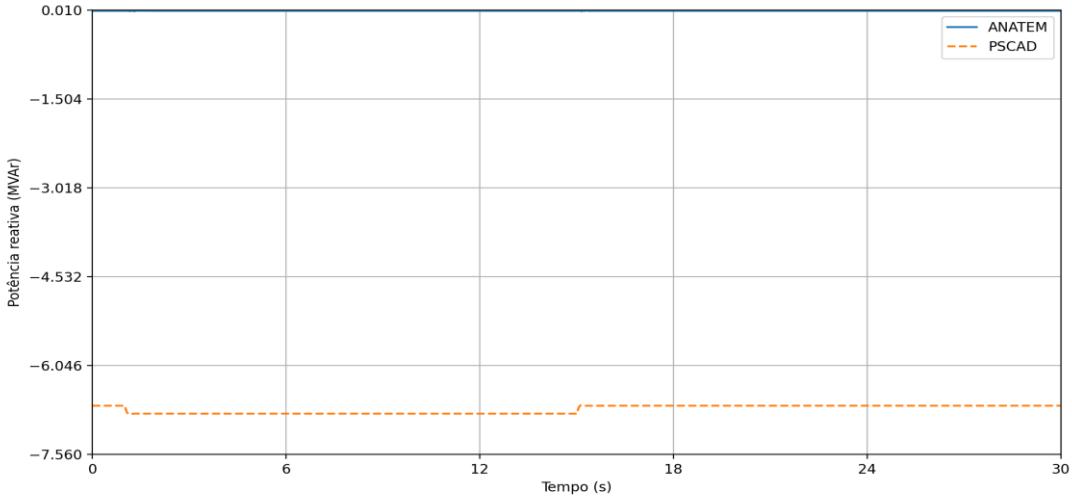

Figura 4-764 – Potência reativa

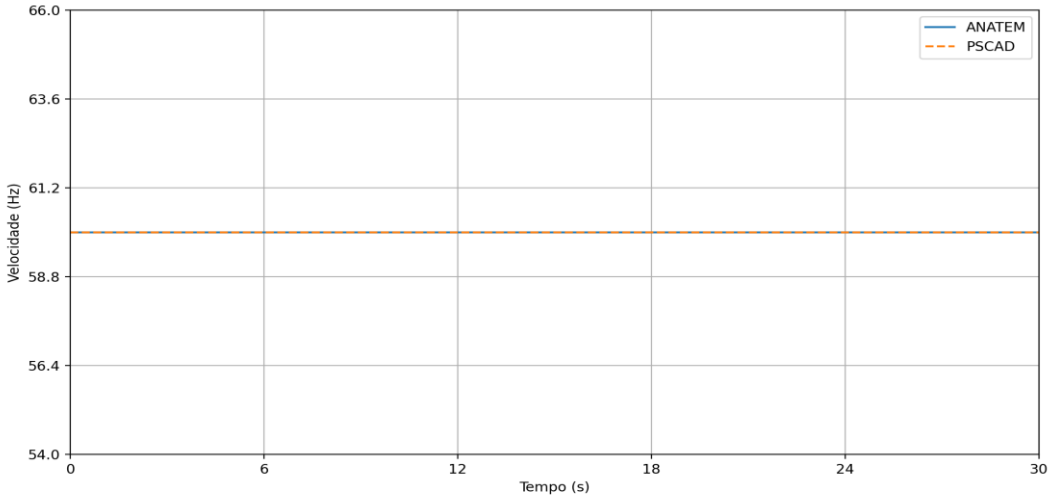

Figura 4-765 – Velocidade da máquina

4.31.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

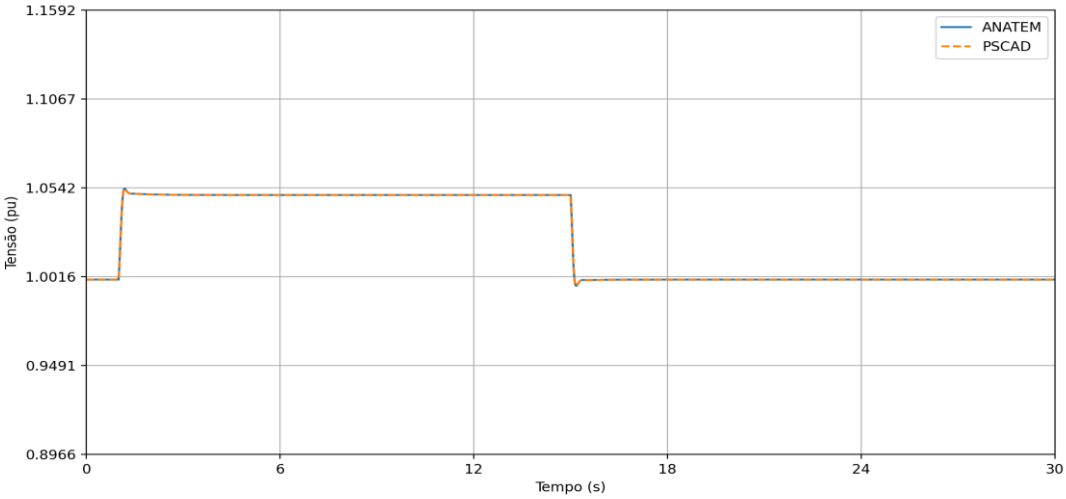

Figura 4-766 – Tensão terminal

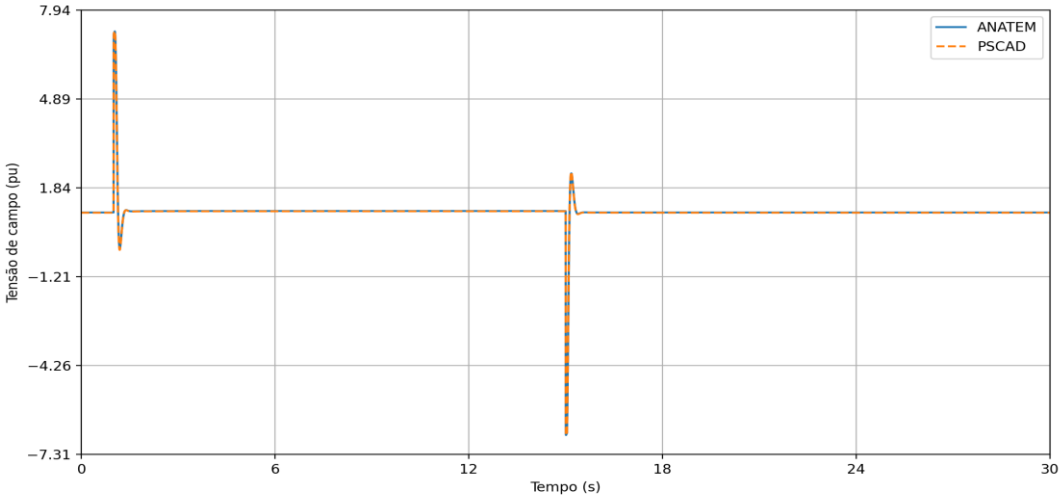

Figura 4-767 – Tensão de campo

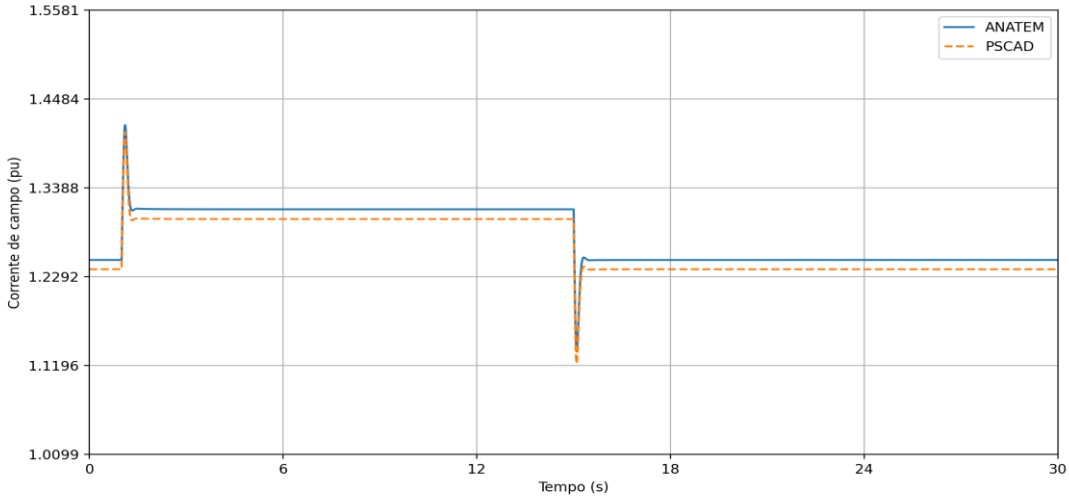

Figura 4-768 – Corrente de campo

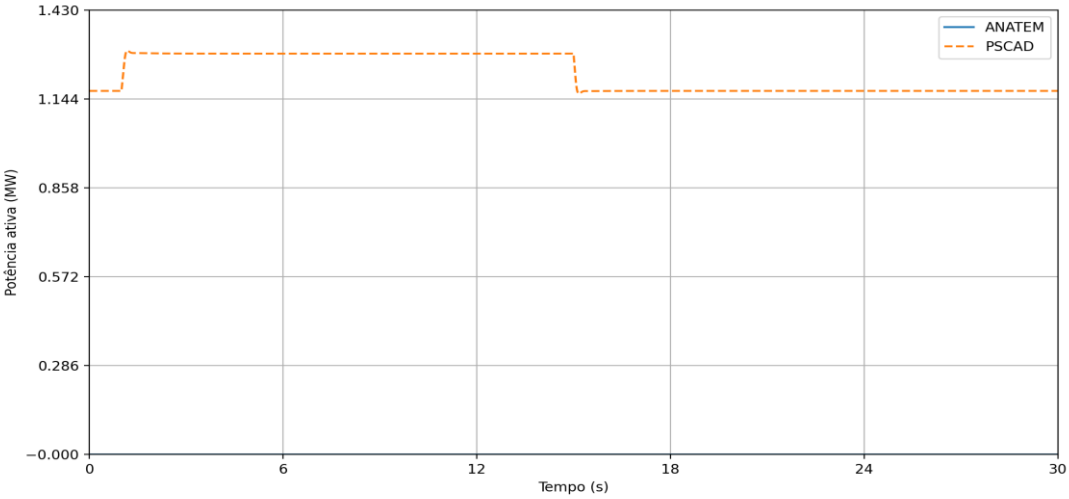

Figura 4-769 – Potência ativa

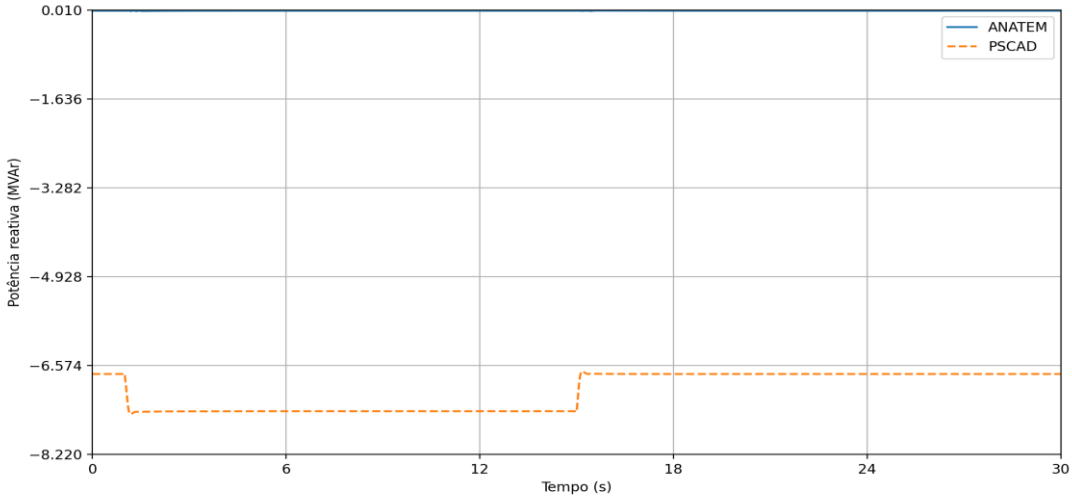

Figura 4-770 – Potência reativa

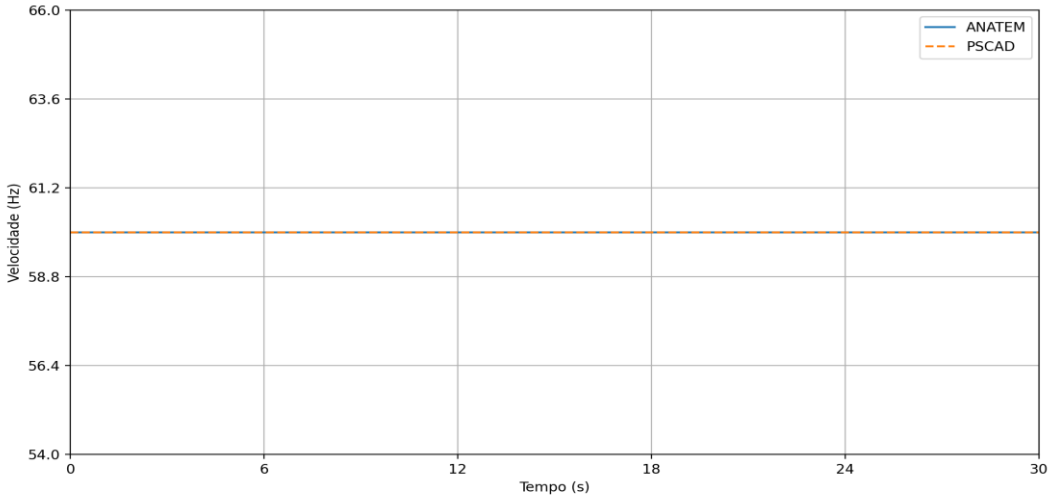

Figura 4-771 – Velocidade da máquina

4.31.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.31.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.31.4.2.

4.31.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

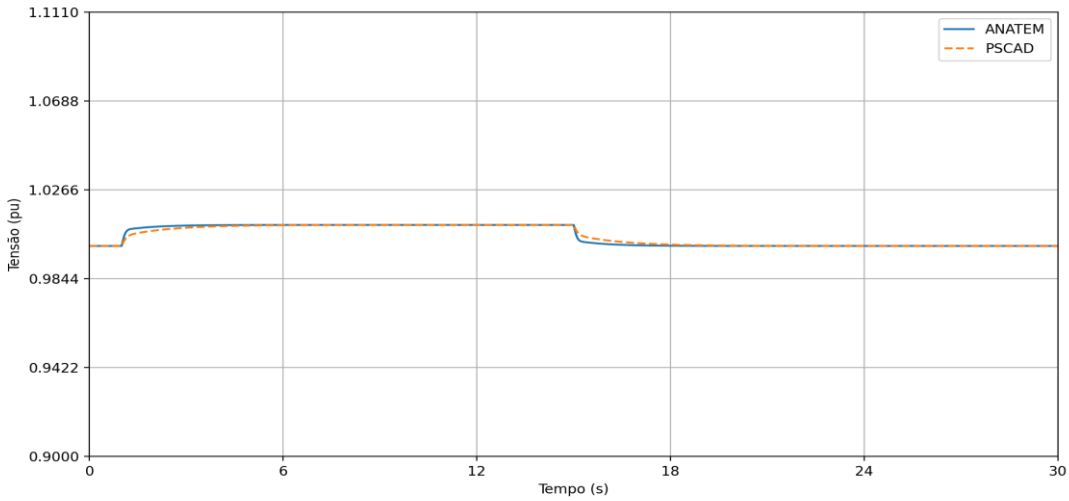

Figura 4-772 – Tensão terminal

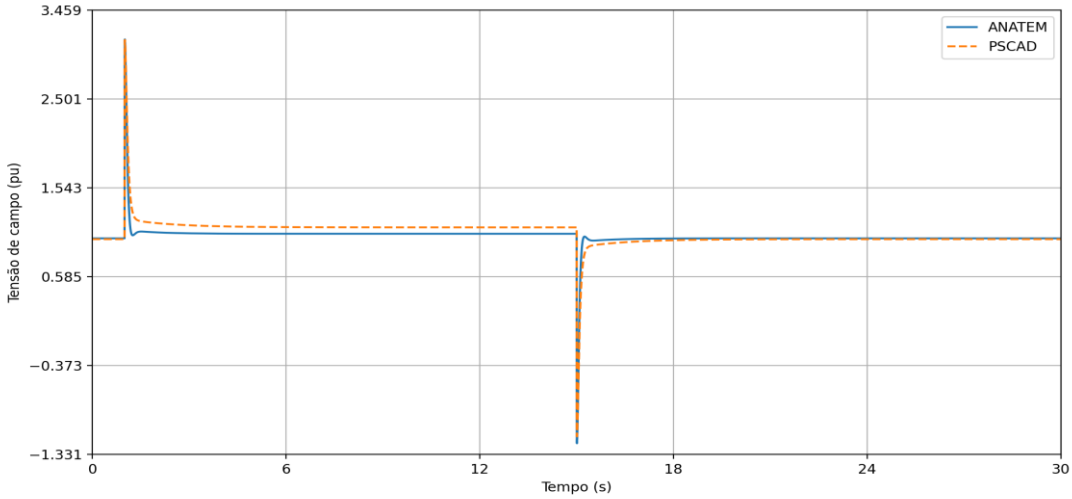

Figura 4-773 – Tensão de campo

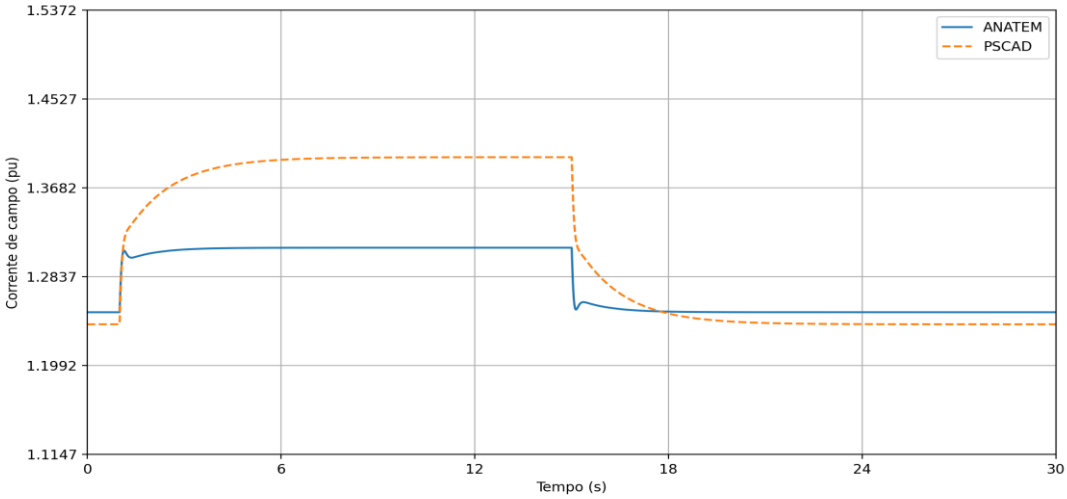

Figura 4-774 – Corrente de campo

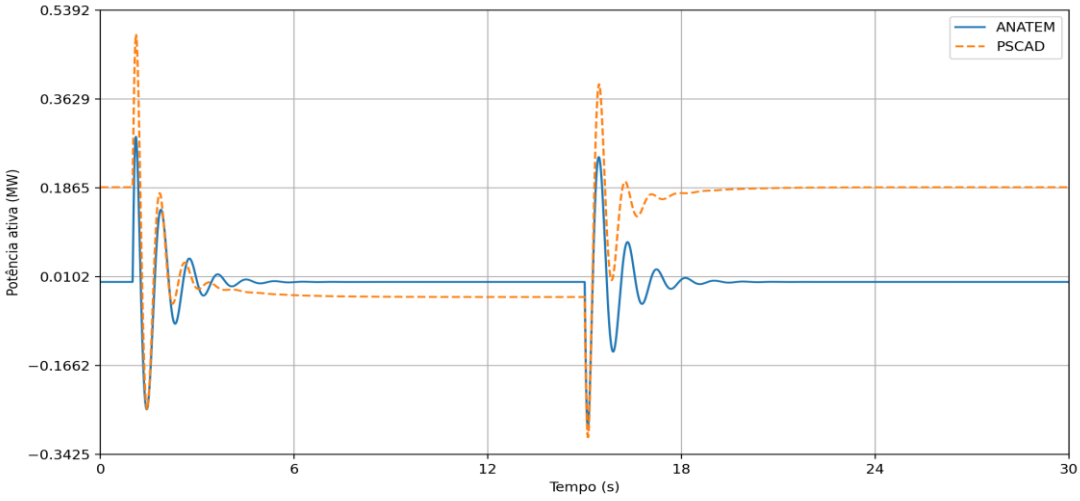

Figura 4-775 – Potência ativa

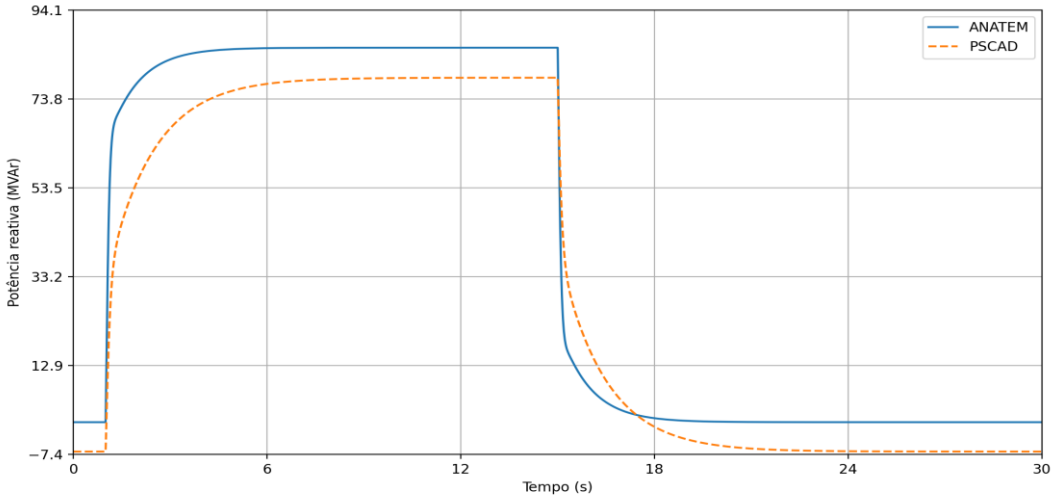

Figura 4-776 – Potência reativa

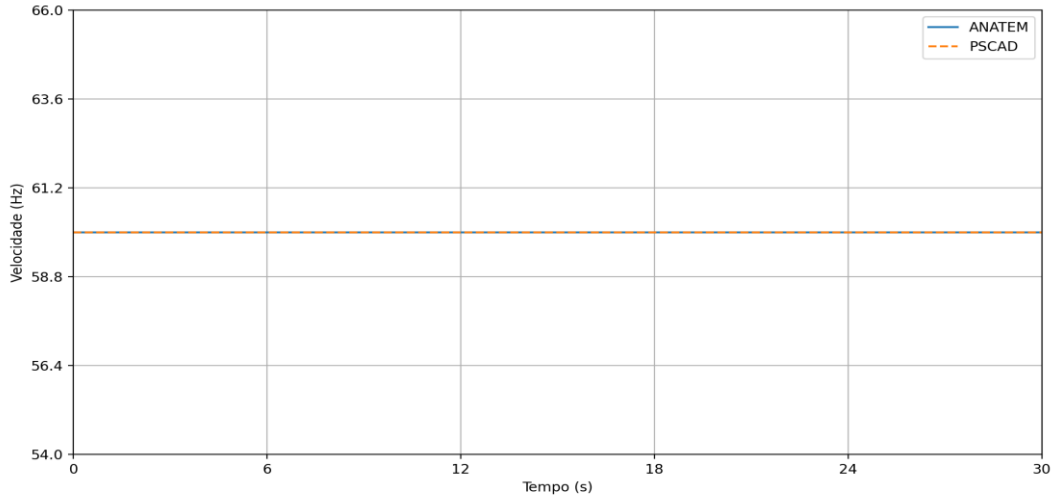

Figura 4-777 – Velocidade da máquina

4.31.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

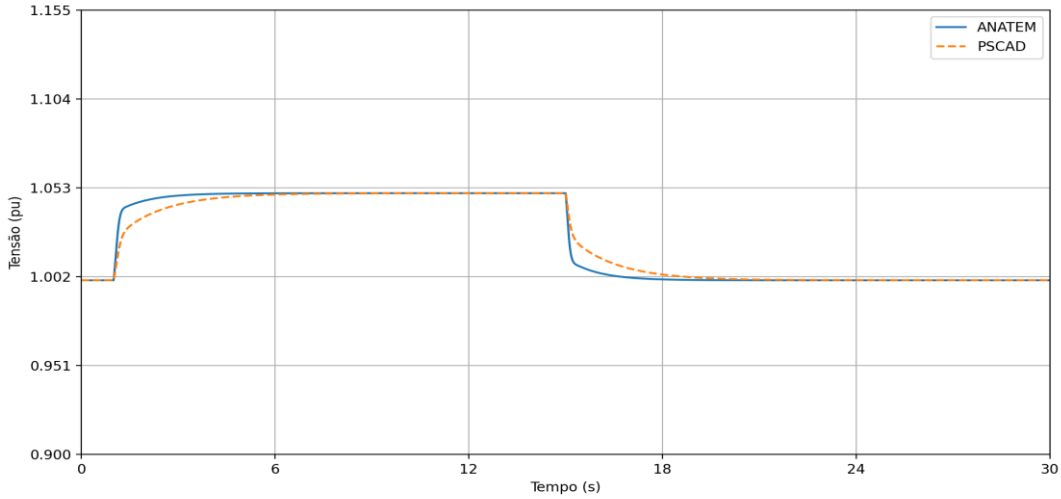

Figura 4-778 – Tensão terminal

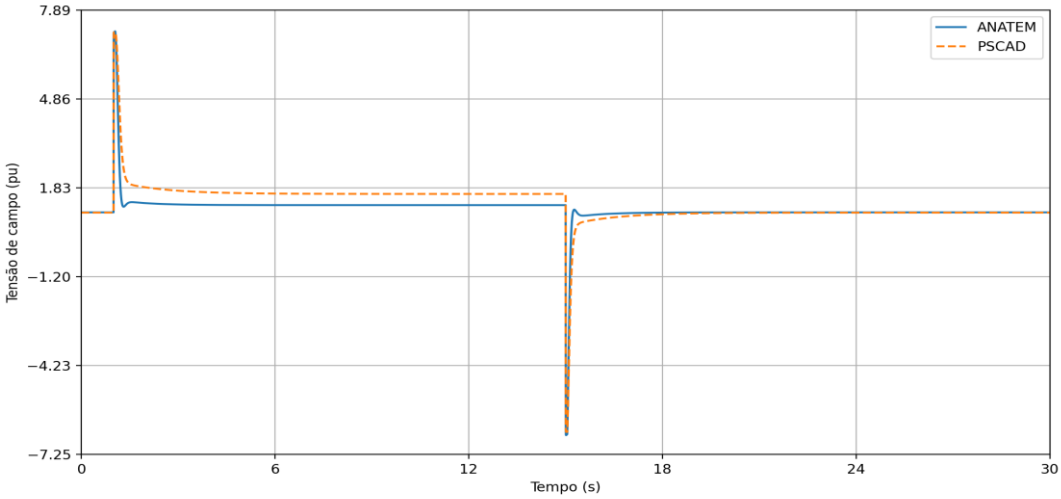

Figura 4-779 – Tensão de campo

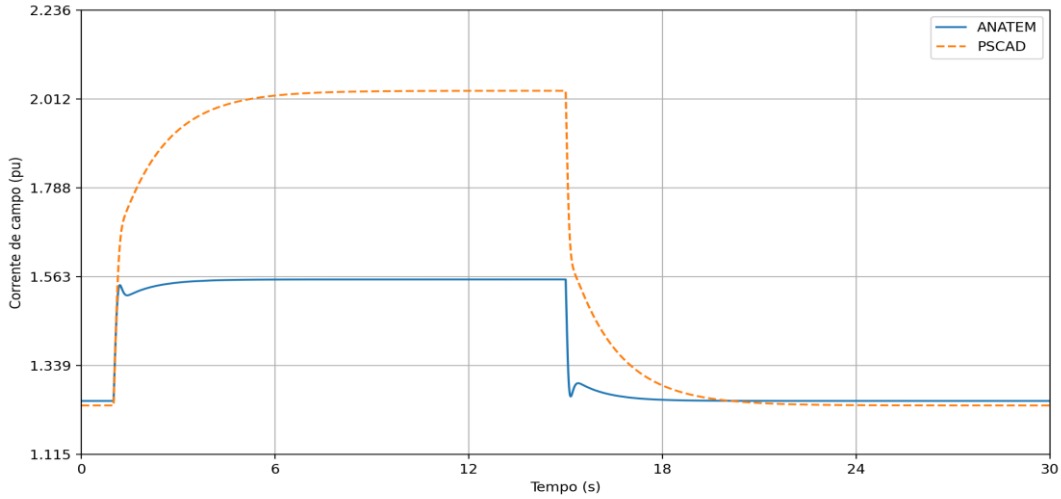

Figura 4-780 – Corrente de campo

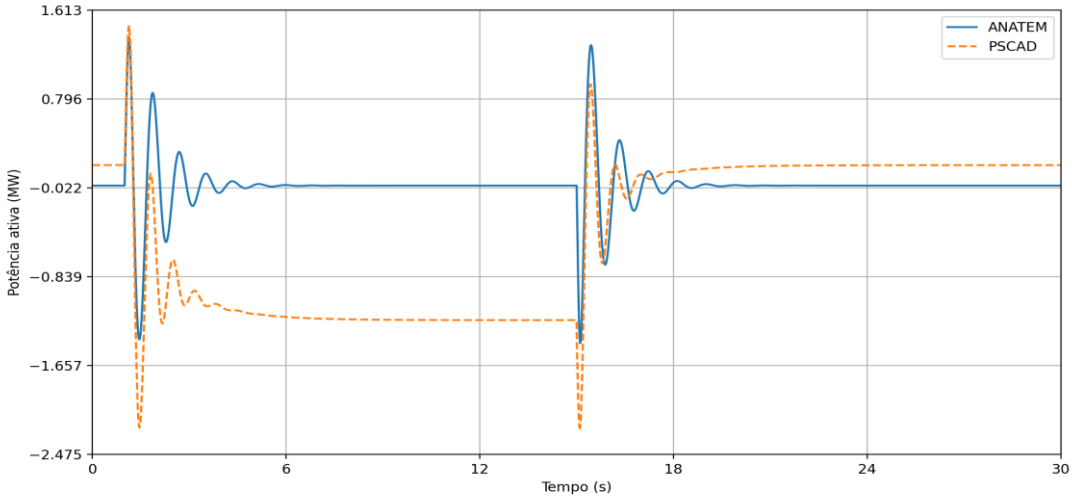

Figura 4-781 – Potência ativa

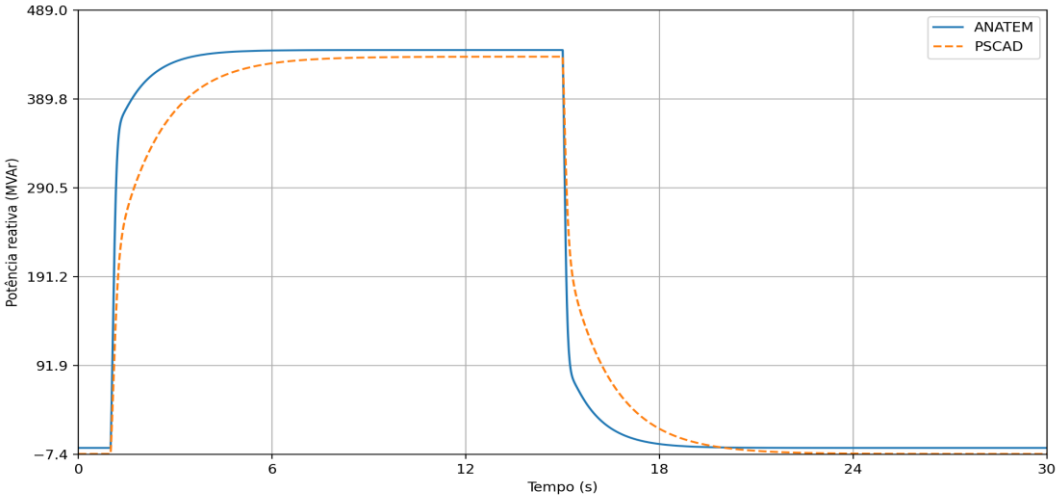

Figura 4-782 – Potência reativa

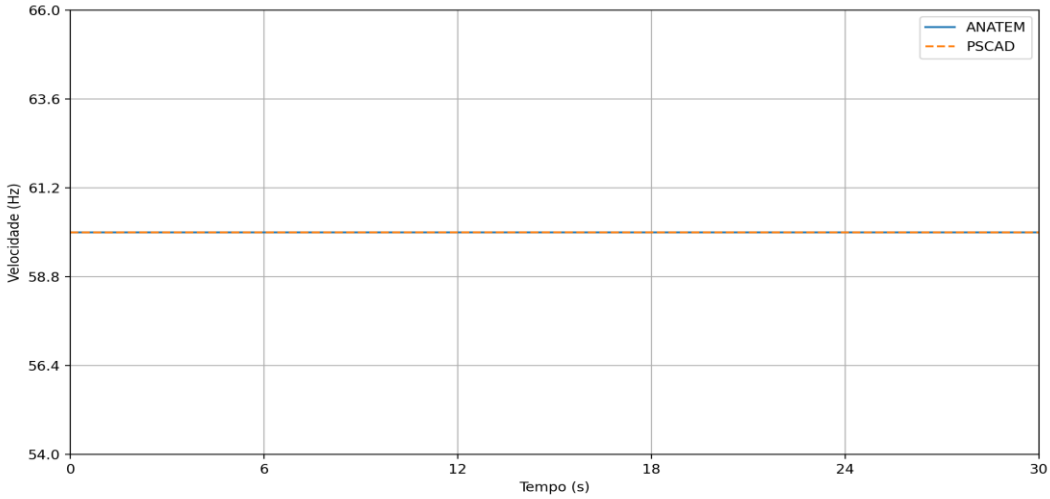

Figura 4-783 – Velocidade da máquina

4.32 CS ARARAQUARA

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Araraquara, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.32.1 Modelo do CS Araraquara

A Tabela 4-94 apresenta os parâmetros do CS Araraquara disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-94 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	111	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	93	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	25	I(KA)	12,551	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	22	H(s)	2,2	
xl(%)	12	D(pu)	0,1	
T'd(s)	6	Ra(pu)	0,002	
		xp(pu)	0,12	Reatância de Potier
T''d(s)	0,25	xd(pu)	1,11	
T''q(s)	0,41	xd_(pu)	0,25	x'd
Ra(%)	0,18	Td0_(s)	6	T'd
H(s)	2,2	xd__(pu)	0,22	x''d
D(pu)	0,1	Td0__(s)	0,25	T''d
S(MVA)	300	Xq(pu)	0,93	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,22	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,41	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.32.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-95, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Araraquara estão apresentados na Tabela 4-96.

A partir dos parâmetros da Tabela 4-95, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-96. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-784.

Tabela 4-95 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Araraquara	
Ag	**Y1**	0,0172
Bg	**Y2**	6,0267
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-96 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,817	0,800
0,992	0,950
1,024	0,975
1,057	1,000
1,103	1,033
1,153	1,067
1,205	1,100
1,392	1,200
1,65	1,300

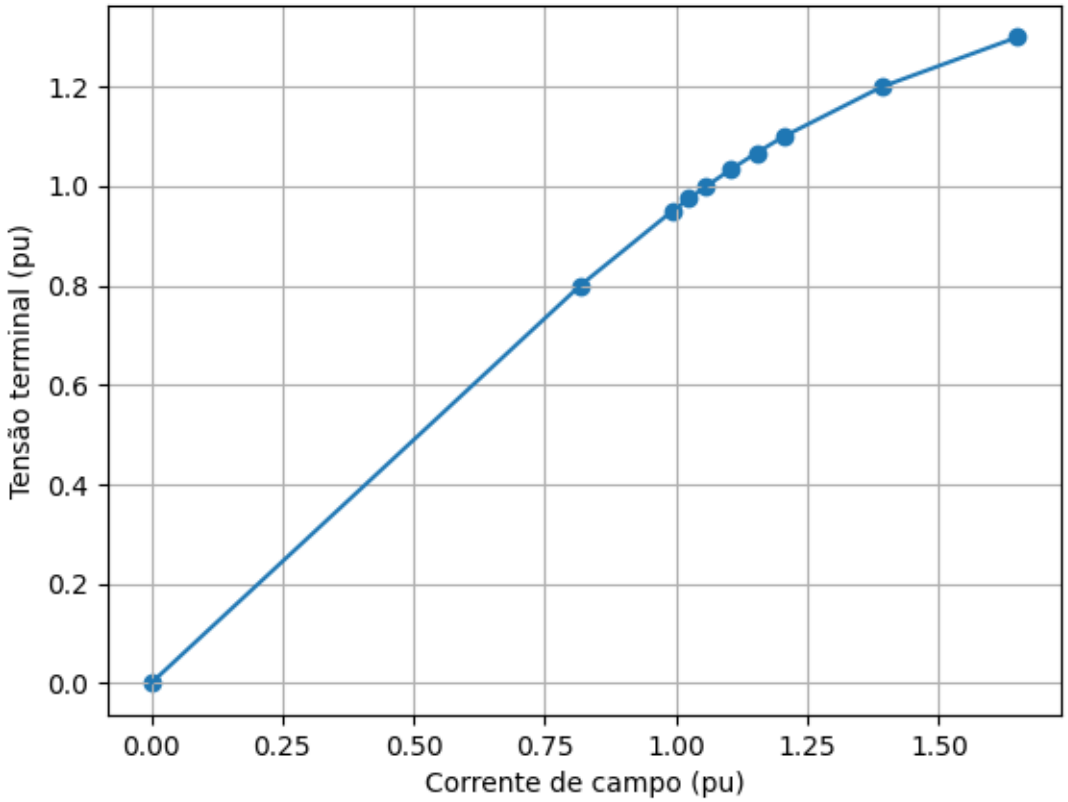

Figura 4-784 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.32.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.32.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.32.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.32.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

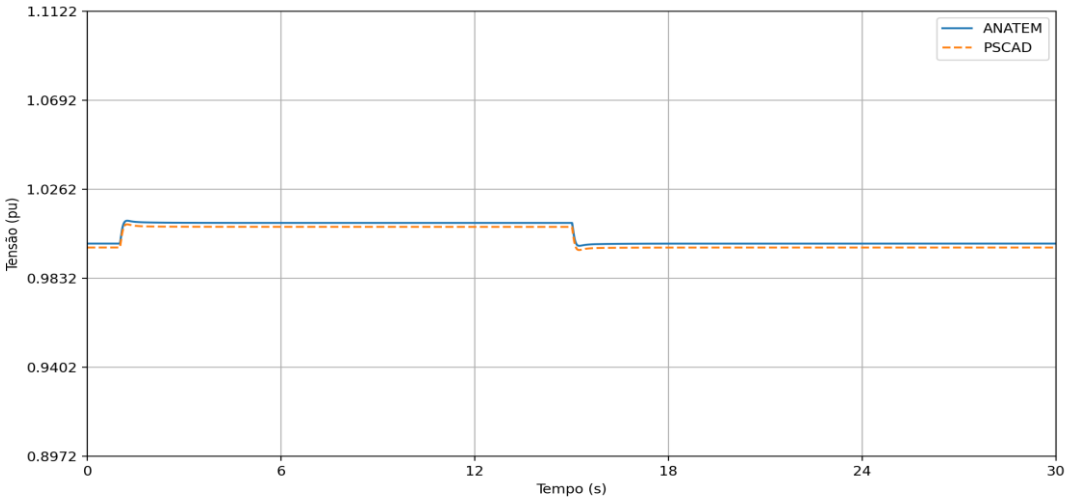

Figura 4-785 – Tensão terminal

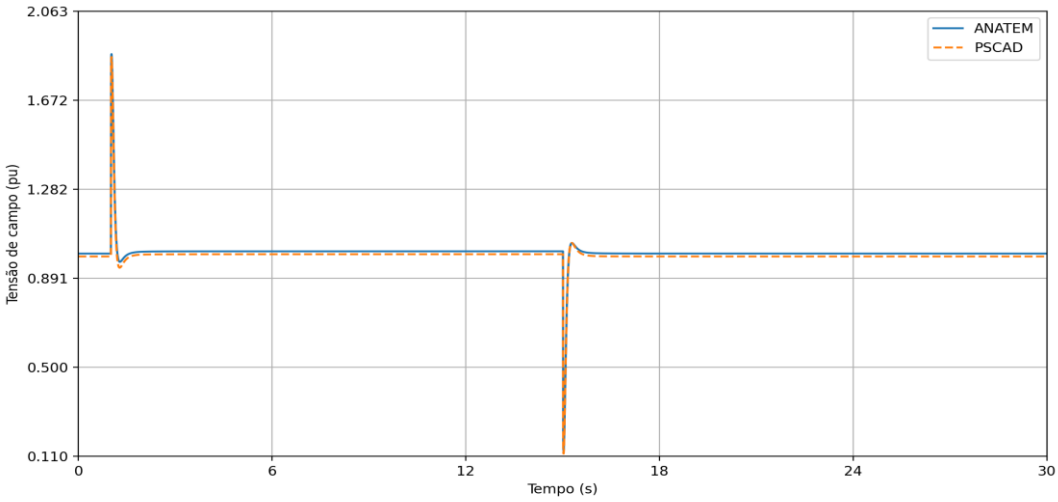

Figura 4-786 – Tensão de campo

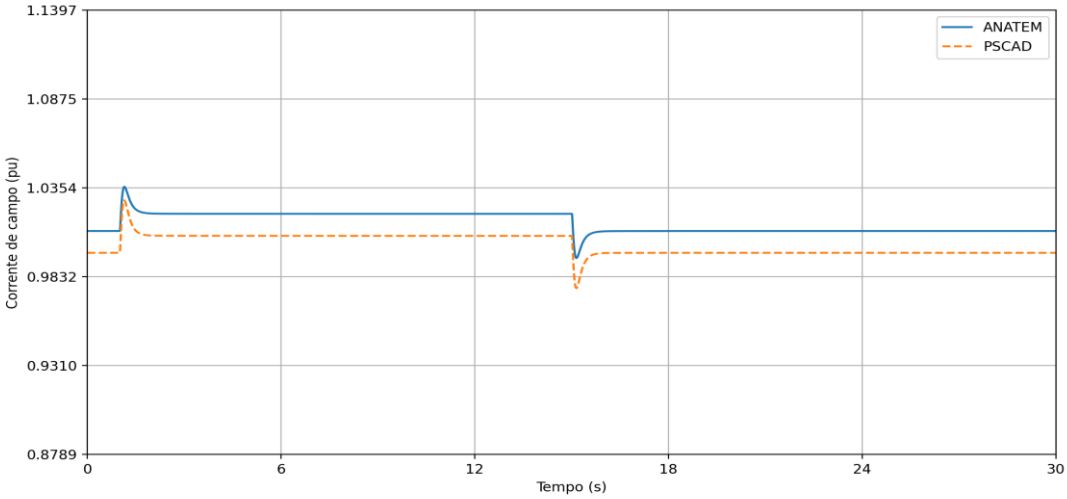

Figura 4-787 – Corrente de campo

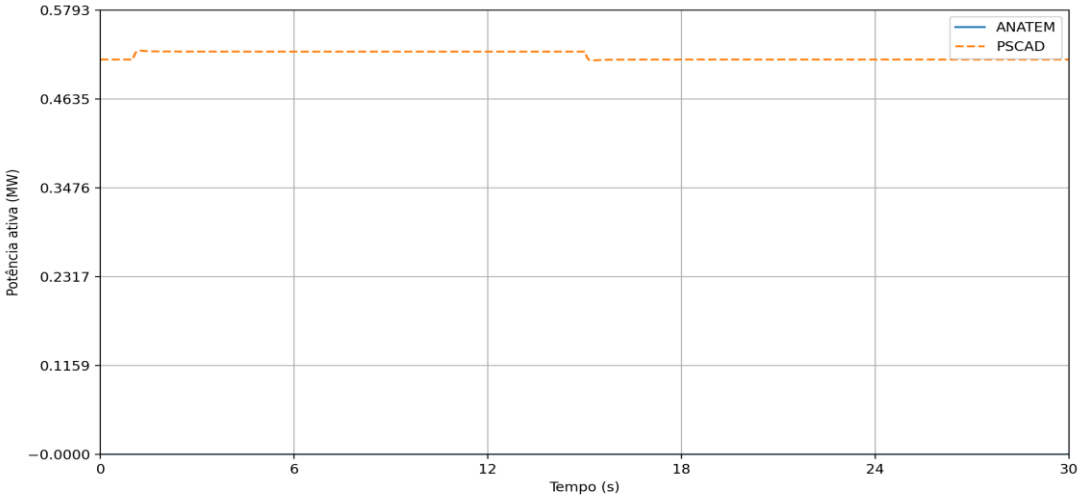

Figura 4-788 – Potência ativa

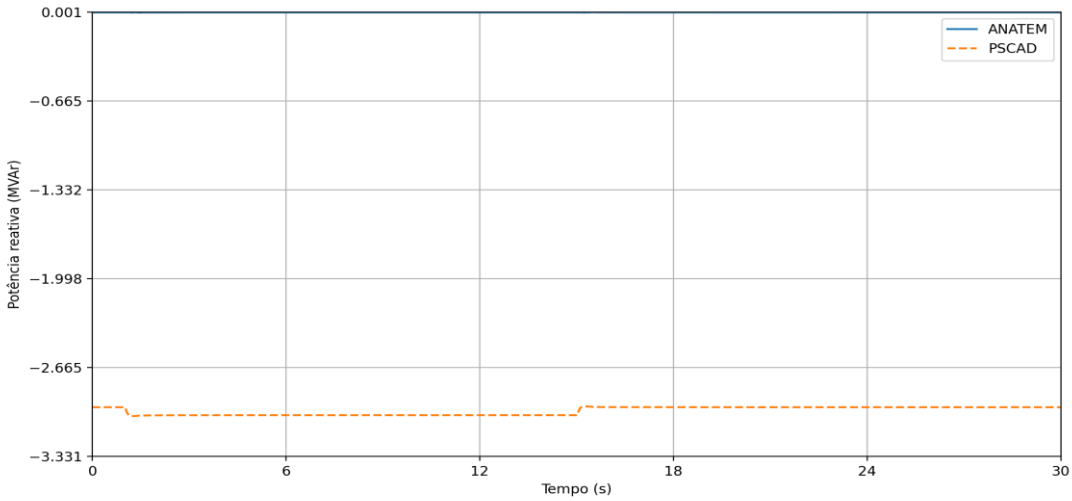

Figura 4-789 – Potência reativa

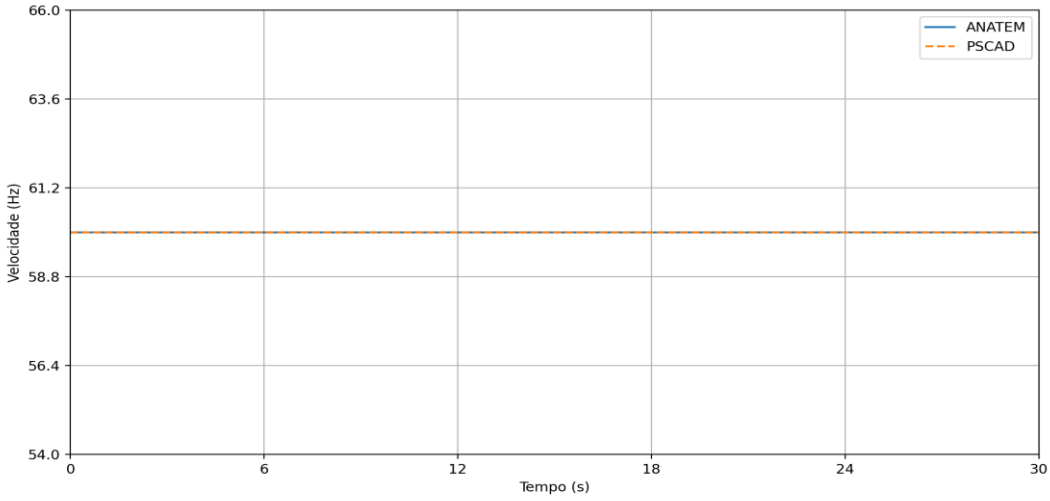

Figura 4-790 – Velocidade da máquina

4.32.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

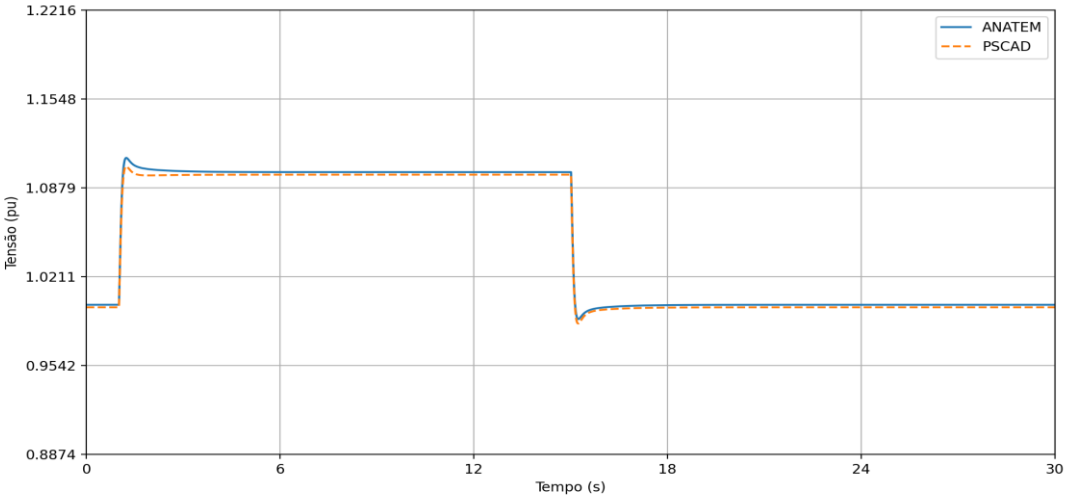

Figura 4-791 – Tensão terminal

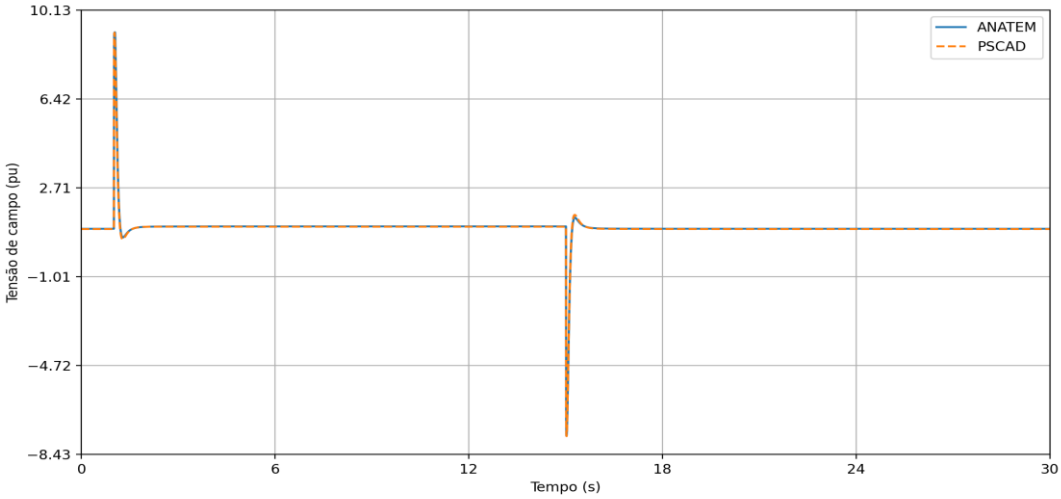

Figura 4-792 – Tensão de campo

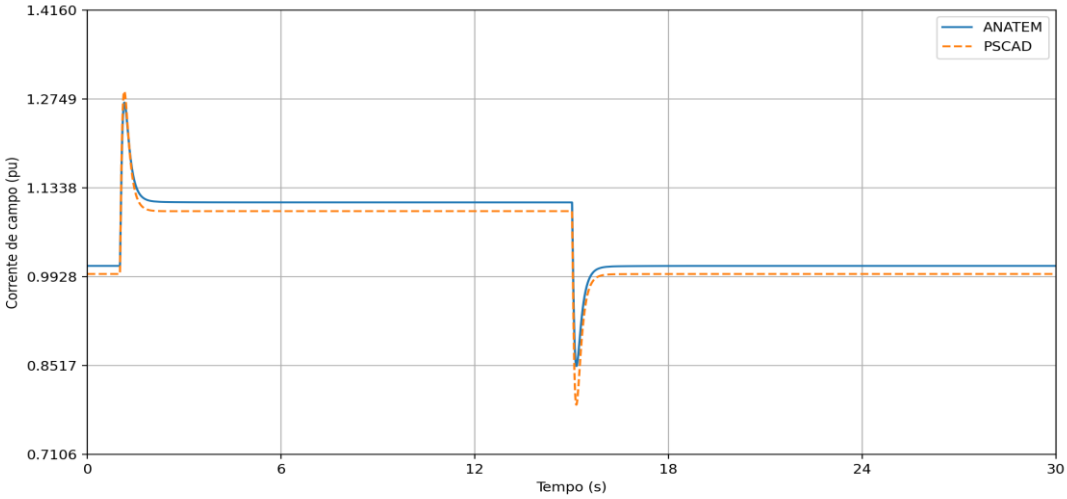

Figura 4-793 – Corrente de campo

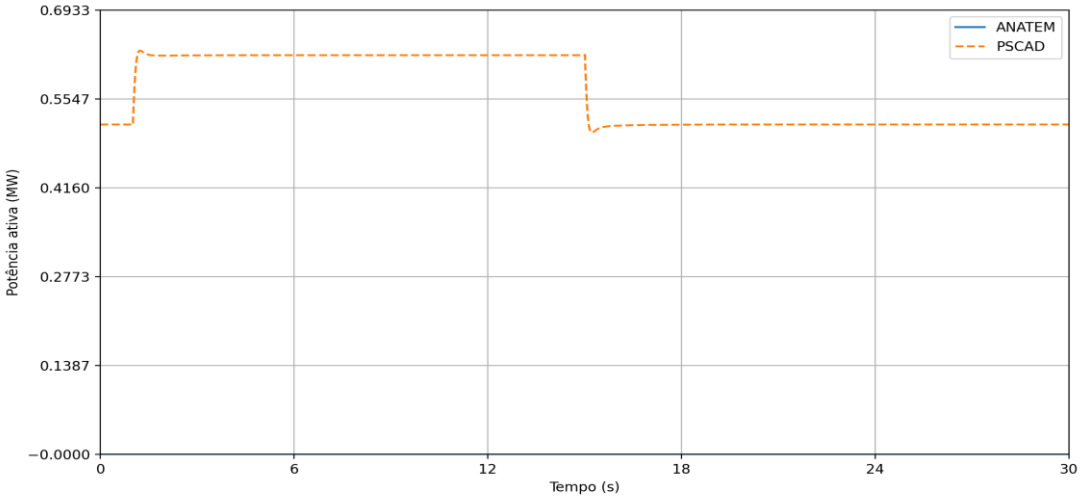

Figura 4-794 – Potência ativa

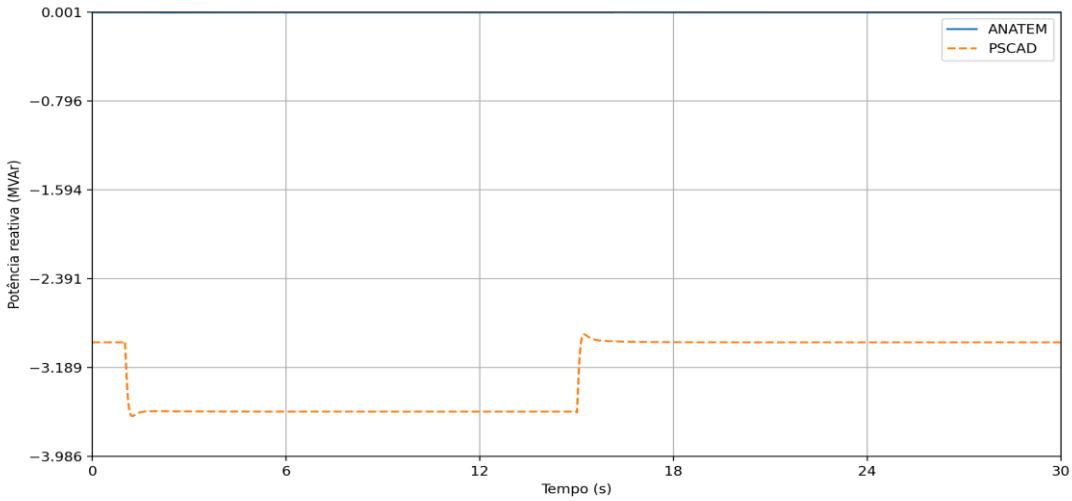

Figura 4-795 – Potência reativa

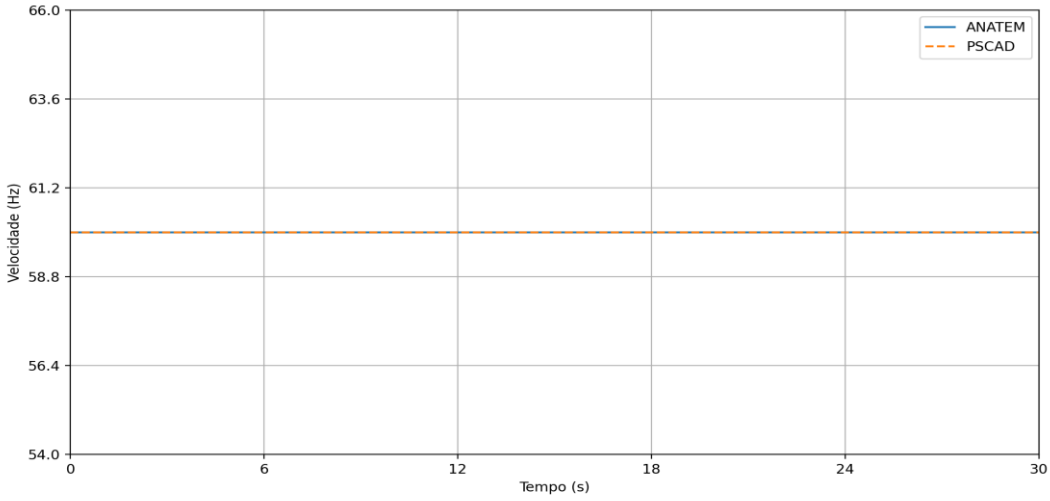

Figura 4-796 – Velocidade da máquina

4.32.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.32.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.32.4.2.

4.32.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

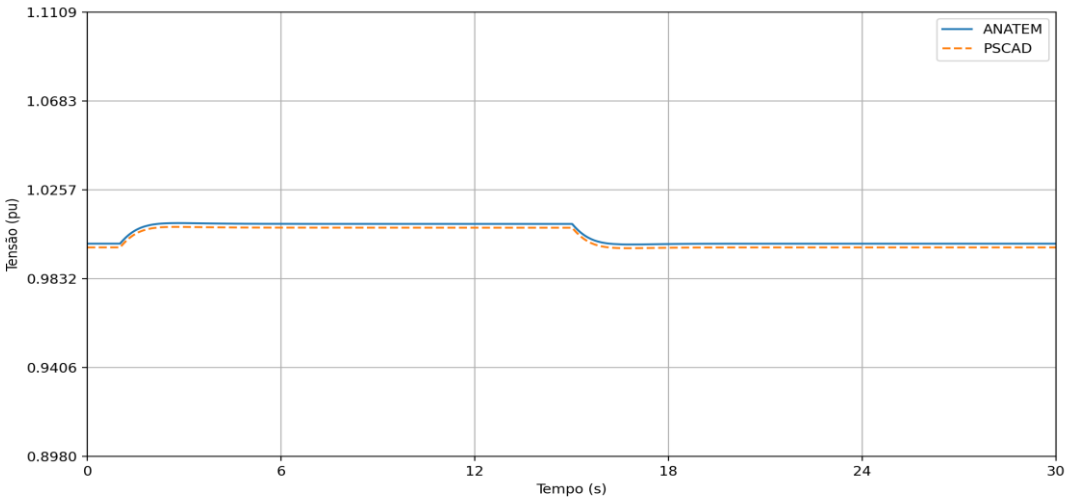

Figura 4-797 – Tensão terminal

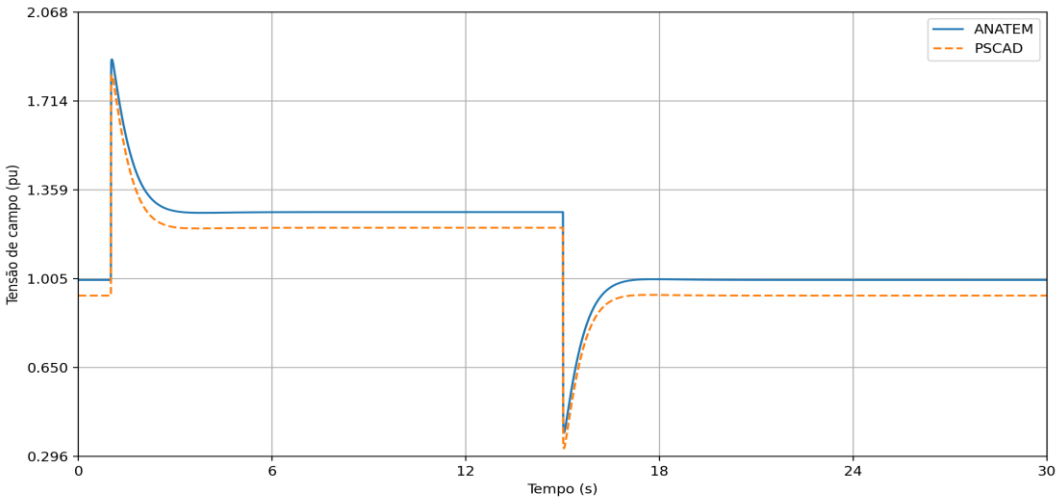

Figura 4-798 – Tensão de campo

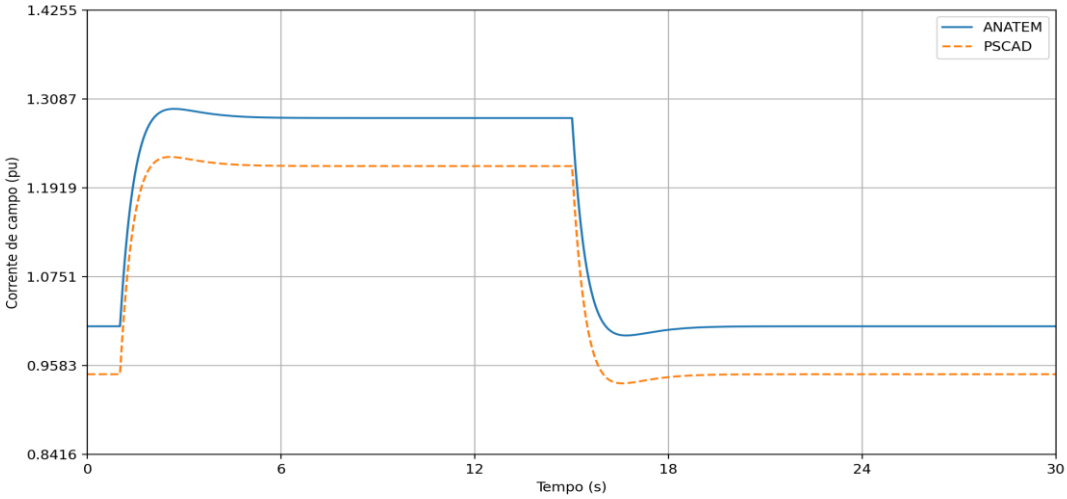

Figura 4-799 – Corrente de campo

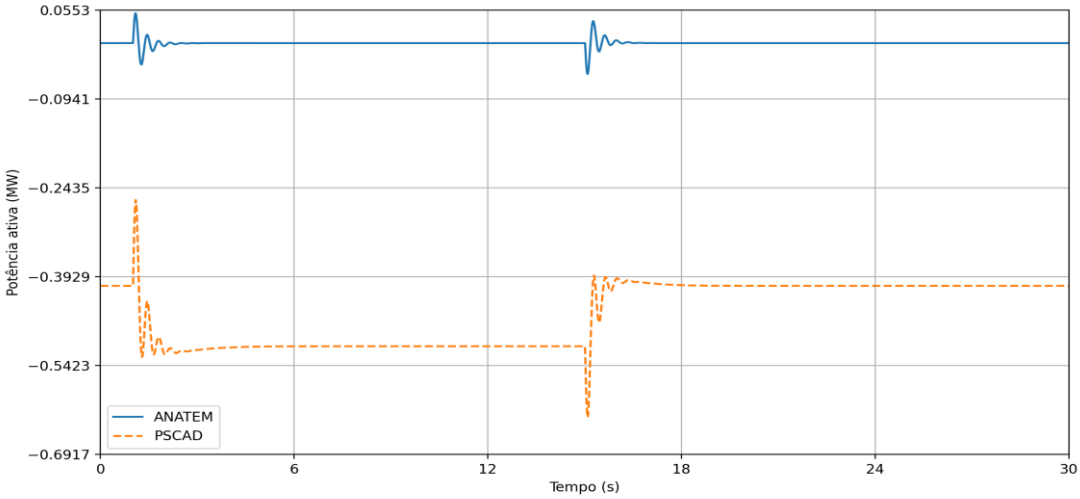

Figura 4-800 – Potência ativa

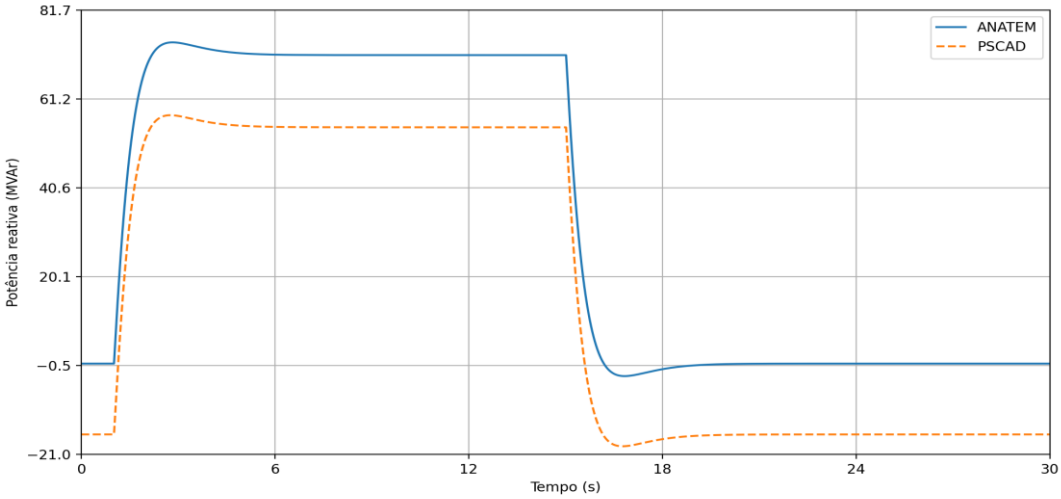

Figura 4-801 – Potência reativa

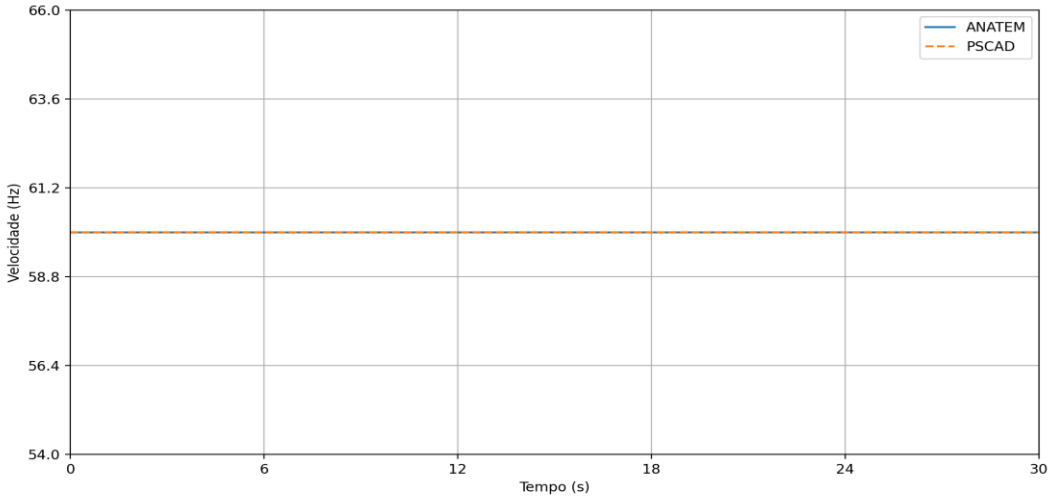

Figura 4-802 – Velocidade da máquina

4.32.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

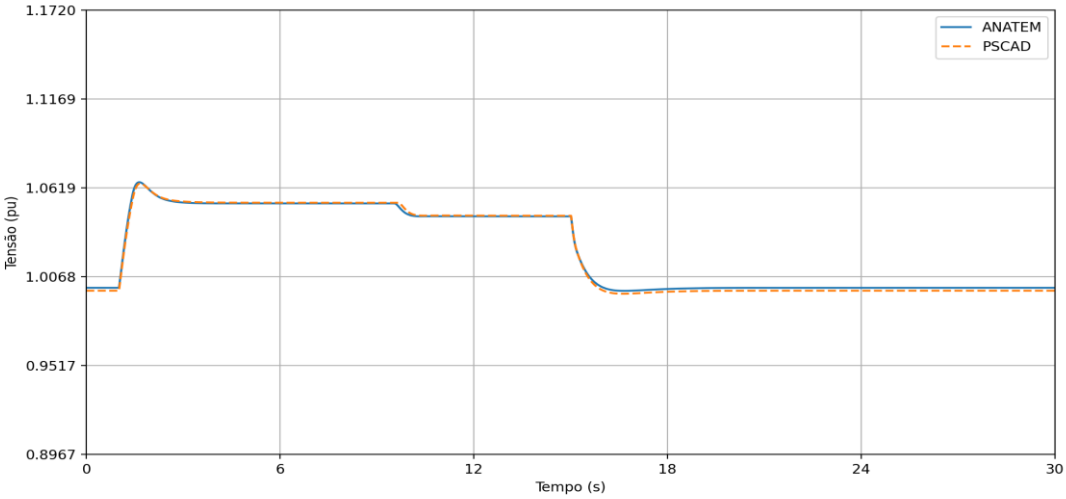

Figura 4-803 – Tensão terminal

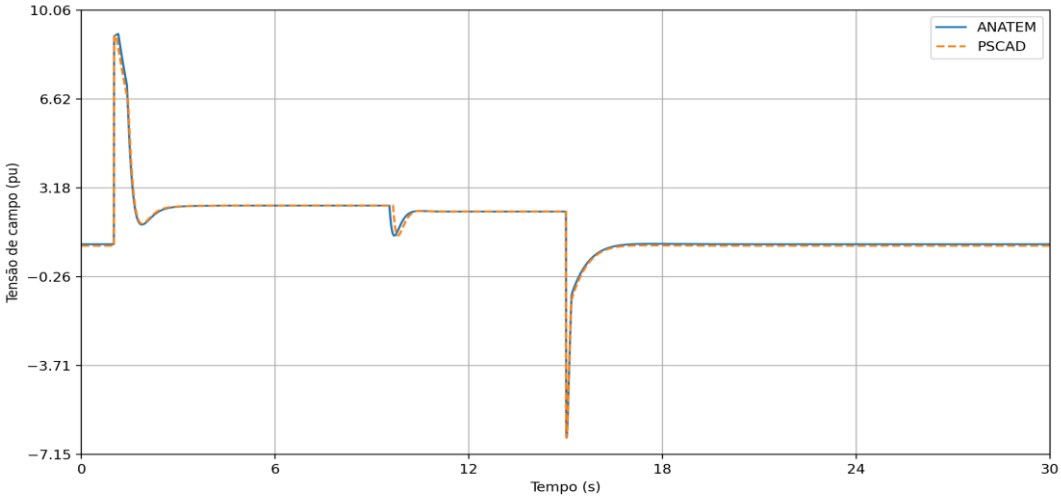

Figura 4-804 – Tensão de campo

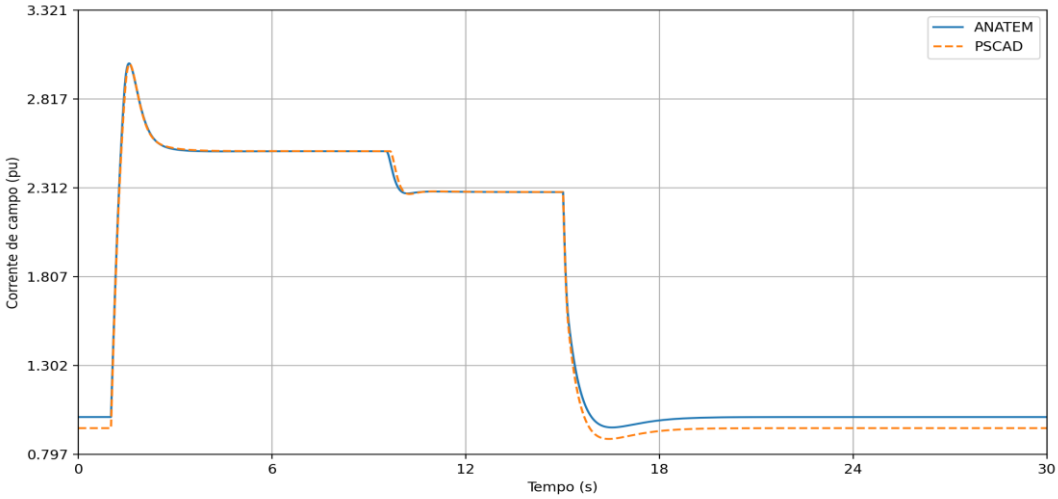

Figura 4-805 – Corrente de campo

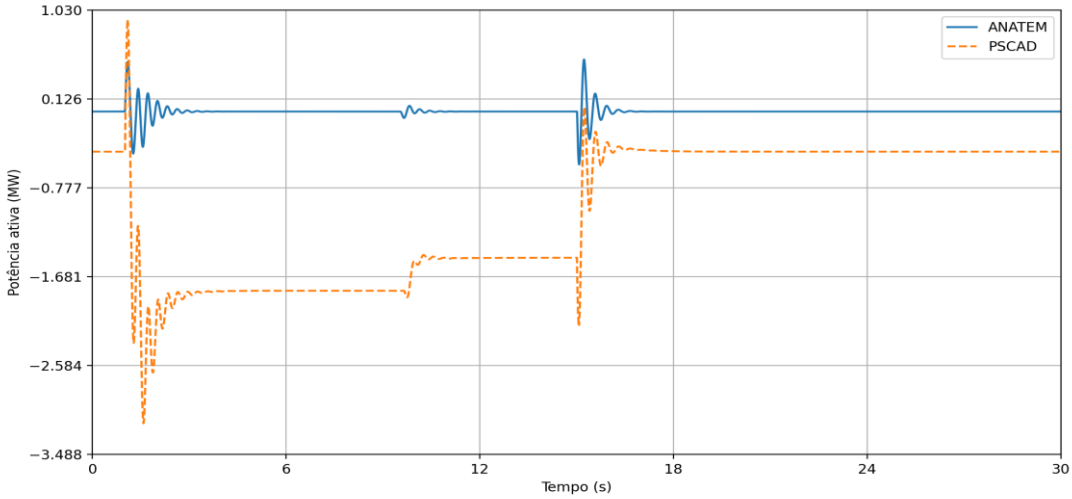

Figura 4-806 – Potência ativa

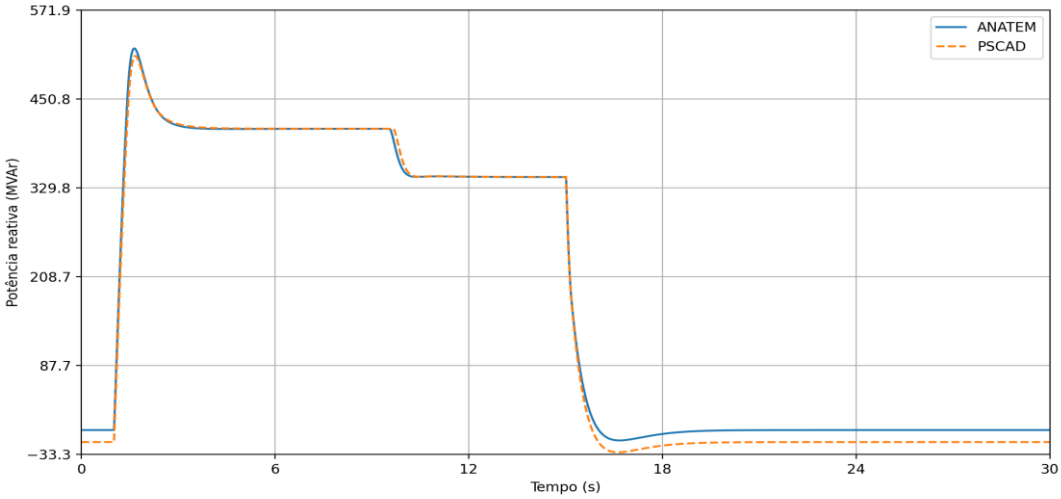

Figura 4-807 – Potência reativa

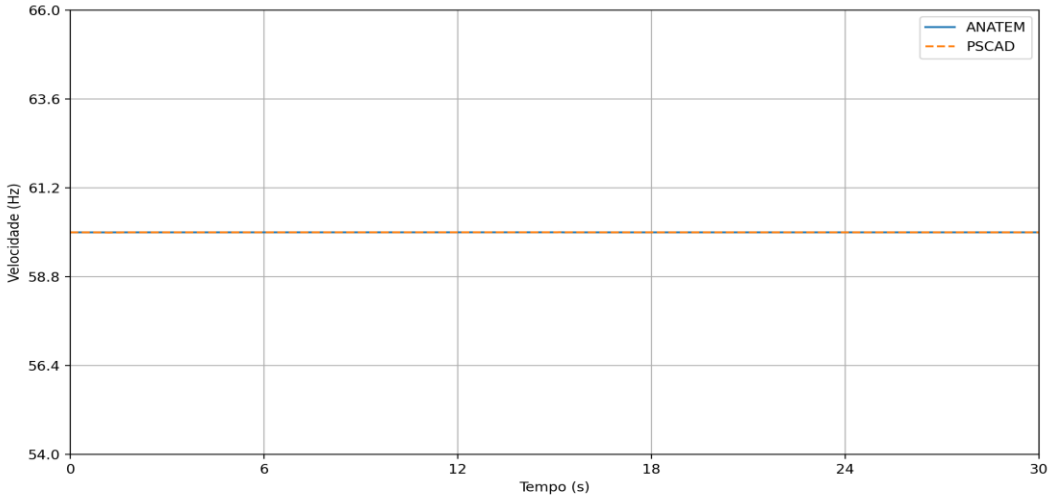

Figura 4-808 – Velocidade da máquina

4.33 UTE MARANHAO IV – GAS

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UTE Maranhão IV – gás, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.33.1 Modelo da UTE Maranhão IV – gás

A Tabela 4-97 apresenta os parâmetros da UTE Maranhão IV – gás disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-97 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	187	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	177	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	23,5	I(KA)	8,702	
x'q (%)	42,5	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	17,5	H(s)	5,14	
xl(%)	13	D(pu)	0	
T'd(s)	7	Ra(pu)	0,003	
T'q(s)	0,55	xp(pu)	0,13	Reatância de Potier
T''d(s)	0,04	xd(pu)	1,87	
T''q(s)	0,081	xd_(pu)	0,235	x'd
Ra(%)	0,26	Td0_(s)	7	T'd
H(s)	5,14	xd__(pu)	0,175	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,04	T''d
S(MVA)	208	Xq(pu)	1,77	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,425	x'q
		Tq0_(s)	0,55	T'q
		xq__(pu)	0,175	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,081	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.33.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-98, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UTE Maranhão IV – gás estão apresentados na Tabela 4-99. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-98, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-99. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-809.

Tabela 4-98 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UTE Maranhão IV – gás	
Ag	**Y1**	0,0047
Bg	**Y2**	12,1635
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-99 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,805	0,800
0,979	0,950
1,014	0,975
1,054	1,000
1,113	1,033
1,188	1,067
1,281	1,100
1,81	1,200
3,358	1,300

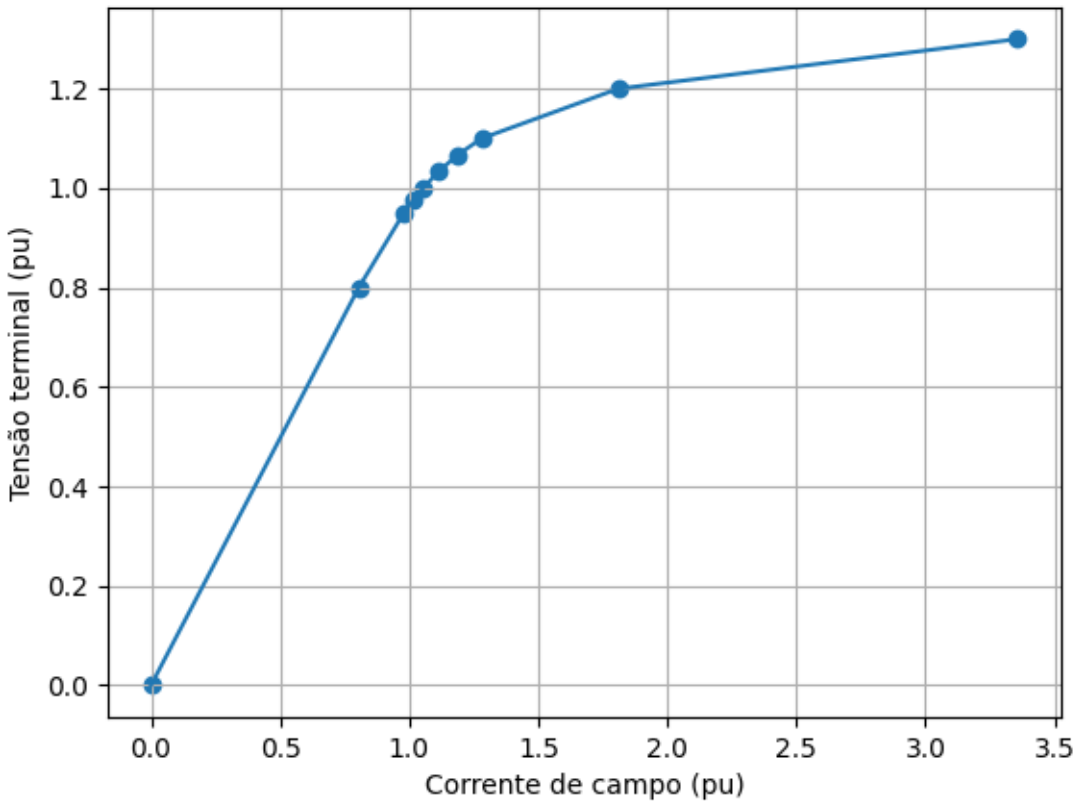

Figura 4-809 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.33.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.33.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.33.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.33.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

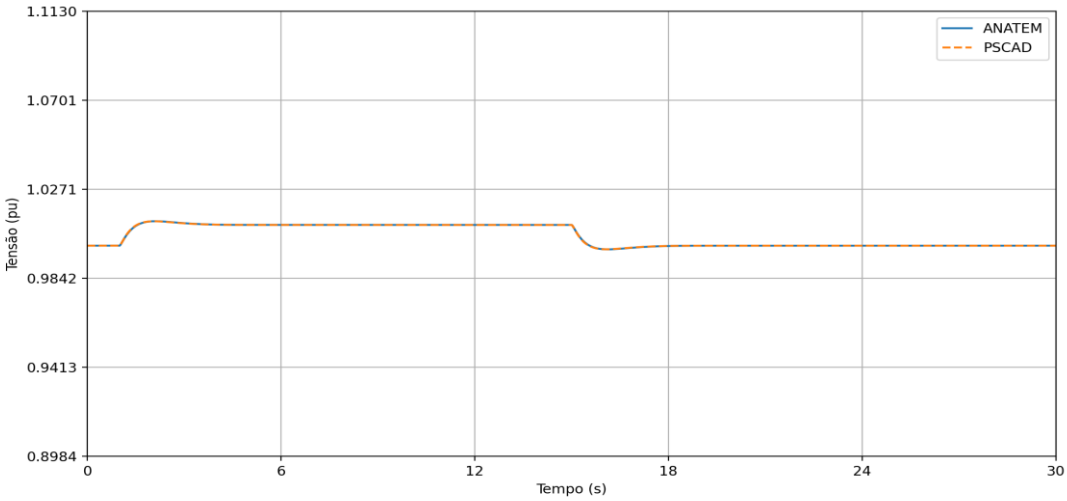

Figura 4-810 – Tensão terminal

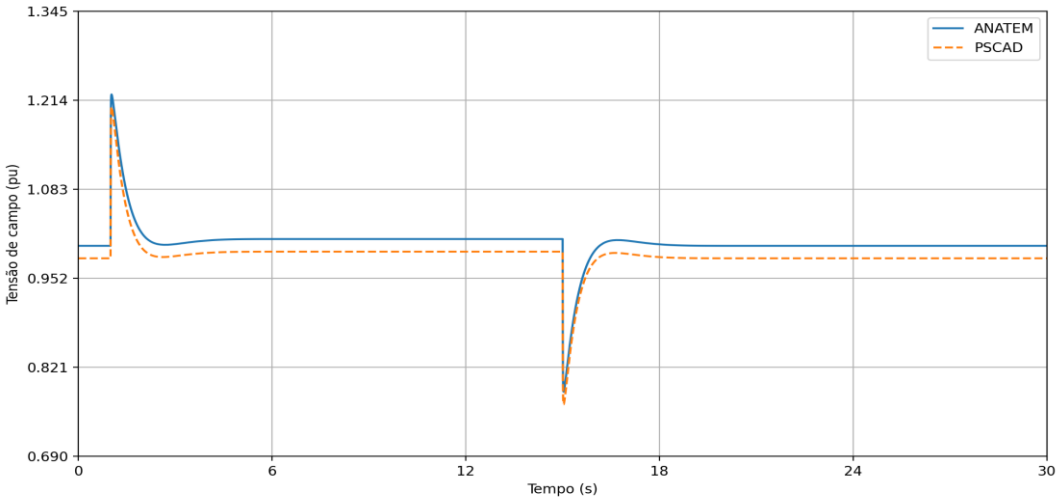

Figura 4-811 – Tensão de campo

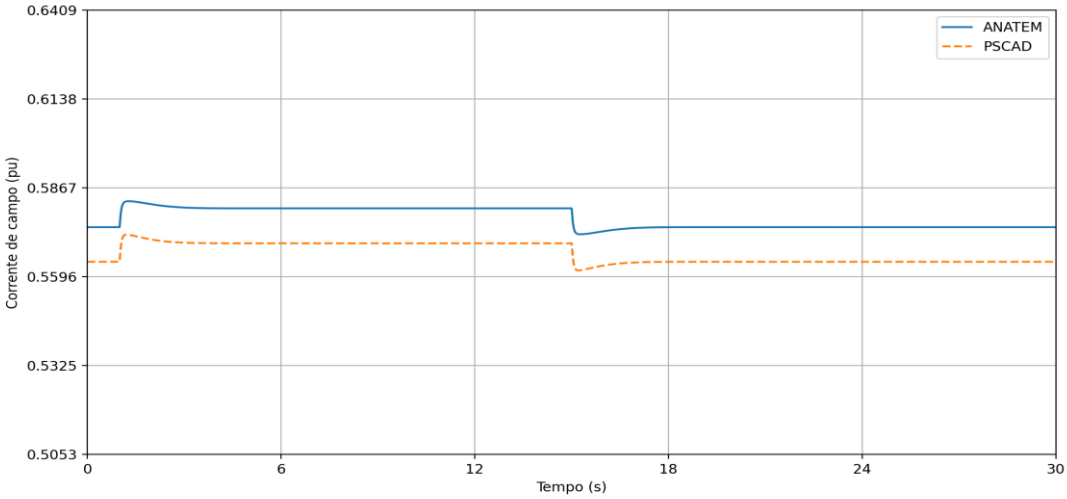

Figura 4-812 – Corrente de campo

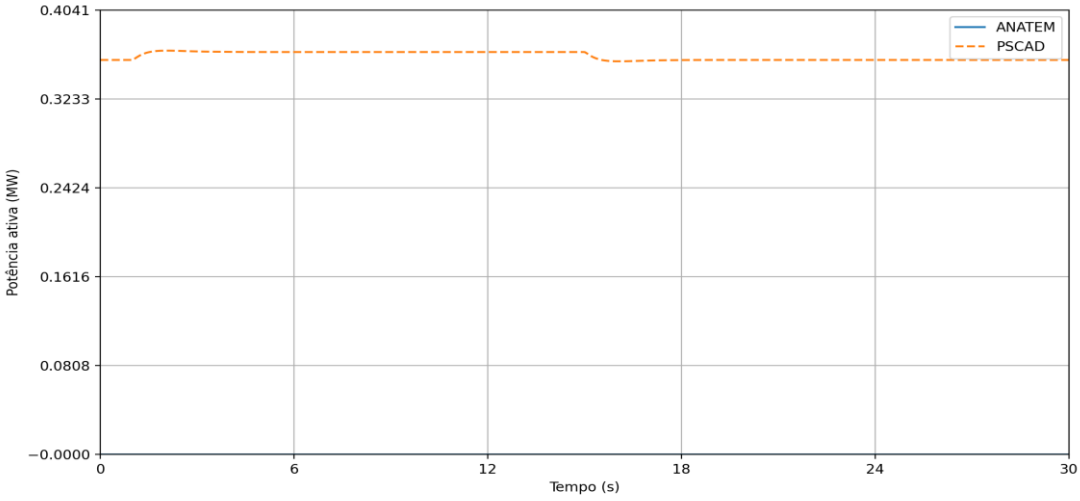

Figura 4-813 – Potência ativa

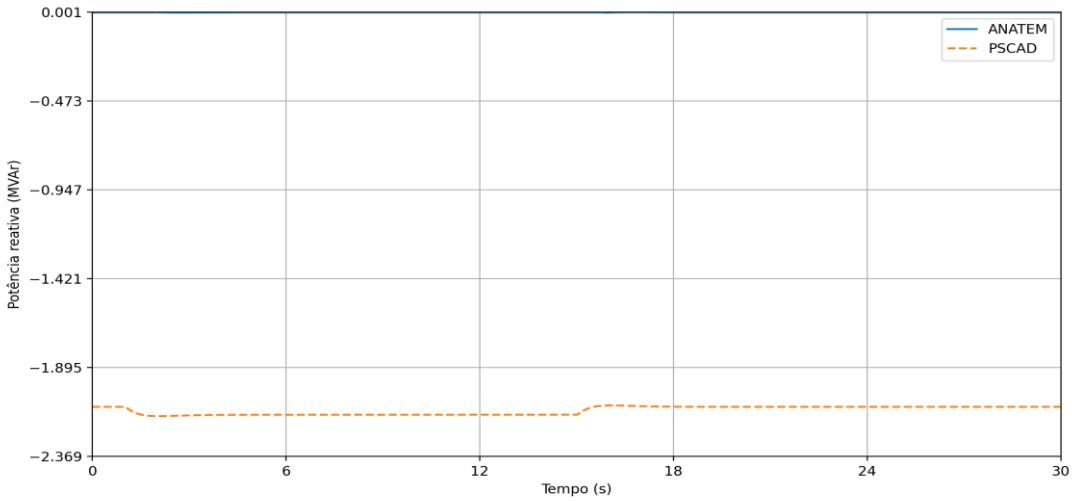

Figura 4-814 – Potência reativa

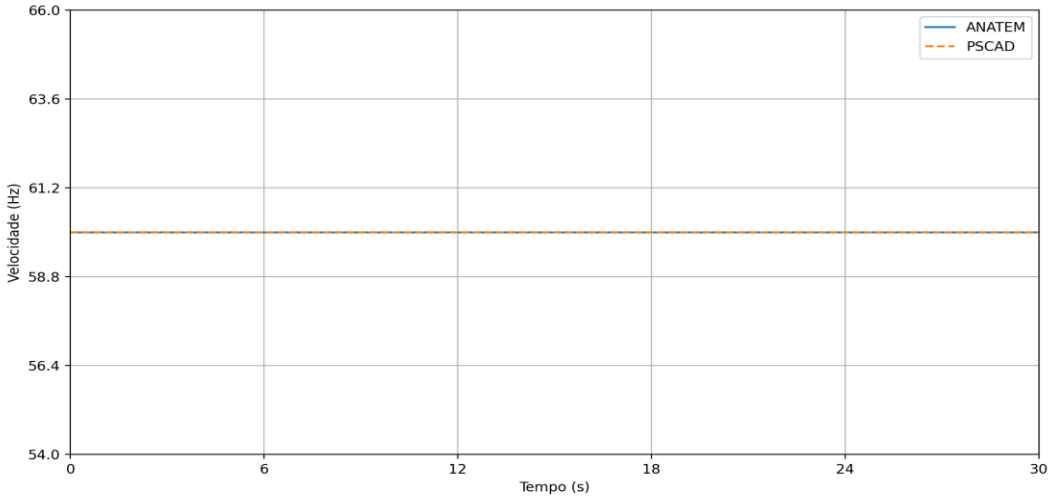

Figura 4-815 – Velocidade da máquina

4.33.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

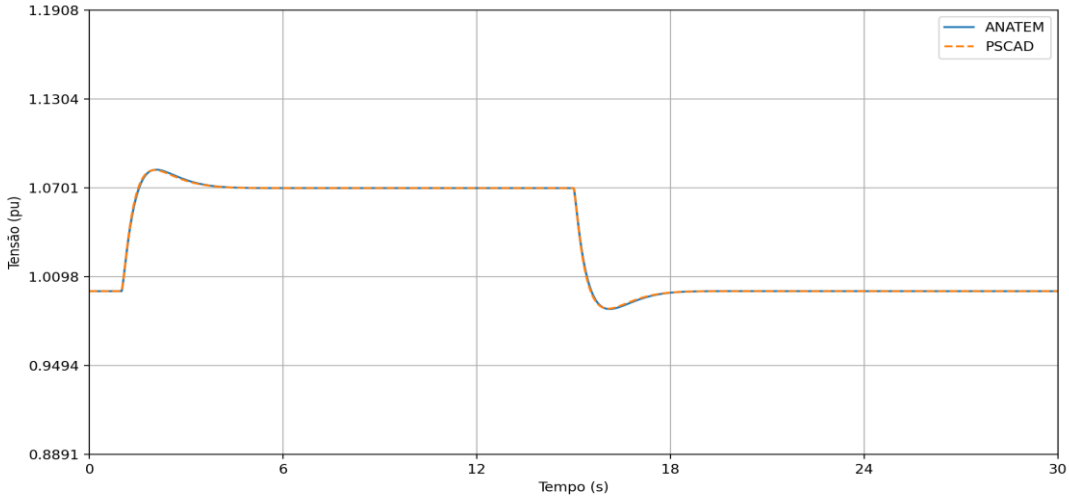

Figura 4-816 – Tensão terminal

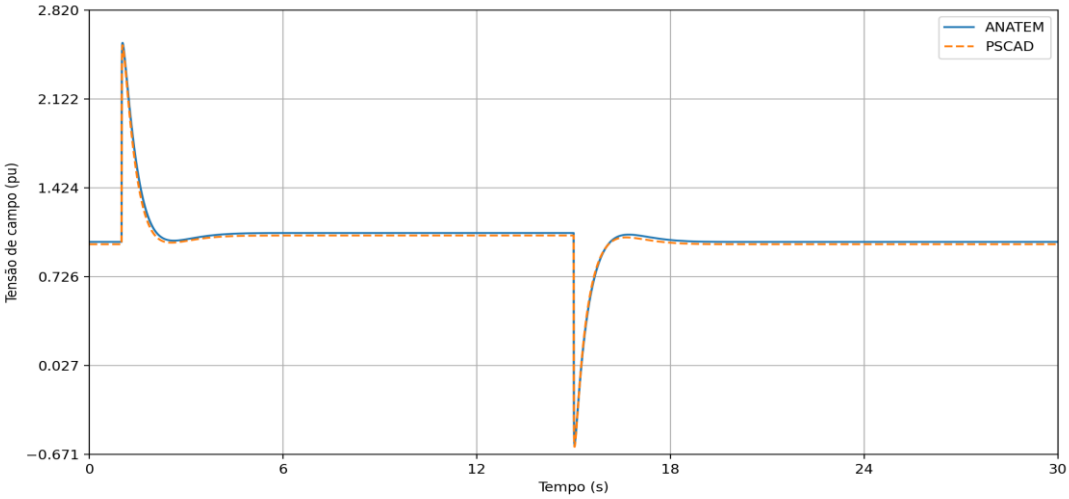

Figura 4-817 – Tensão de campo

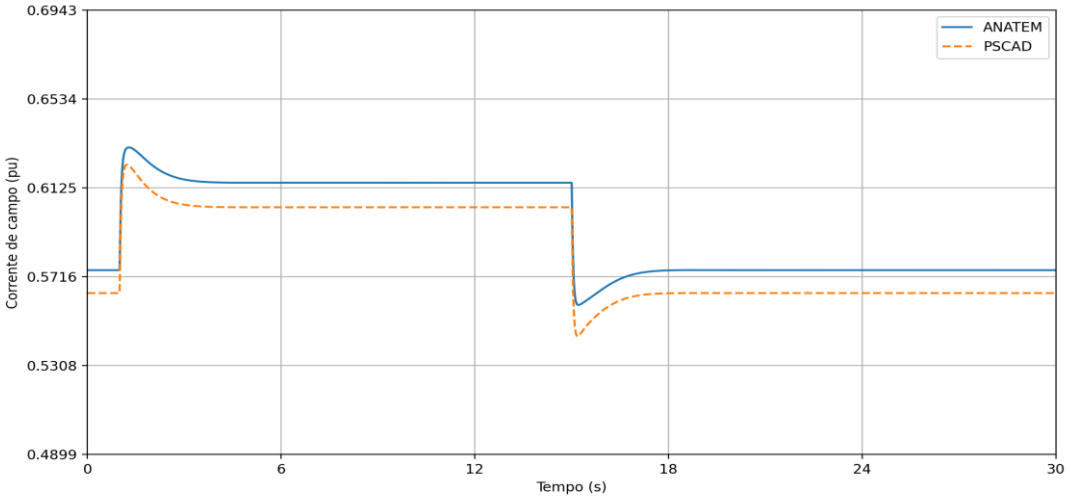

Figura 4-818 – Corrente de campo

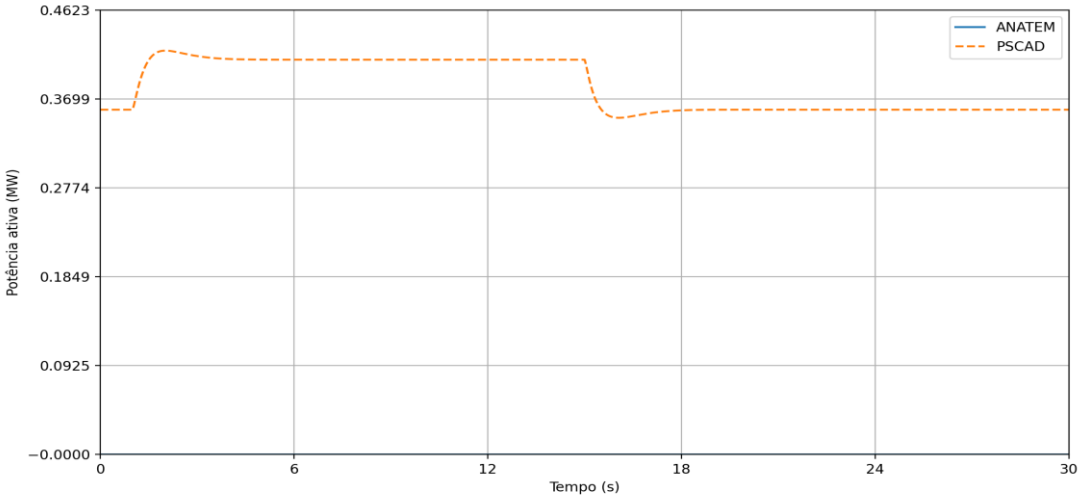

Figura 4-819 – Potência ativa

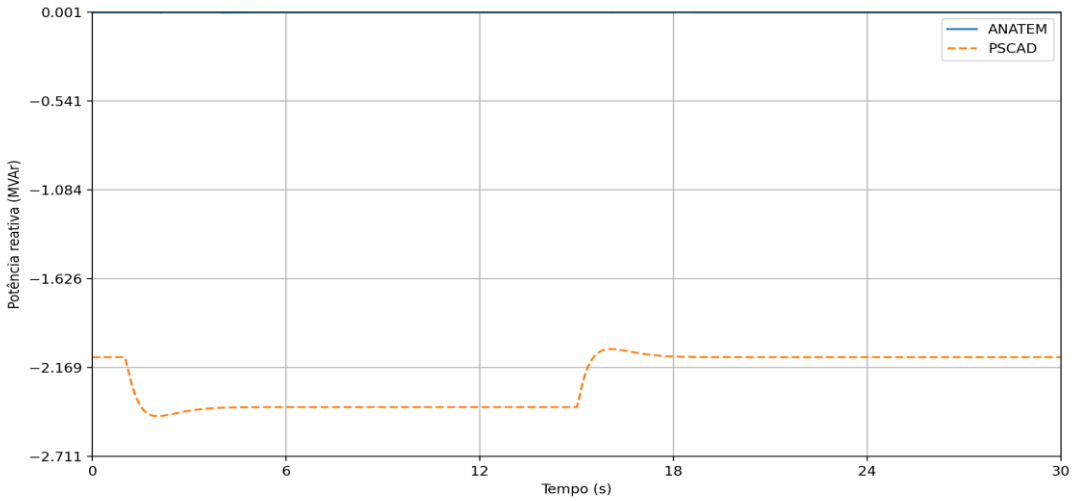

Figura 4-820 – Potência reativa

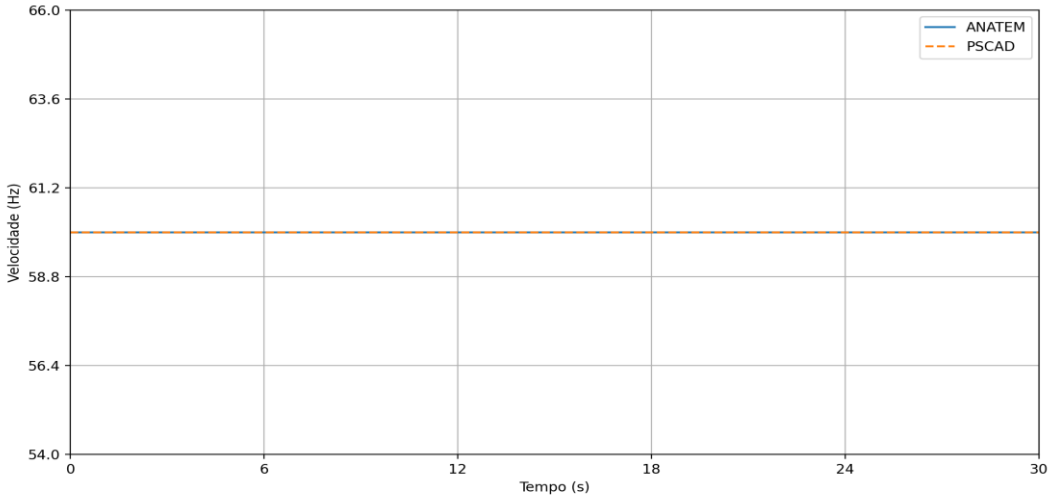

Figura 4-821 – Velocidade da máquina

4.33.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.33.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.33.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.33.4.3.

4.33.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

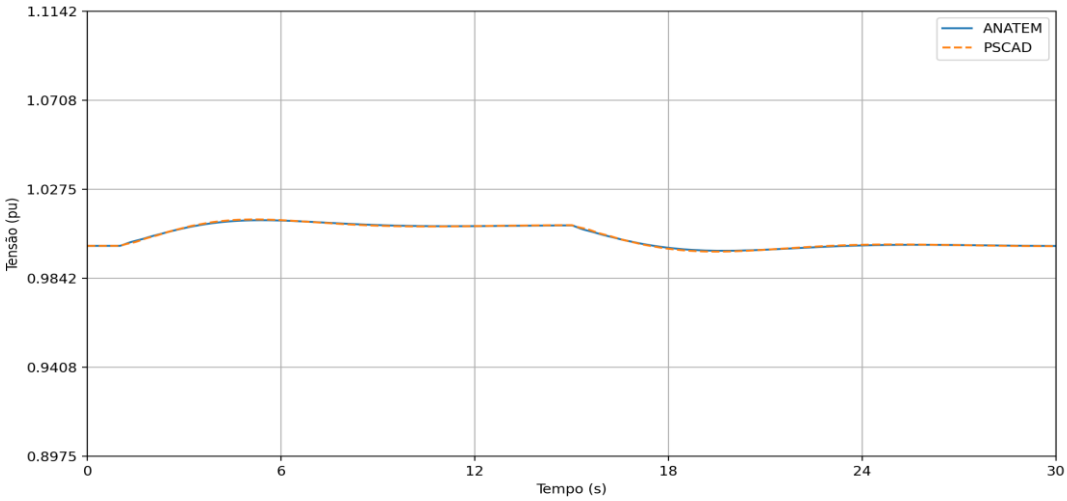

Figura 4-822 – Tensão terminal

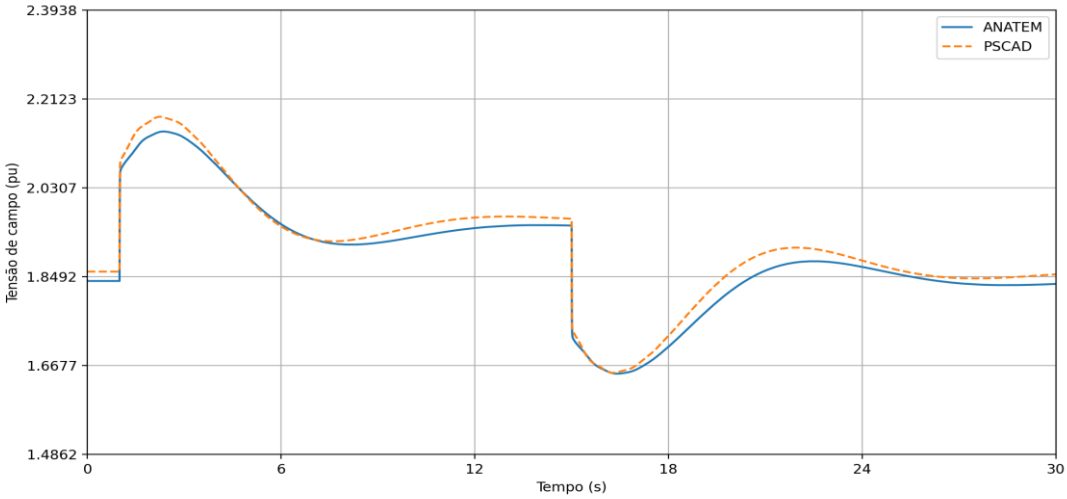

Figura 4-823 – Tensão de campo

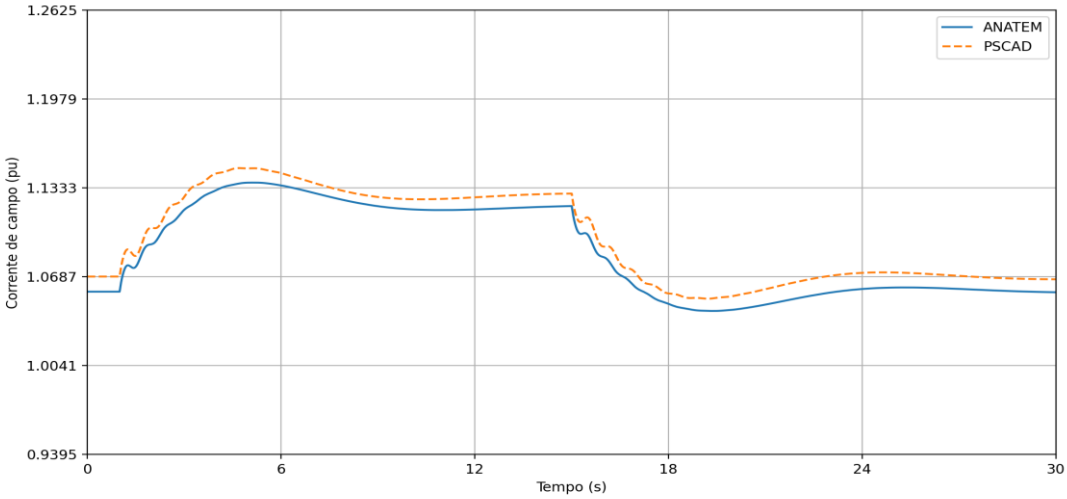

Figura 4-824 – Corrente de campo

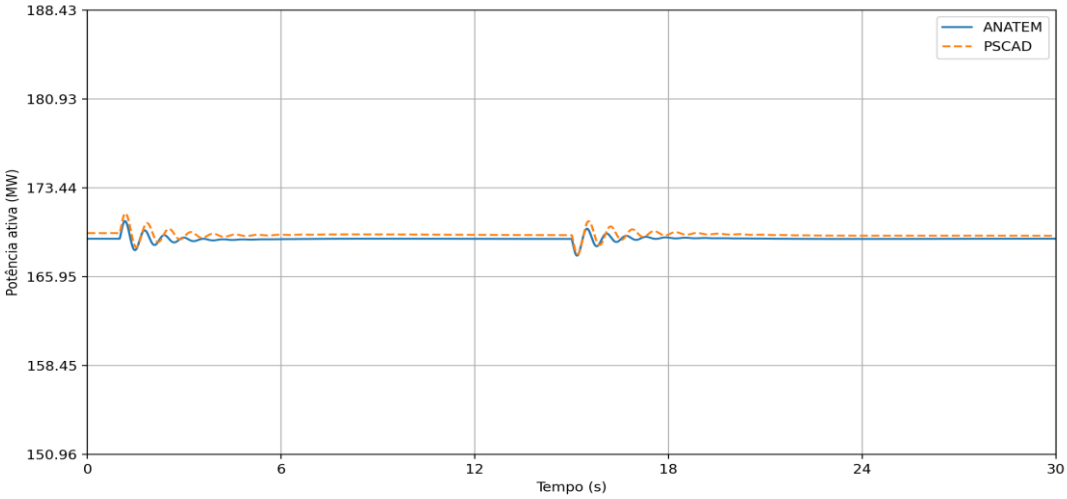

Figura 4-825 – Potência ativa

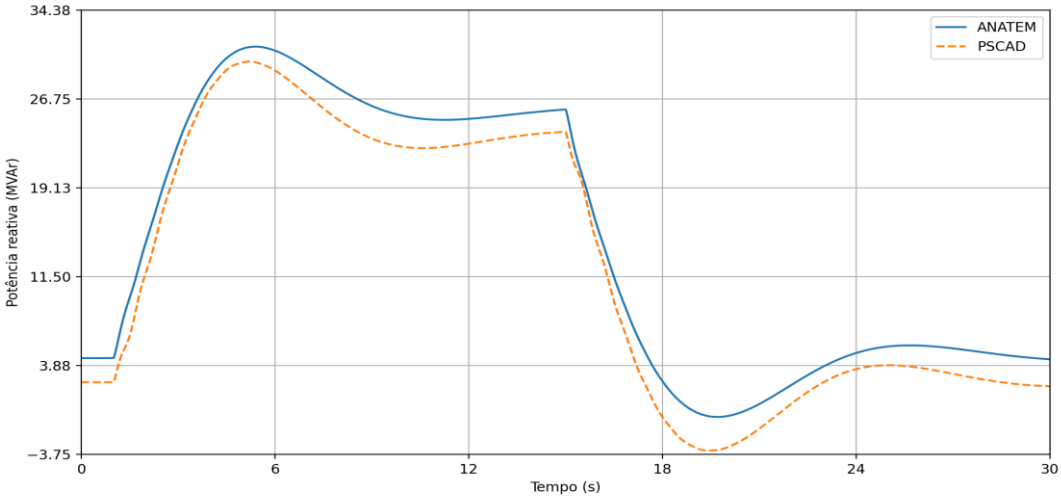

Figura 4-826 – Potência reativa

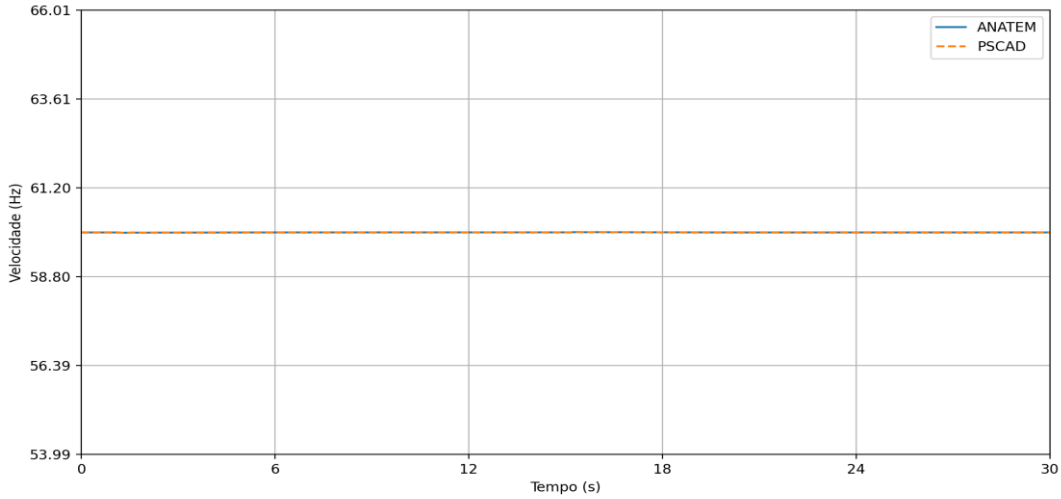

Figura 4-827 – Velocidade da máquina

4.33.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

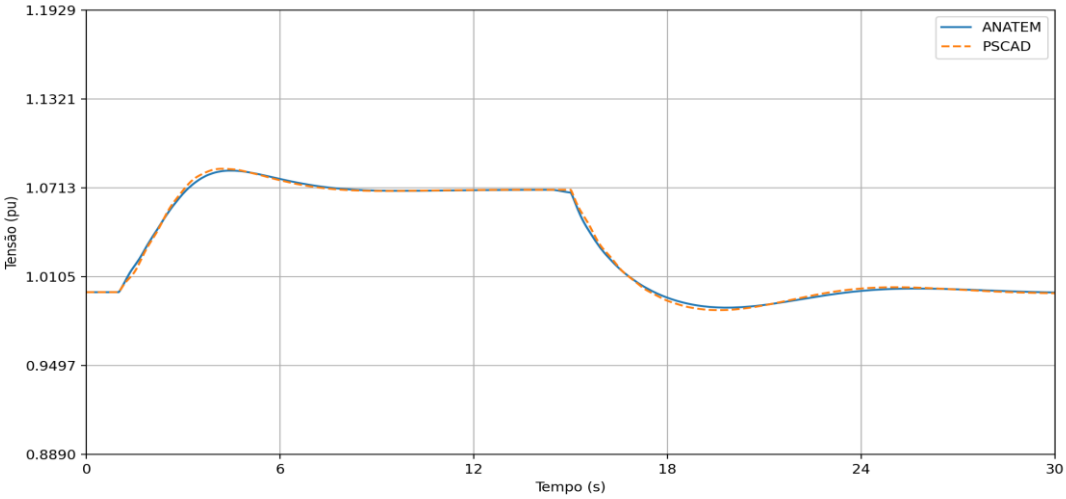

Figura 4-828 – Tensão terminal

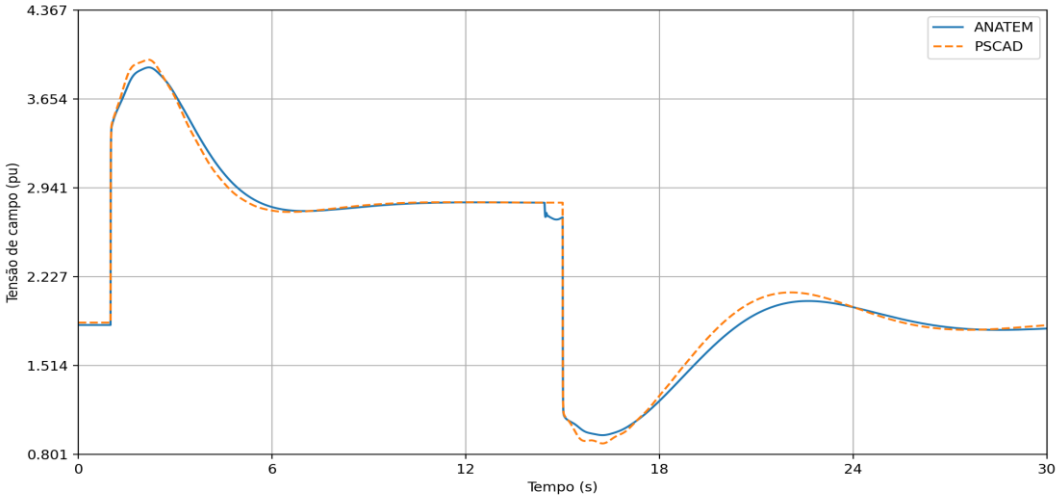

Figura 4-829 – Tensão de campo

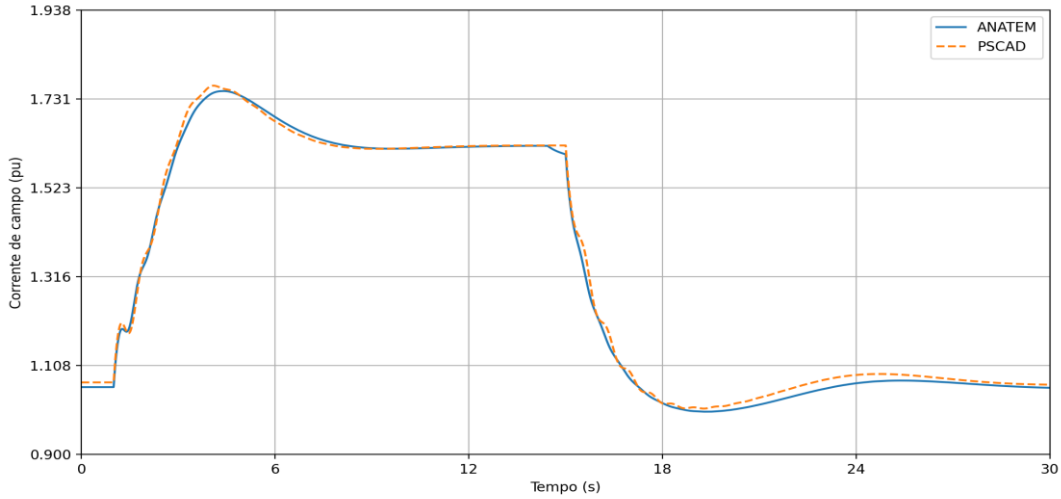

Figura 4-830 – Corrente de campo

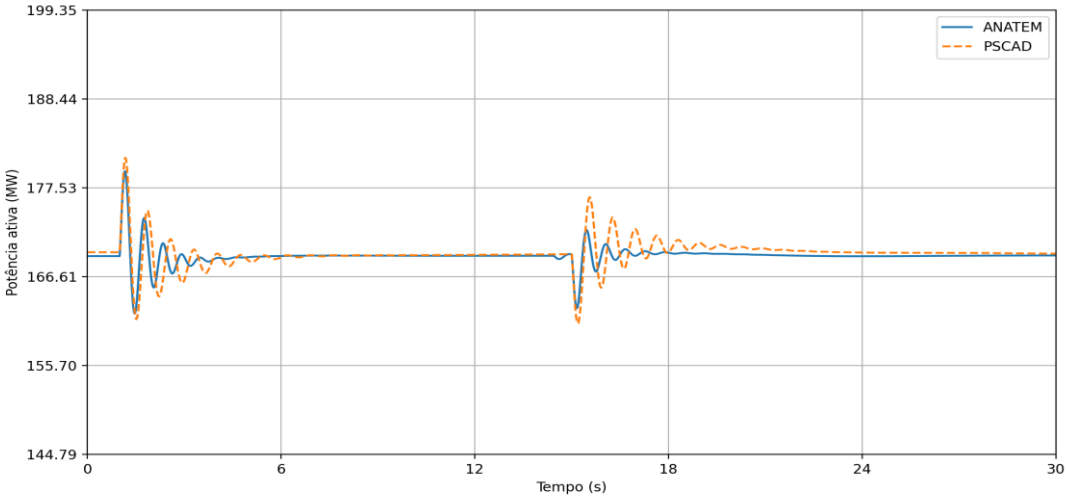

Figura 4-831 – Potência ativa

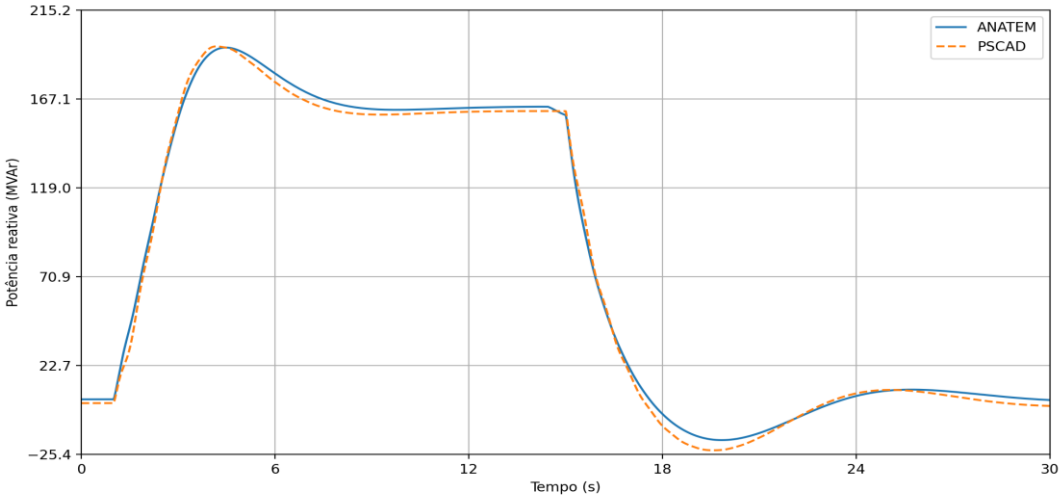

Figura 4-832 – Potência reativa

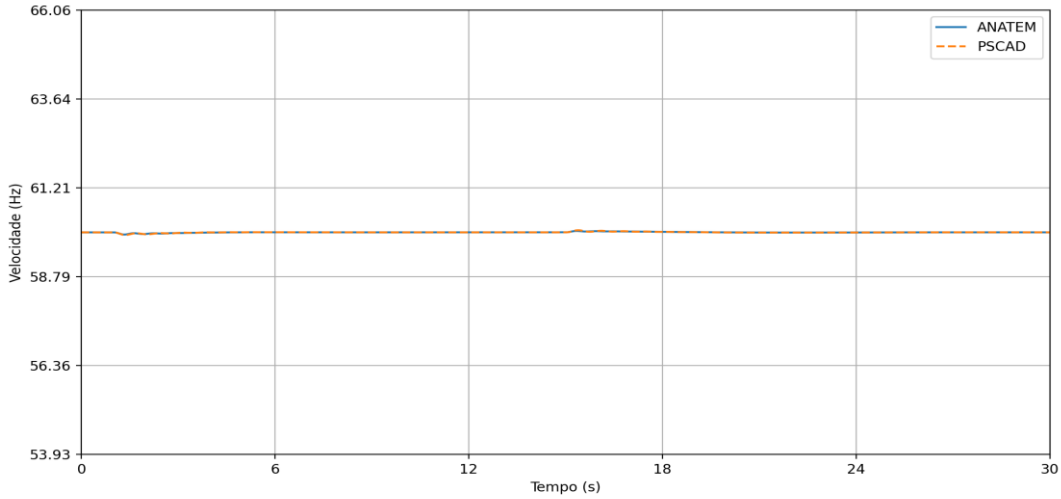

Figura 4-833 – Velocidade da máquina

4.33.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

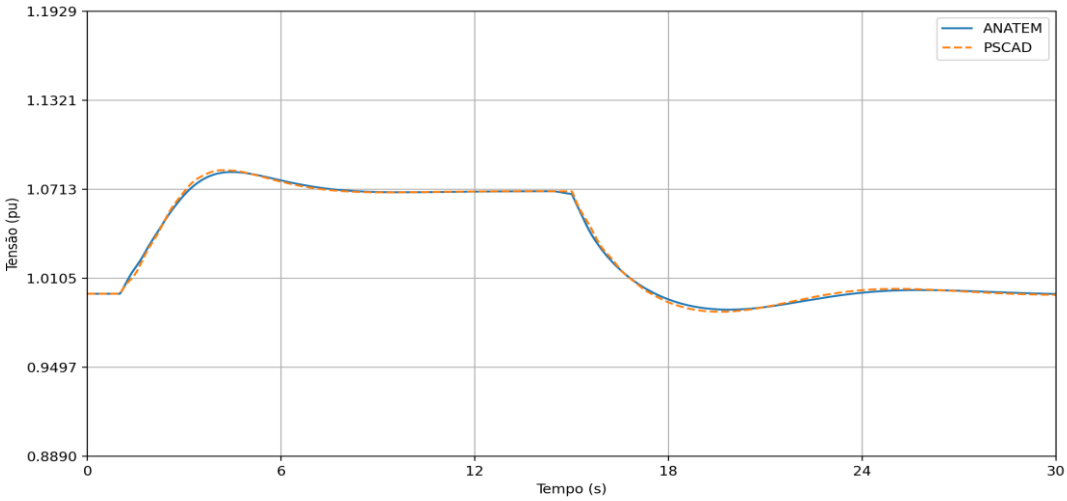

Figura 4-834 – Tensão terminal

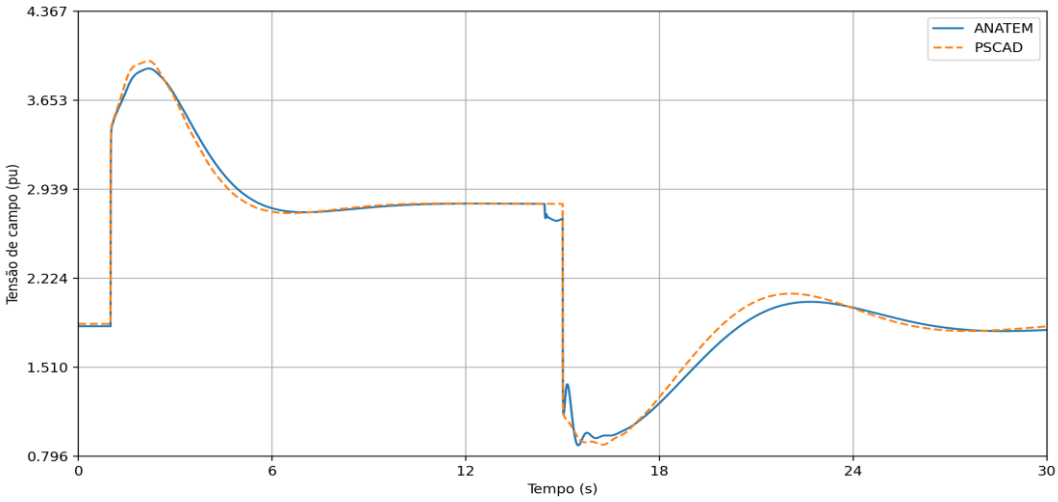

Figura 4-835 – Tensão de campo

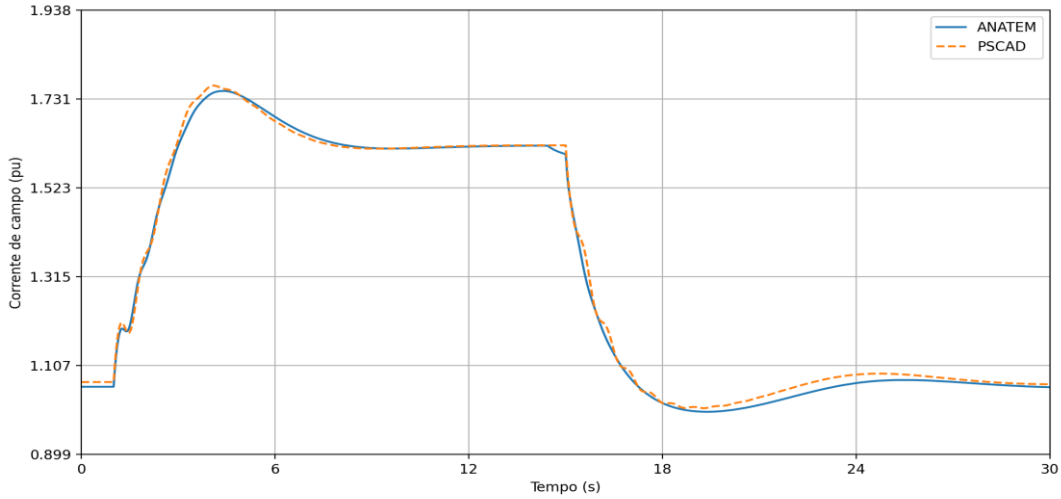

Figura 4-836 – Corrente de campo

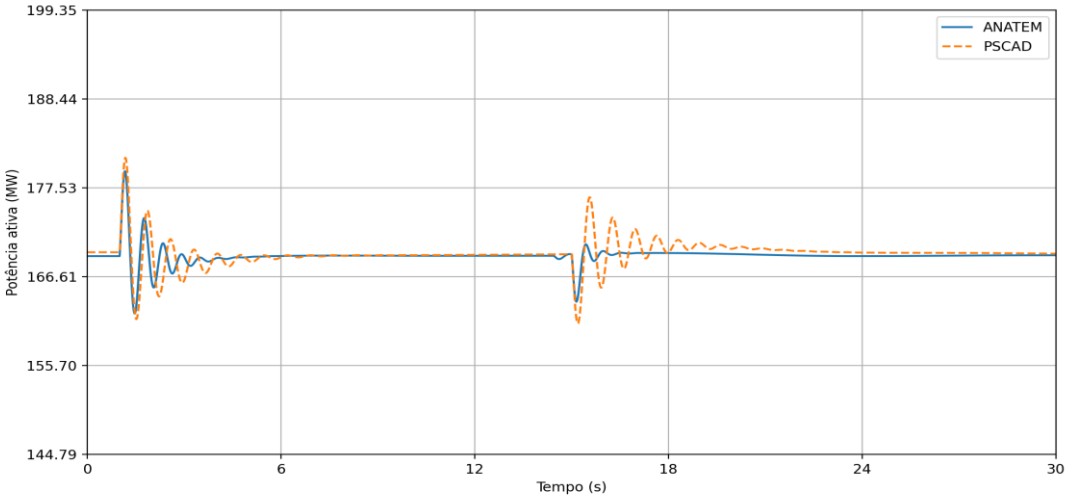

Figura 4-837 – Potência ativa

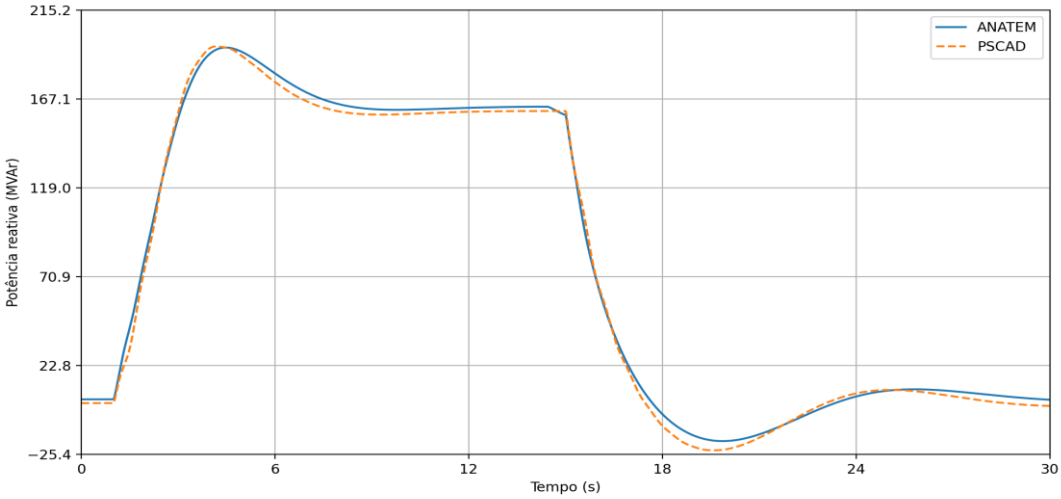

Figura 4-838 – Potência reativa

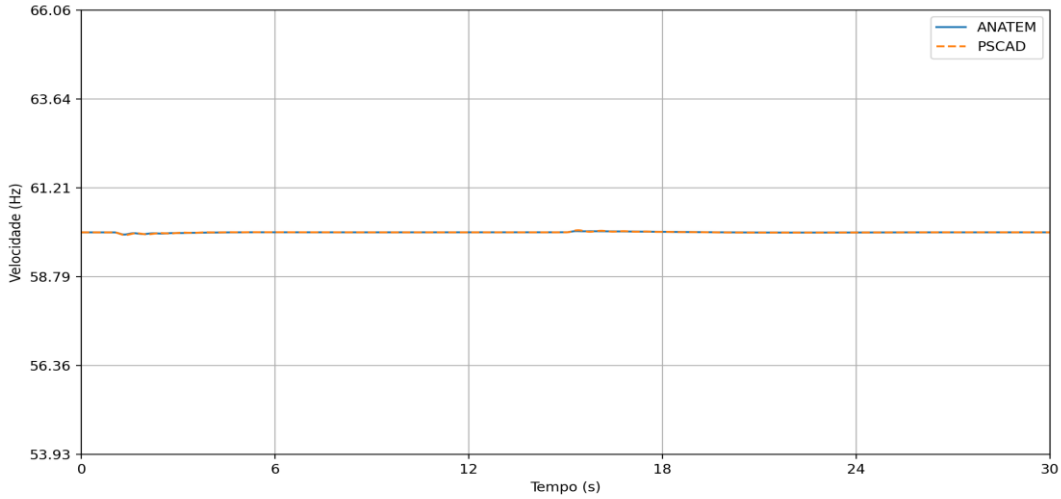

Figura 4-839 – Velocidade da máquina

4.34 UTE MARANHAO V – GÁS

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UTE Maranhão V – gás, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.34.1 Modelo da UTE Maranhão V – gás

A Tabela 4-100 apresenta os parâmetros da UTE Maranhão V – gás disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-100 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	187	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	177	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	23,5	I(KA)	8,702	
x'q (%)	42,5	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	17,5	H(s)	5,14	
xl(%)	13	D(pu)	0	
T'd(s)	7	Ra(pu)	0,003	
T'q(s)	0,55	xp(pu)	0,13	Reatância de Potier
T''d(s)	0,04	xd(pu)	1,87	
T''q(s)	0,081	xd_(pu)	0,235	x'd
Ra(%)	0,26	Td0_(s)	7	T'd
H(s)	5,14	xd__(pu)	0,175	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,04	T''d
S(MVA)	208	Xq(pu)	1,77	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,425	x'q
		Tq0_(s)	0,55	T'q
		xq__(pu)	0,175	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,081	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.34.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na

Tabela 4-101, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UTE Maranhão V – gás estão apresentados na Tabela 4-102. A partir dos parâmetros da

Tabela 4-101, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-102. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-840.

Tabela 4-101 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UTE Maranhão V – gás	
Ag	**Y1**	0,0047
Bg	**Y2**	12,1635
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-102 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,805	0,800
0,979	0,950
1,014	0,975
1,054	1,000
1,113	1,033
1,188	1,067
1,281	1,100
1,81	1,200
3,358	1,300

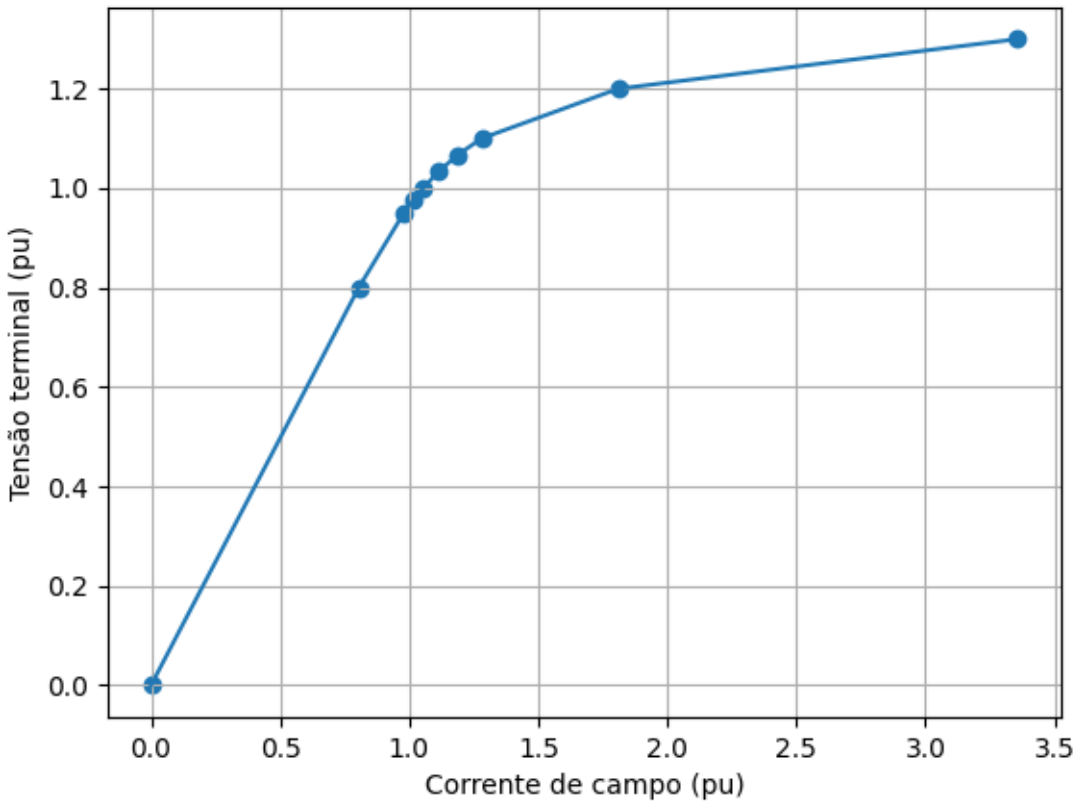

Figura 4-840 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio, Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.34.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.34.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.34.3.2, Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.34.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

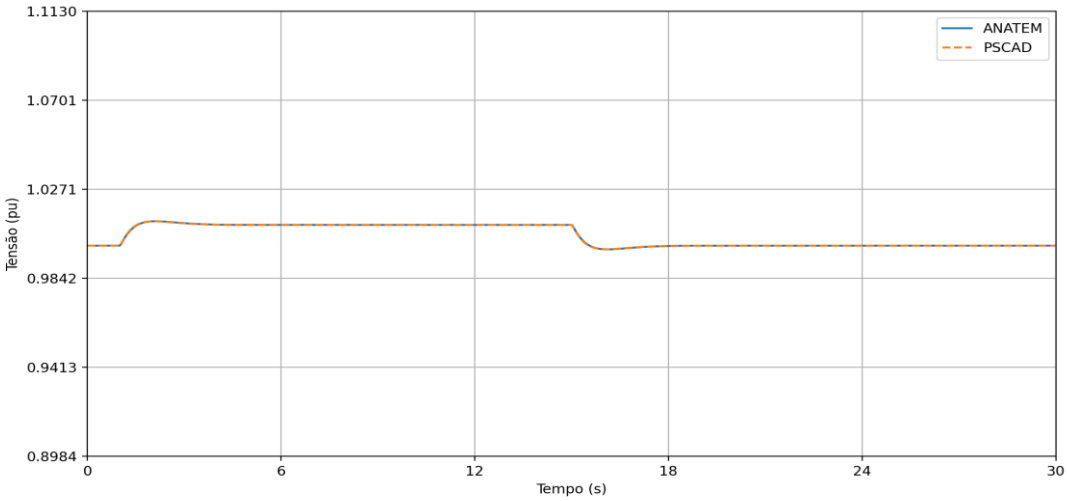

Figura 4-841 – Tensão terminal

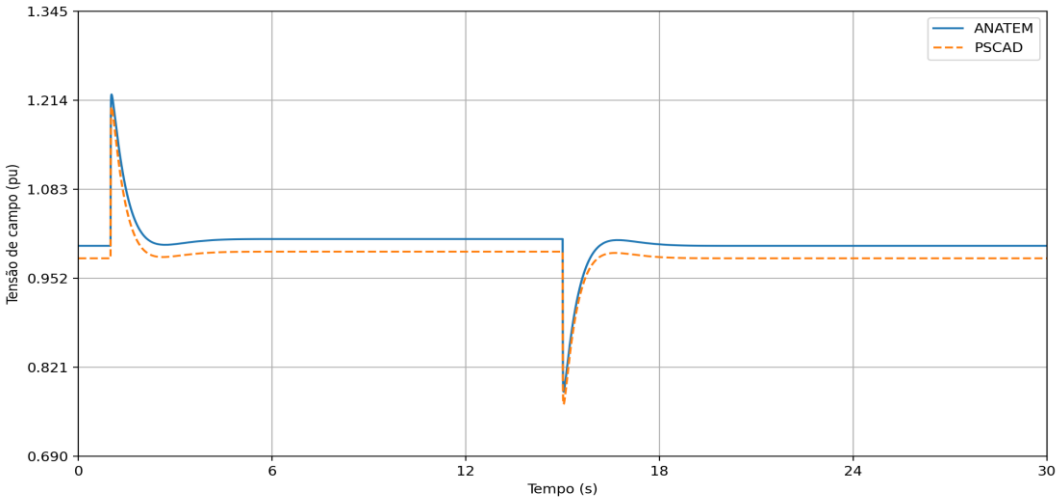

Figura 4-842 – Tensão de campo

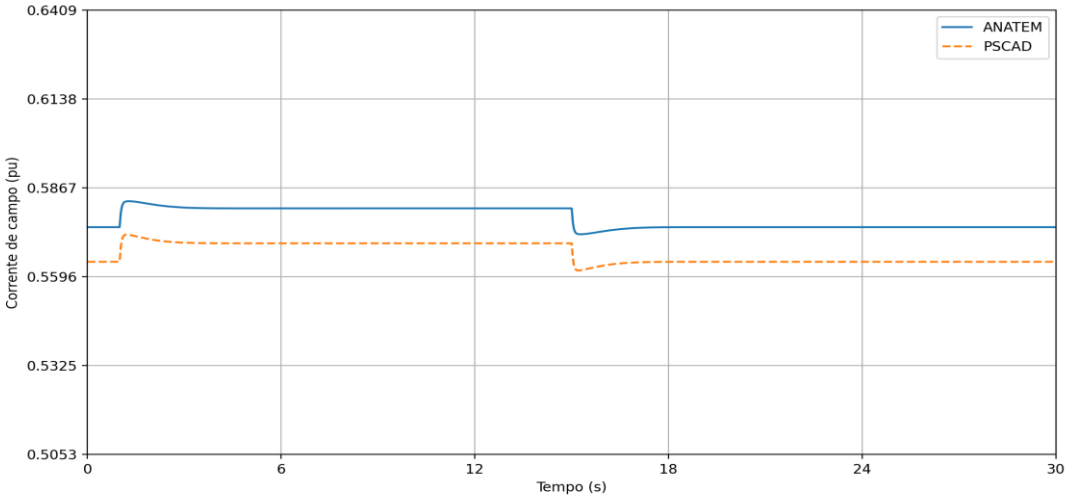

Figura 4-843 – Corrente de campo

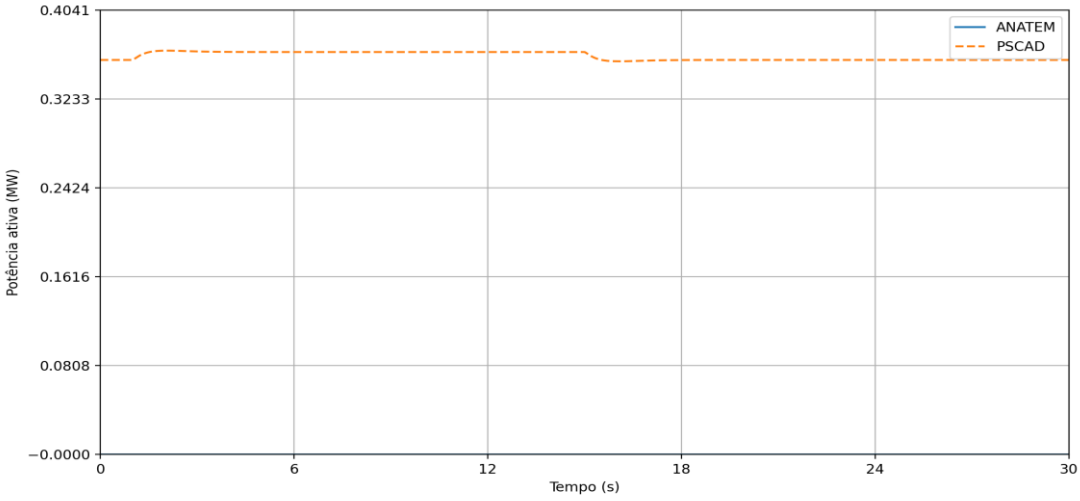

Figura 4-844 – Potência ativa

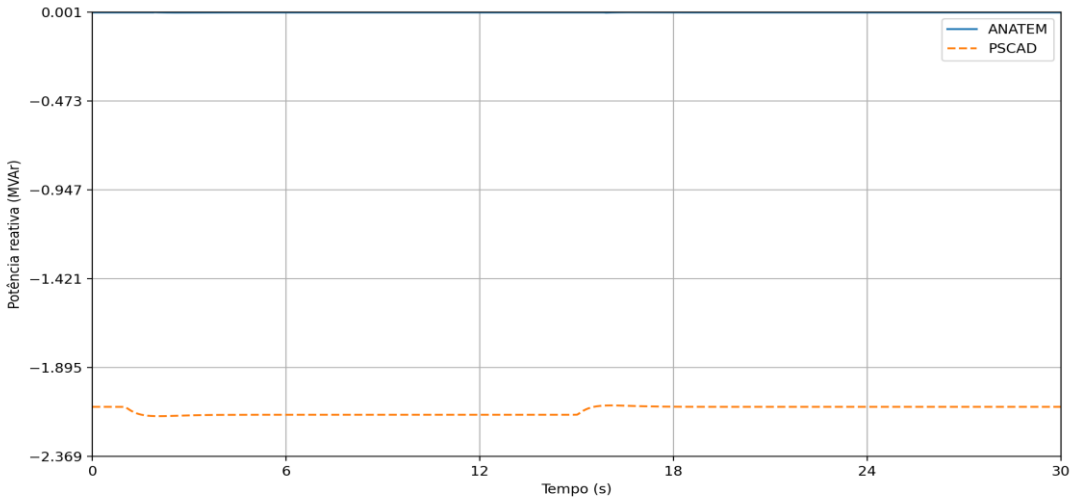

Figura 4-845 – Potência reativa

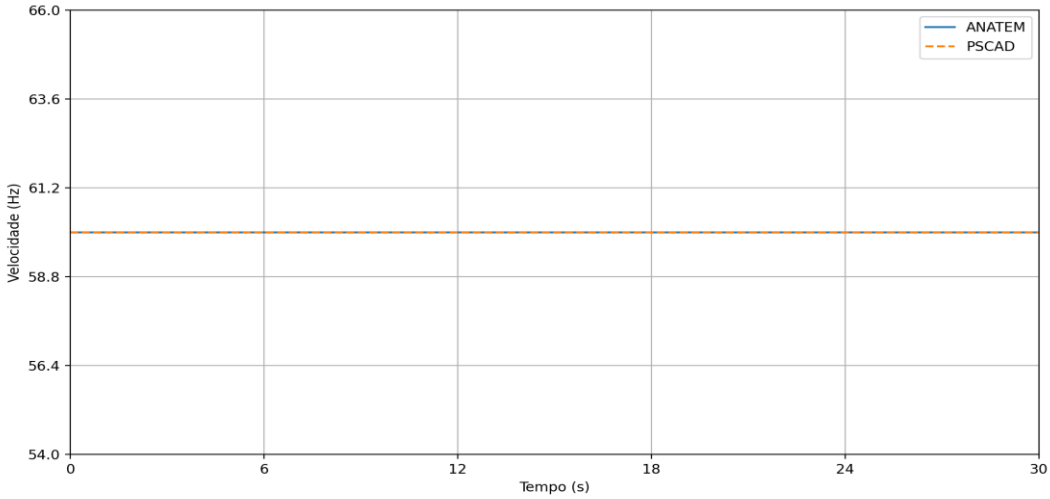

Figura 4-846 – Velocidade da máquina

4.34.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

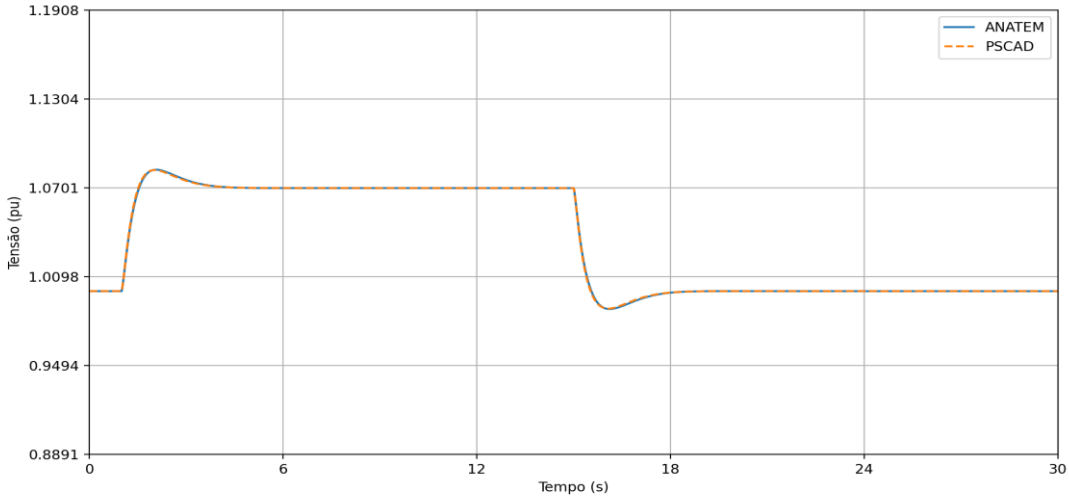

Figura 4-847 – Tensão terminal

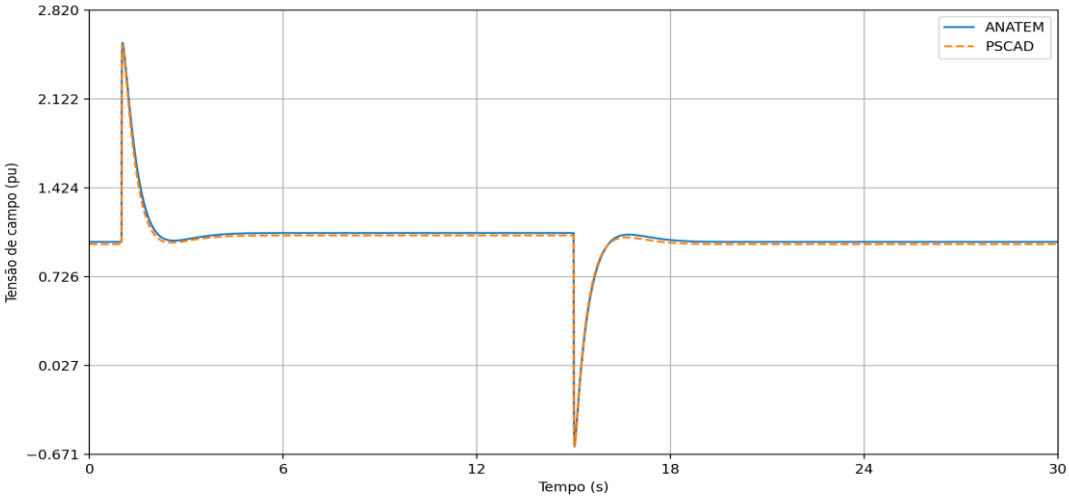

Figura 4-848 – Tensão de campo

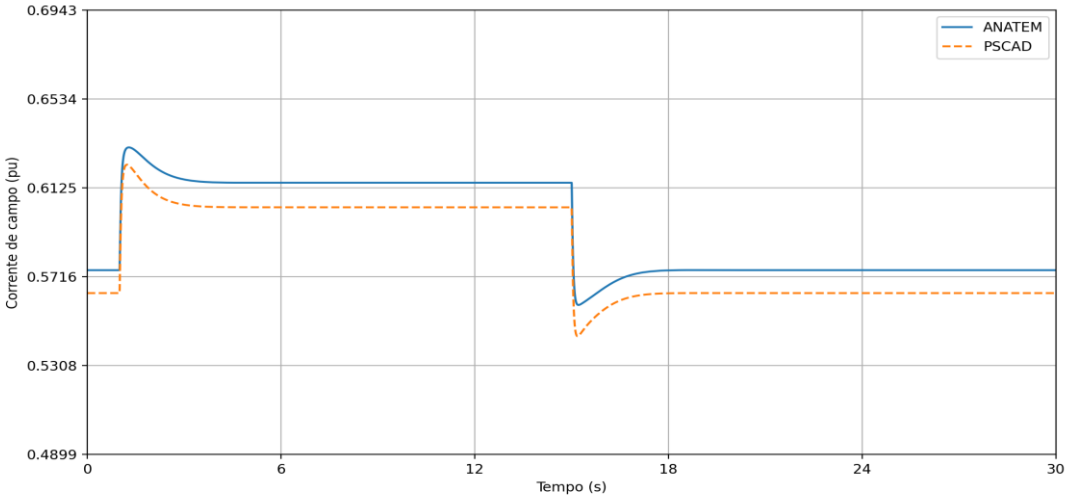

Figura 4-849 – Corrente de campo

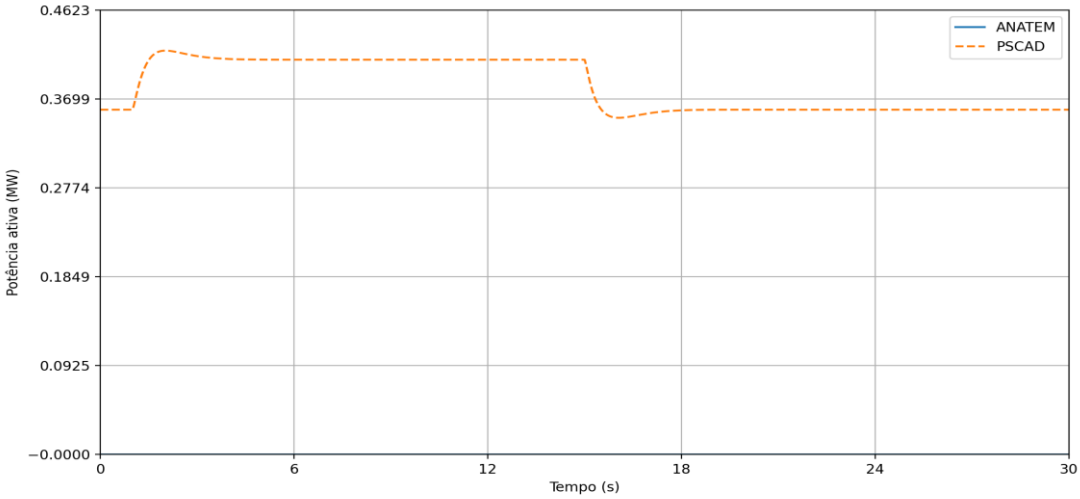

Figura 4-850 – Potência ativa

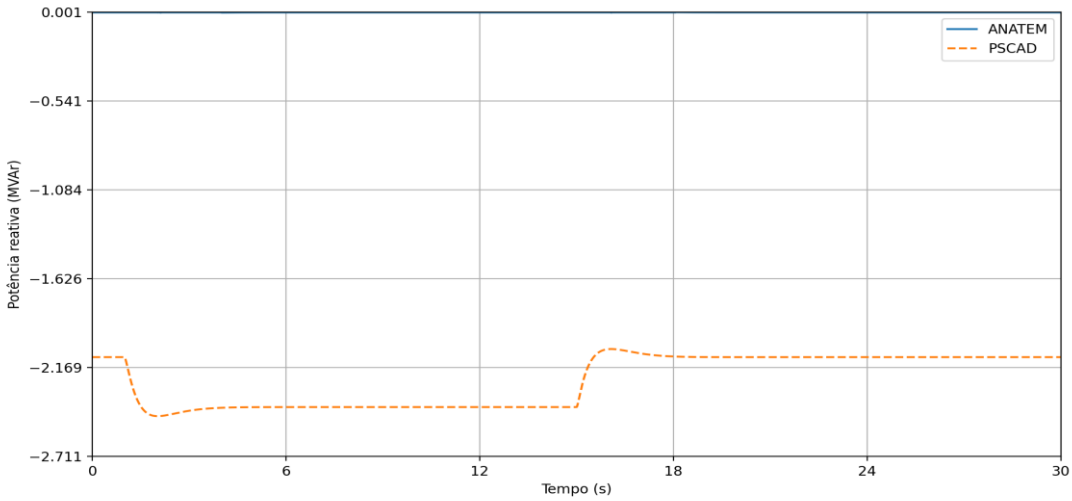

Figura 4-851 – Potência reativa

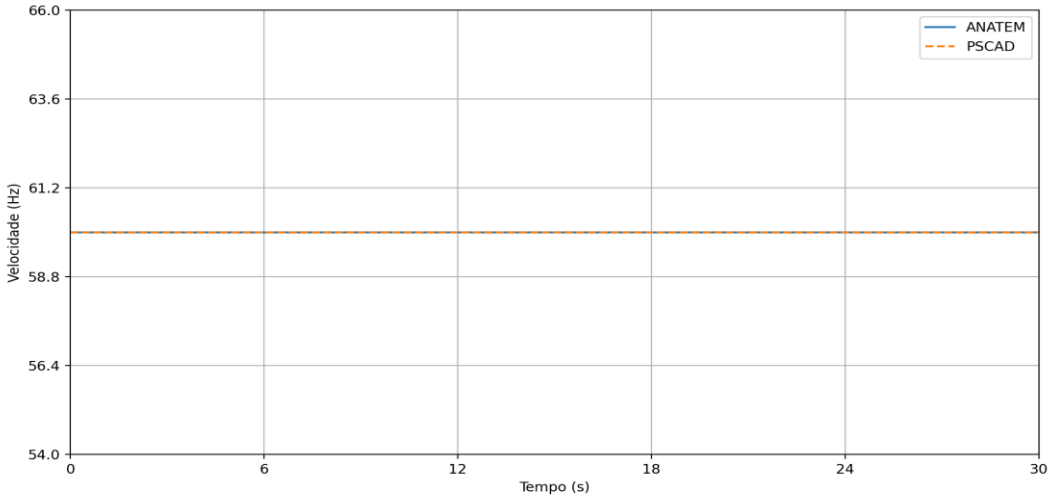

Figura 4-852 – Velocidade da máquina

4.34.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.34.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.34.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.34.4.3.

4.34.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

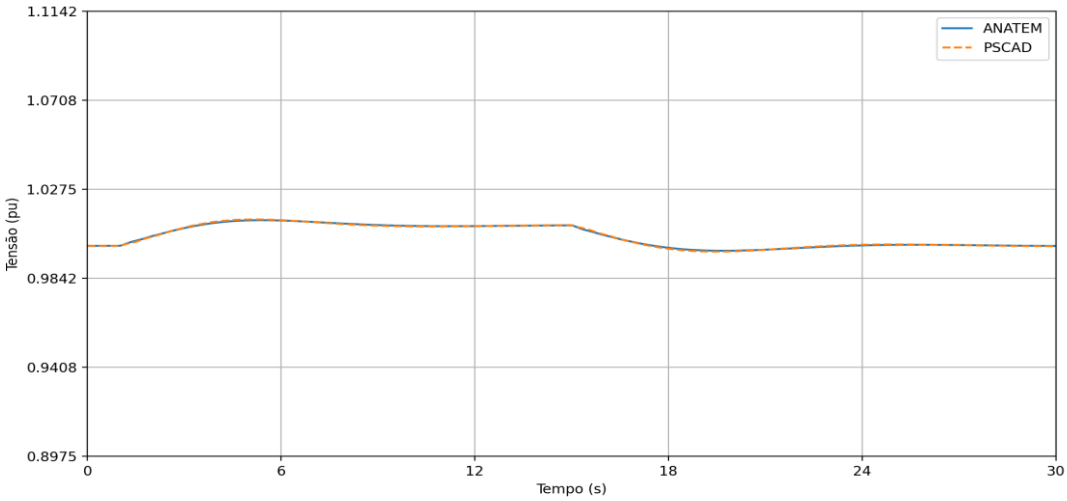

Figura 4-853 – Tensão terminal

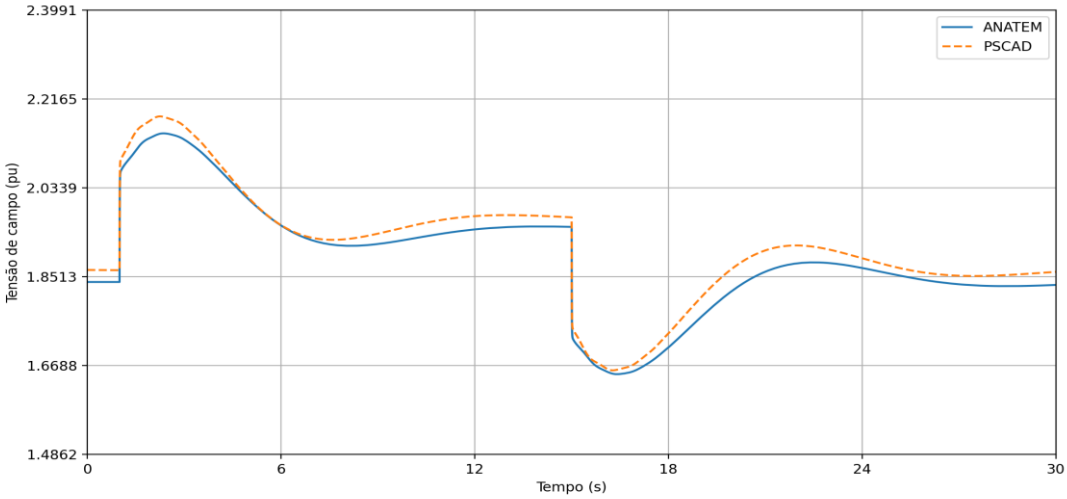

Figura 4-854 – Tensão de campo

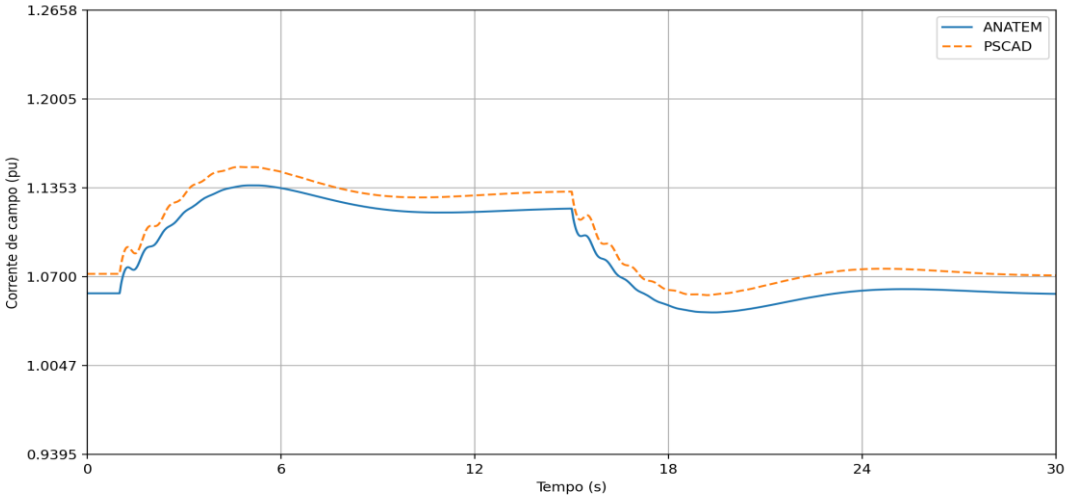

Figura 4-855 – Corrente de campo

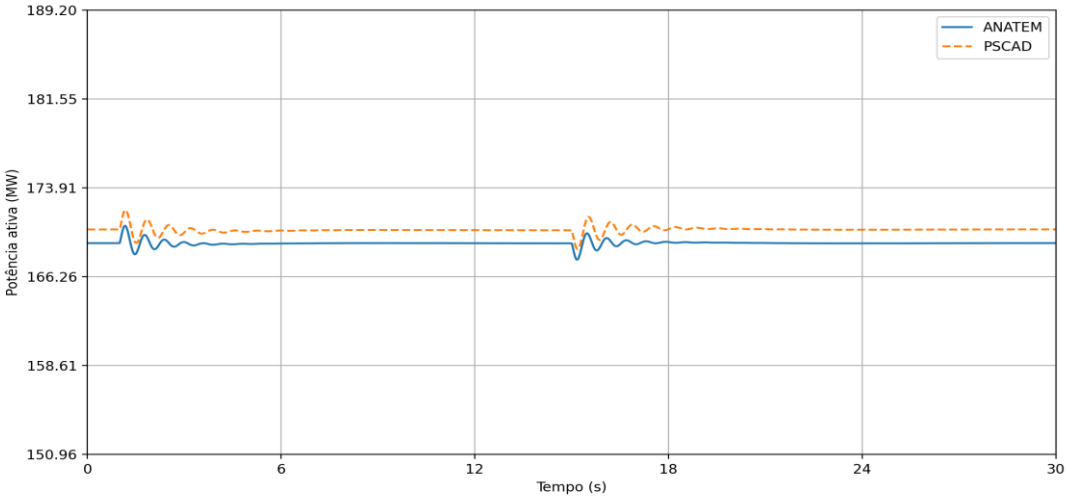

Figura 4-856 – Potência ativa

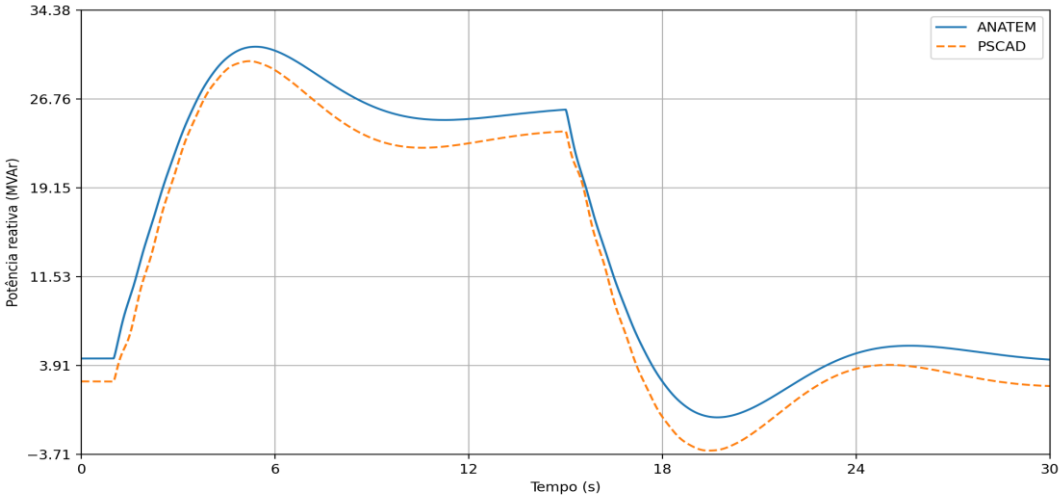

Figura 4-857 – Potência reativa

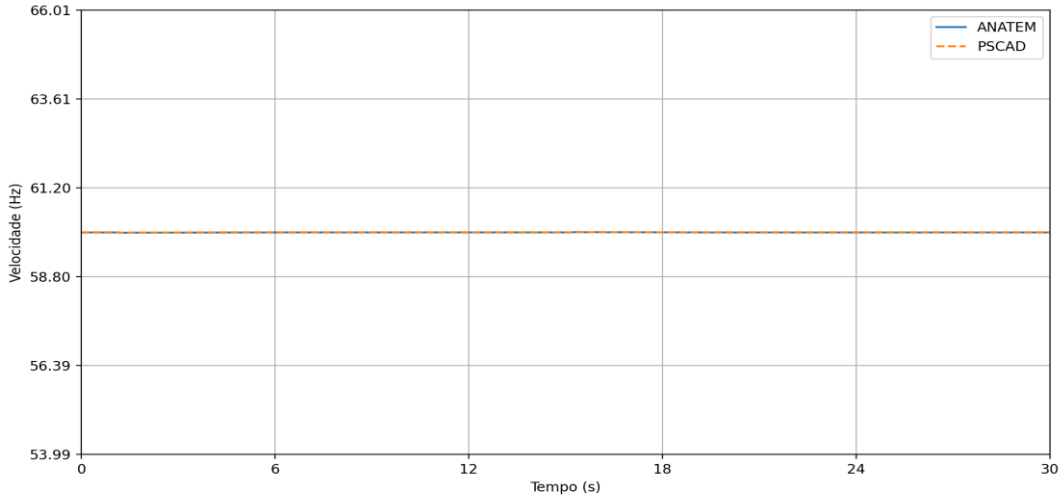

Figura 4-858 – Velocidade da máquina

4.34.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

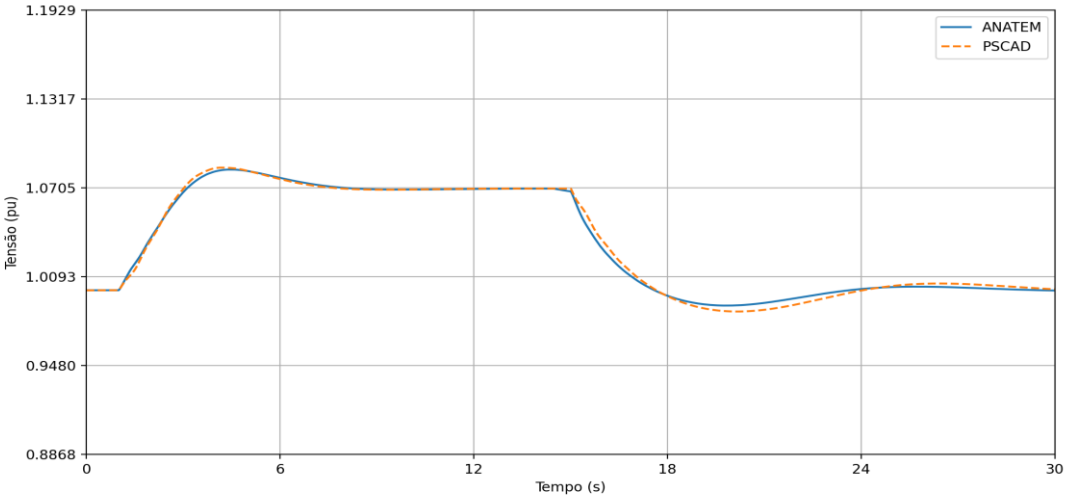

Figura 4-859 – Tensão terminal

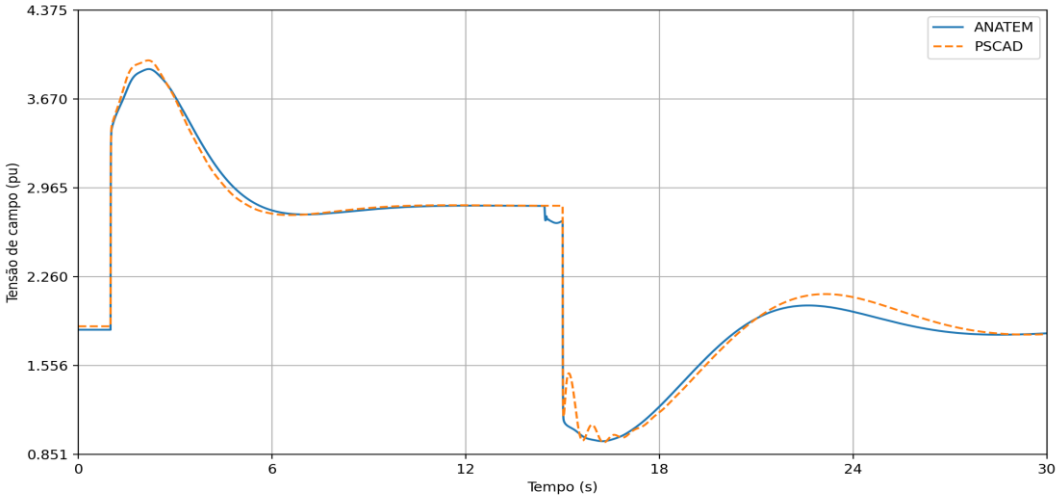

Figura 4-860 – Tensão de campo

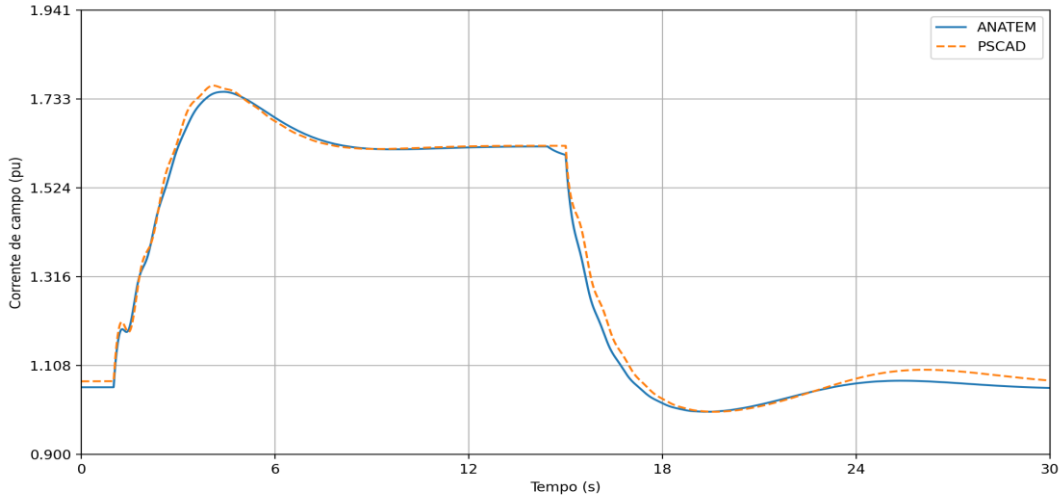

Figura 4-861 – Corrente de campo

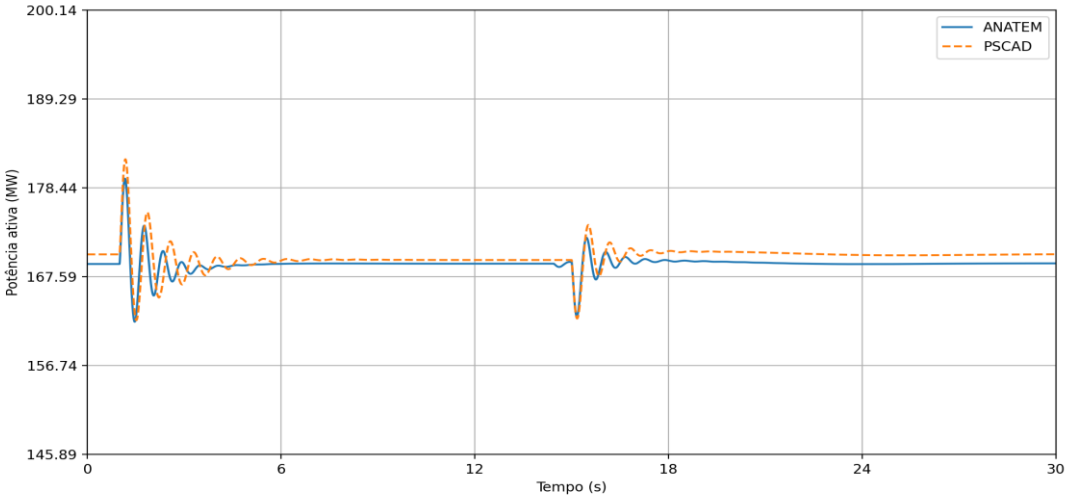

Figura 4-862 – Potência ativa

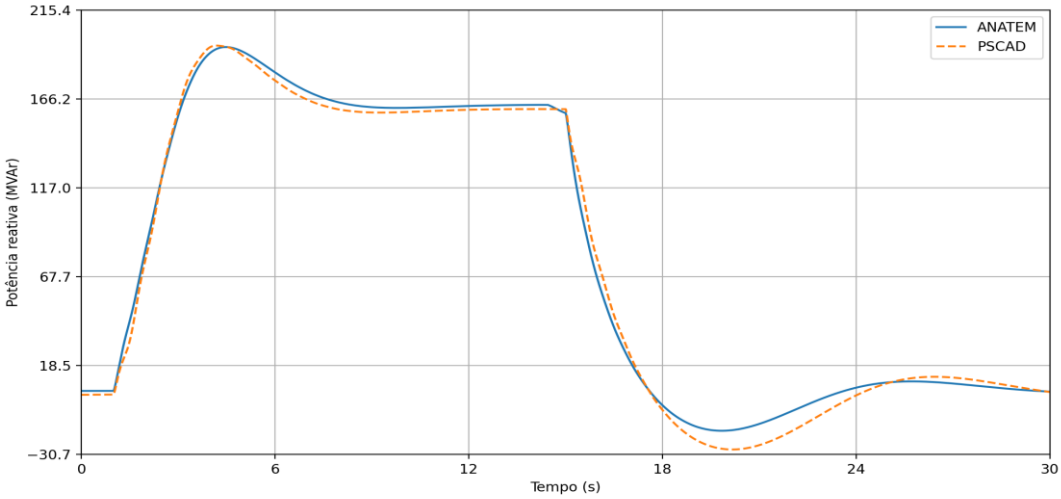

Figura 4-863 – Potência reativa

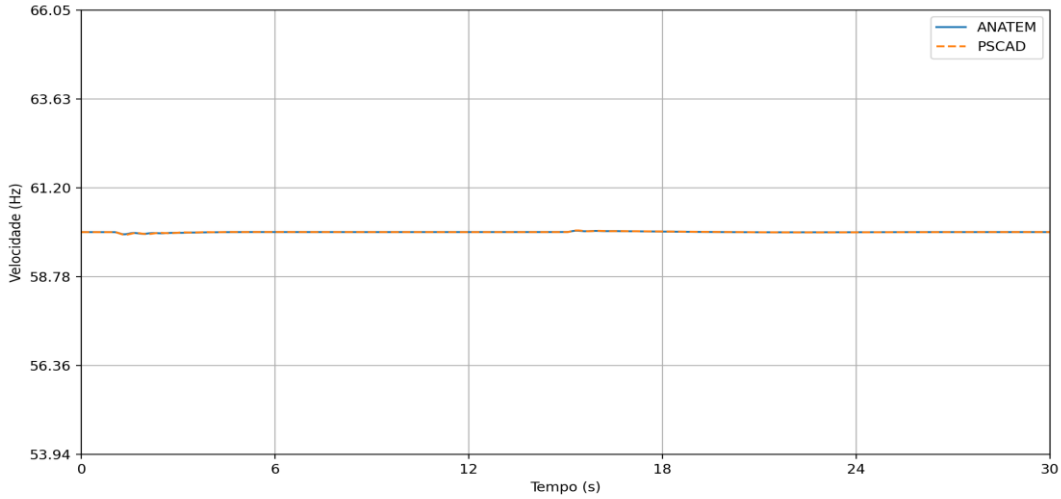

Figura 4-864 – Velocidade da máquina

4.34.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

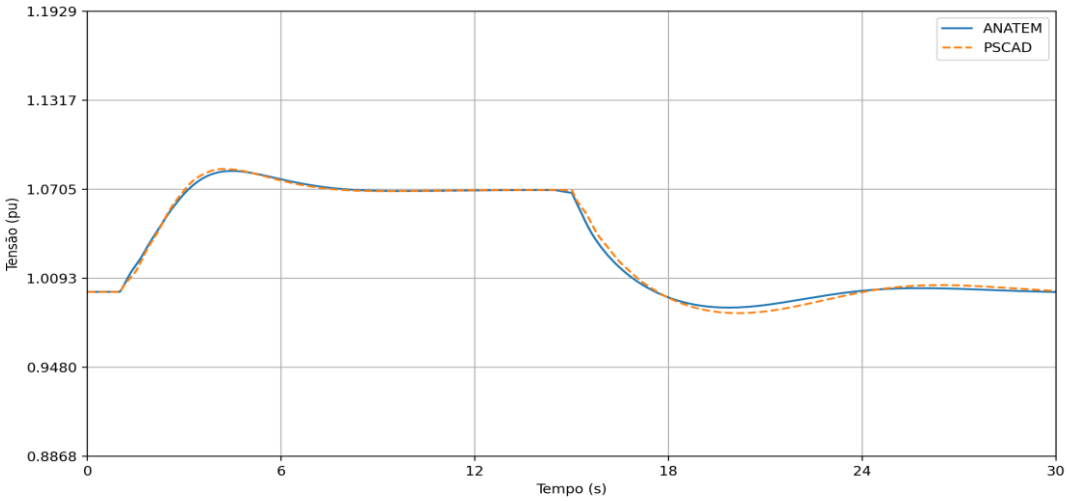

Figura 4-865 – Tensão terminal

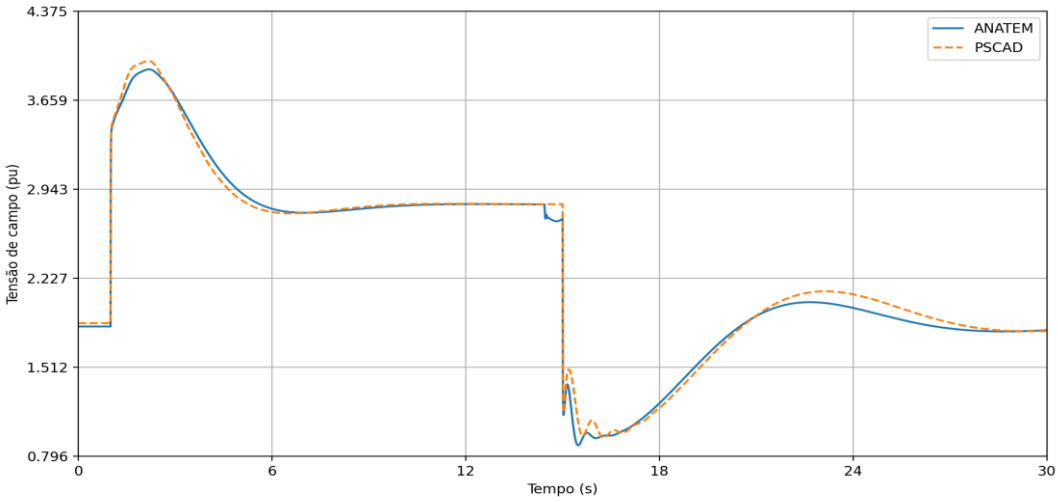

Figura 4-866 – Tensão de campo

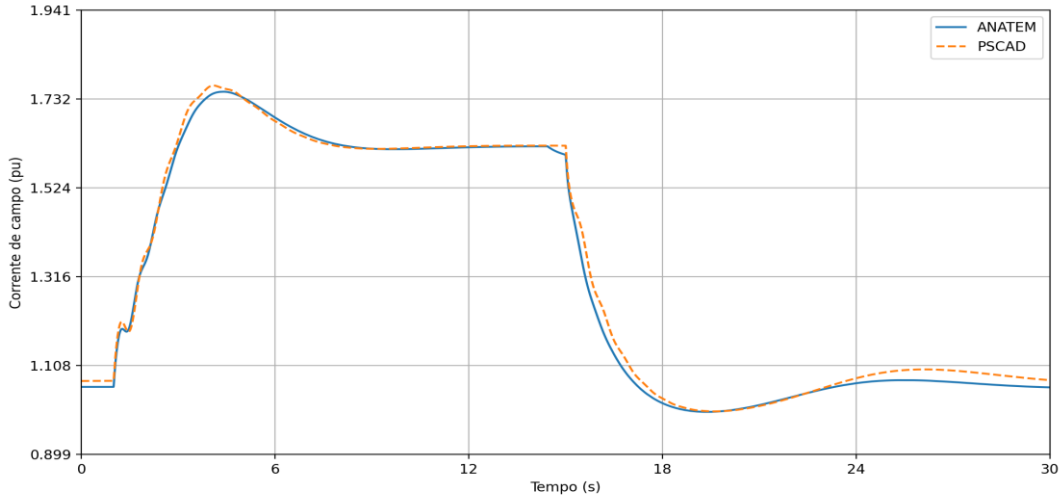

Figura 4-867 – Corrente de campo

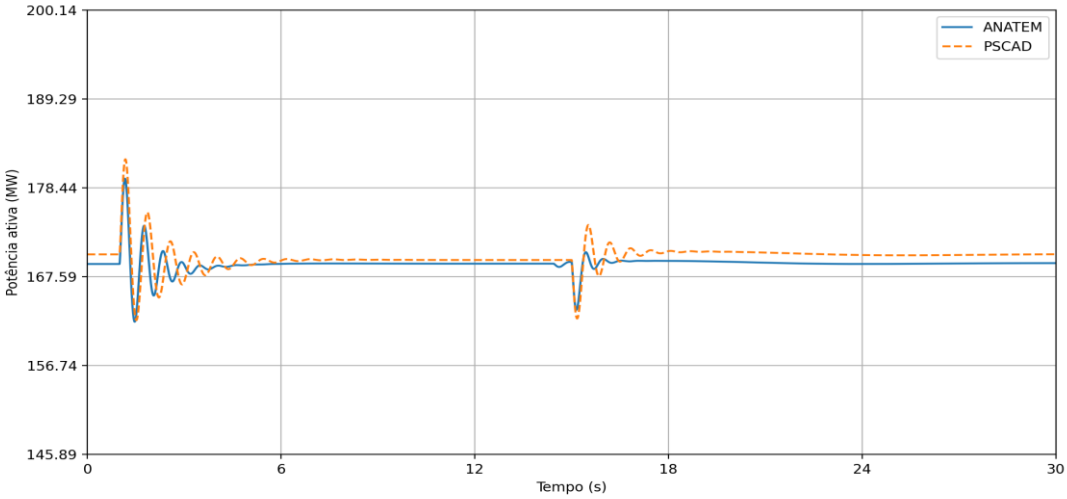

Figura 4-868 – Potência ativa

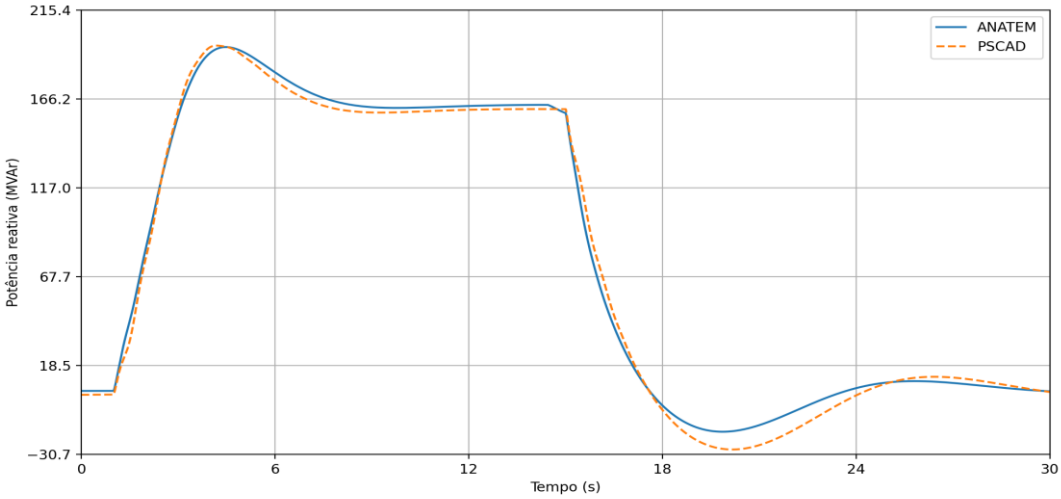

Figura 4-869 – Potência reativa

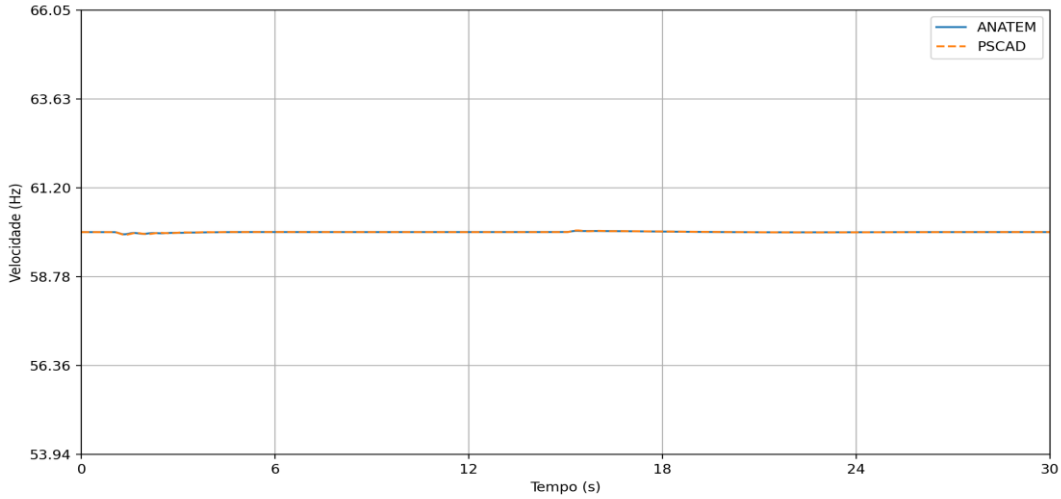

Figura 4-870 – Velocidade da máquina

4.35 UTE MARANHAO III – GP10

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UTE Maranhão III – GP10, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.35.1 Modelo da UTE Maranhão III – GP10

A Tabela 4-103 apresenta os parâmetros da UTE Maranhão III – GP10 disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-103 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	187	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	177	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	23,5	I(KA)	8,702	
x'q (%)	42,5	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	17,5	H(s)	5,14	
xl(%)	13	D(pu)	0	
T'd(s)	7	Ra(pu)	0,003	
T'q(s)	0,55	xp(pu)	0,13	Reatância de Potier
T''d(s)	0,04	xd(pu)	1,87	
T''q(s)	0,081	xd_(pu)	0,235	x'd
Ra(%)	0,26	Td0_(s)	7	T'd
H(s)	5,14	xd__(pu)	0,175	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,04	T''d
S(MVA)	208	Xq(pu)	1,77	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,425	x'q
		Tq0_(s)	0,55	T'q
		xq__(pu)	0,175	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,081	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.35.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-104, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UTE Maranhão III – GP10 estão apresentados na Tabela 4-105. A partir dos parâmetros da Tabela 4-104, calcula-se os dados a serem introduzidos

no PSCAD, apresentados na Tabela 4-105. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-871.

Tabela 4-104 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UTE Maranhão III – GP10	
Ag	**Y1**	0,0047
Bg	**Y2**	12,1635
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-105 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,805	0,800
0,979	0,950
1,014	0,975
1,054	1,000
1,113	1,033
1,188	1,067
1,281	1,100
1,81	1,200
3,358	1,300

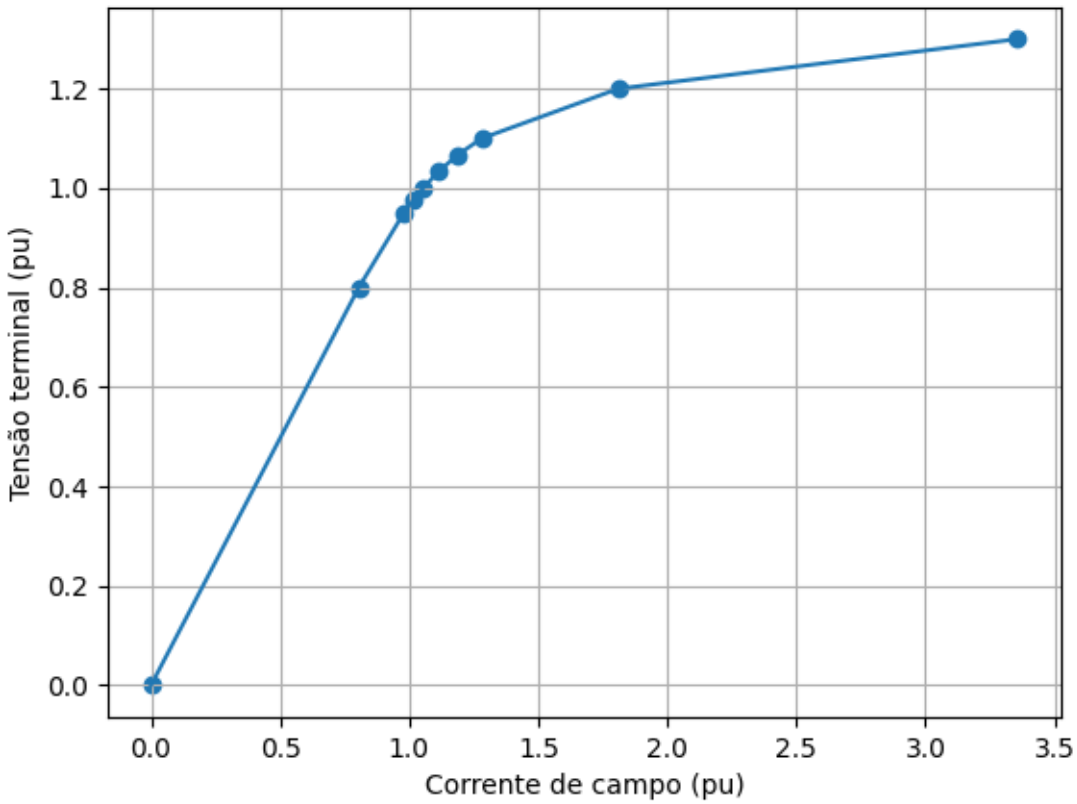

Figura 4-871 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio, Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.35.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.35.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.35.3.2, Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu,.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.35.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

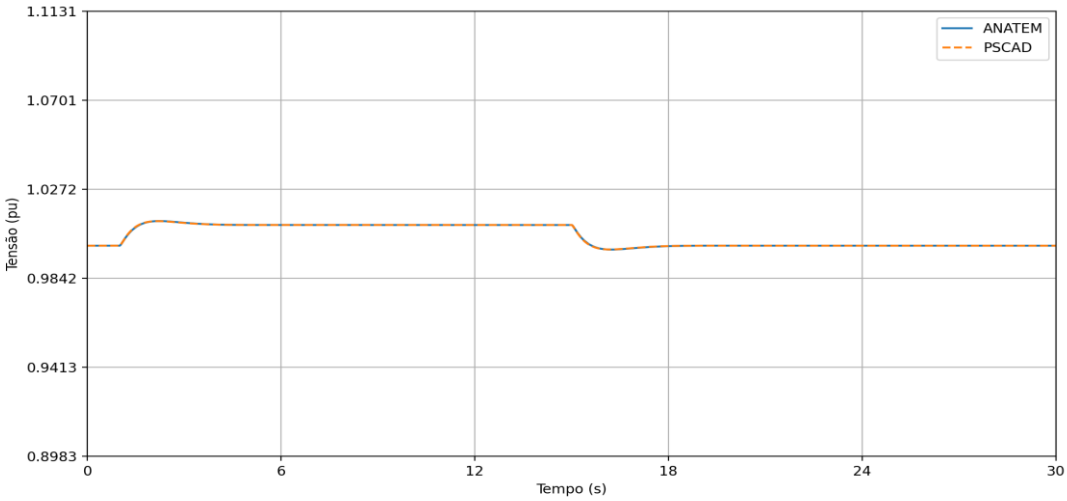

Figura 4-872 – Tensão terminal

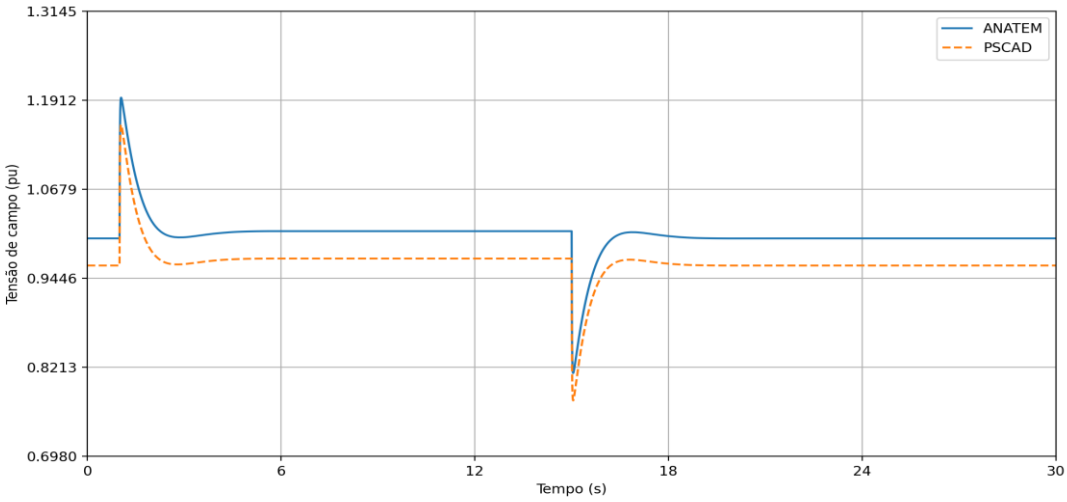

Figura 4-873 – Tensão de campo

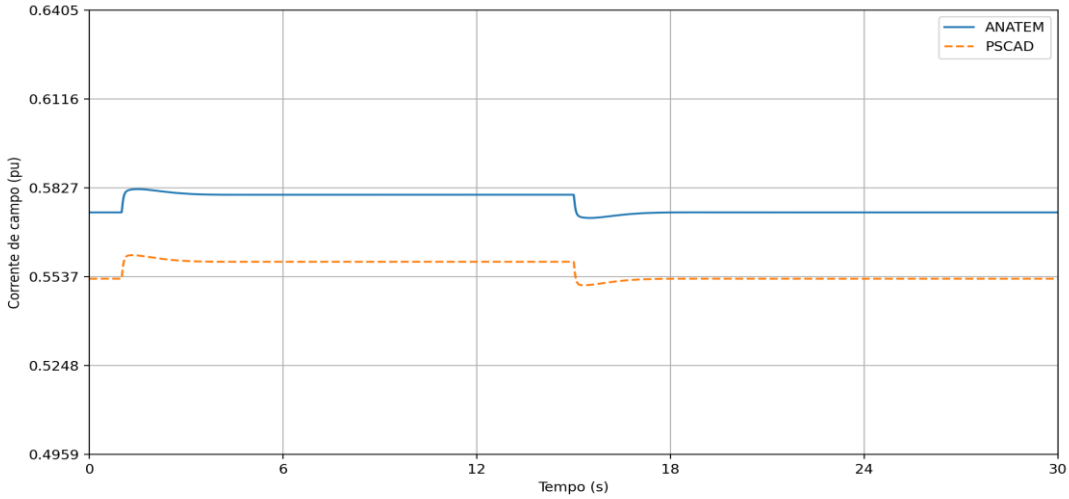

Figura 4-874 – Corrente de campo

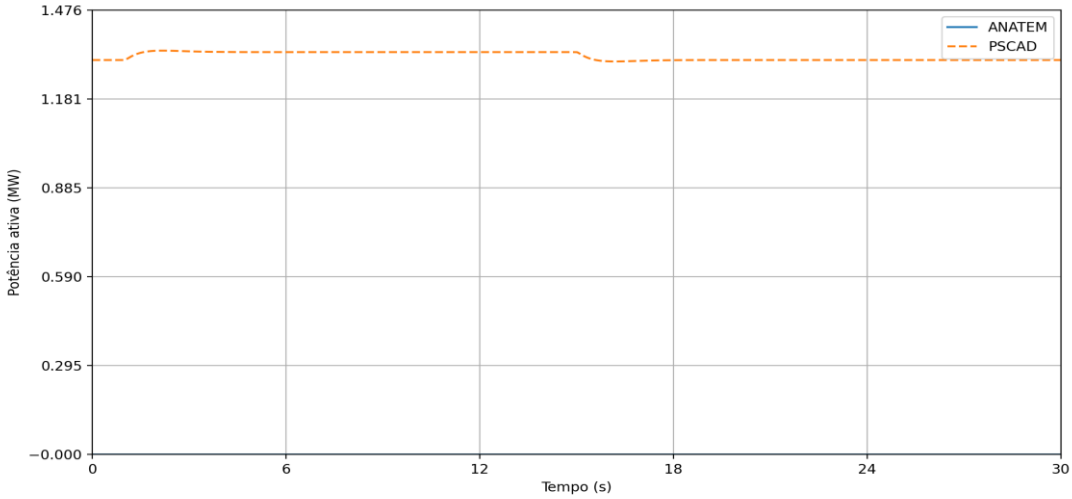

Figura 4-875 – Potência ativa

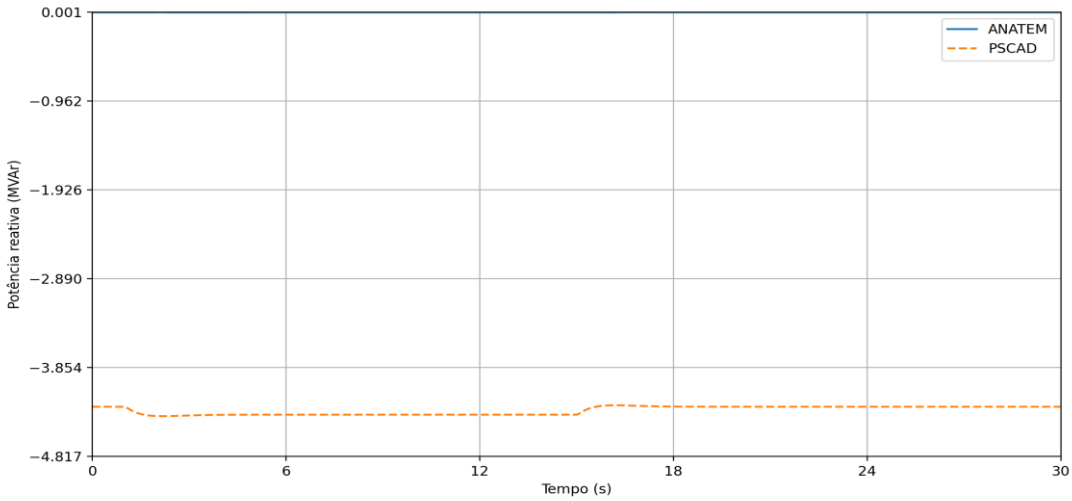

Figura 4-876 – Potência reativa

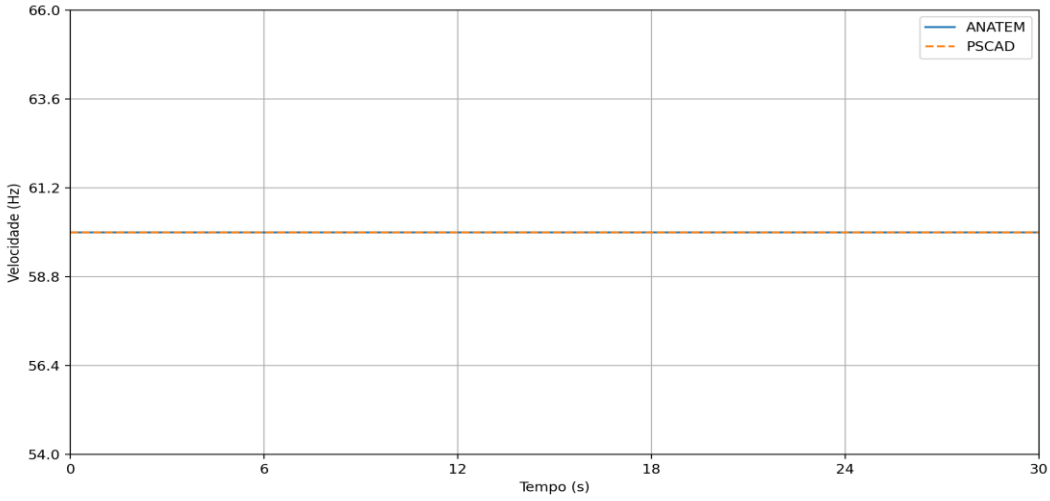

Figura 4-877 – Velocidade da máquina

4.35.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

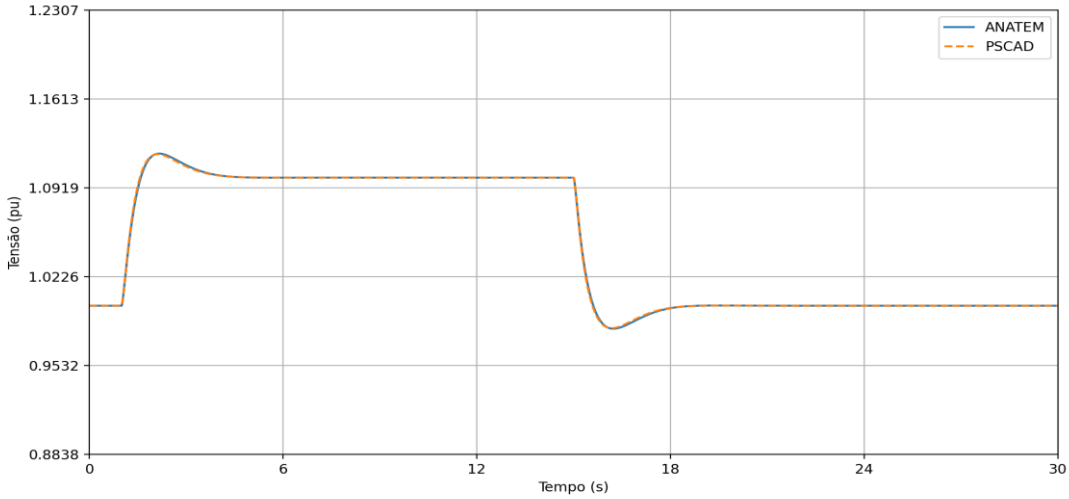

Figura 4-878 – Tensão terminal

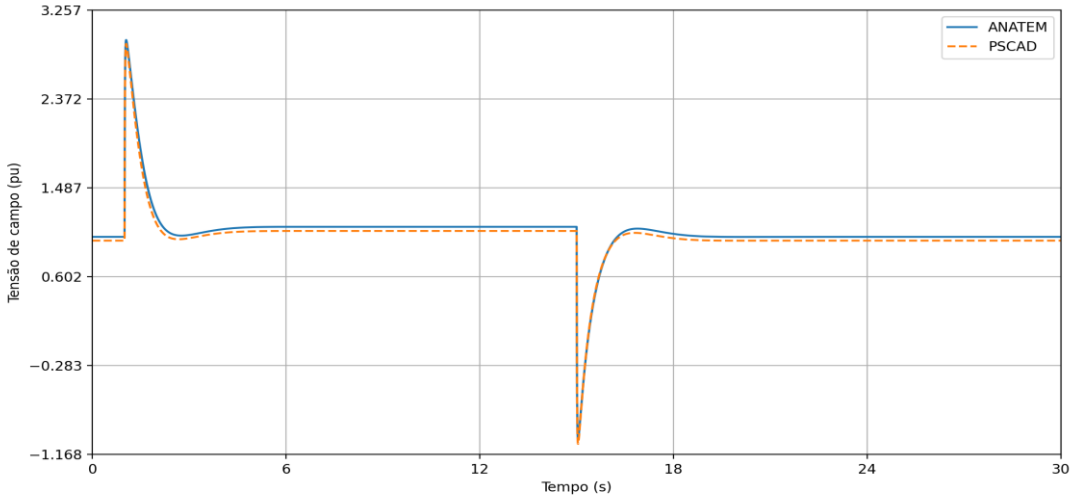

Figura 4-879 – Tensão de campo

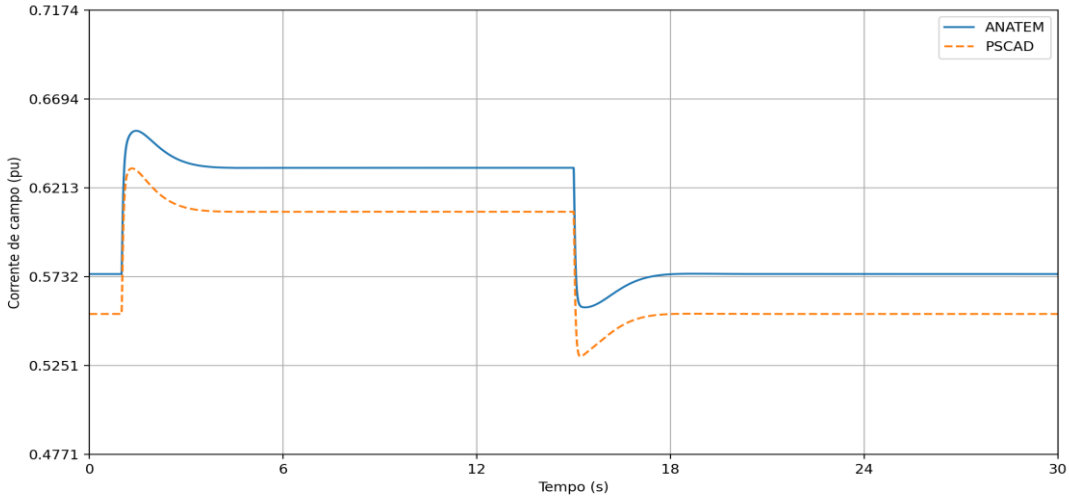

Figura 4-880 – Corrente de campo

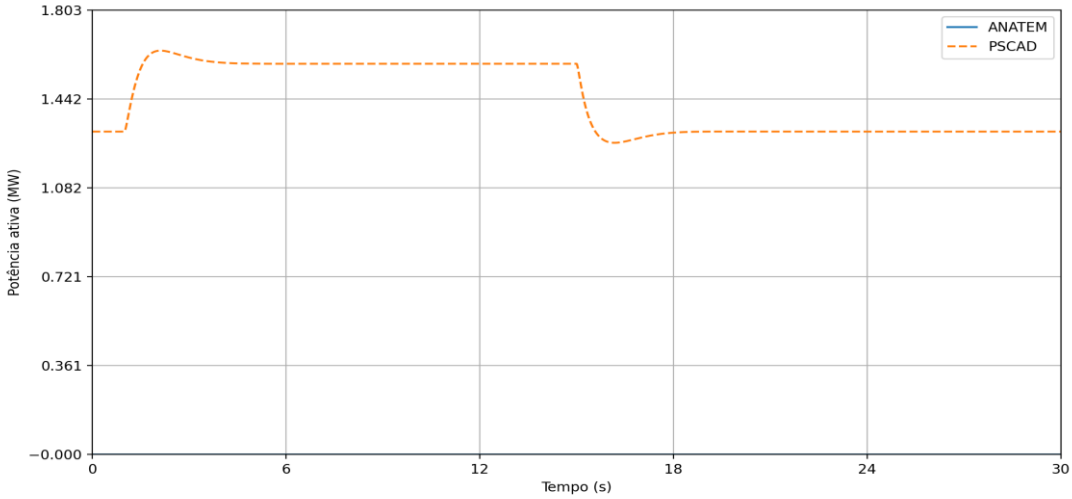

Figura 4-881 – Potência ativa

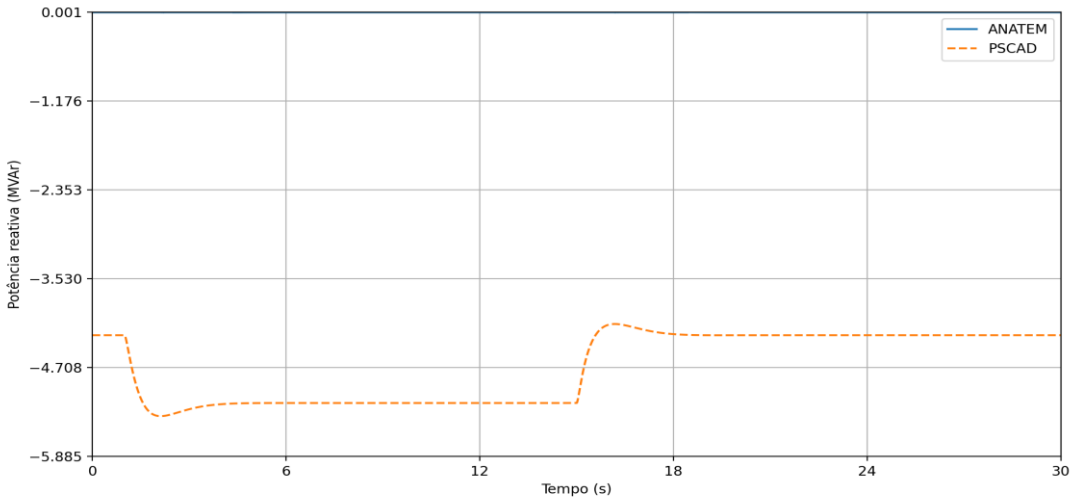

Figura 4-882 – Potência reativa

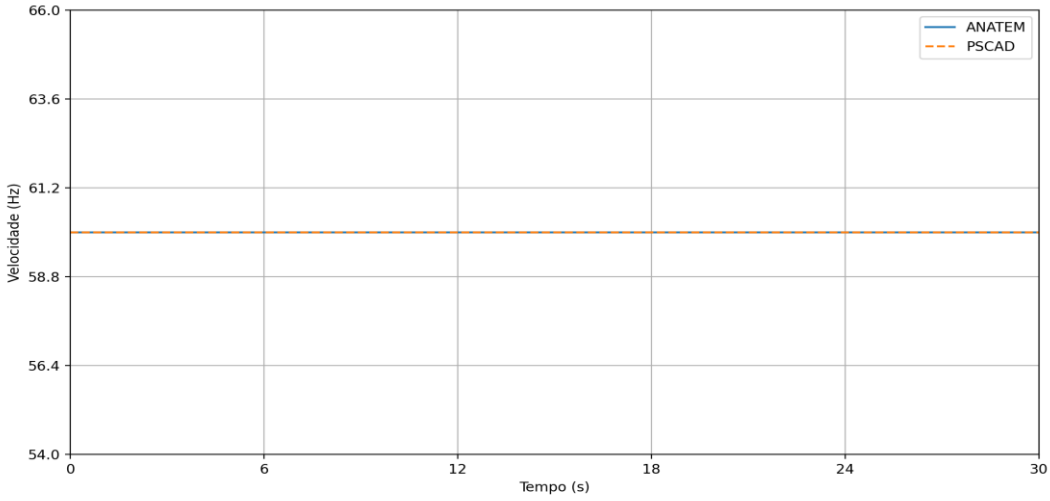

Figura 4-883 – Velocidade da máquina

4.35.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.35.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.35.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.35.4.3.

4.35.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

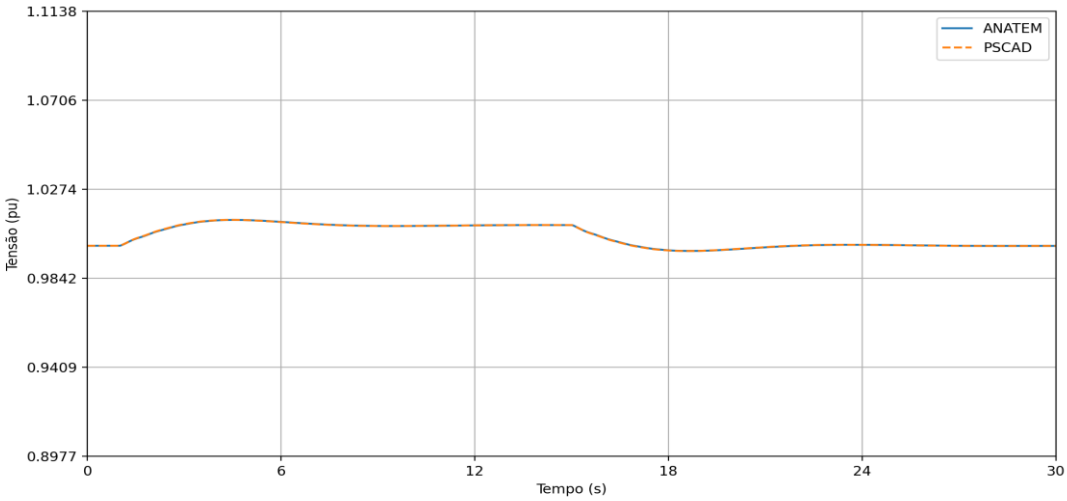

Figura 4-884 – Tensão terminal

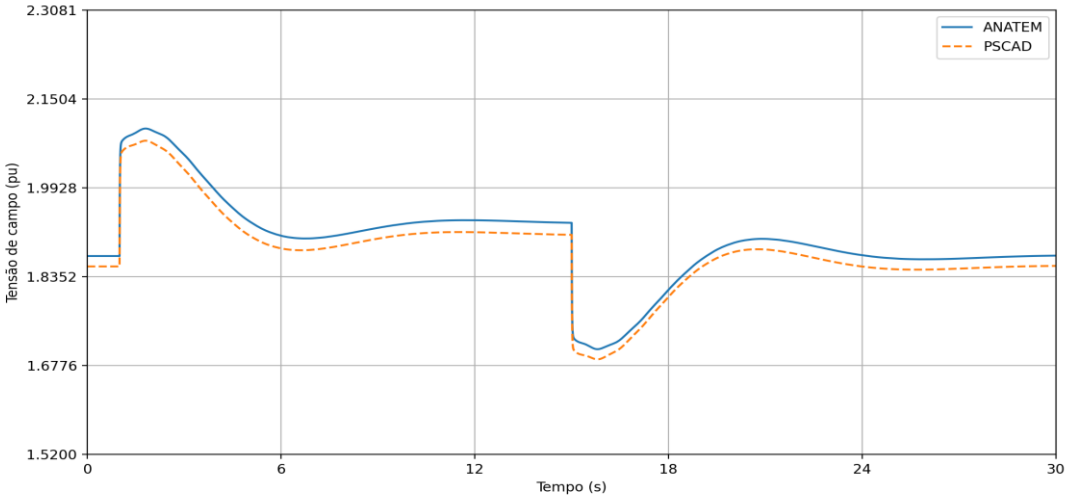

Figura 4-885 – Tensão de campo

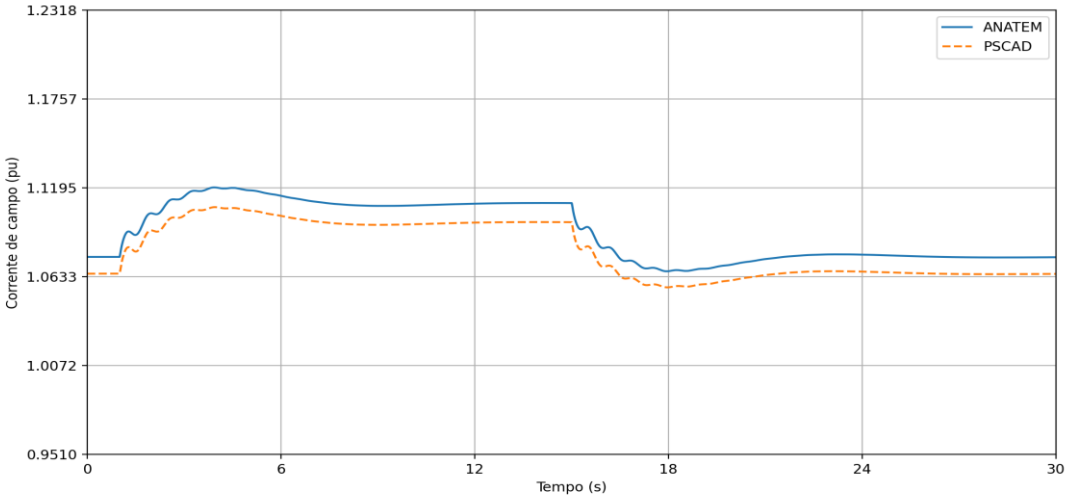

Figura 4-886 – Corrente de campo

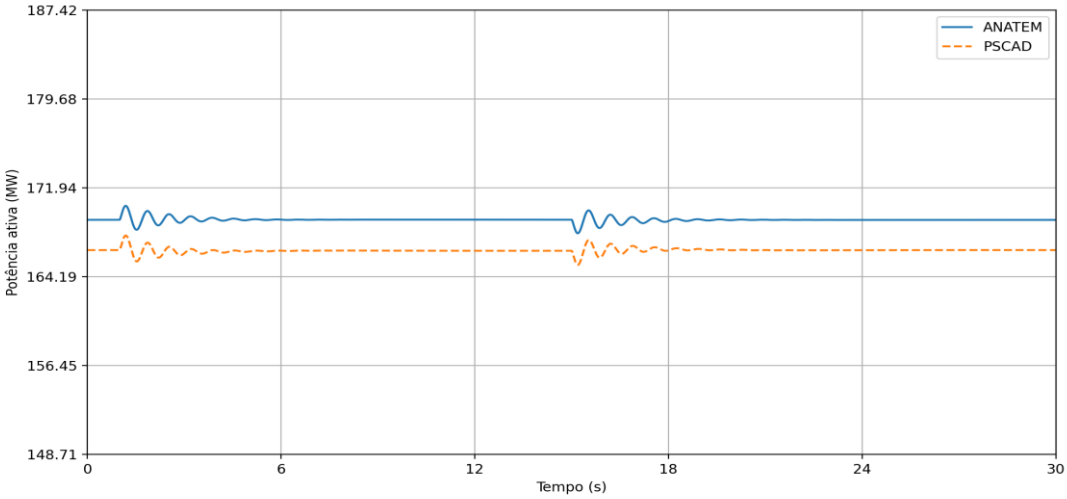

Figura 4-887 – Potência ativa

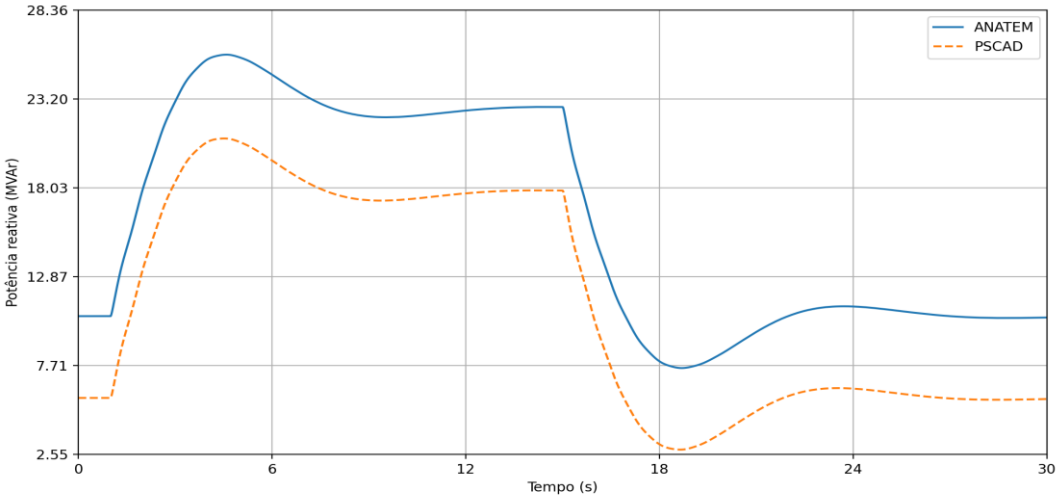

Figura 4-888 – Potência reativa

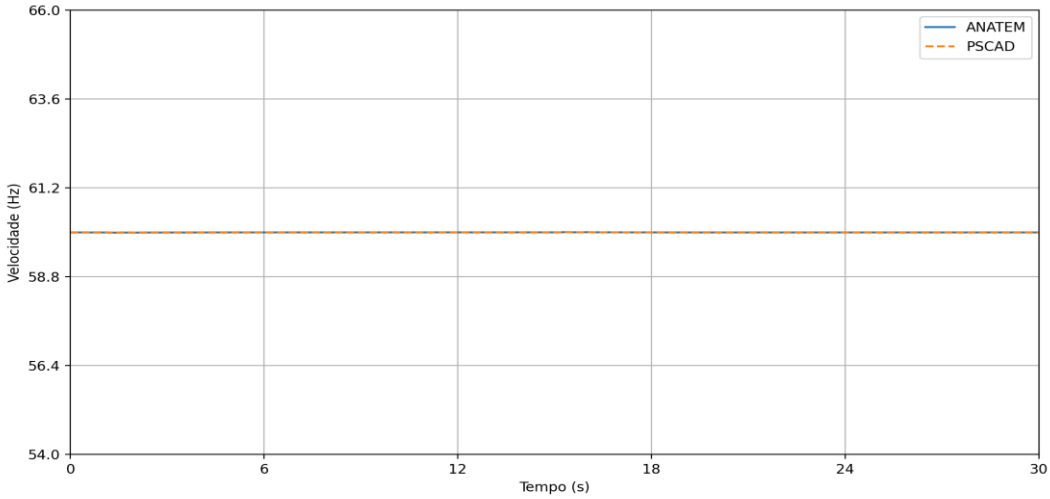

Figura 4-889 – Velocidade da máquina

4.35.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

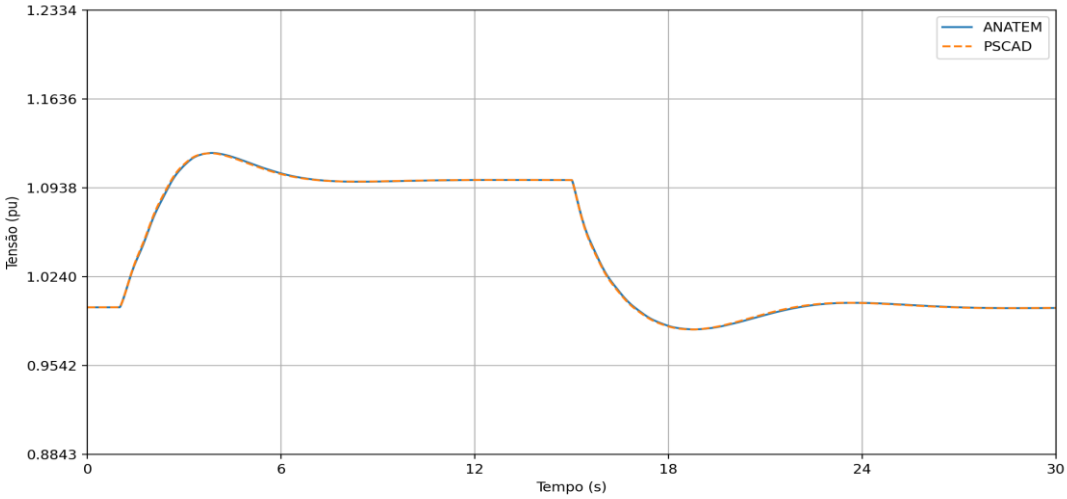

Figura 4-890 – Tensão terminal

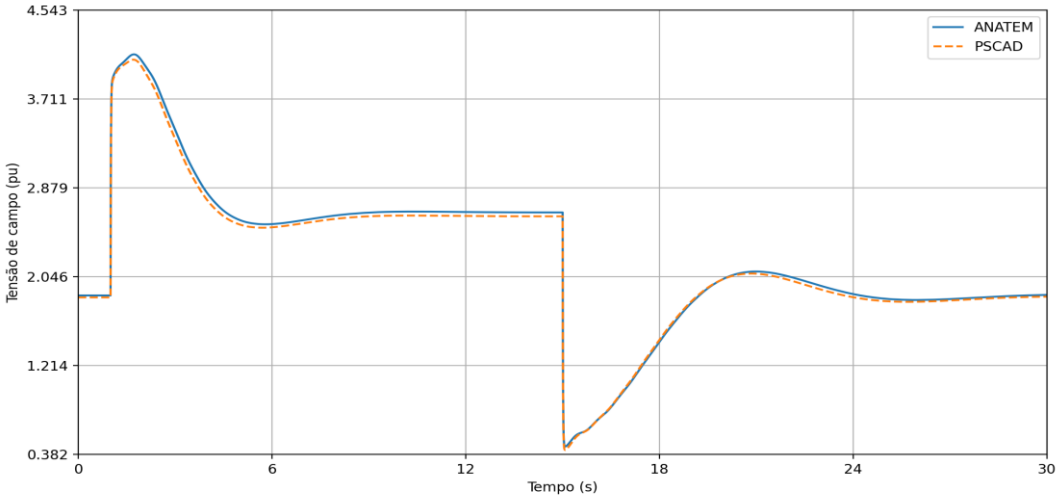

Figura 4-891 – Tensão de campo

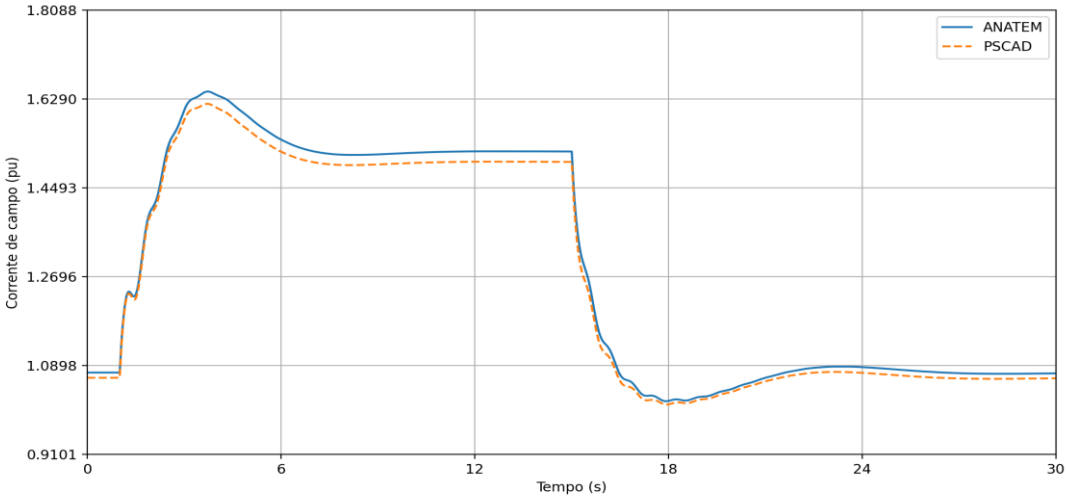

Figura 4-892 – Corrente de campo

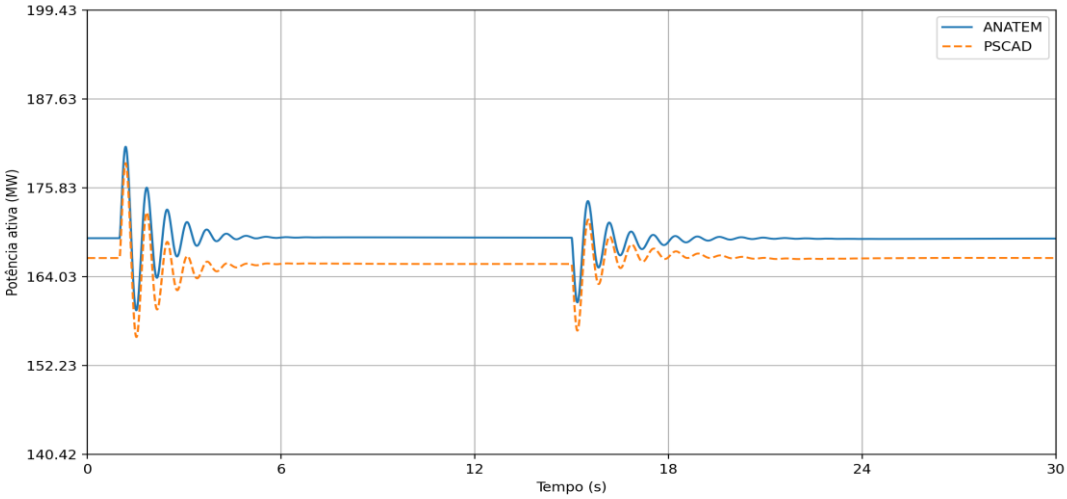

Figura 4-893 – Potência ativa

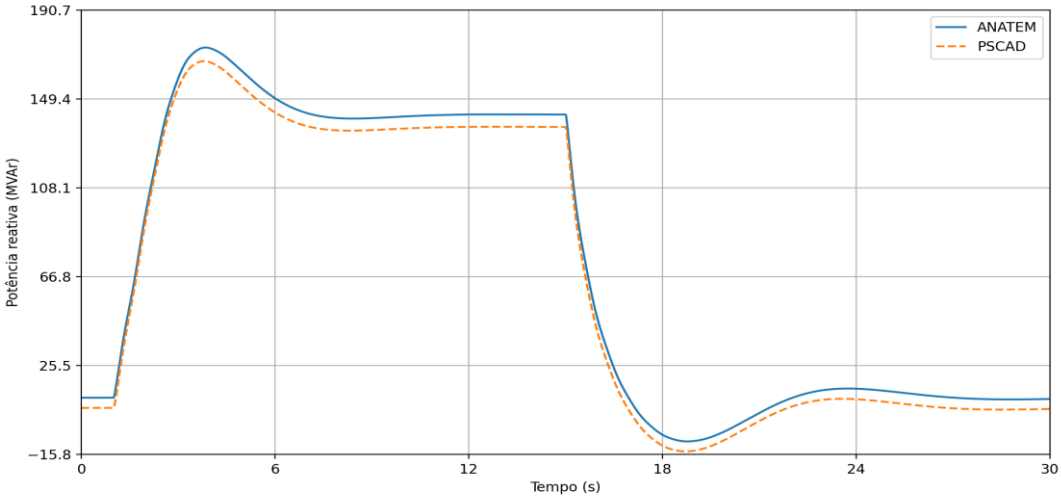

Figura 4-894 – Potência reativa

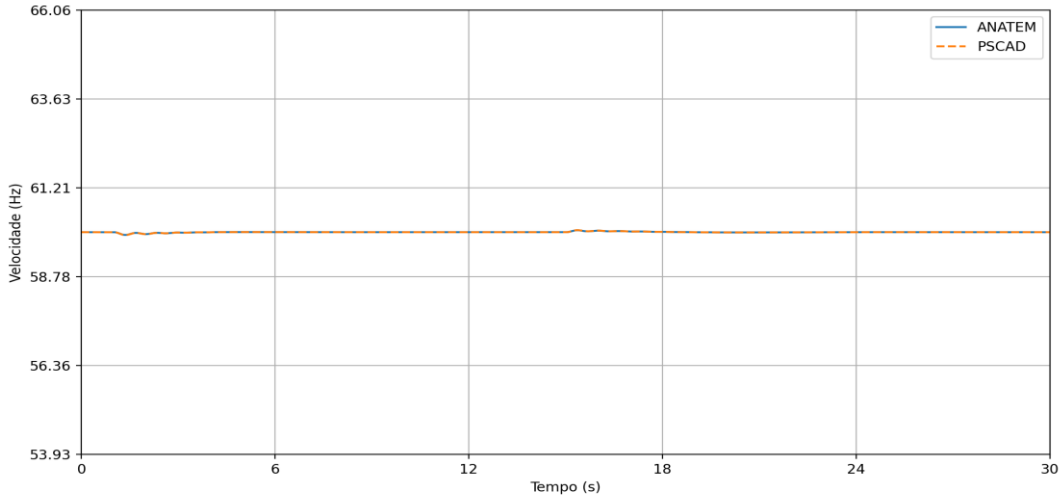

Figura 4-895 – Velocidade da máquina

4.35.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

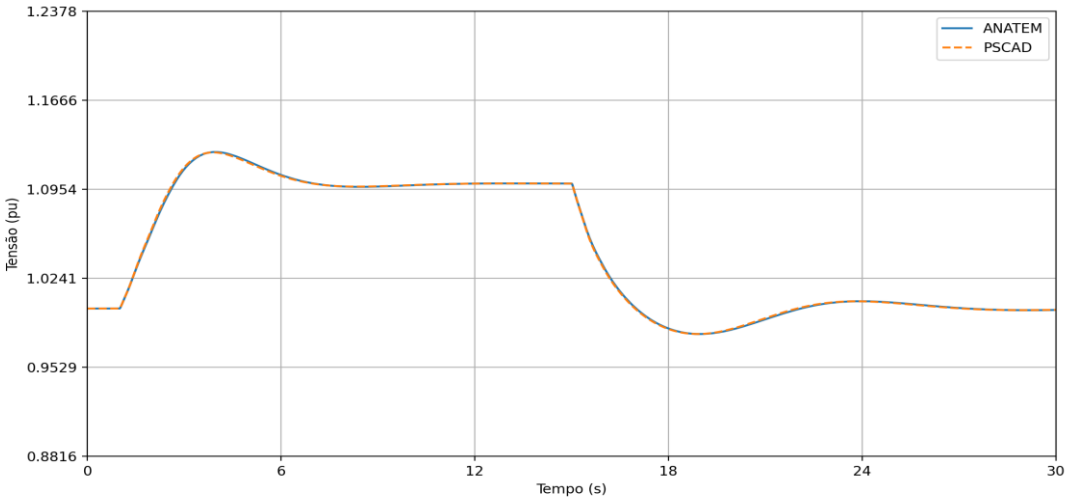

Figura 4-896 – Tensão terminal

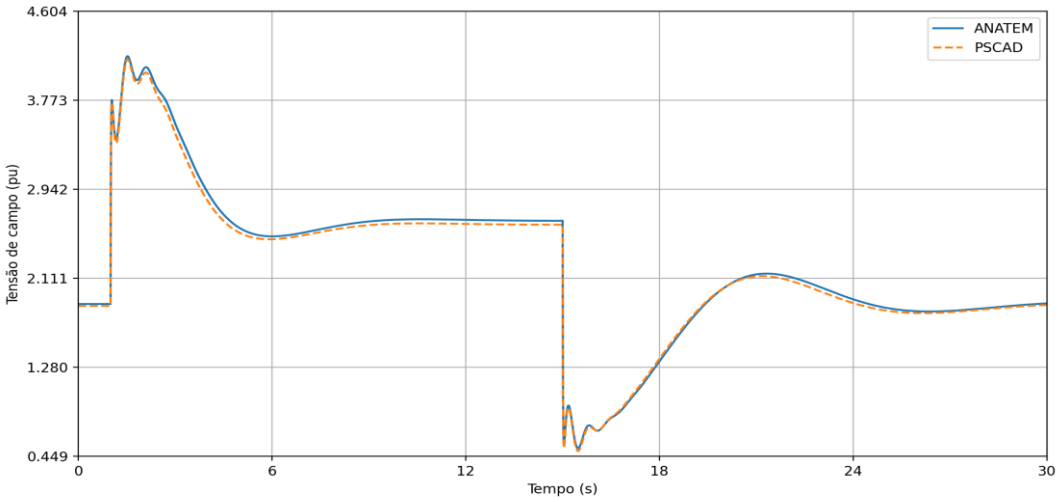

Figura 4-897 – Tensão de campo

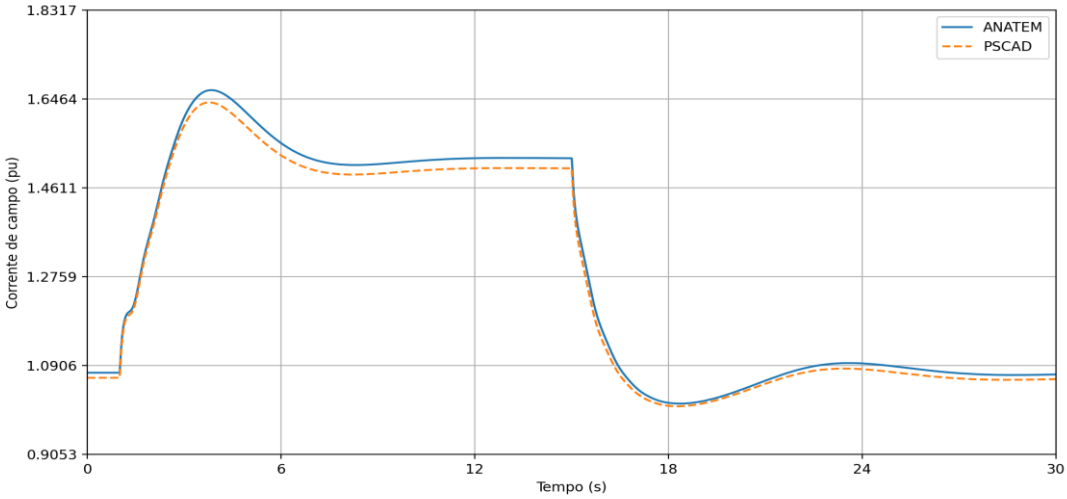

Figura 4-898 – Corrente de campo

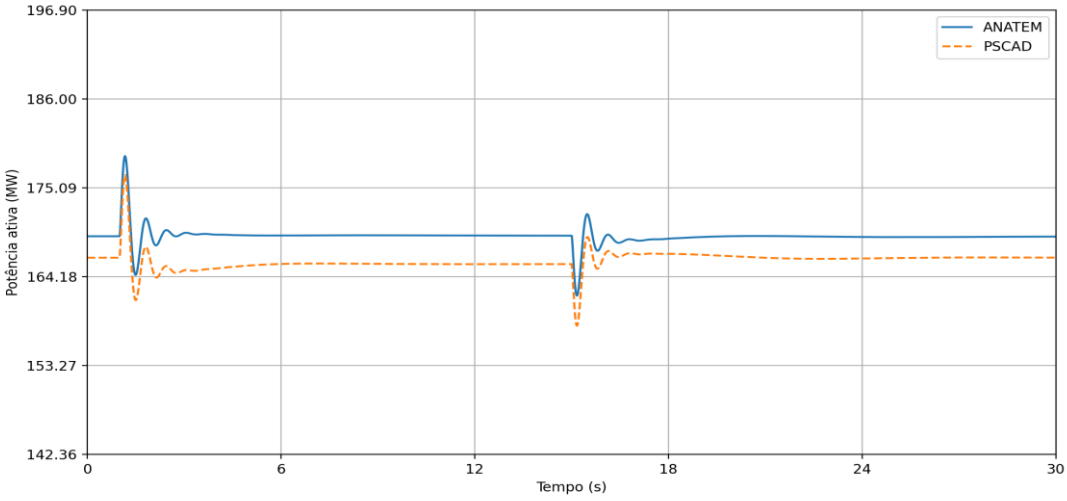

Figura 4-899 – Potência ativa

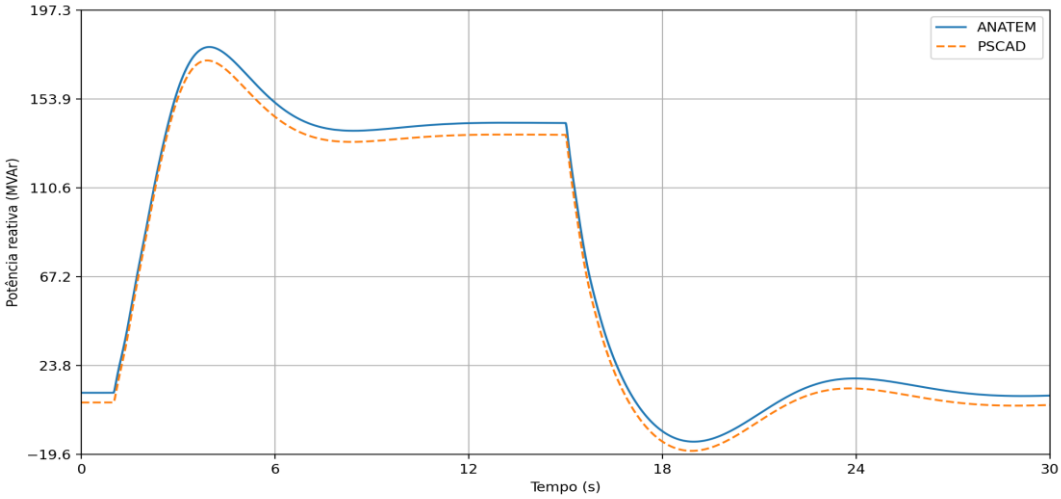

Figura 4-900 – Potência reativa

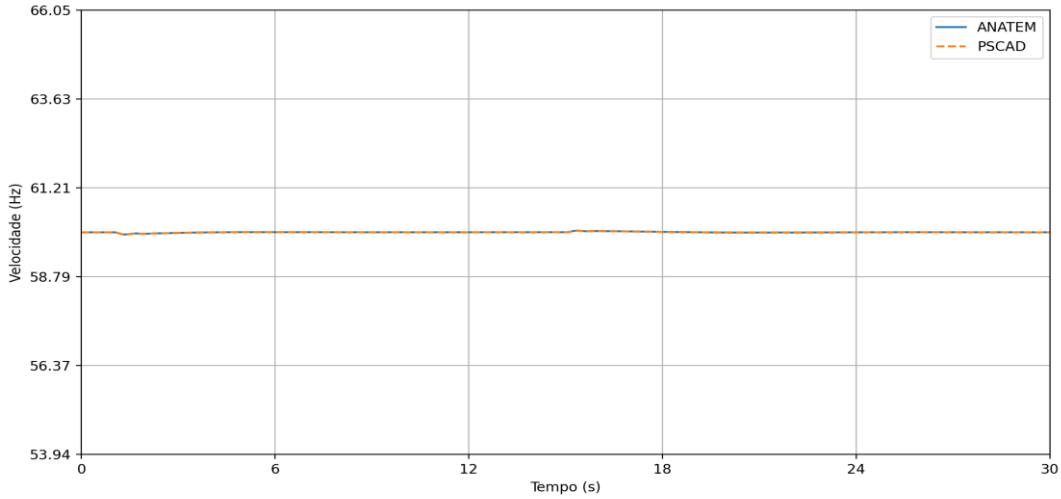

Figura 4-901 – Velocidade da máquina

4.36 UTE MARANHAO III – GP20

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UTE Maranhão III – GP20, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.36.1 Modelo da UTE Maranhão III – GP20

A Tabela 4-106 apresenta os parâmetros da UTE Maranhão III – GP20 disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-106 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	202	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	190	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	25	I(KA)	9,371	
x'q (%)	45	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	19	H(s)	4,507	
xl(%)	14	D(pu)	0	
T'd(s)	7	Ra(pu)	0	
T'q(s)	0,57	xp(pu)	0,14	Reatância de Potier
T''d(s)	0,04	xd(pu)	2,02	
T''q(s)	0,08	xd_(pu)	0,25	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	7	T'd
H(s)	4,507	xd__(pu)	0,19	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,04	T''d
S(MVA)	224	Xq(pu)	1,9	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,45	x'q
		Tq0_(s)	0,57	T'q
		xq__(pu)	0,19	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,08	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.36.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-107, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UTE Maranhão III – GP20 estão apresentados na Tabela 4-108. A partir dos parâmetros da Tabela 4-107, calcula-se os dados a serem introduzidos

no PSCAD, apresentados na Tabela 4-108. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-902.

Tabela 4-107 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UTE Maranhão III – GP20	
Ag	**Y1**	0,0034
Bg	**Y2**	12,2214
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-108 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,803	0,800
0,971	0,950
1,004	0,975
1,039	1,000
1,092	1,033
1,156	1,067
1,233	1,100
1,651	1,200
2,832	1,300

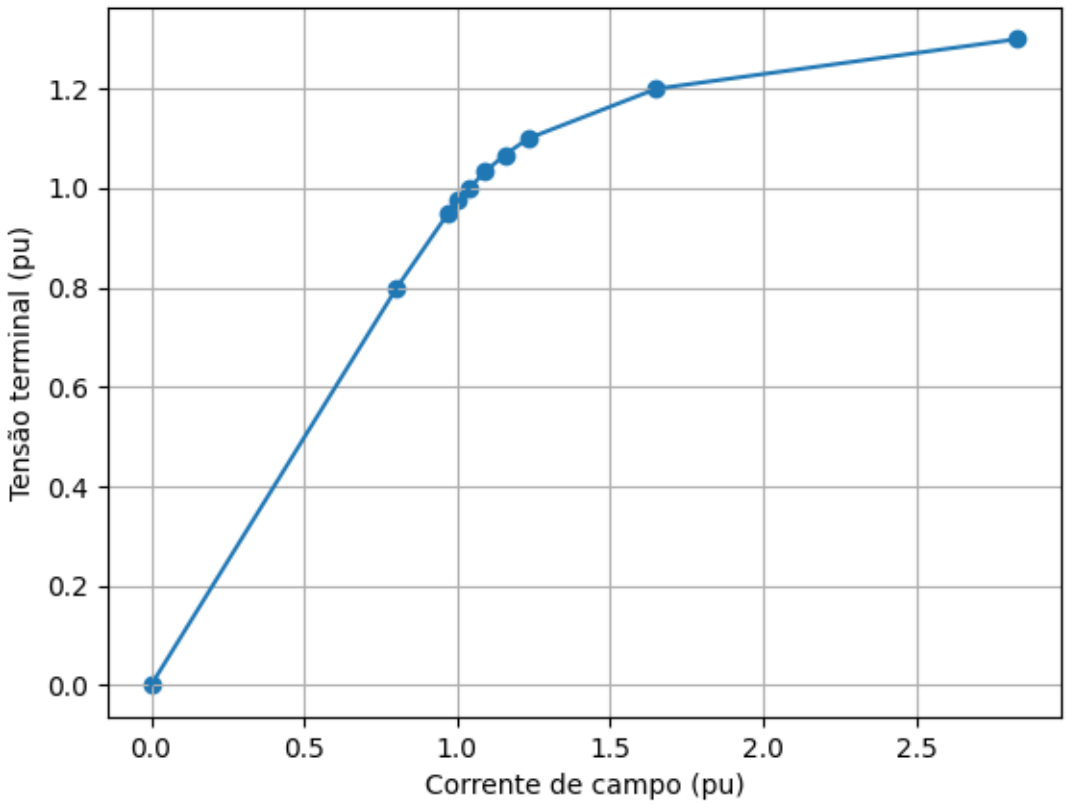

Figura 4-902 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio, Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.36.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.36.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.36.3.2, Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.36.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

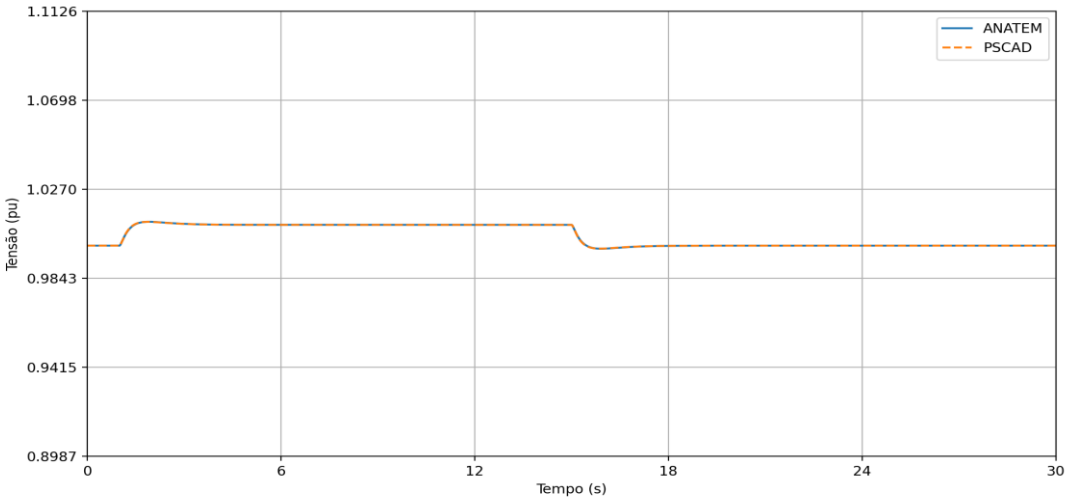

Figura 4-903 – Tensão terminal

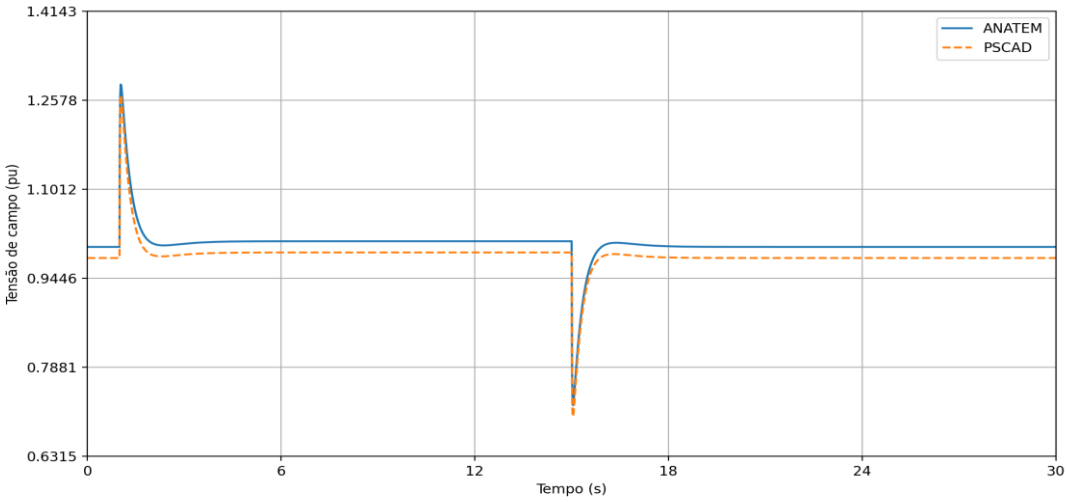

Figura 4-904 – Tensão de campo

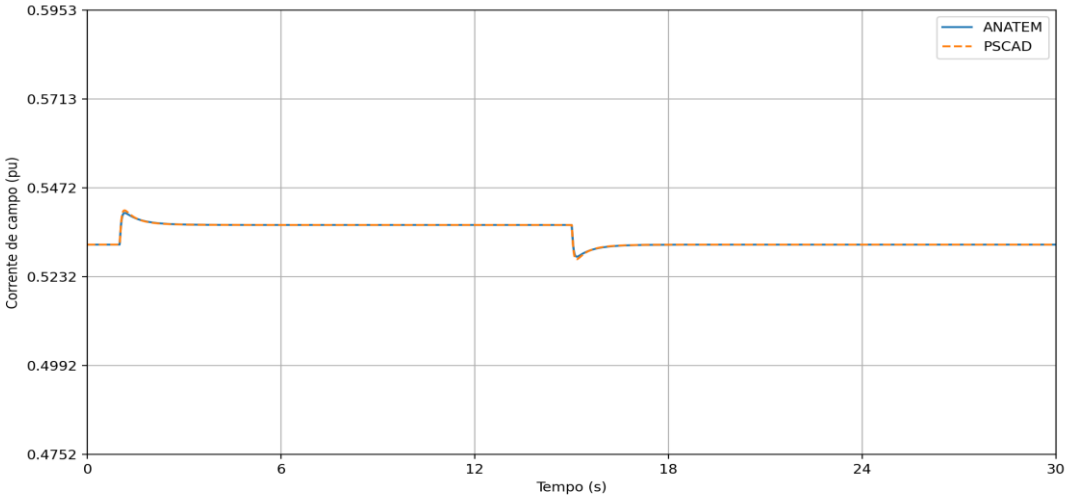

Figura 4-905 – Corrente de campo

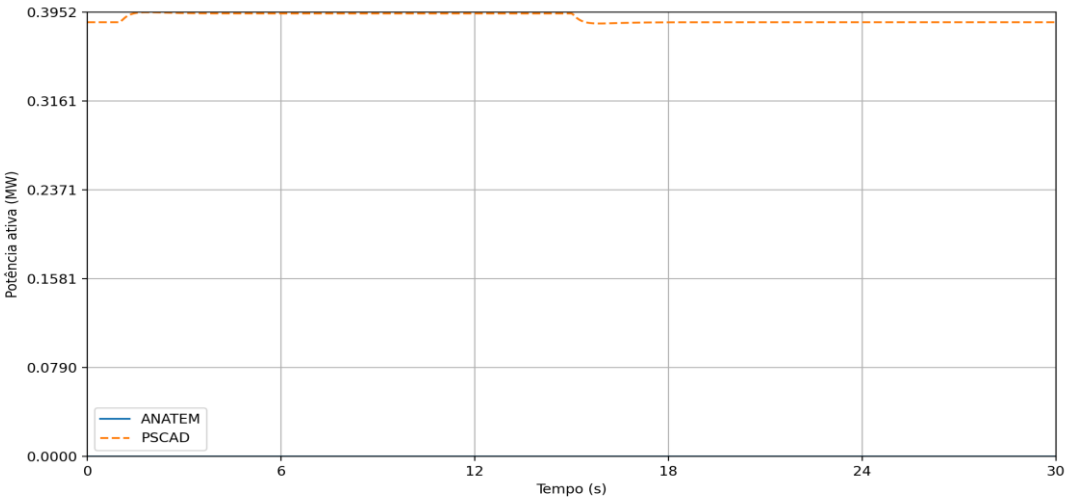

Figura 4-906 – Potência ativa

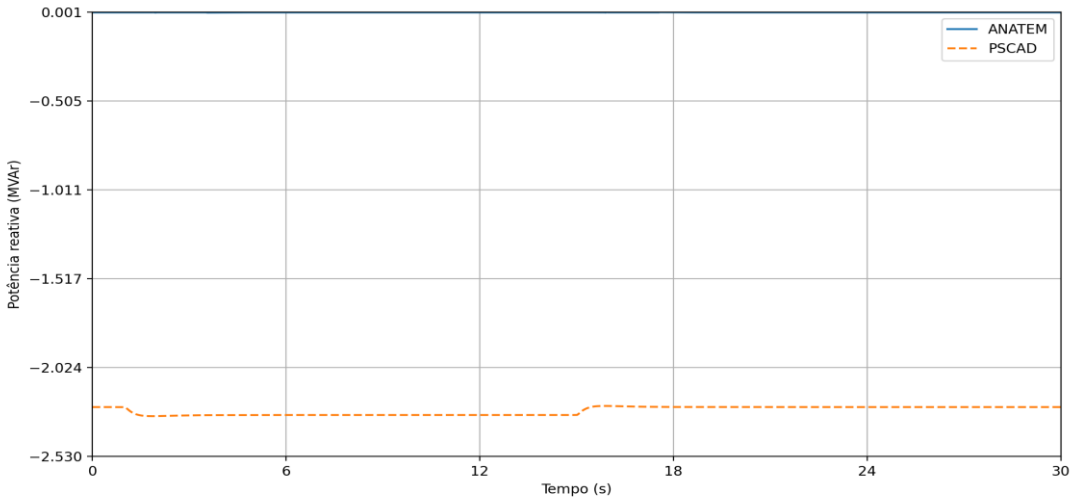

Figura 4-907 – Potência reativa

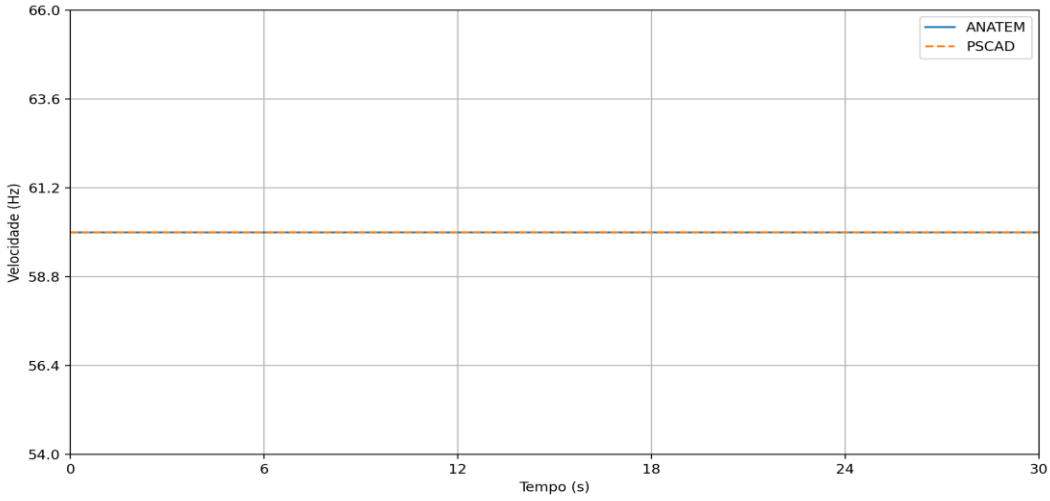

Figura 4-908 – Velocidade da máquina

4.36.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

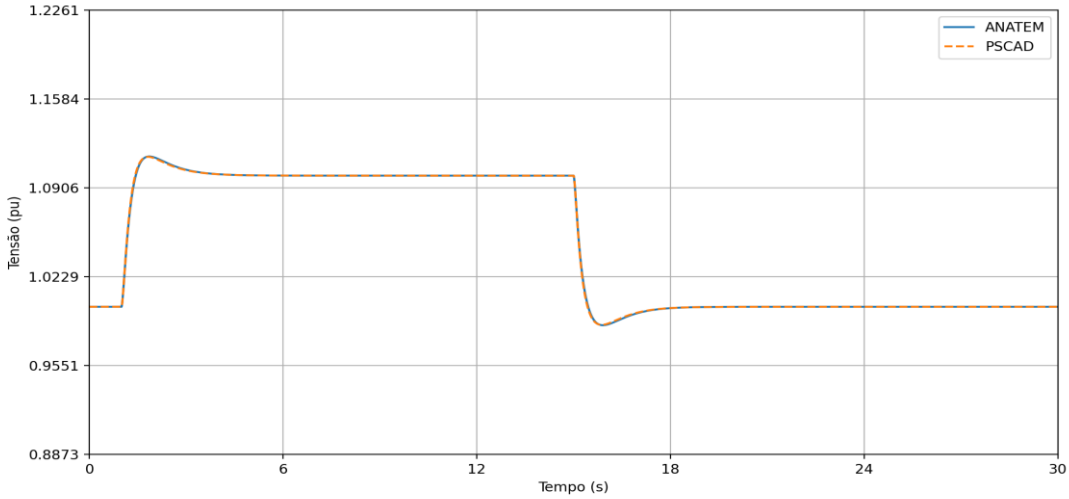

Figura 4-909 – Tensão terminal

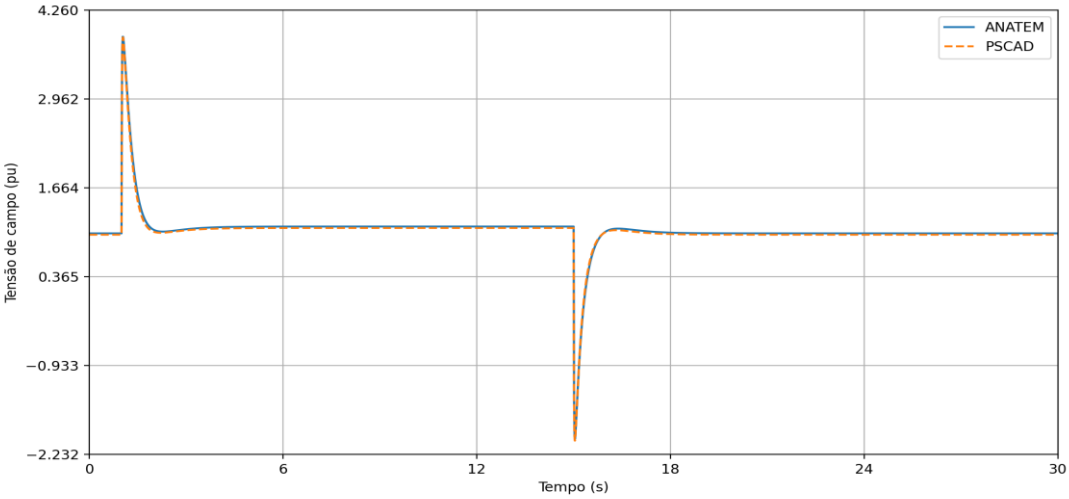

Figura 4-910 – Tensão de campo

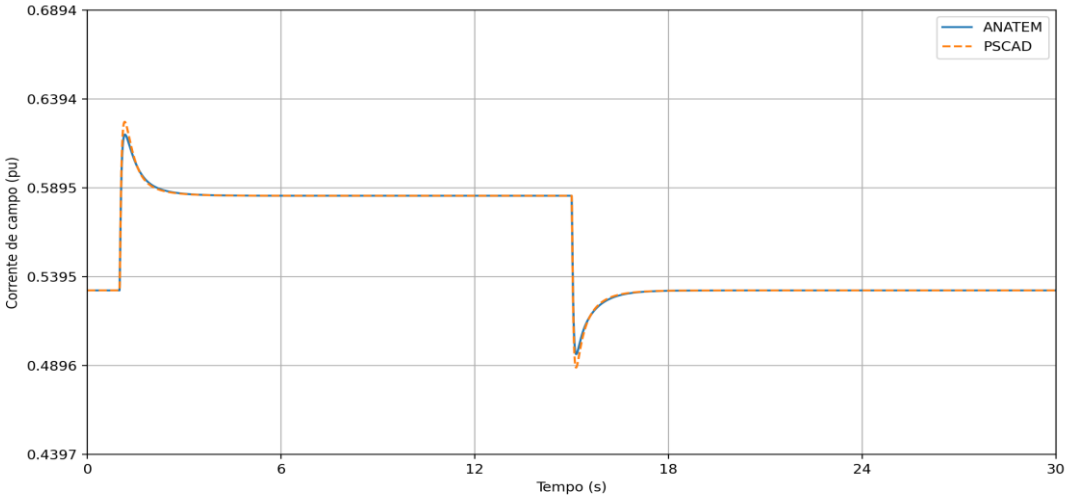

Figura 4-911 – Corrente de campo

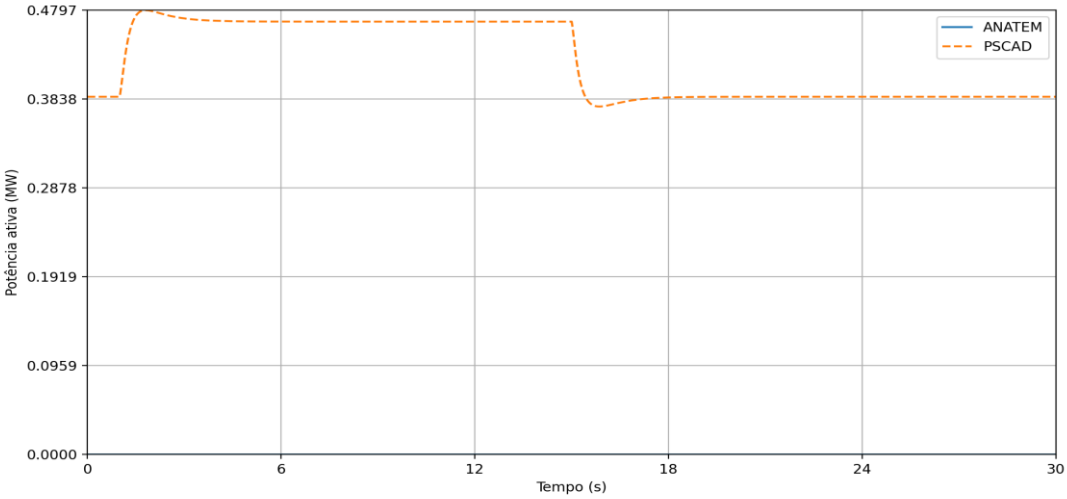

Figura 4-912 – Potência ativa

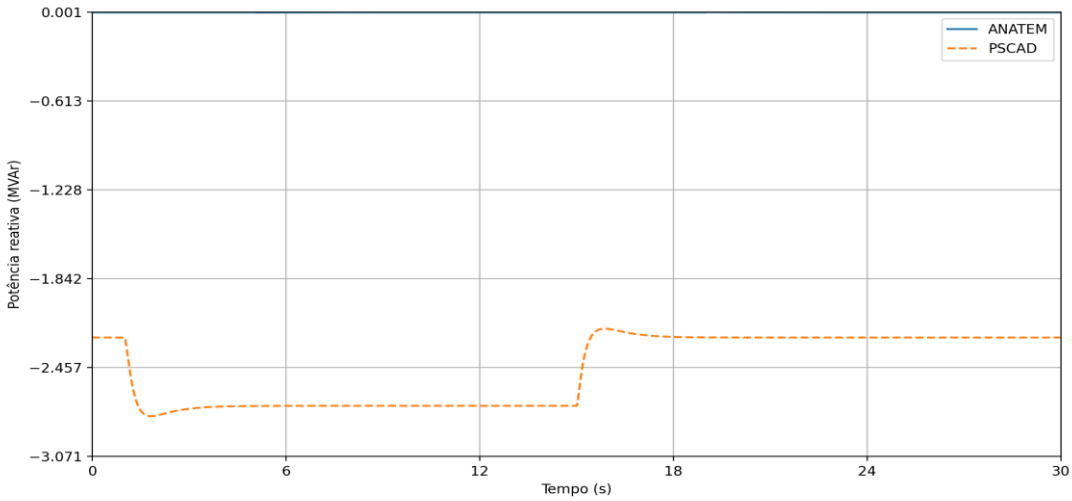

Figura 4-913 – Potência reativa

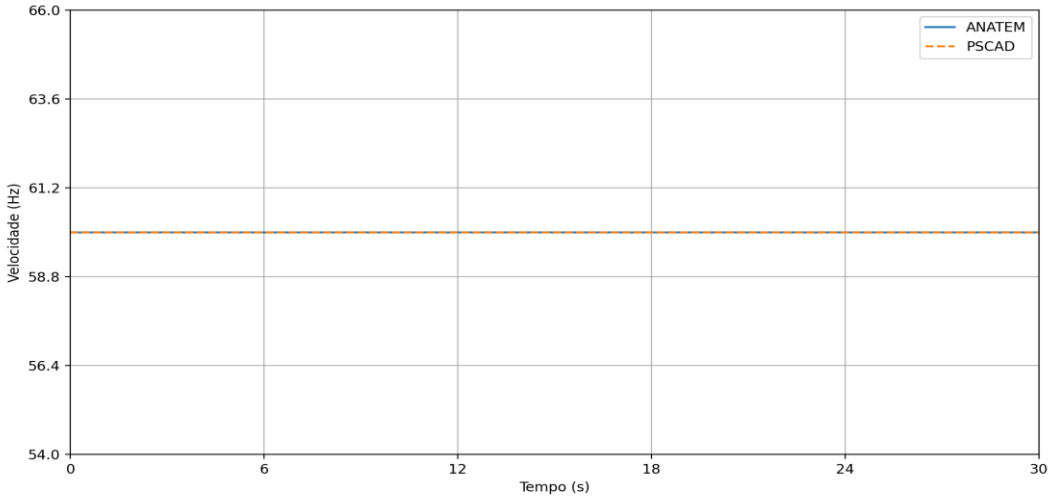

Figura 4-914 – Velocidade da máquina

4.36.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.36.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.36.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.36.4.3.

4.36.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

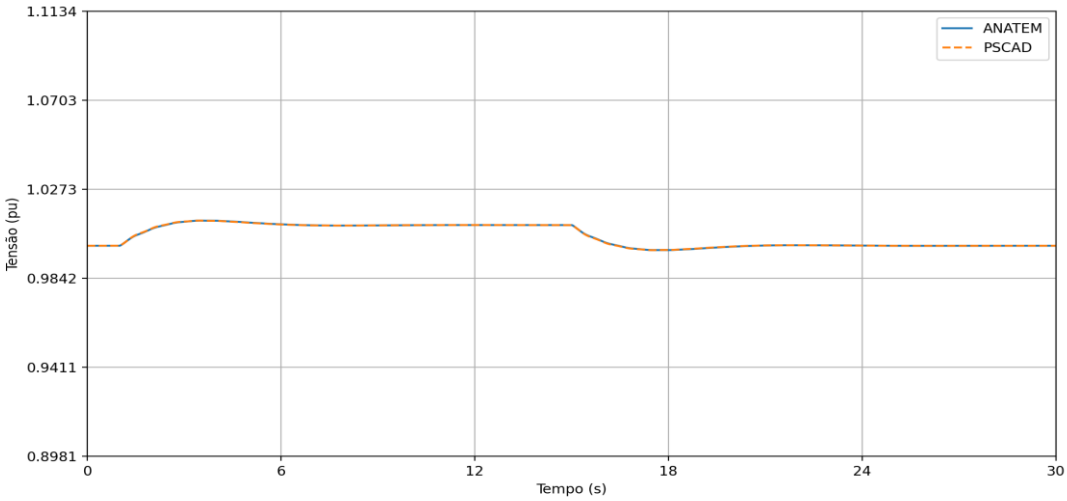

Figura 4-915 – Tensão terminal

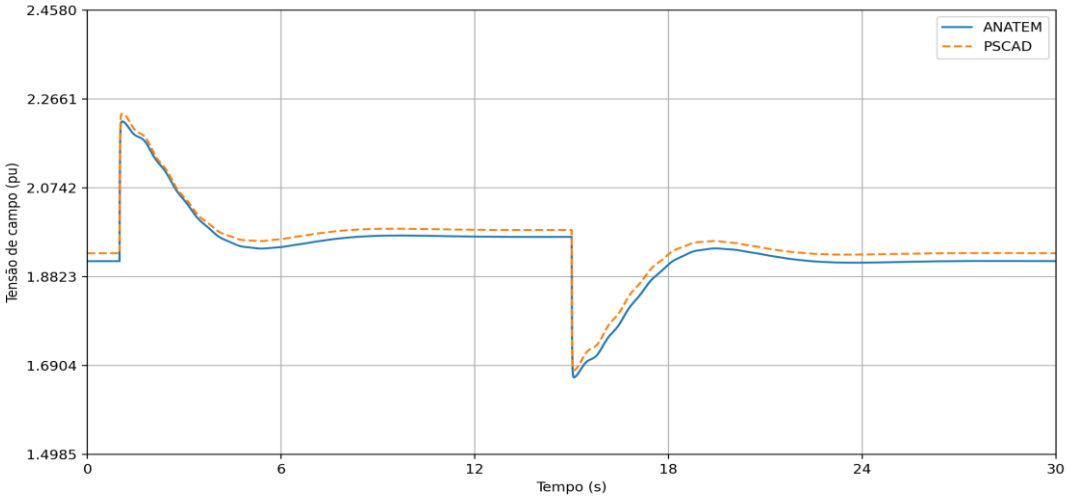

Figura 4-916 – Tensão de campo

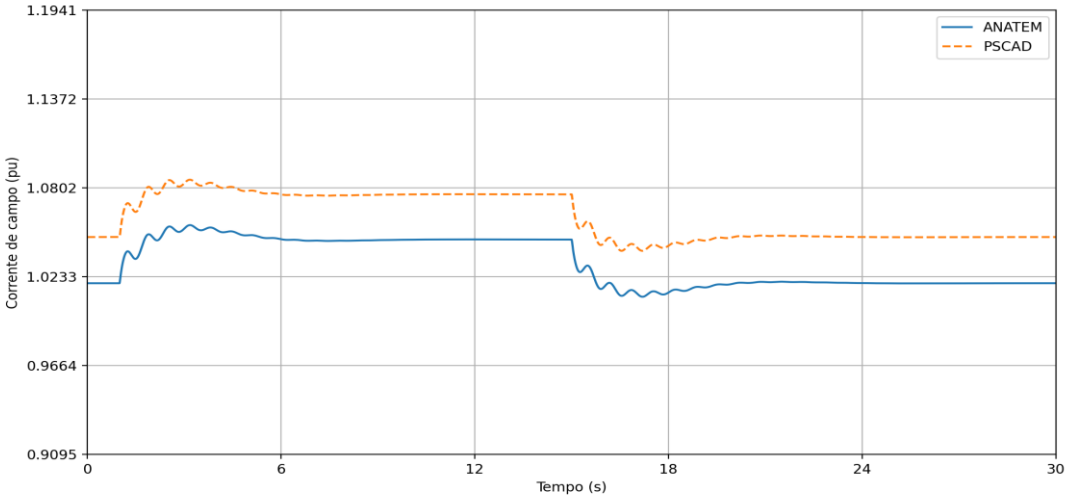

Figura 4-917 – Corrente de campo

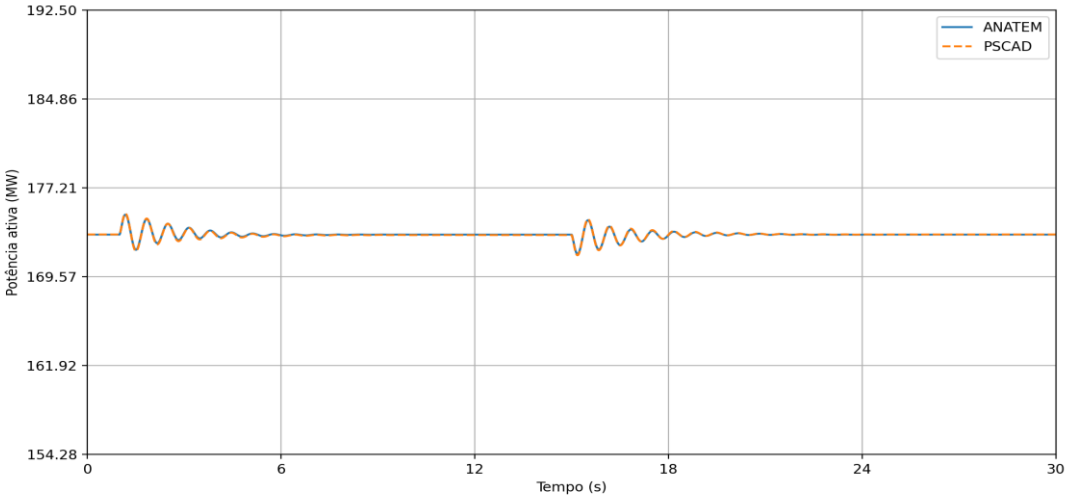

Figura 4-918 – Potência ativa

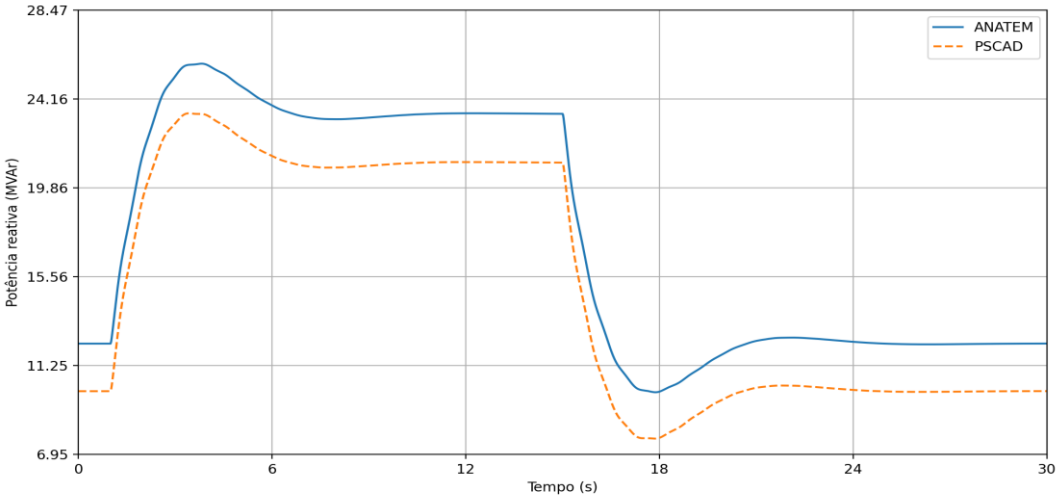

Figura 4-919 – Potência reativa

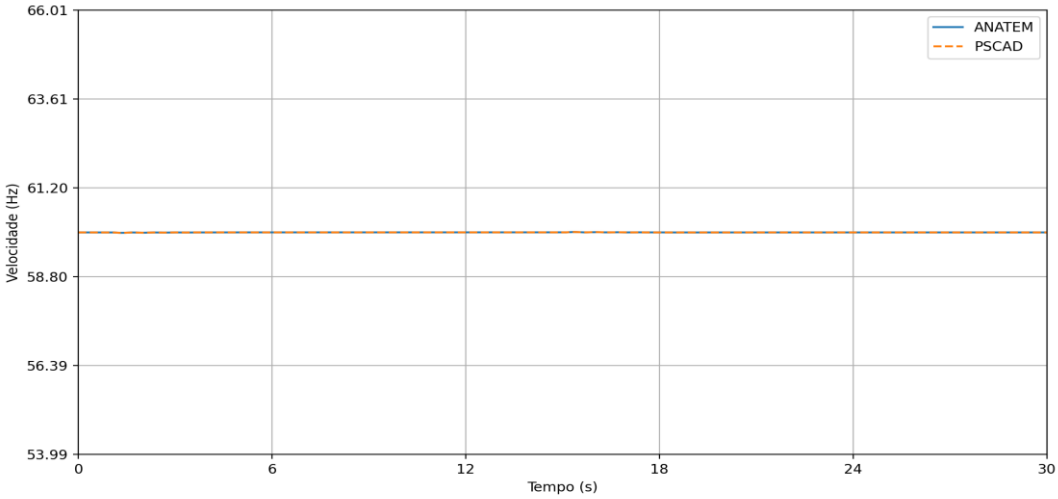

Figura 4-920 – Velocidade da máquina

4.36.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

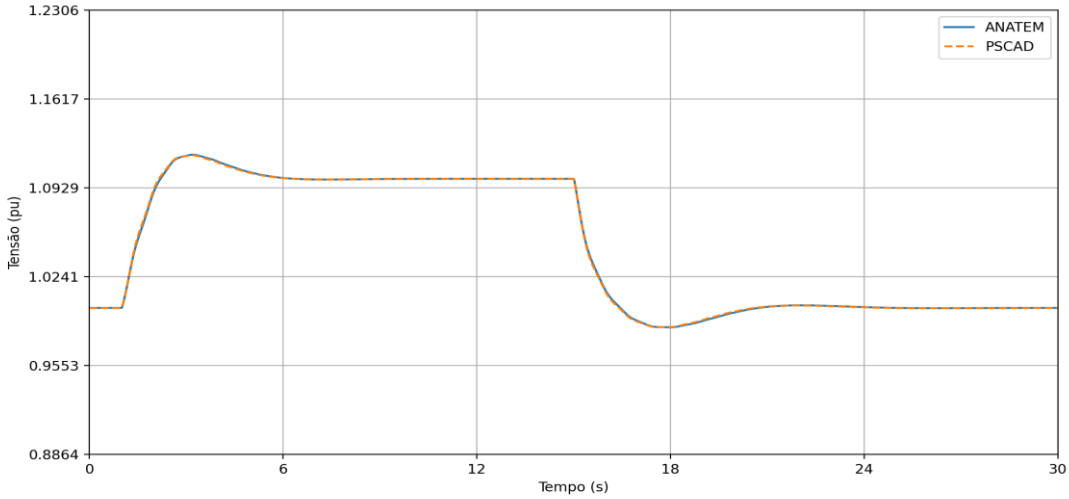

Figura 4-921 – Tensão terminal

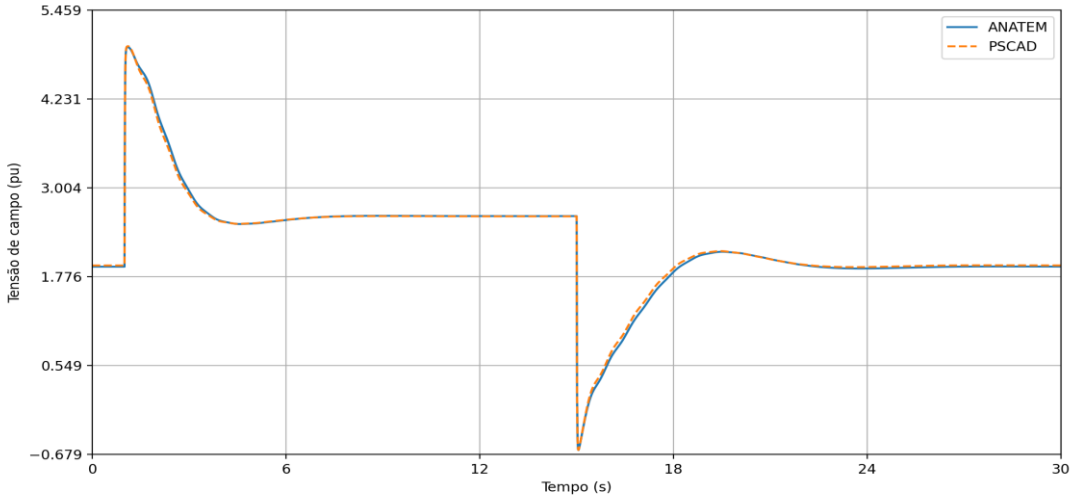

Figura 4-922 – Tensão de campo

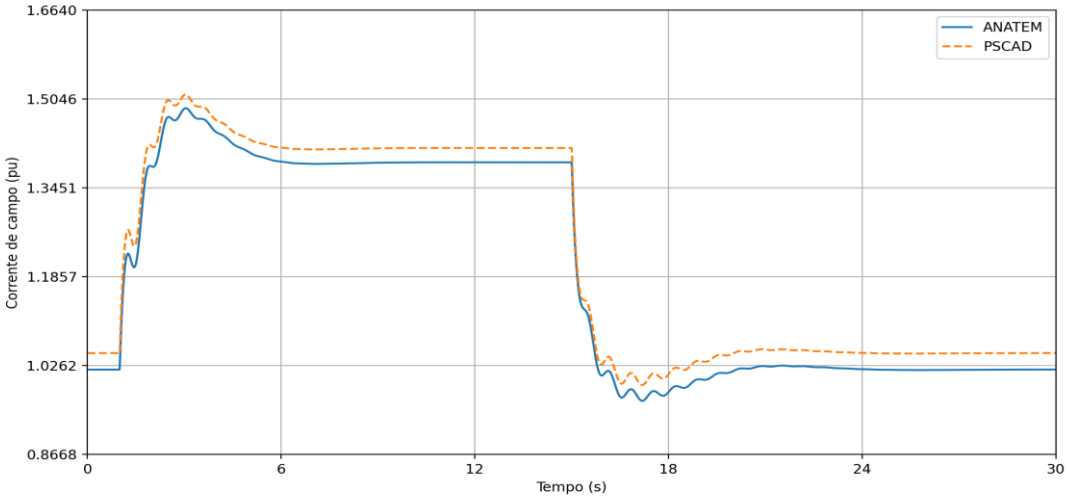

Figura 4-923 – Corrente de campo

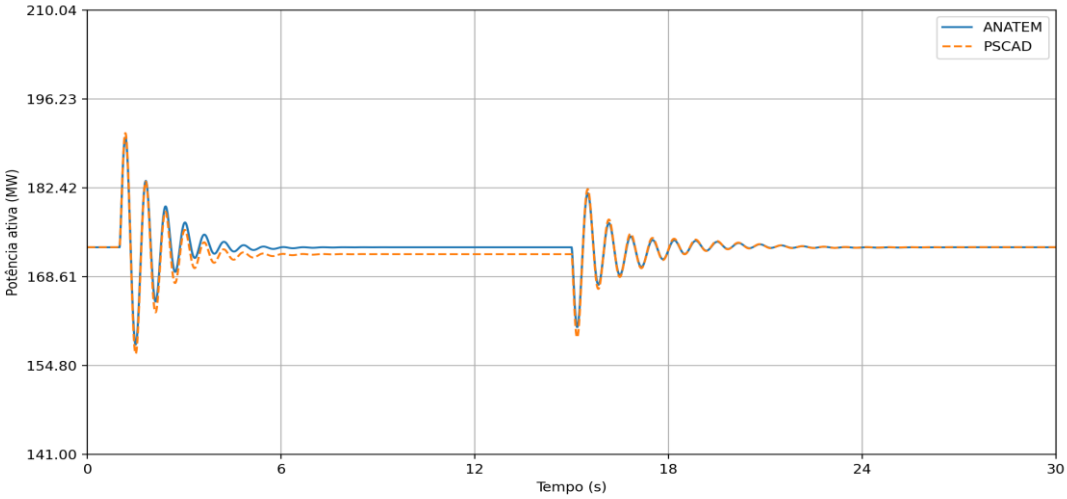

Figura 4-924 – Potência ativa

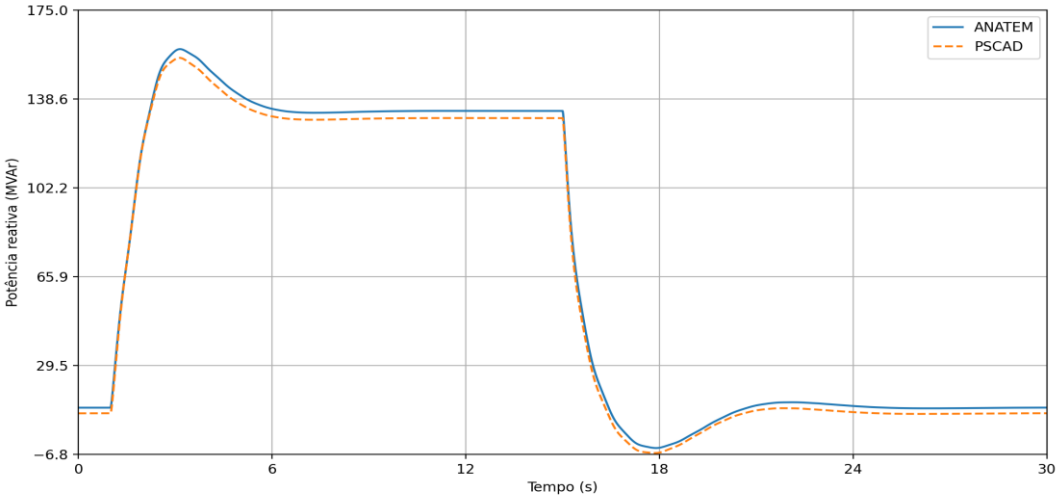

Figura 4-925 – Potência reativa

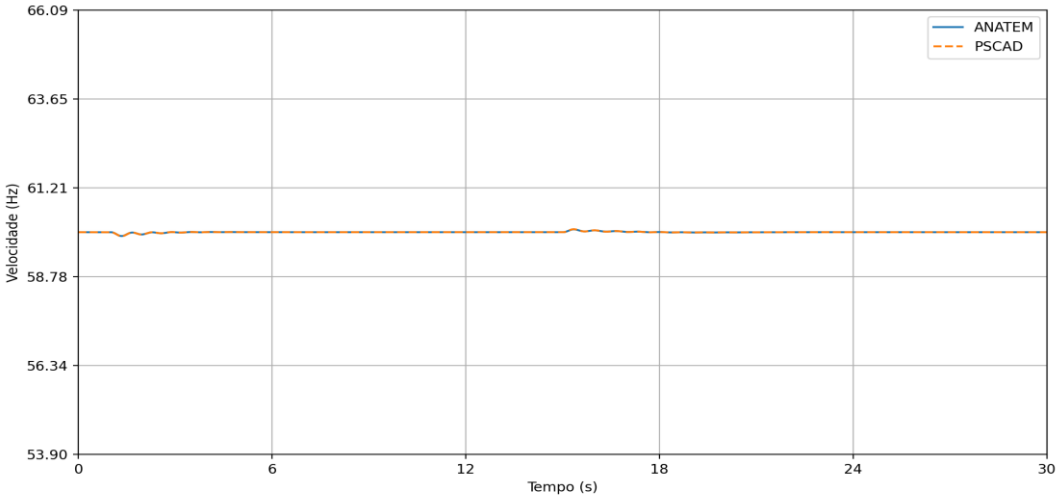

Figura 4-926 – Velocidade da máquina

4.36.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

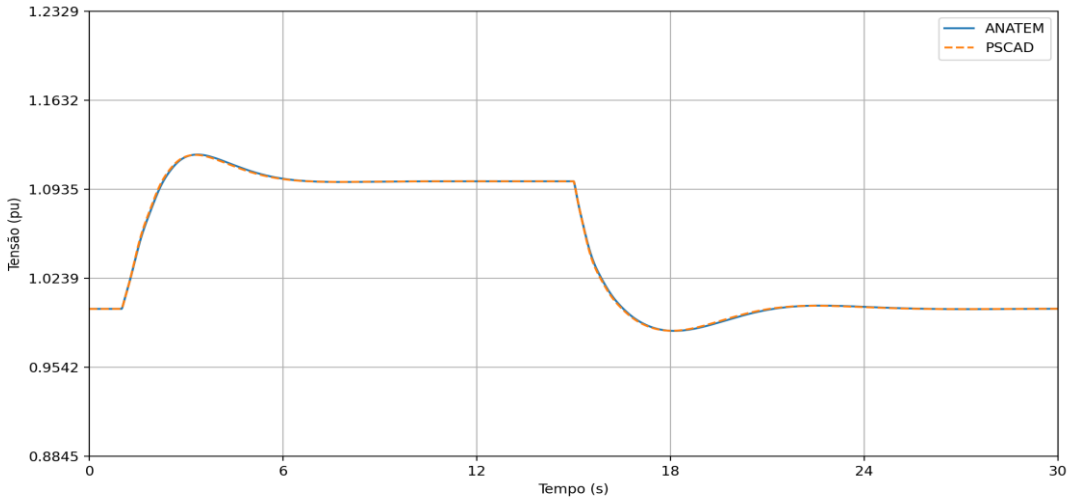

Figura 4-927 – Tensão terminal

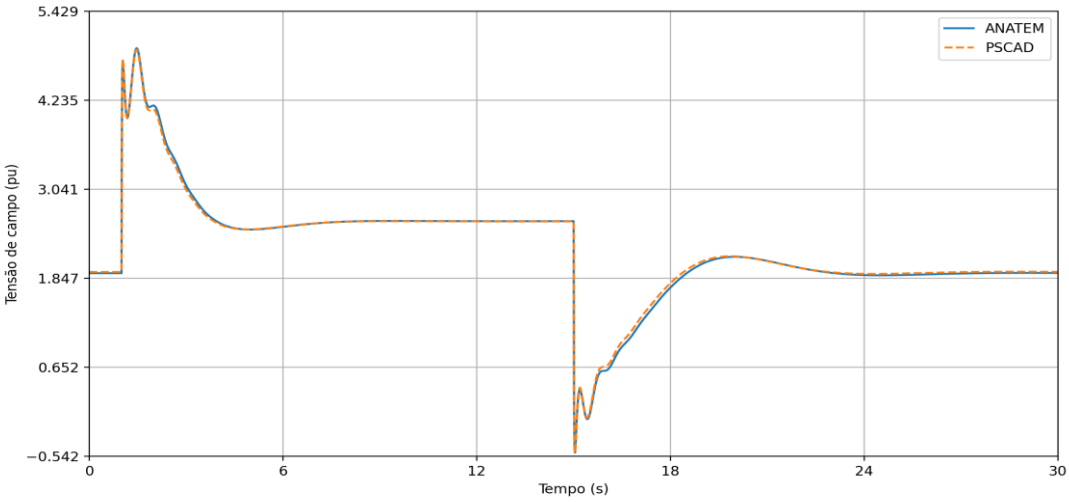

Figura 4-928 – Tensão de campo

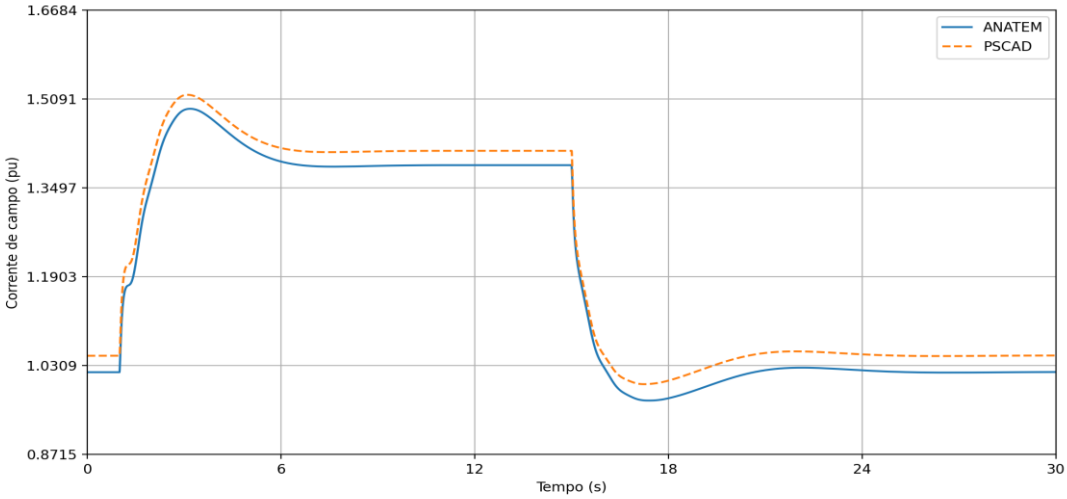

Figura 4-929 – Corrente de campo

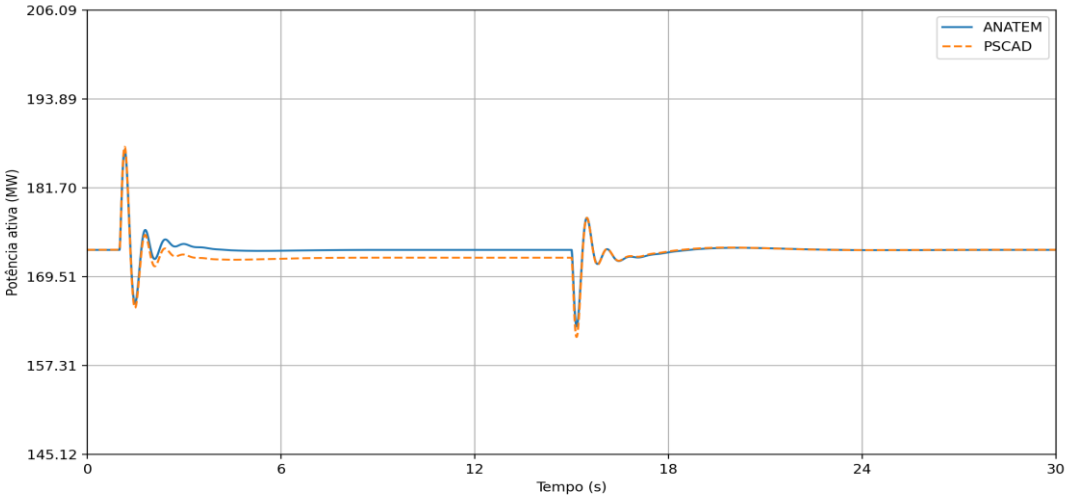

Figura 4-930 – Potência ativa

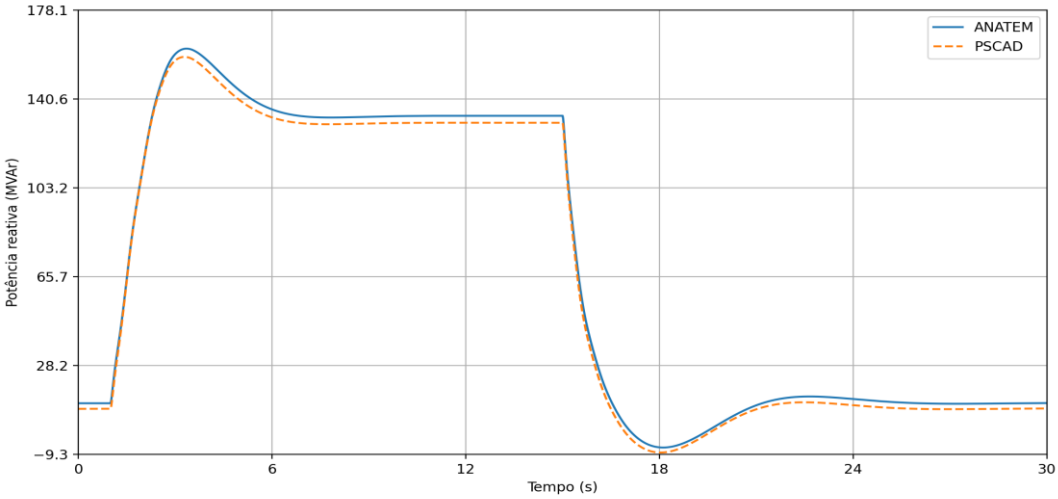

Figura 4-931 – Potência reativa

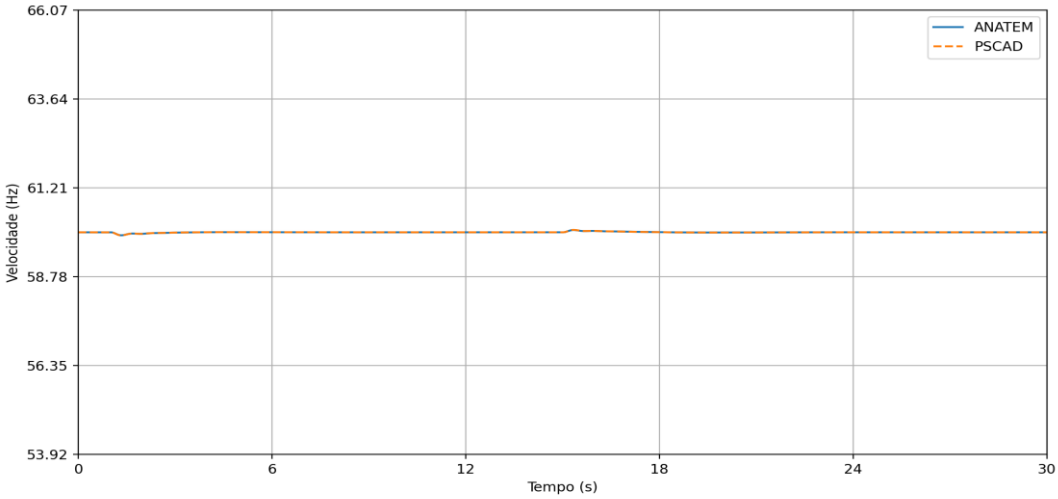

Figura 4-932 – Velocidade da máquina

4.37 UTE PARNAÍBA IV

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UTE Parnaíba IV, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão e velocidade, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.37.1 Modelo da UTE Parnaíba IV

A Tabela 4-109 apresenta os parâmetros da UTE Parnaíba IV disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-109 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	178,3	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	98,5	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	38,1	I(KA)	0,981	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	21,1	H(s)	0,803	
xl(%)	18,2	D(pu)	0	
T'd(s)	7,892	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,182	Reatância de Potier
T''d(s)	0,042	xd(pu)	1,783	
T''q(s)	0,153	xd_(pu)	0,381	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	7,892	T'd
H(s)	0,803	xd__(pu)	0,211	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,042	T''d
S(MVA)	23,44	Xq(pu)	0,985	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,211	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,153	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.37.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-110, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UTE Parnaíba IV estão apresentados na Tabela

4-111. A partir dos parâmetros da Tabela 4-110, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-111. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-933.

Tabela 4-110 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UTE Parnaíba IV	
Ag	**Y1**	0,1447
Bg	**Y2**	2,7122
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-111 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,017	0,000
0,945	0,800
1,167	0,950
1,208	0,975
1,249	1,000
1,305	1,033
1,366	1,067
1,426	1,100
1,628	1,200
1,862	1,300

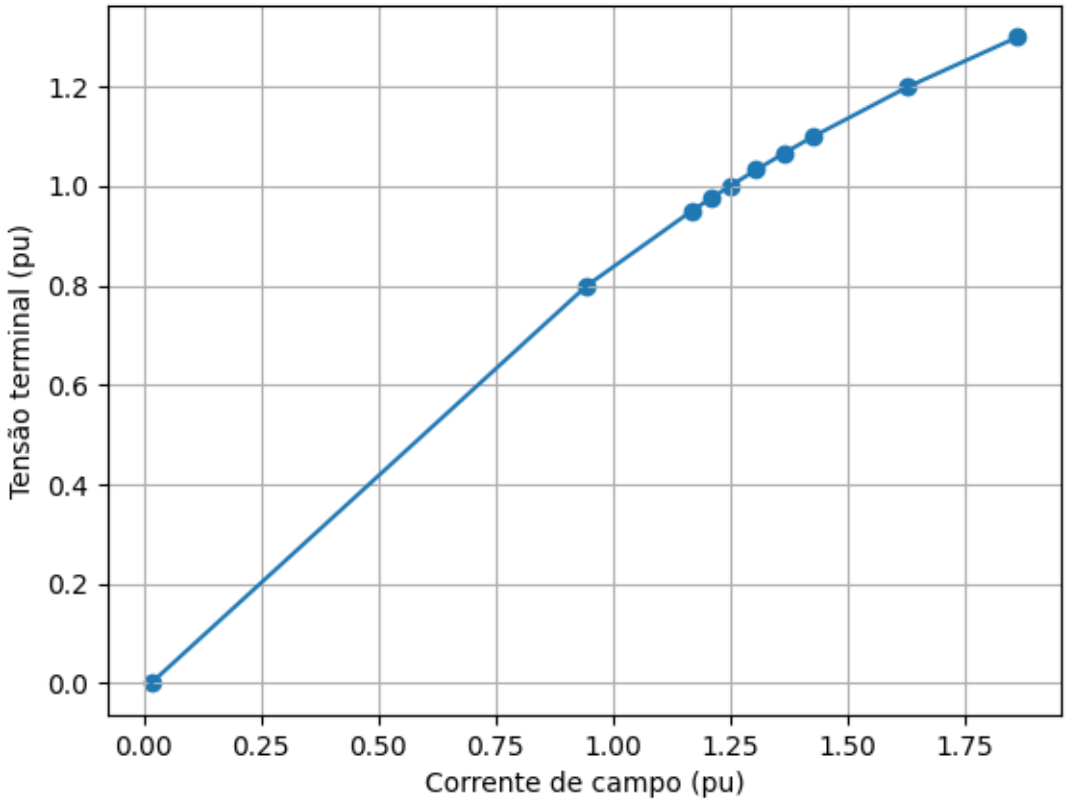

Figura 4-933 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.37.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.37.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.37.3.2, Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.37.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

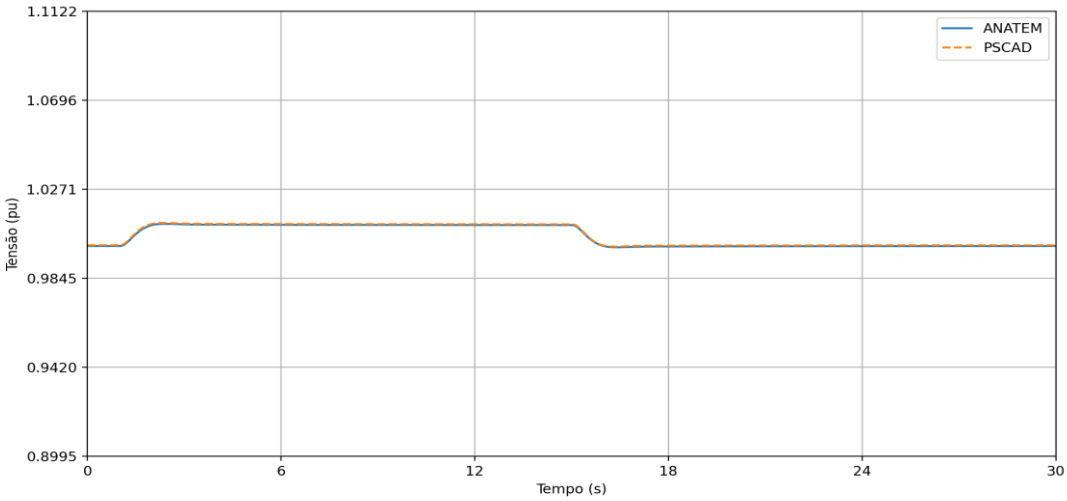

Figura 4-934 – Tensão terminal

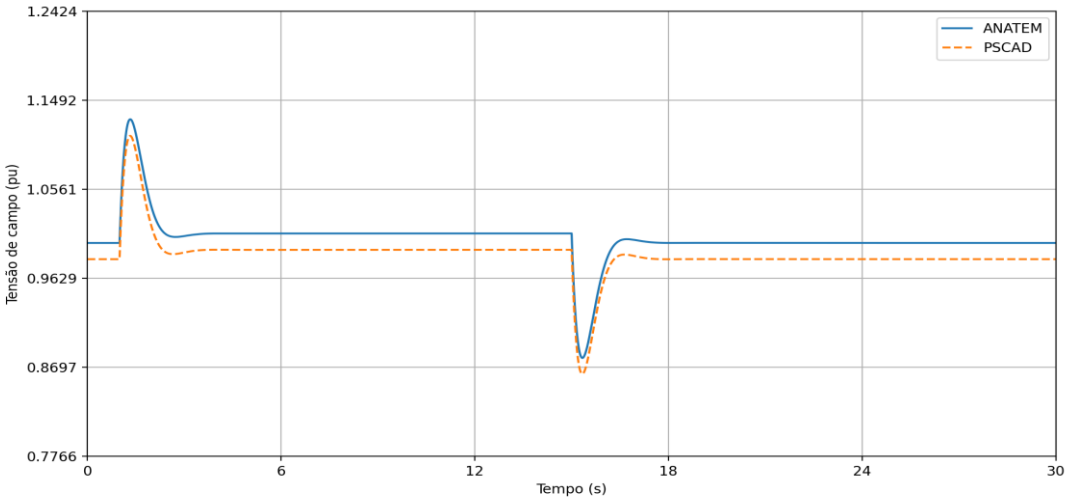

Figura 4-935 – Tensão de campo

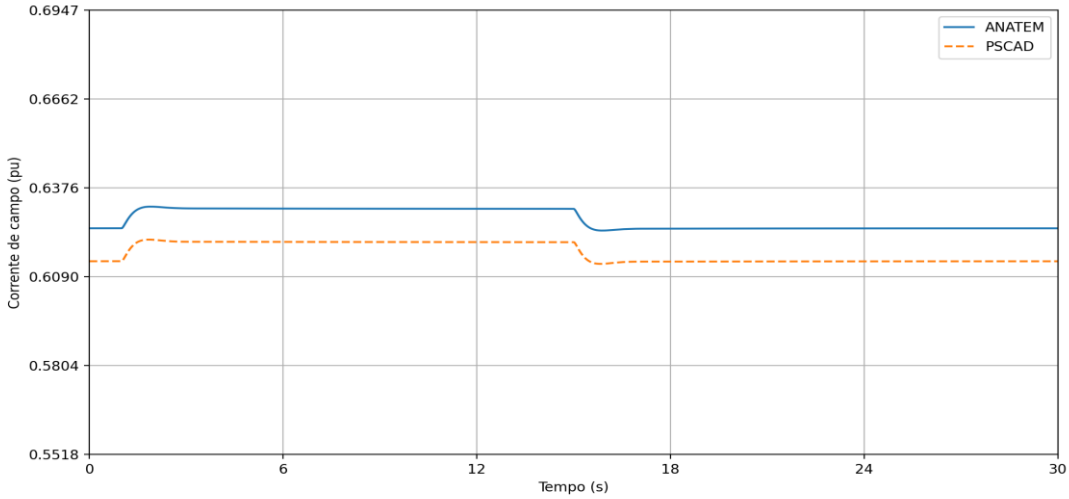

Figura 4-936 – Corrente de campo

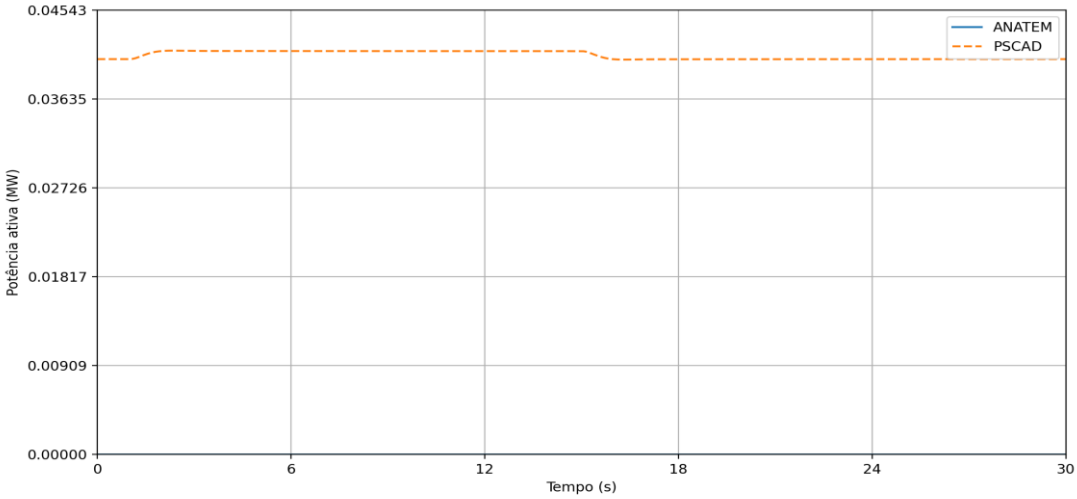

Figura 4-937 – Potência ativa

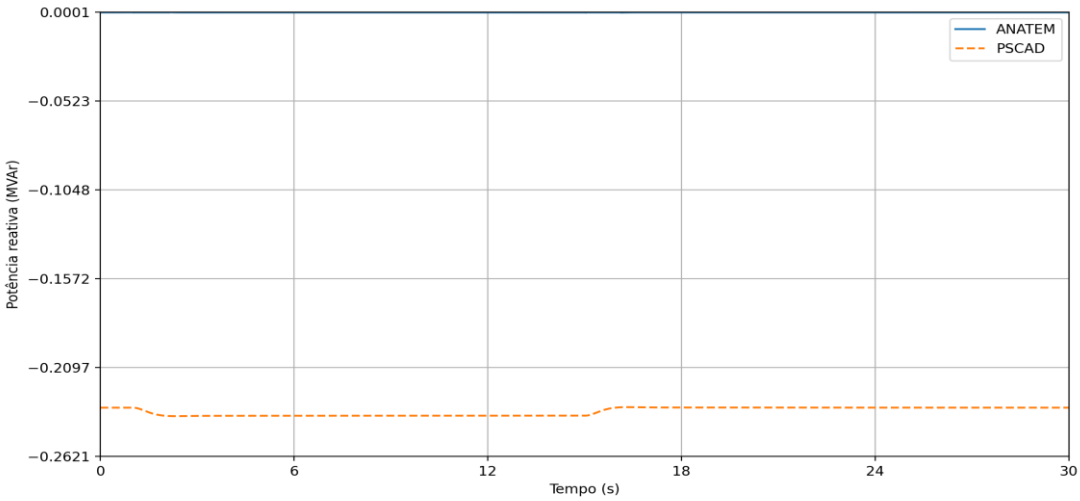

Figura 4-938 – Potência reativa

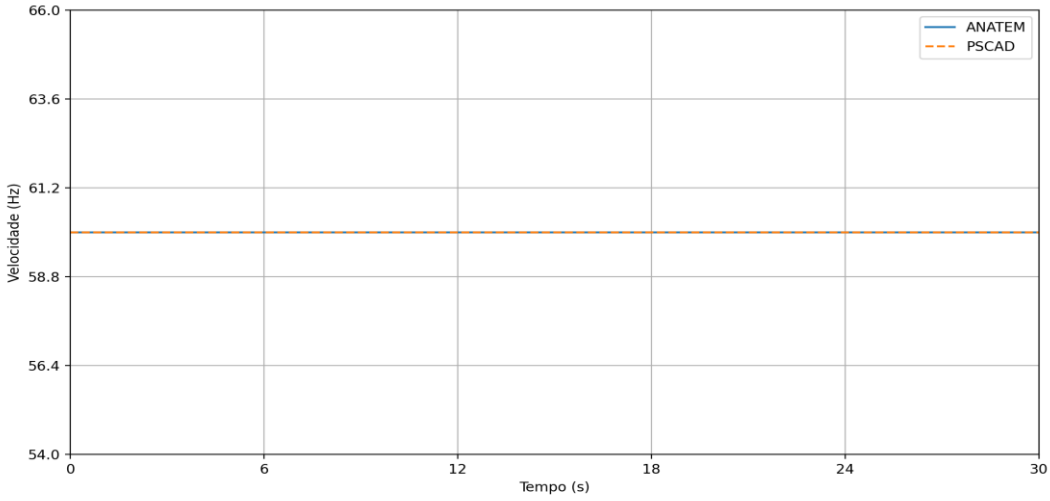

Figura 4-939 – Velocidade da máquina

4.37.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

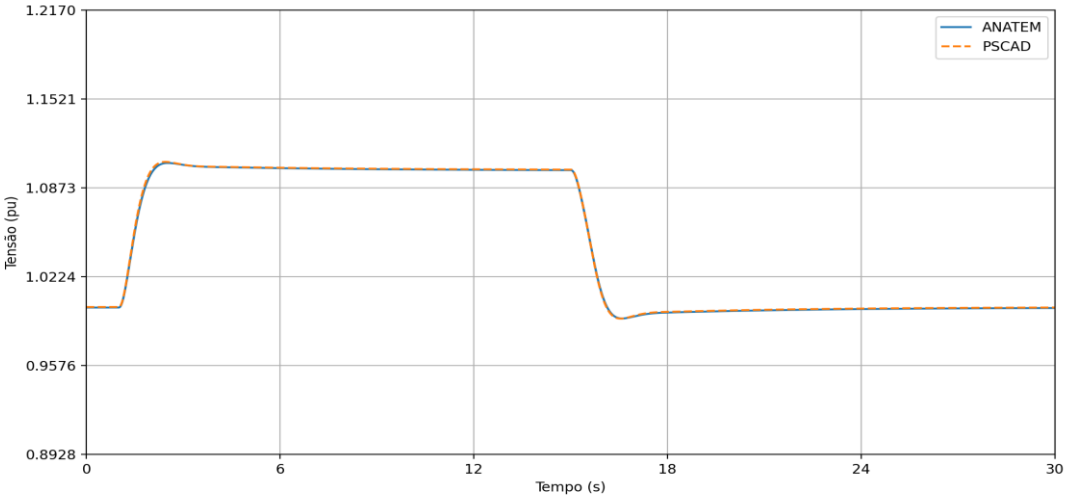

Figura 4-940 – Tensão terminal

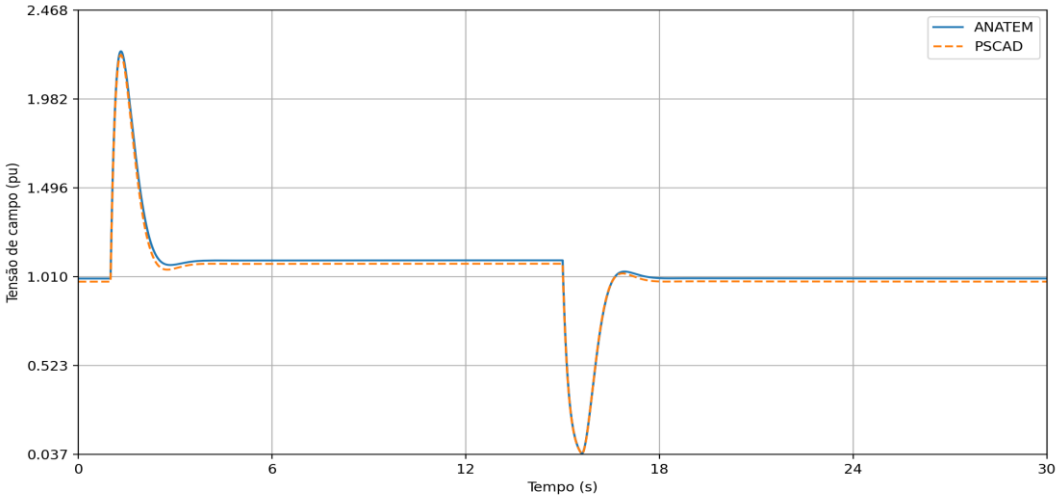

Figura 4-941 – Tensão de campo

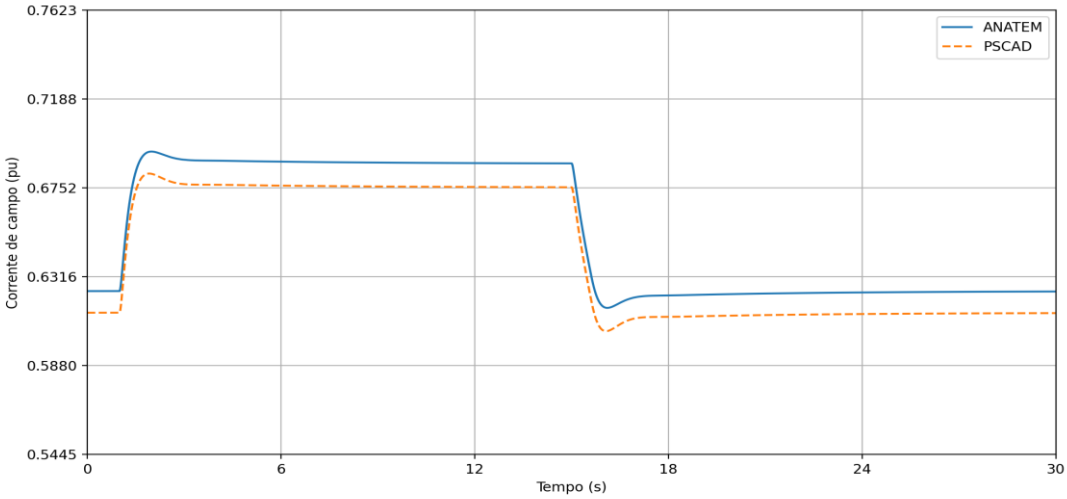

Figura 4-942 – Corrente de campo

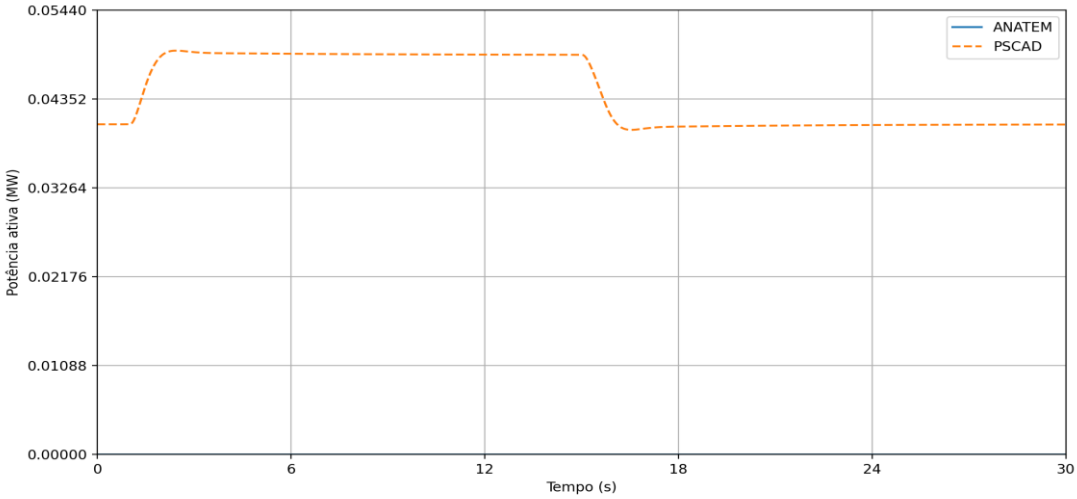

Figura 4-943 – Potência ativa

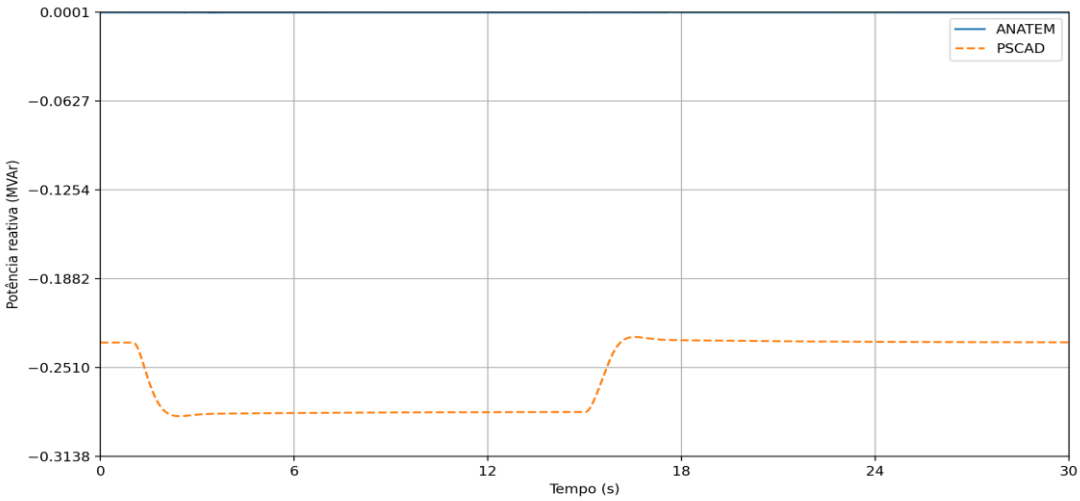

Figura 4-944 – Potência reativa

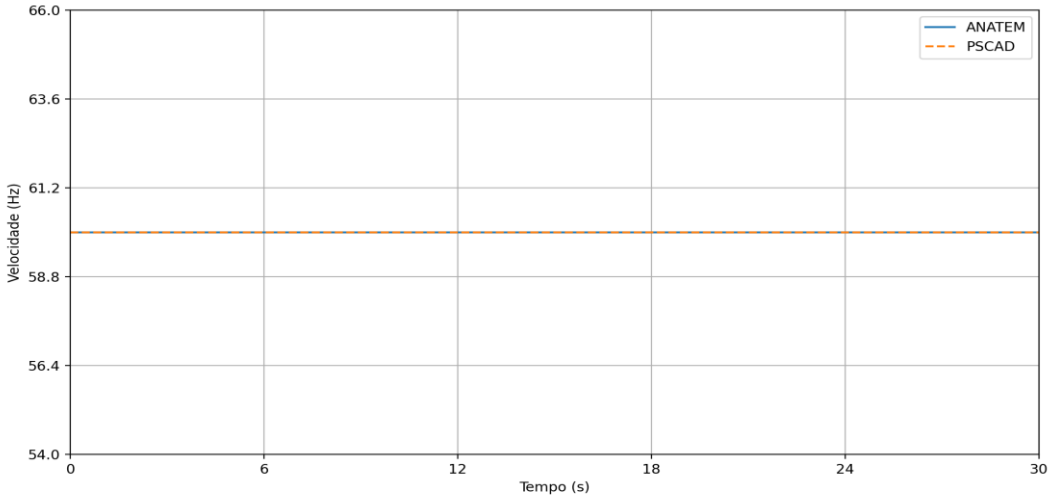

Figura 4-945 – Velocidade da máquina

4.37.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.37.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.37.4.2.

4.37.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

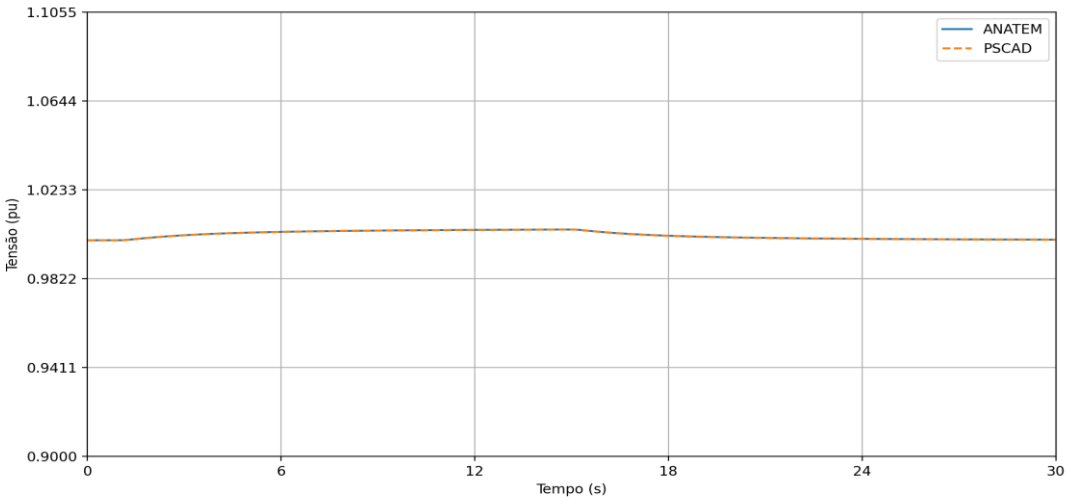

Figura 4-946 – Tensão terminal

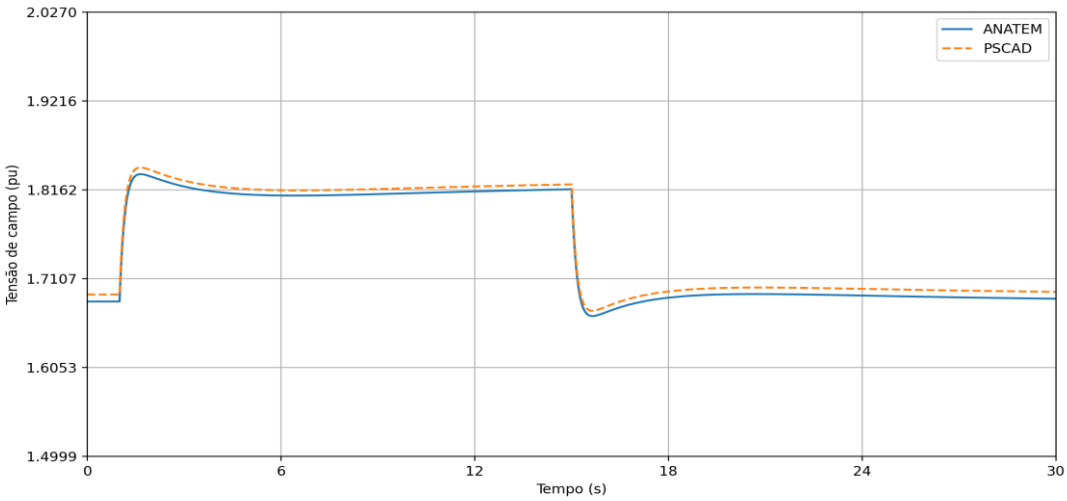

Figura 4-947 – Tensão de campo

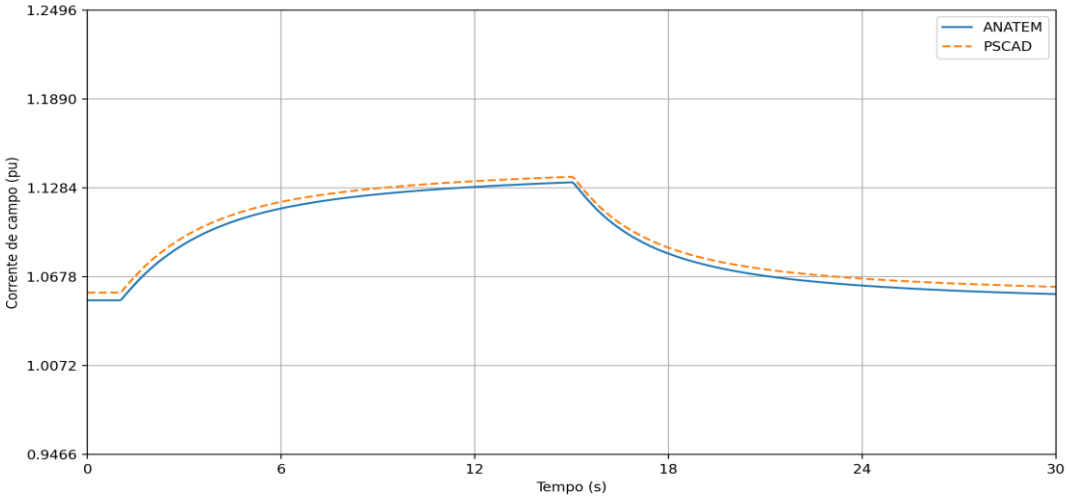

Figura 4-948 – Corrente de campo

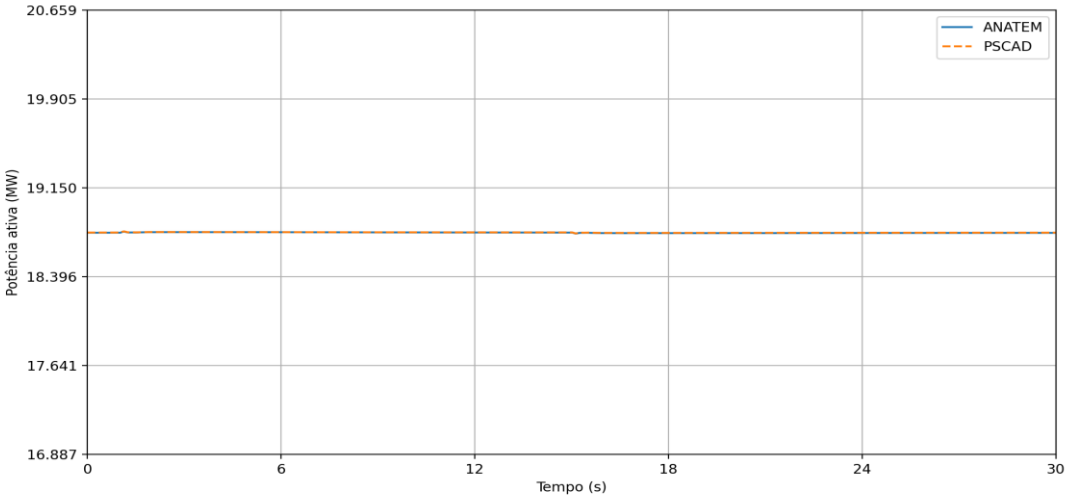

Figura 4-949 – Potência ativa

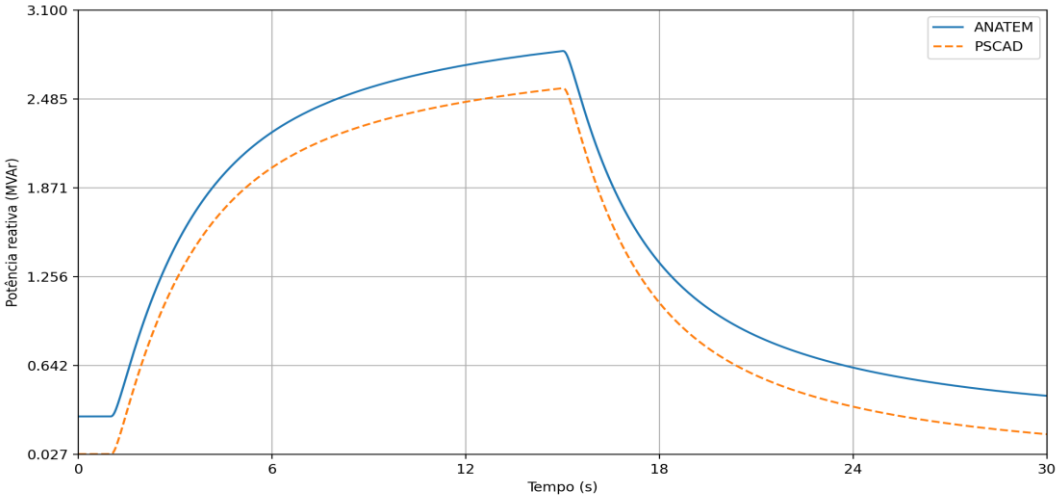

Figura 4-950 – Potência reativa

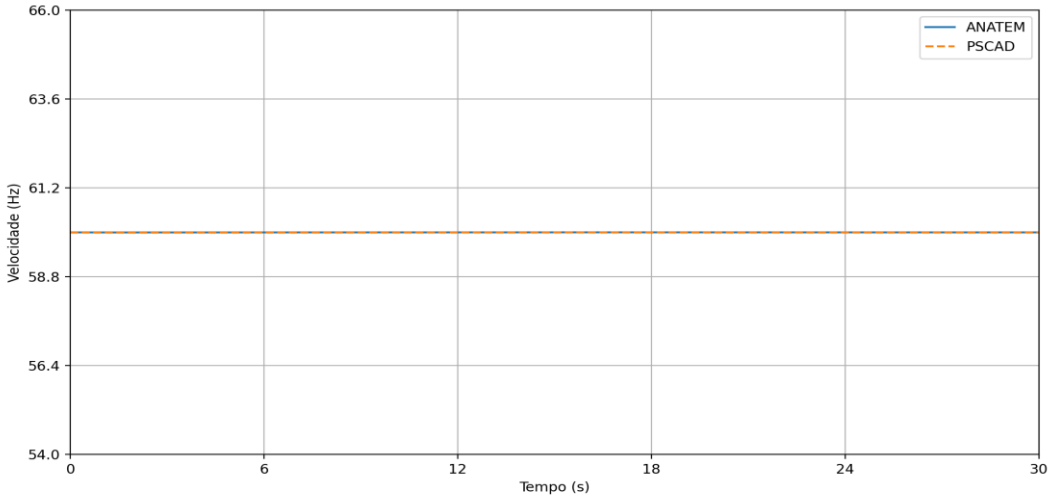

Figura 4-951 – Velocidade da máquina

4.37.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

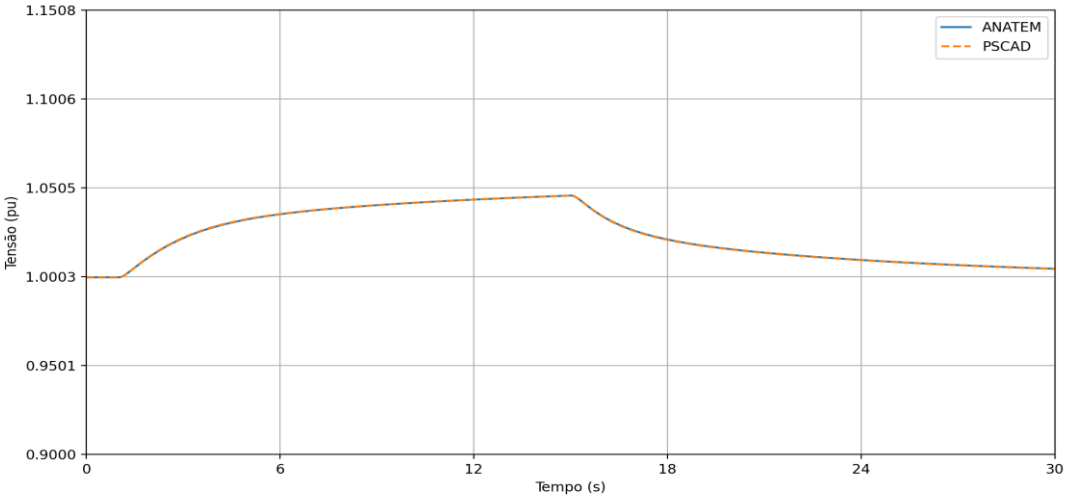

Figura 4-952 – Tensão terminal

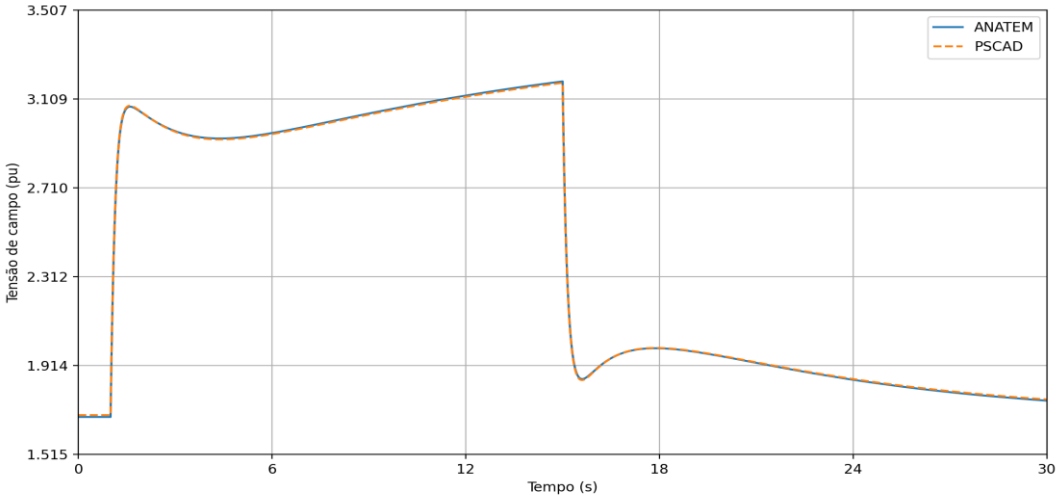

Figura 4-953 – Tensão de campo

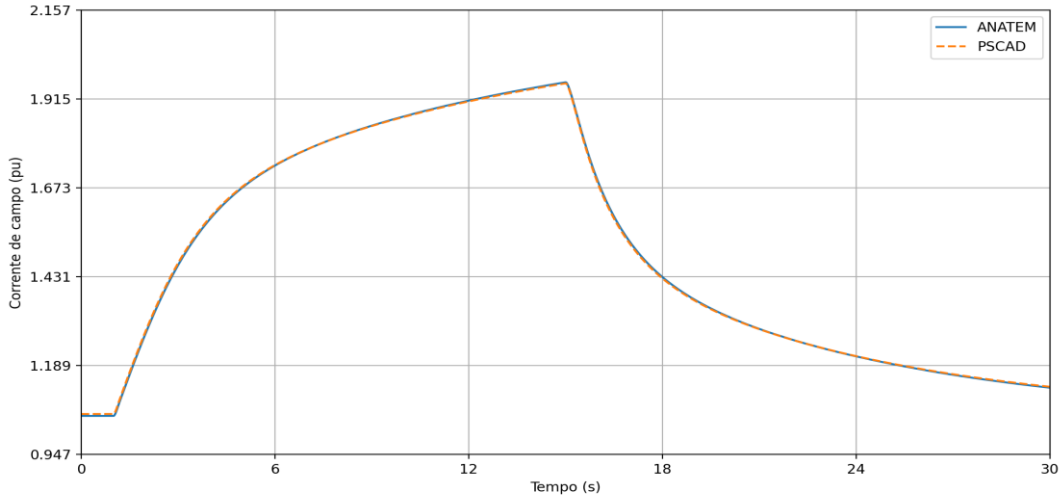

Figura 4-954 – Corrente de campo

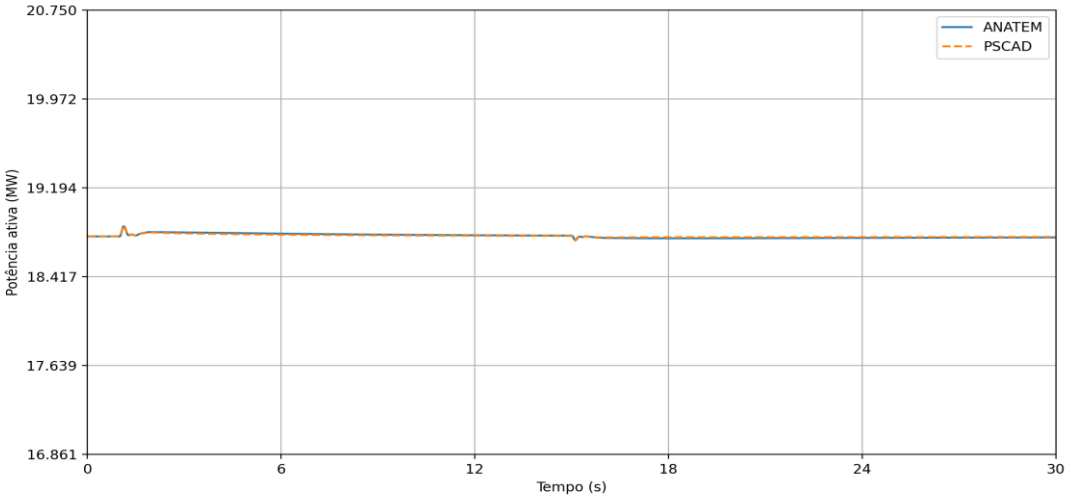

Figura 4-955 – Potência ativa

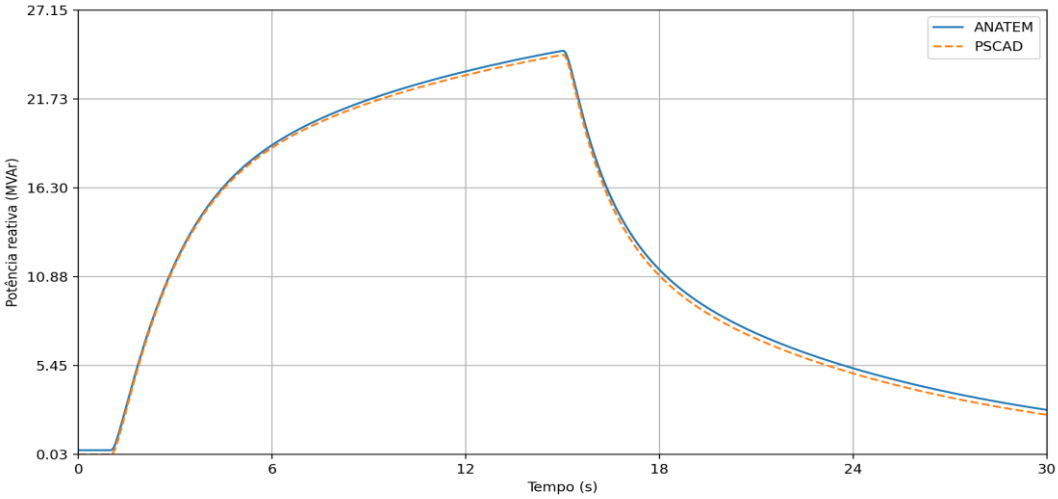

Figura 4-956 – Potência reativa

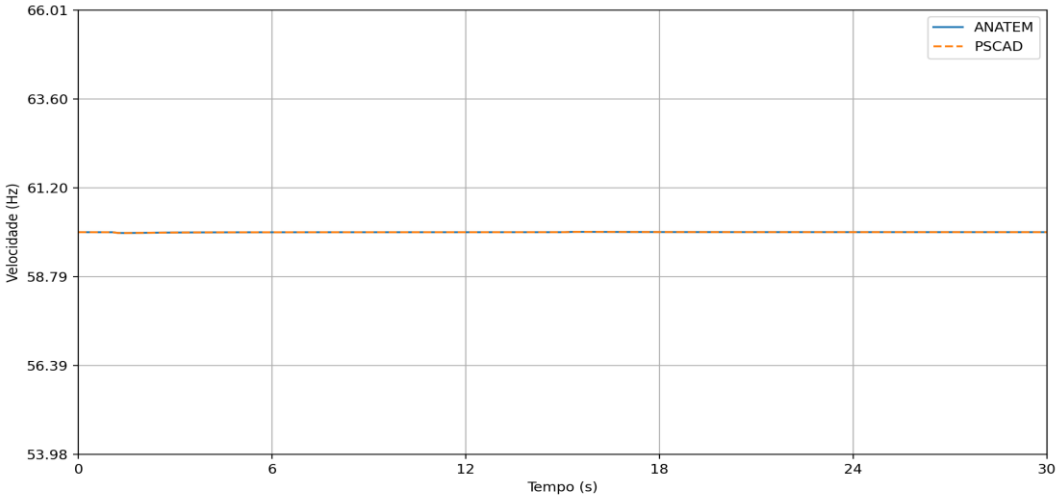

Figura 4-957 – Velocidade da máquina

4.38 UTE PARNAÍBA 5ª

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UTE PARNAÍBA 5ª, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.38.1 Modelo da UTE PARNAÍBA 5ª

A Tabela 4-112 apresenta os parâmetros da UTE PARNAÍBA 5ª disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-112 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	193	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	182	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	24	I(KA)	8,953	
x'q (%)	43	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	18	H(s)	5,35	
xl(%)	13,5	D(pu)	0	
T'd(s)	7,039	Ra(pu)	0,001	
T'q(s)	0,557	xp(pu)	0,135	Reatância de Potier
T''d(s)	0,04	xd(pu)	1,93	
T''q(s)	0,081	xd_(pu)	0,24	x'd
Ra(%)	0,11	Td0_(s)	7,039	T'd
H(s)	5,35	xd__(pu)	0,18	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,04	T''d
S(MVA)	214	Xq(pu)	1,82	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,43	x'q
		Tq0_(s)	0,557	T'q
		xq__(pu)	0,18	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,081	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.38.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-113, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UTE PARNAÍBA 5ª estão apresentados na Tabela

4-114. A partir dos parâmetros da Tabela 4-113, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-114. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-958.

Tabela 4-113 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UTE PARNAÍBA 5ª	
Ag	**Y1**	0,03858
Bg	**Y2**	7,316267
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-114 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,839	0,800
1,066	0,950
1,114	0,975
1,167	1,000
1,245	1,033
1,339	1,067
1,446	1,100
1,92	1,200
2,796	1,300

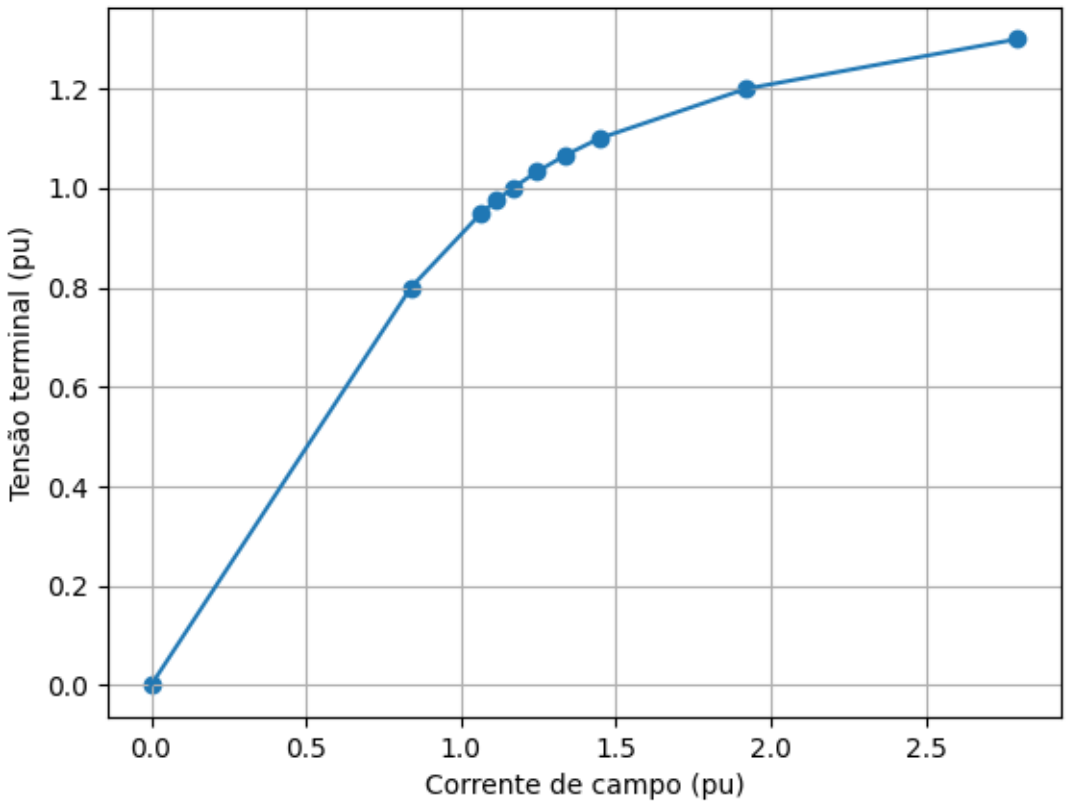

Figura 4-958 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.38.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.38.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.38.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.38.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

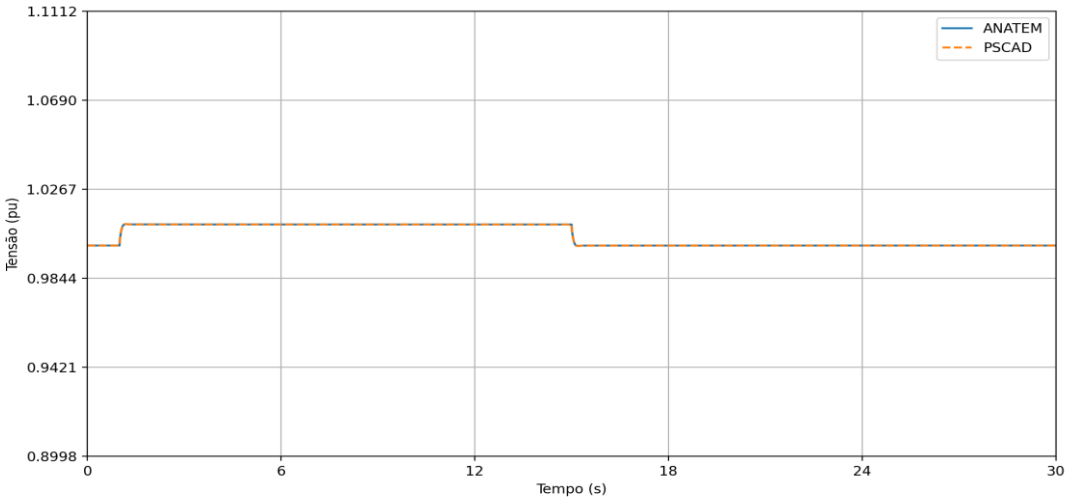

Figura 4-959 – Tensão terminal

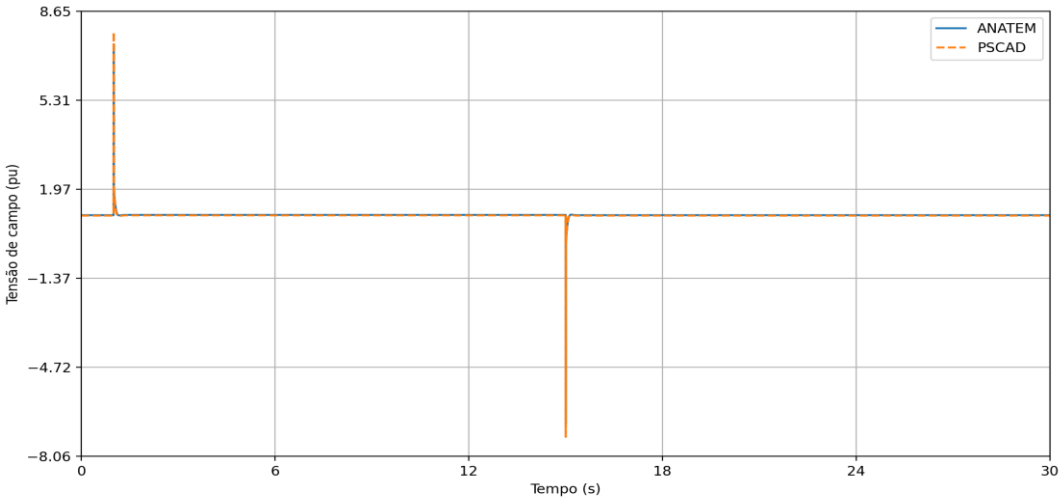

Figura 4-960 – Tensão de campo

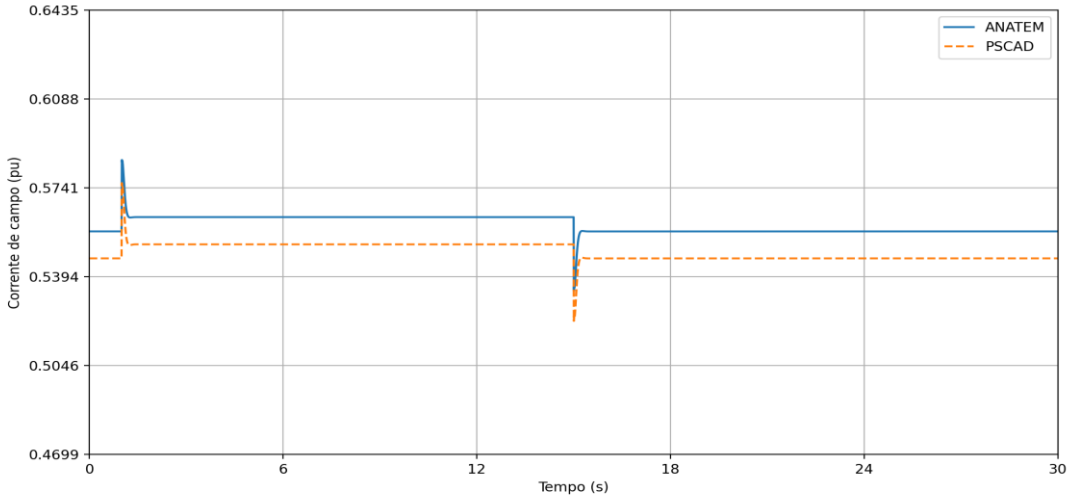

Figura 4-961 – Corrente de campo

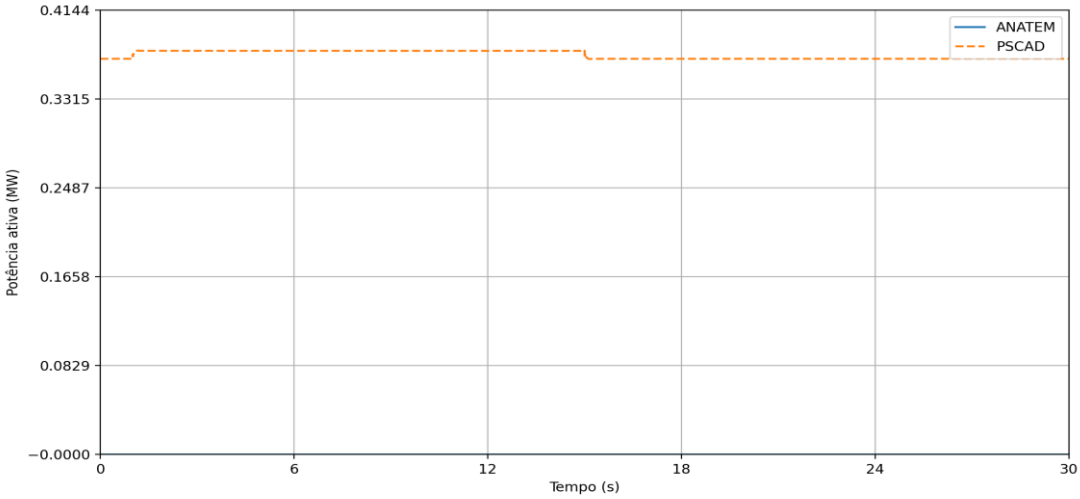

Figura 4-962 – Potência ativa

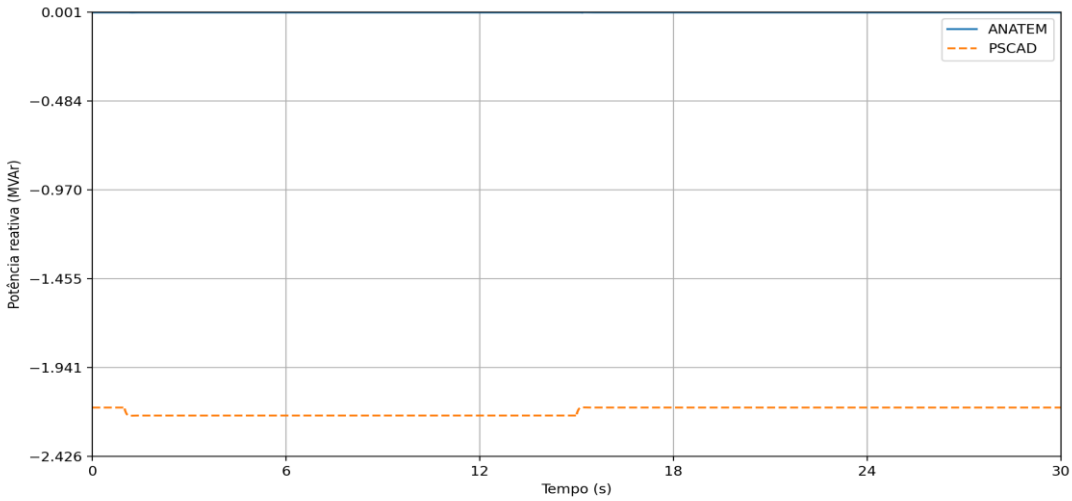

Figura 4-963 – Potência reativa

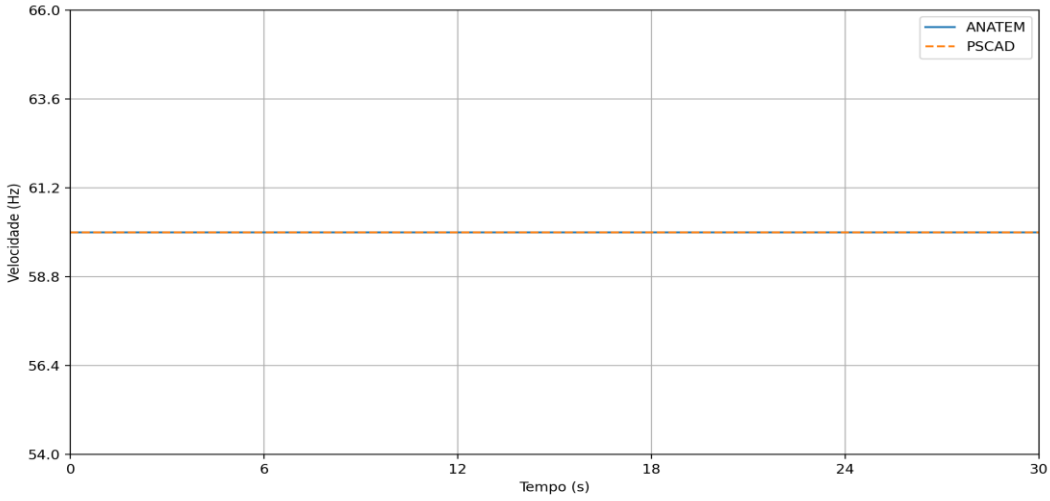

Figura 4-964 – Velocidade da máquina

4.38.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

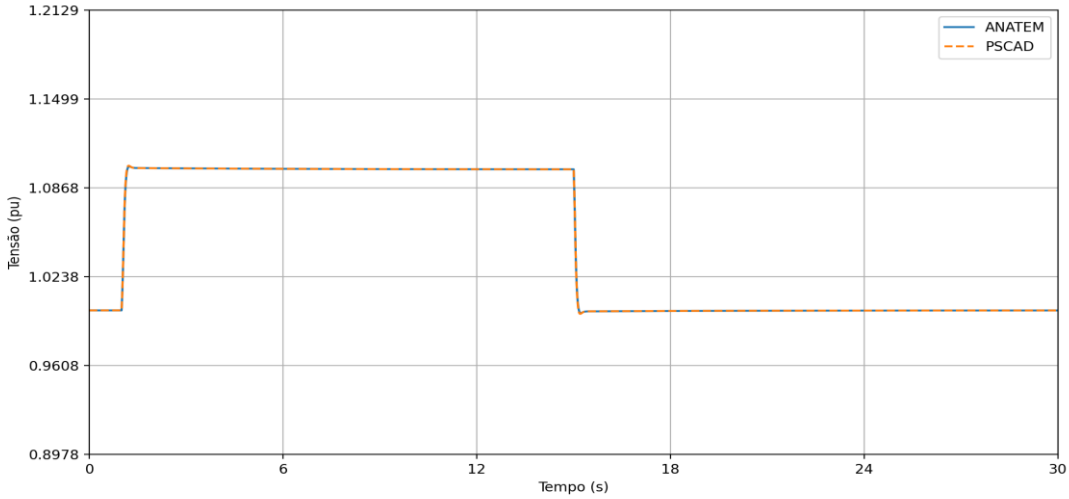

Figura 4-965 – Tensão terminal

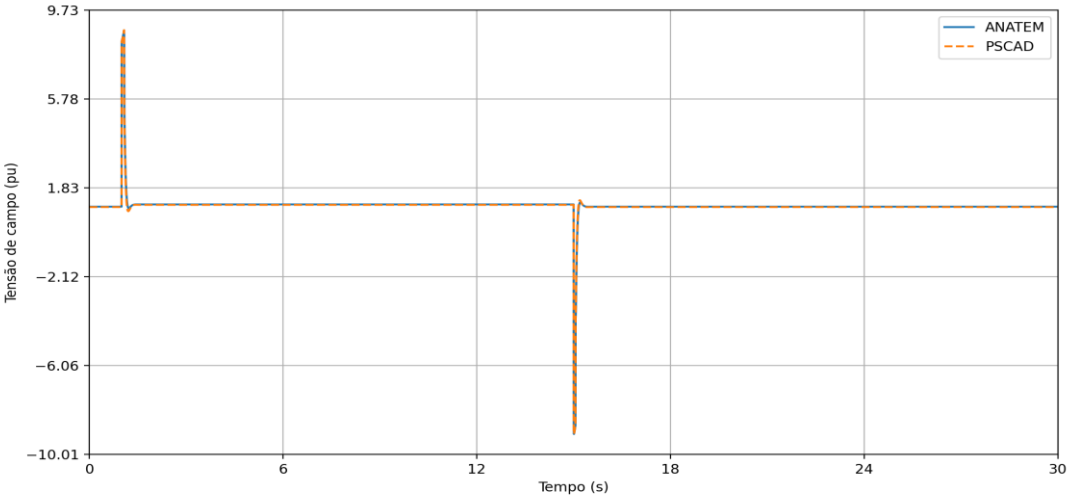

Figura 4-966 – Tensão de campo

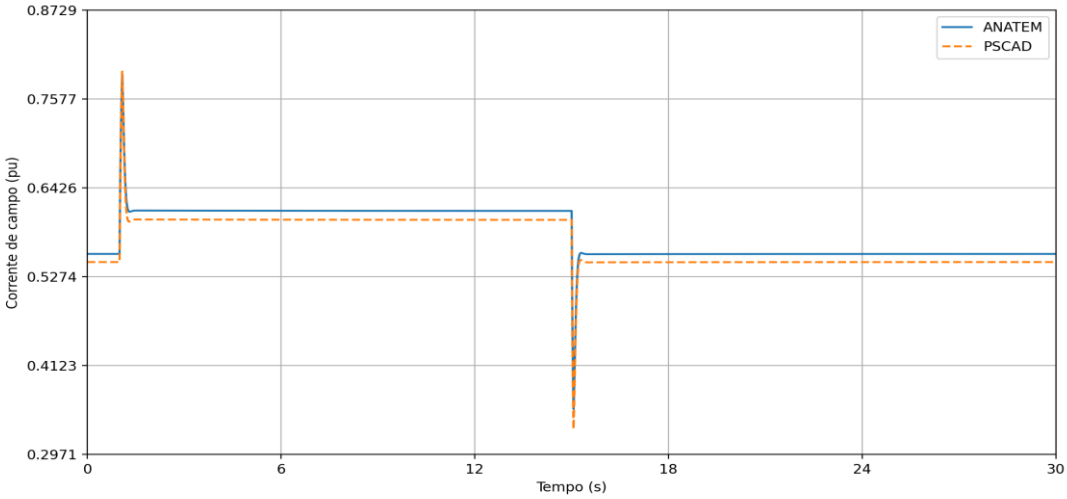

Figura 4-967 – Corrente de campo

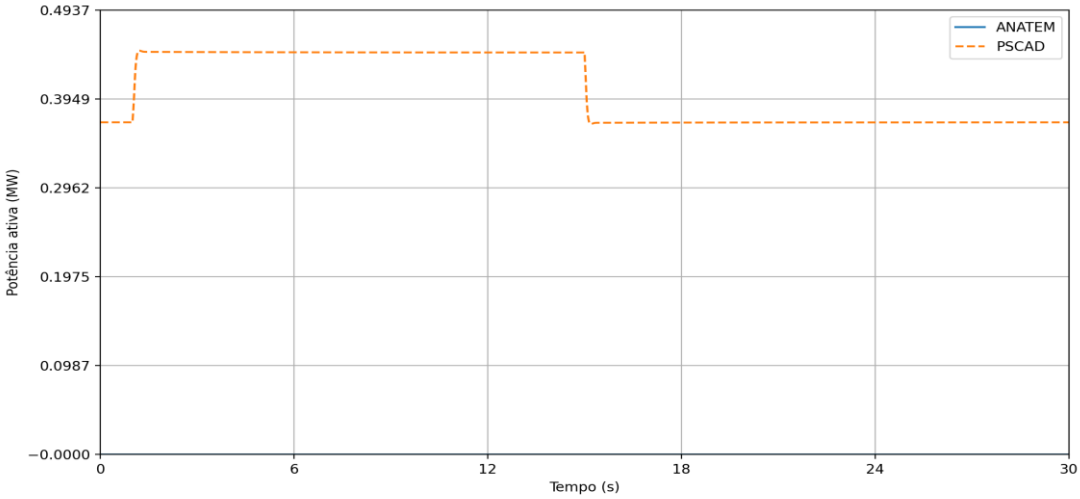

Figura 4-968 – Potência ativa

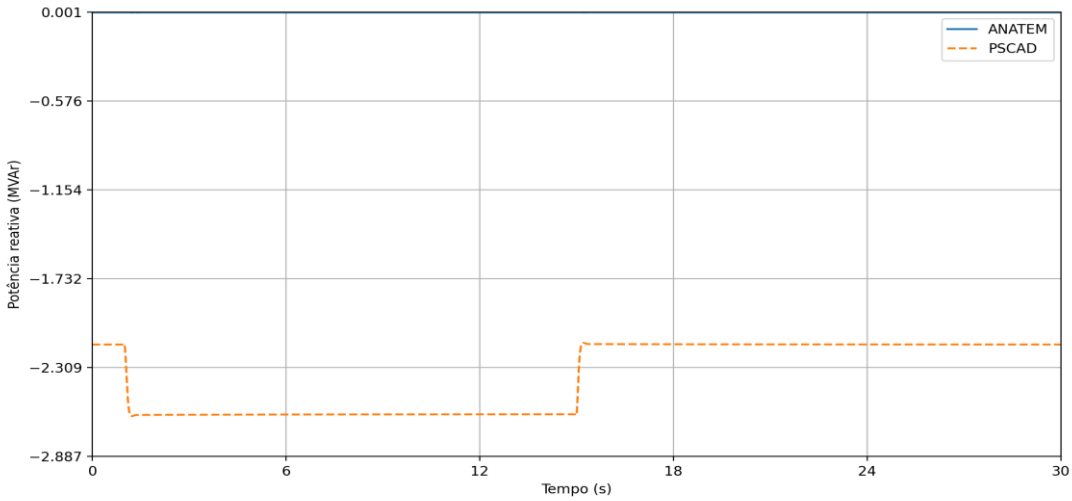

Figura 4-969 – Potência reativa

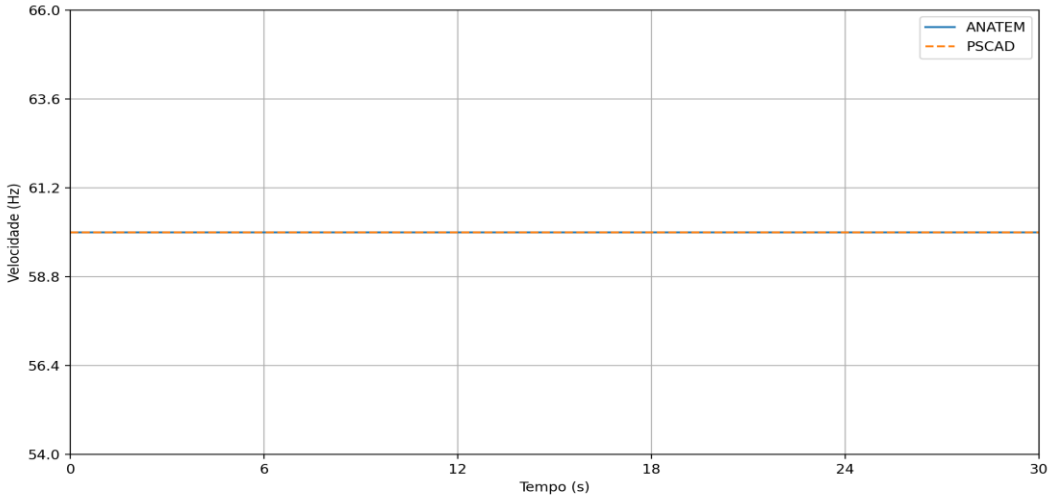

Figura 4-970 – Velocidade da máquina

4.38.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.38.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.38.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.38.4.3.

4.38.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

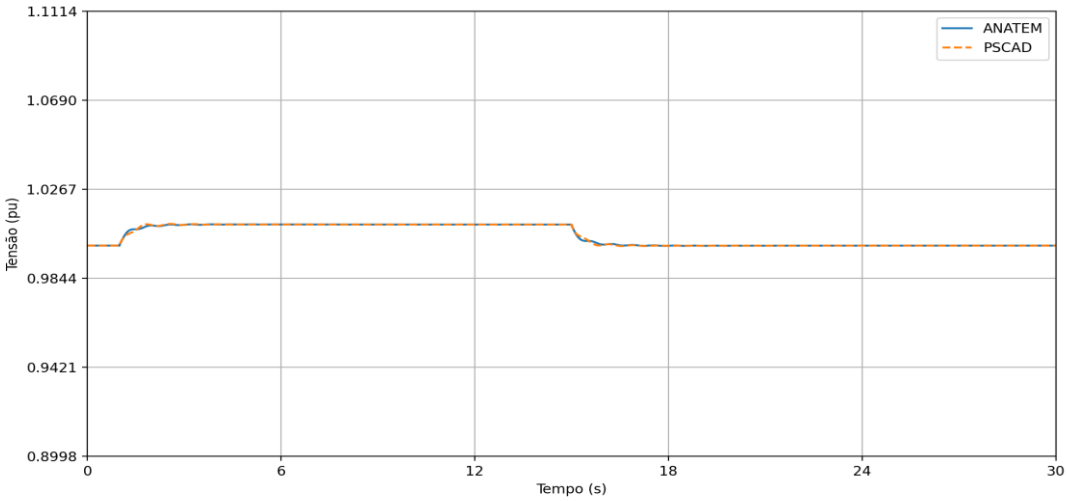

Figura 4-971 – Tensão terminal

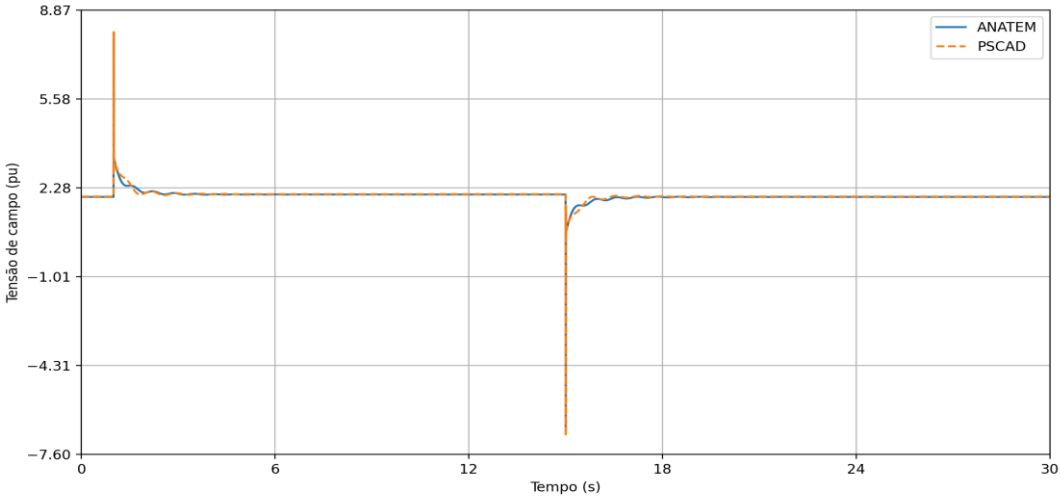

Figura 4-972 – Tensão de campo

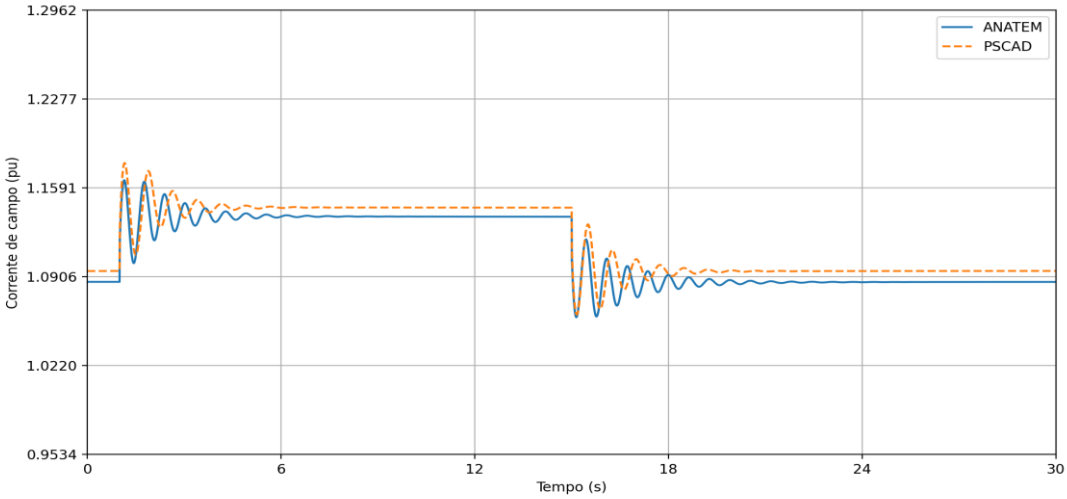

Figura 4-973 – Corrente de campo

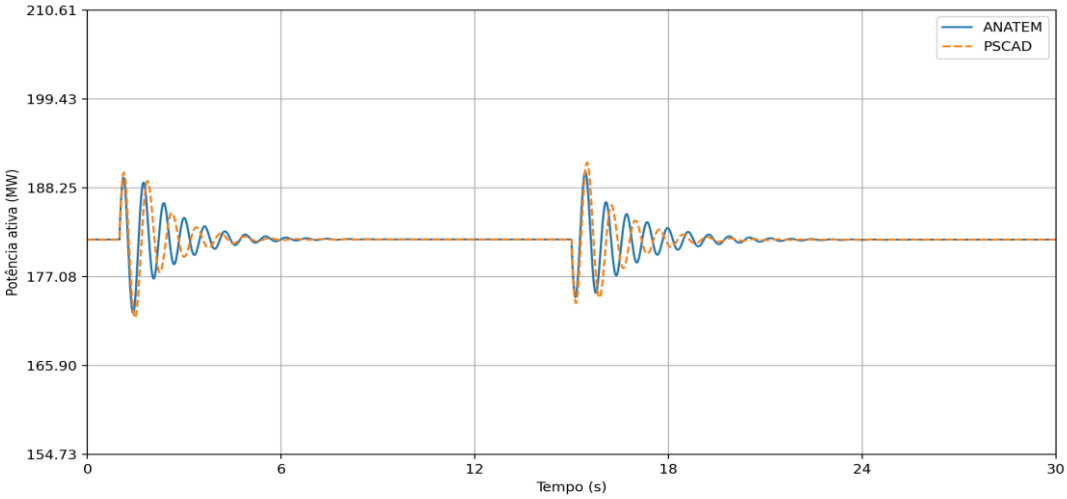

Figura 4-974 – Potência ativa

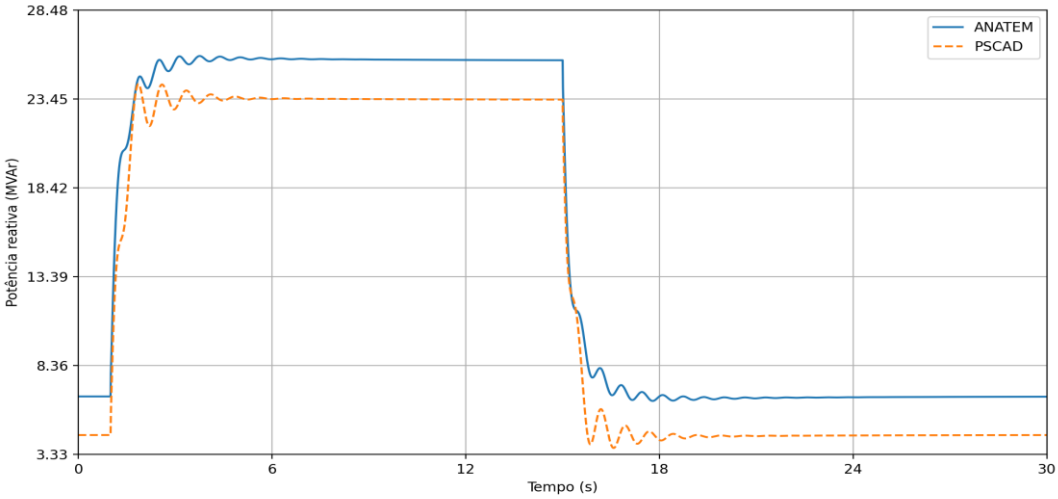

Figura 4-975 – Potência reativa

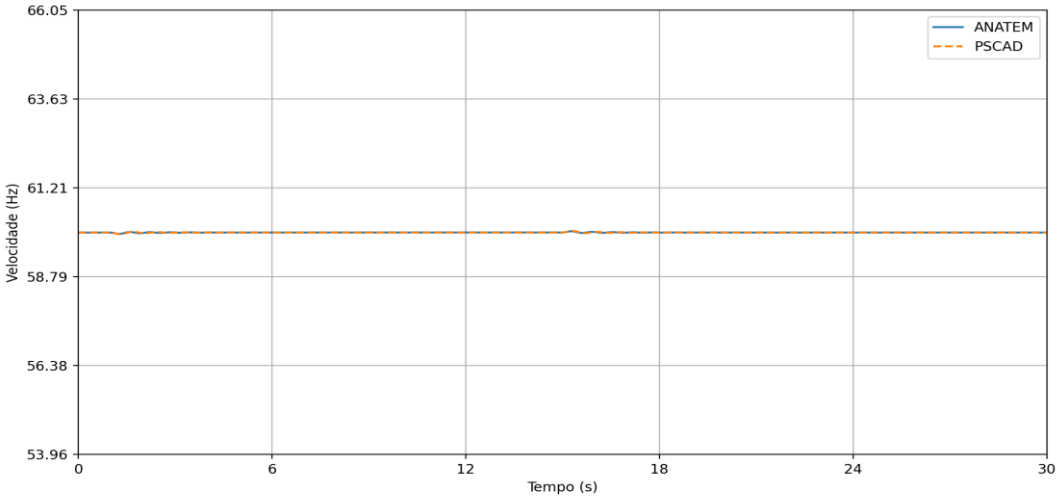

Figura 4-976 – Velocidade da máquina

4.38.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

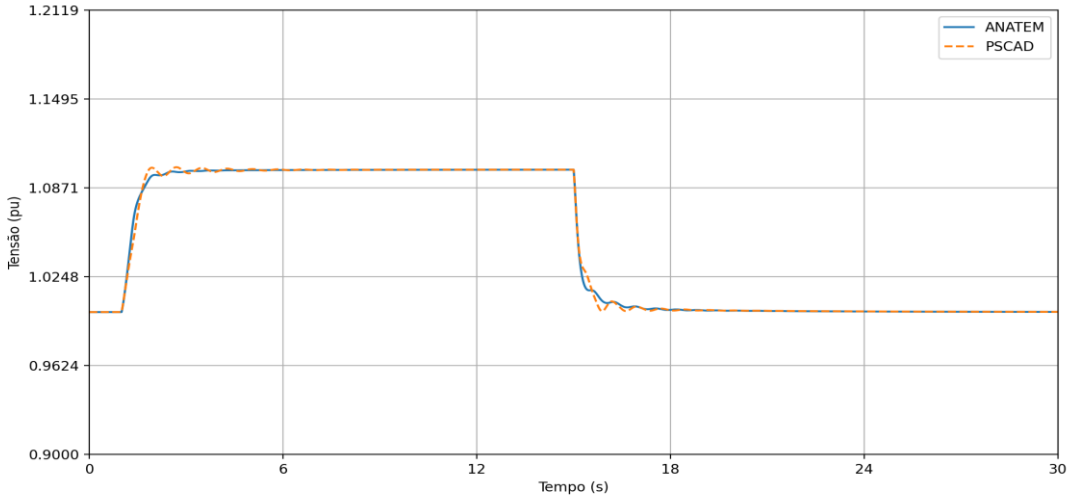

Figura 4-977 – Tensão terminal

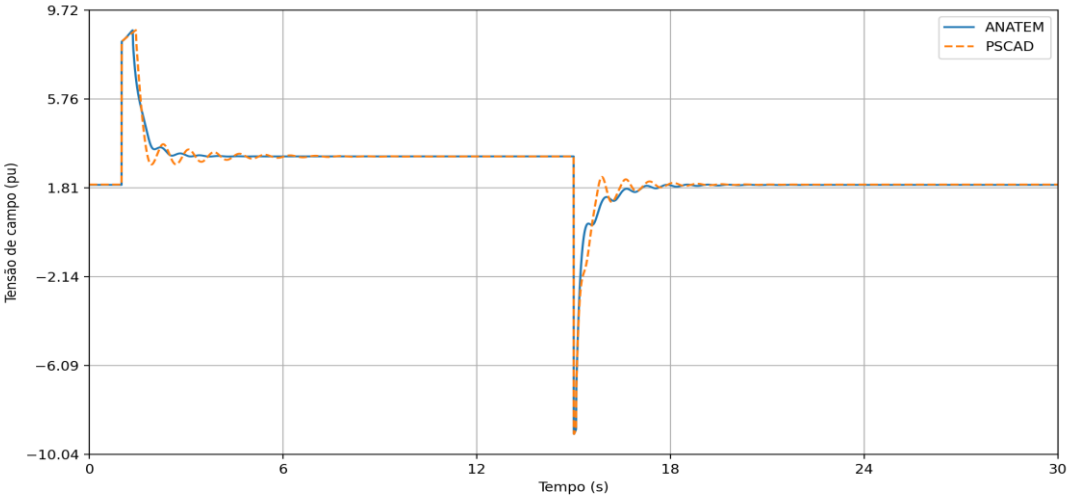

Figura 4-978 – Tensão de campo

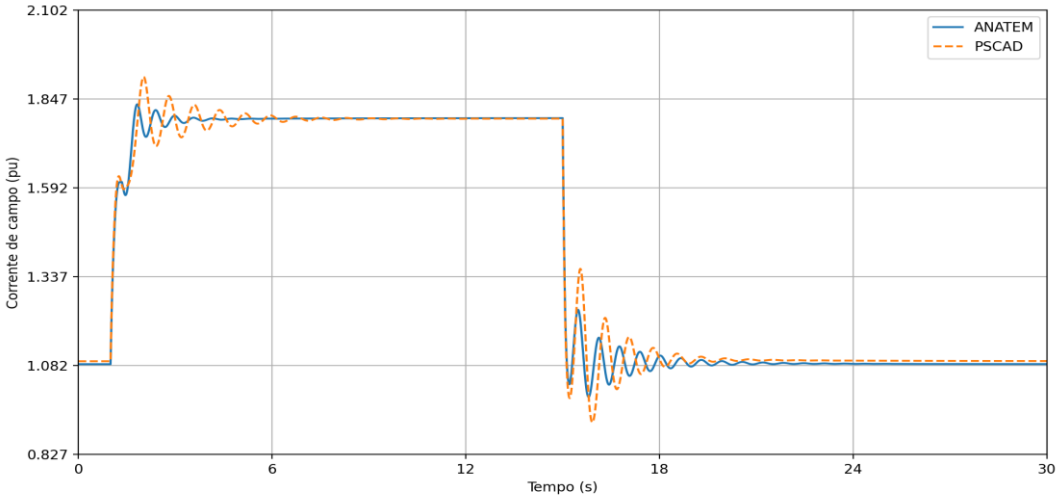

Figura 4-979 – Corrente de campo

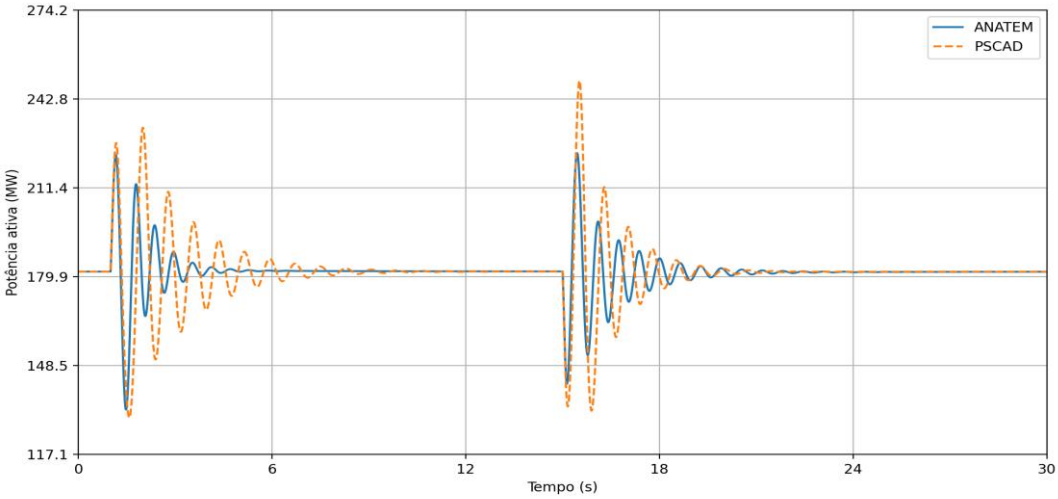

Figura 4-980 – Potência ativa

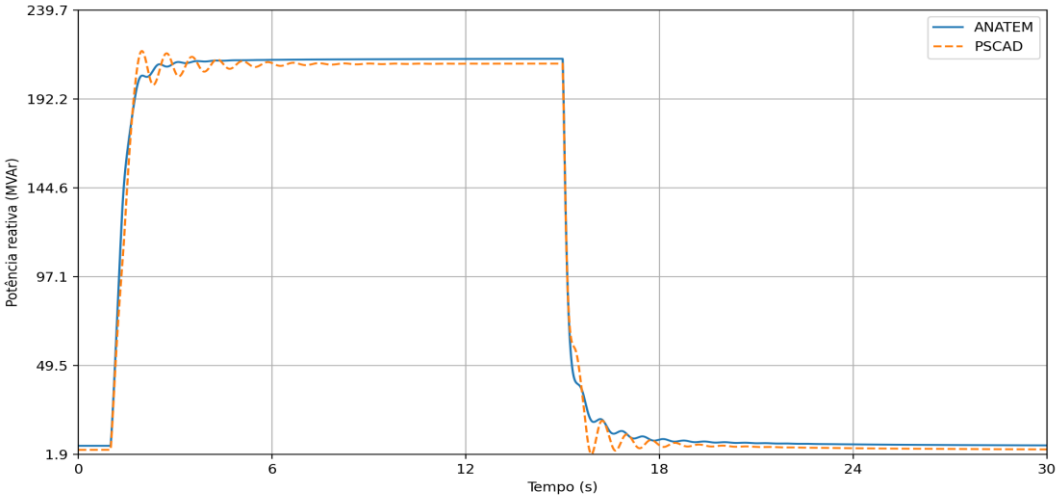

Figura 4-981 – Potência reativa

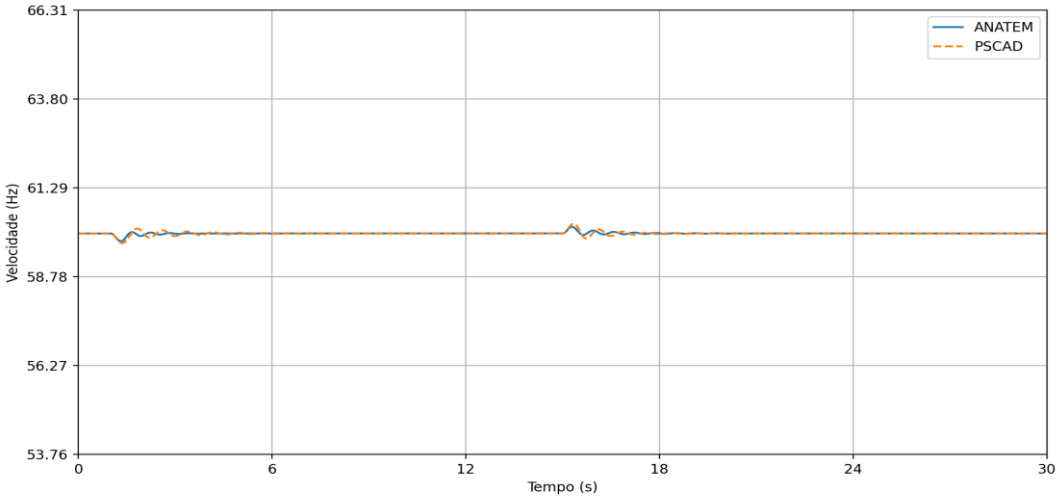

Figura 4-982 – Velocidade da máquina

4.38.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

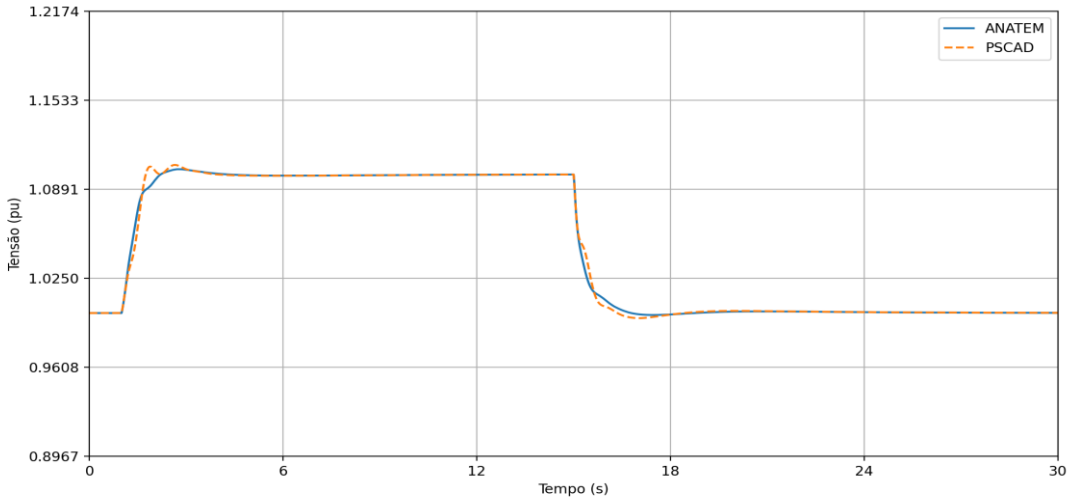

Figura 4-983 – Tensão terminal

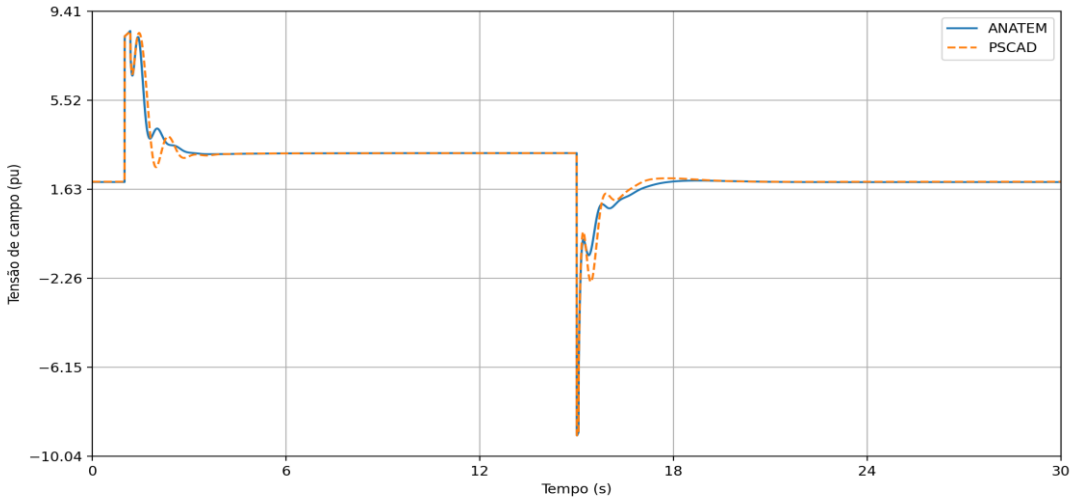

Figura 4-984 – Tensão de campo

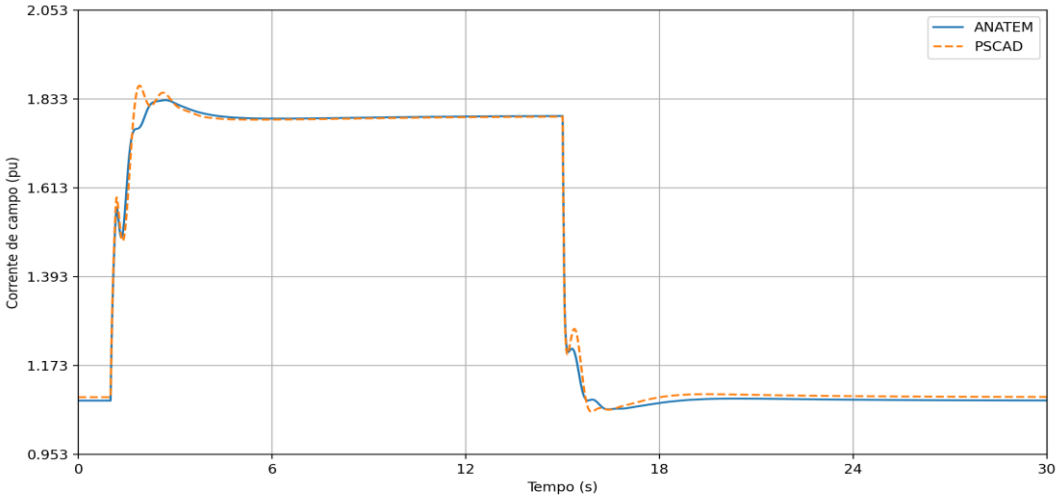

Figura 4-985 – Corrente de campo

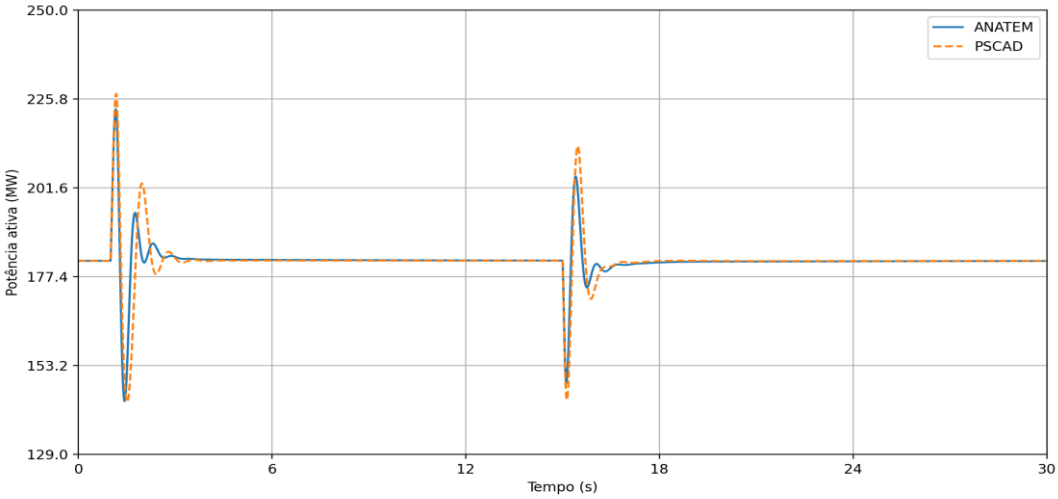

Figura 4-986 – Potência ativa

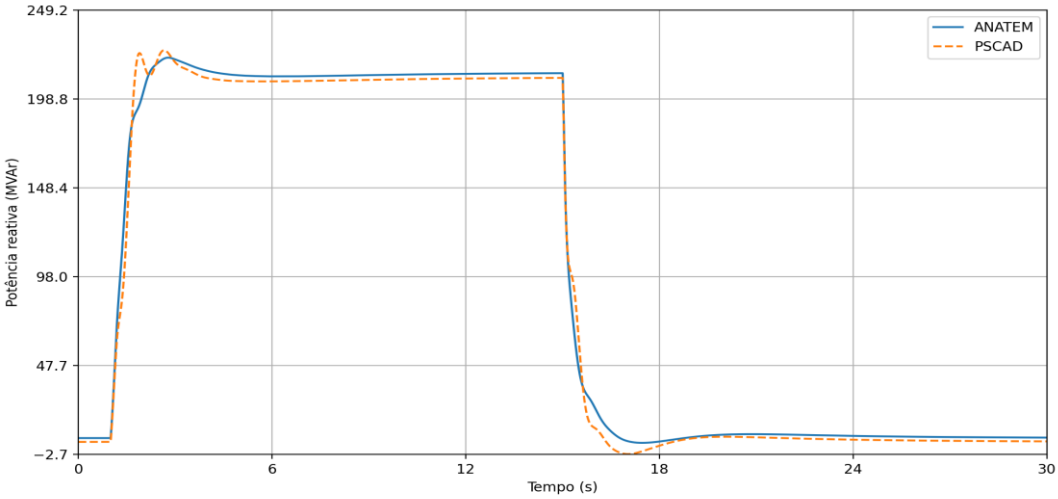

Figura 4-987 – Potência reativa

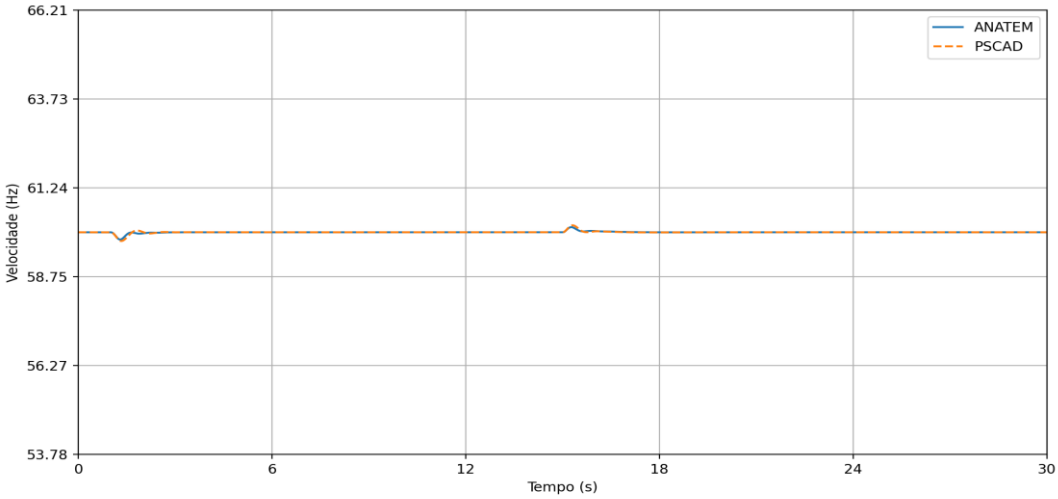

Figura 4-988 – Velocidade da máquina

4.39 UTE PARNAÍBA 5B

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores da UTE PARNAÍBA 5B, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina, reguladores de tensão, velocidade e PSS, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.39.1 Modelo da UTE PARNAÍBA 5B

A Tabela 4-115 apresenta os parâmetros da UTE PARNAÍBA 5B disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-115 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	193	Nqaxw	2	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	182	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	24	I(KA)	8,953	
x'q (%)	43	OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	18	H(s)	5,35	
xl(%)	13,5	D(pu)	0	
T'd(s)	7,039	Ra(pu)	0,001	
T'q(s)	0,557	xp(pu)	0,135	Reatância de Potier
T''d(s)	0,04	xd(pu)	1,93	
T''q(s)	0,081	xd_(pu)	0,24	x'd
Ra(%)	0,11	Td0_(s)	7,039	T'd
H(s)	5,35	xd__(pu)	0,18	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,04	T''d
S(MVA)	214	Xq(pu)	1,82	
V_{linha}(KV)	13,8	xq_(pu)	0,43	x'q
		Tq0_(s)	0,557	T'q
		xq__(pu)	0,18	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,081	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.39.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-116, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação da UTE PARNAÍBA 5B estão apresentados na Tabela

4-117. A partir dos parâmetros da Tabela 4-116, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-117. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-989.

Tabela 4-116 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	UTE PARNAÍBA 5B	
Ag	**Y1**	0,03858
Bg	**Y2**	7,316267
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-117 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,839	0,800
1,066	0,950
1,114	0,975
1,167	1,000
1,245	1,033
1,339	1,067
1,446	1,100
1,92	1,200
2,796	1,300

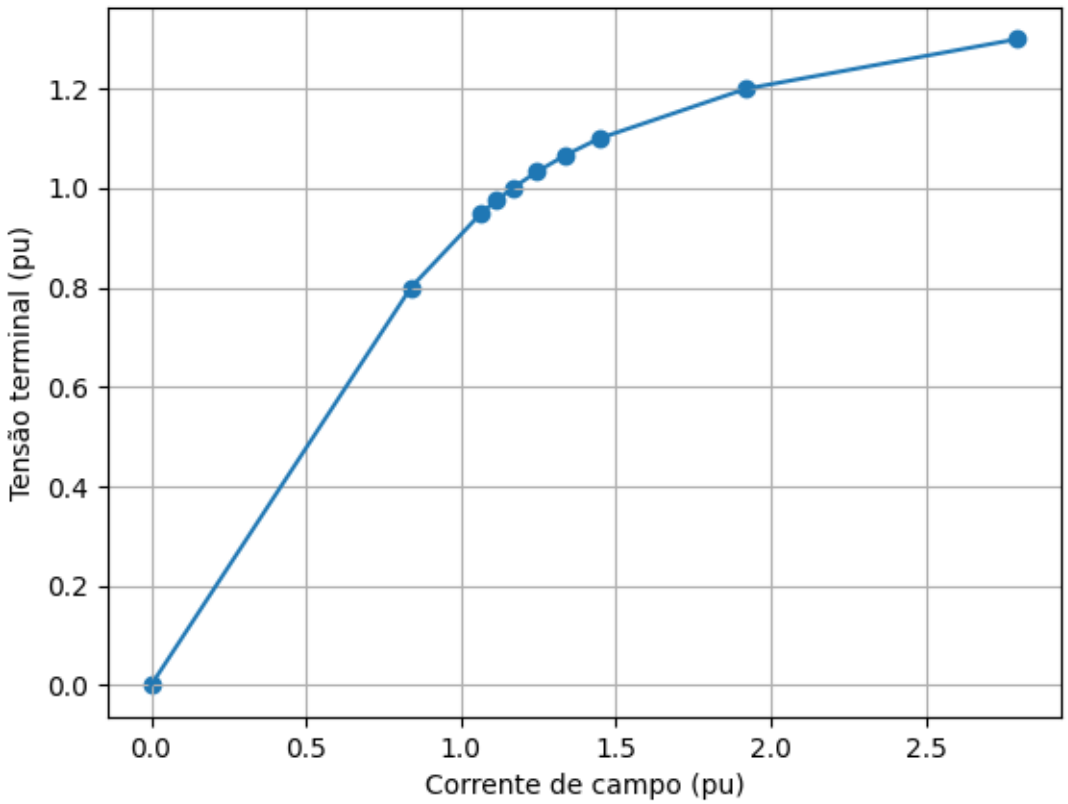

Figura 4-989 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.39.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.39.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.39.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.39.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

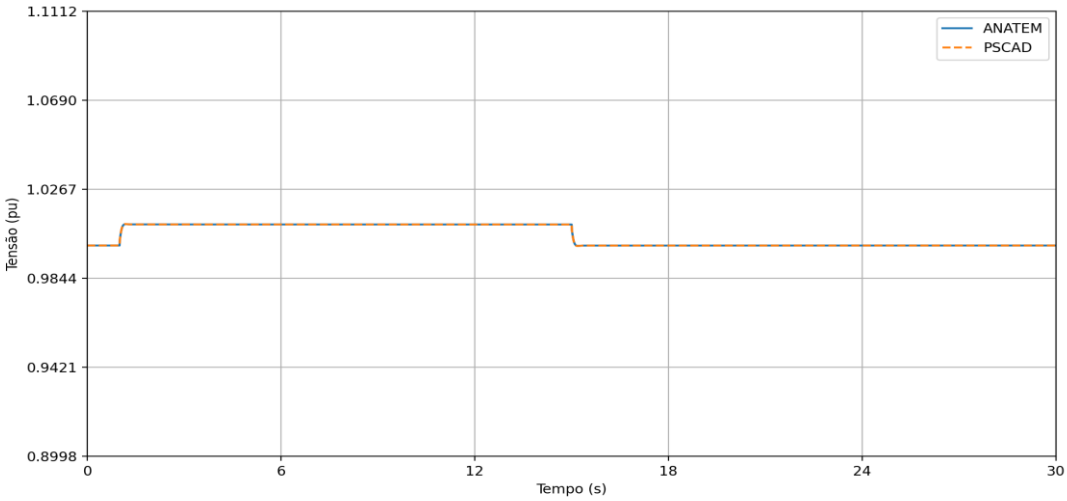

Figura 4-990 – Tensão terminal

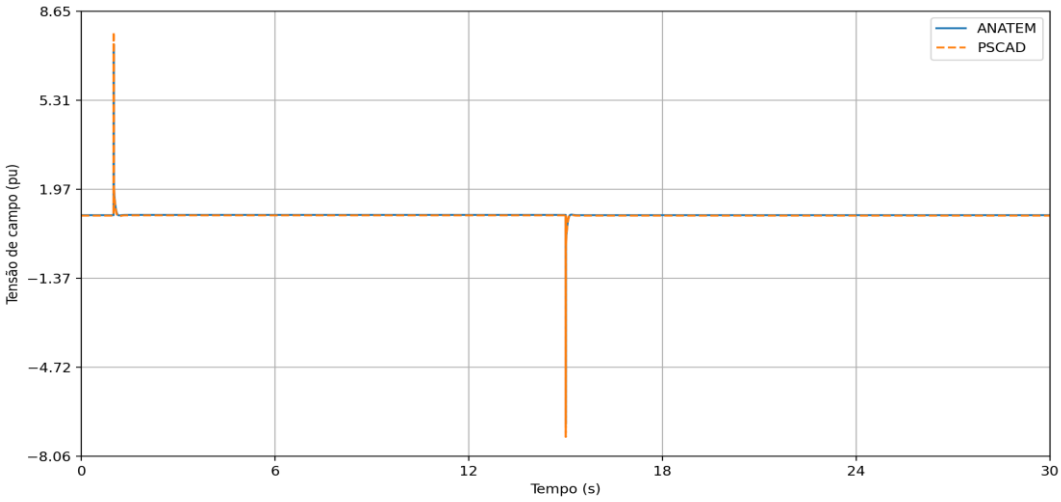

Figura 4-991 – Tensão de campo

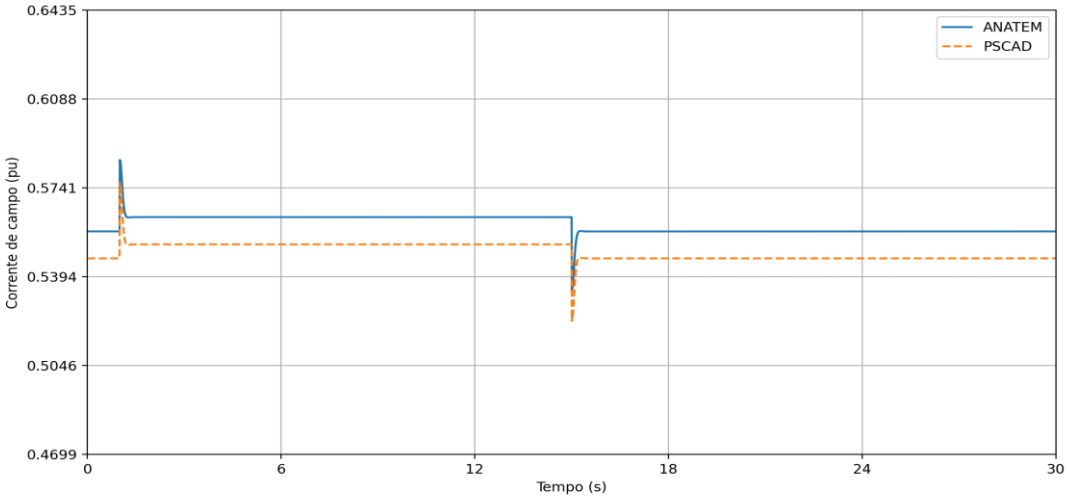

Figura 4-992 – Corrente de campo

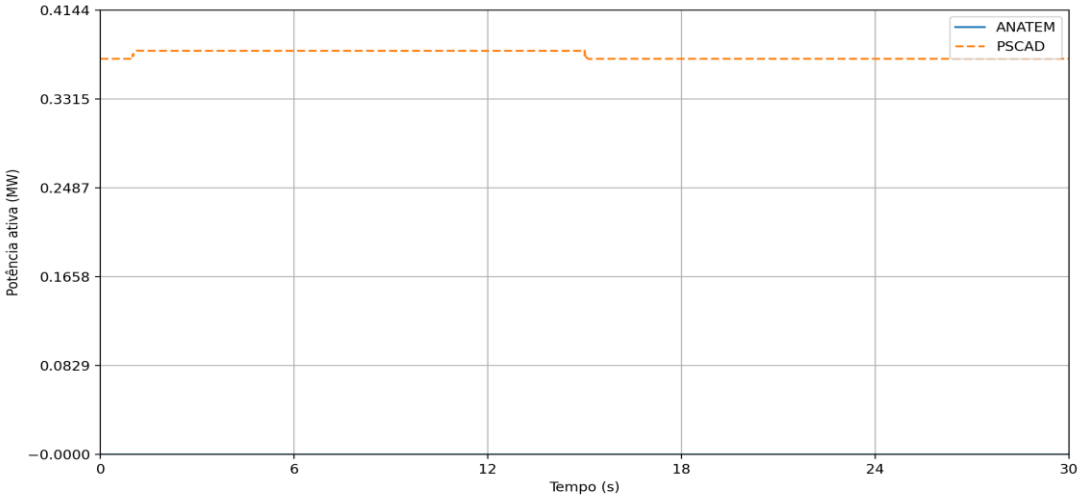

Figura 4-993 – Potência ativa

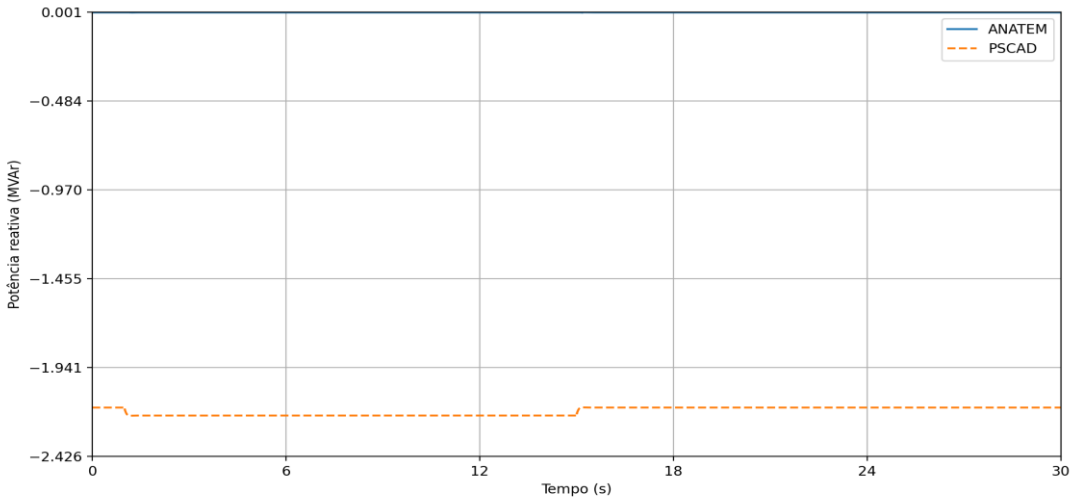

Figura 4-994 – Potência reativa

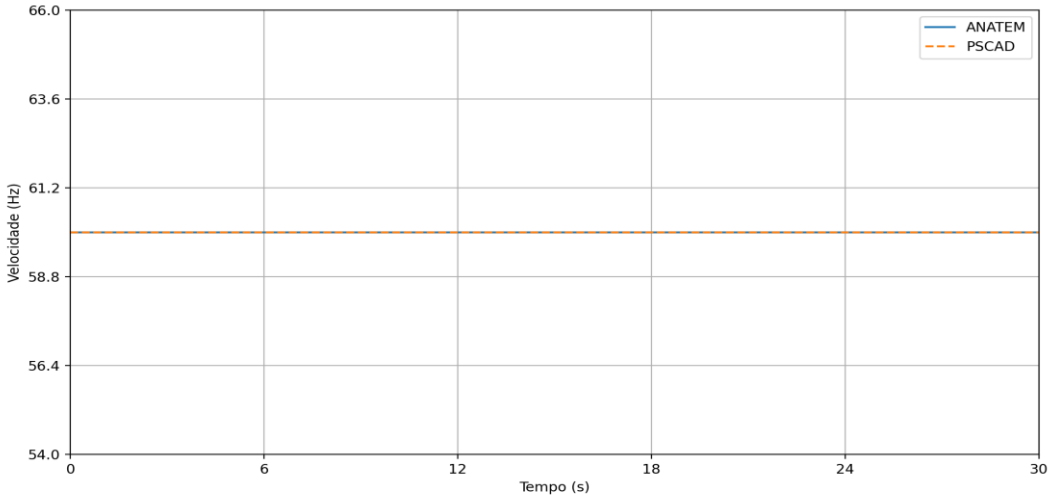

Figura 4-995 – Velocidade da máquina

4.39.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

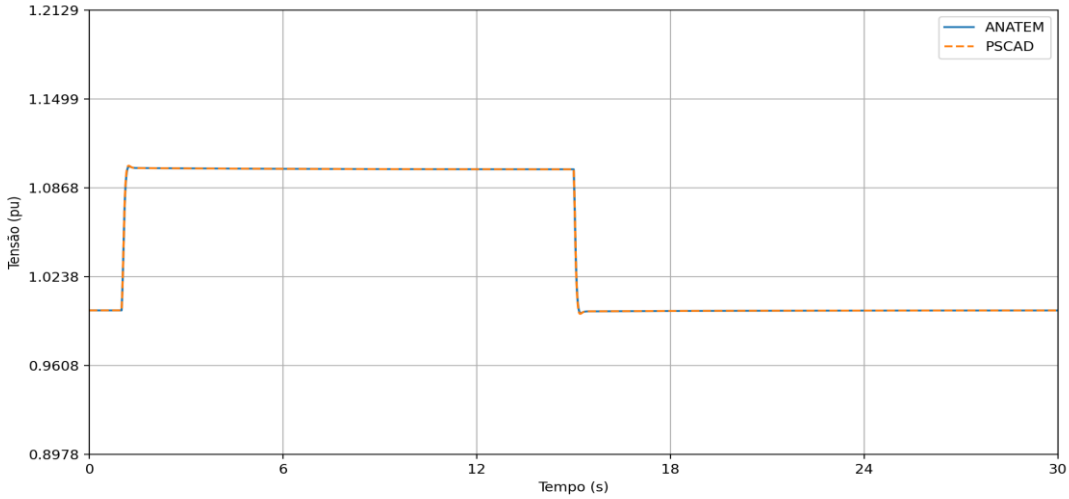

Figura 4-996 – Tensão terminal

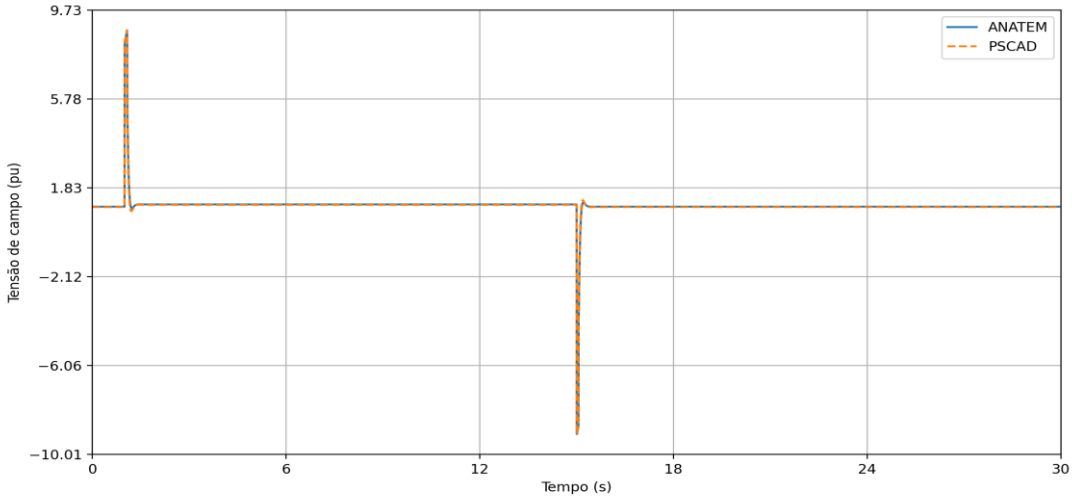

Figura 4-997 – Tensão de campo

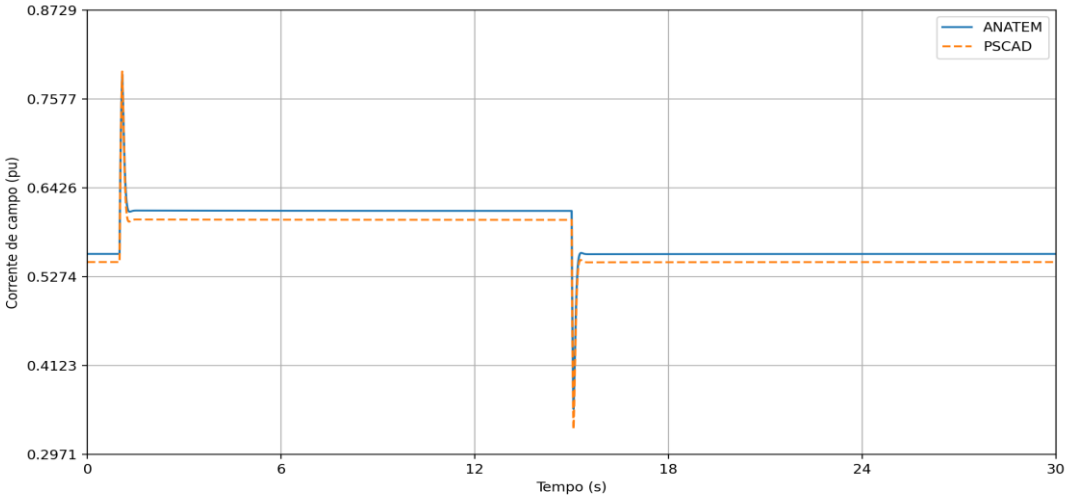

Figura 4-998 – Corrente de campo

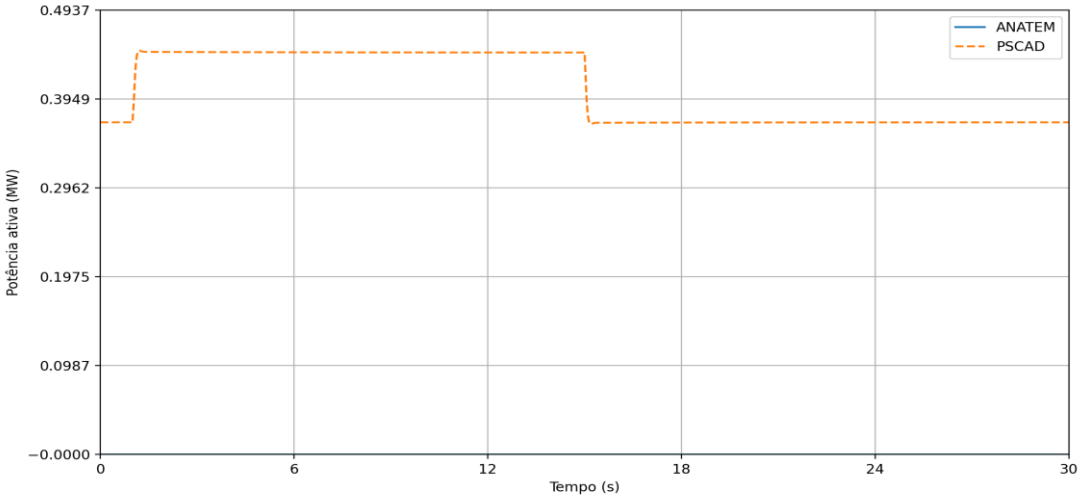

Figura 4-999 – Potência ativa

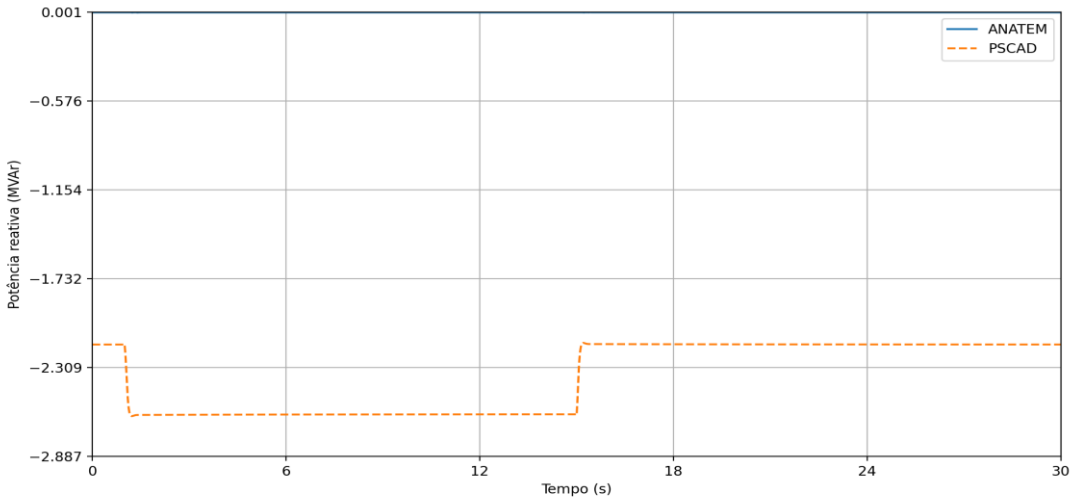

Figura 4-1000 – Potência reativa

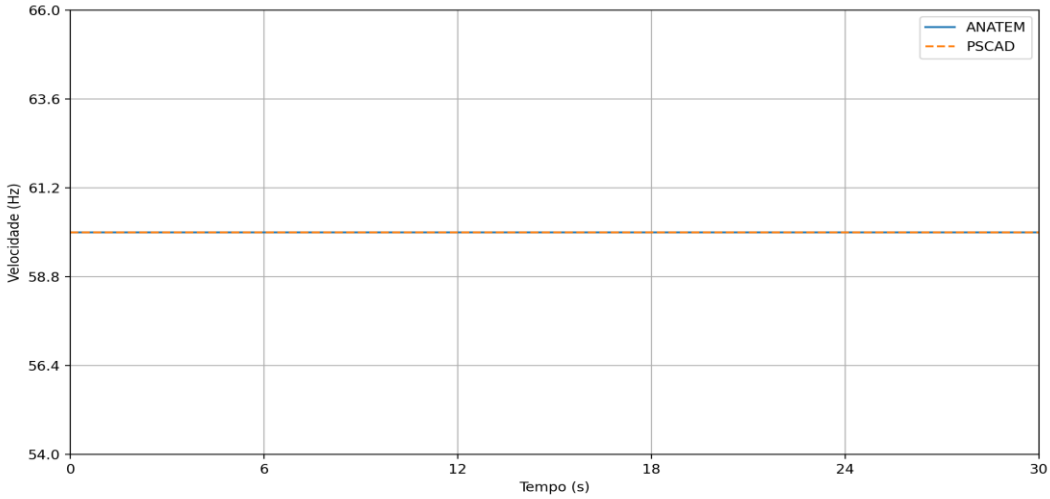

Figura 4-1001 – Velocidade da máquina

4.39.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados três degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.39.4.1, outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.39.4.2 e, por último, para validar o PSS, aplicou-se um degrau de ±10%, apresentado na Seção 4.39.4.3.

4.39.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

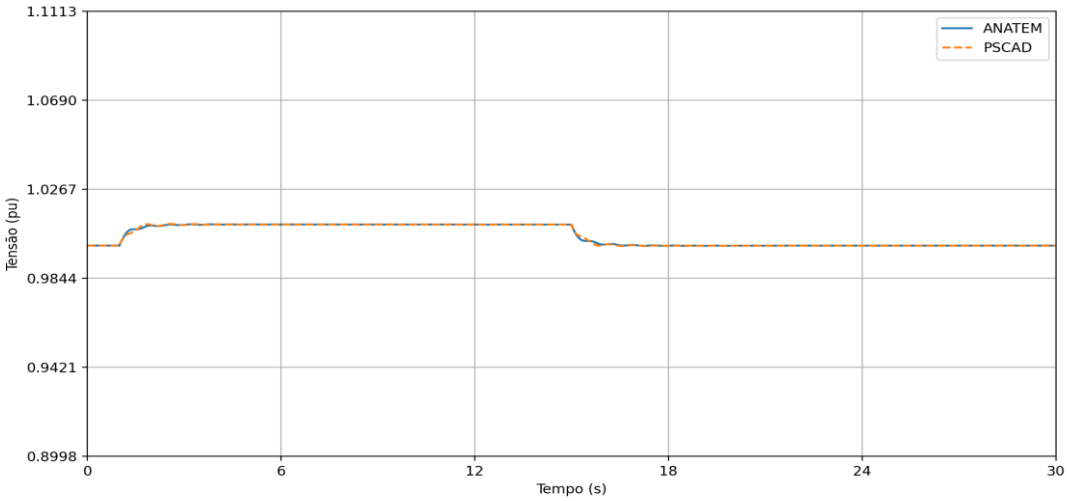

Figura 4-1002 – Tensão terminal

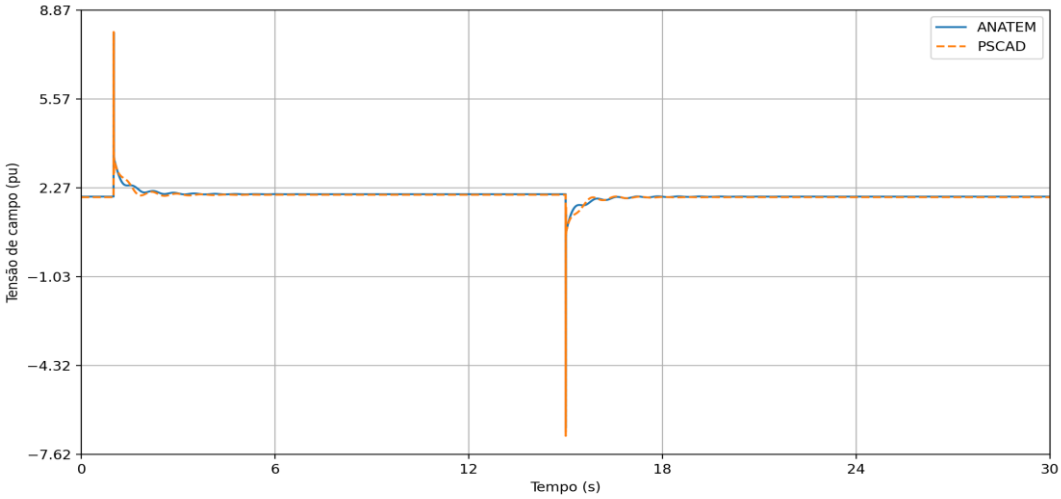

Figura 4-1003 – Tensão de campo

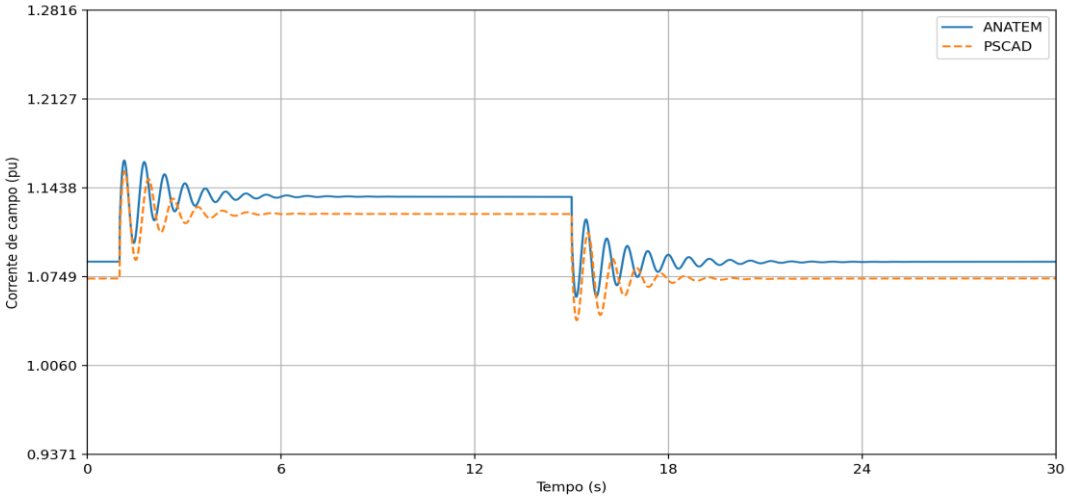

Figura 4-1004 – Corrente de campo

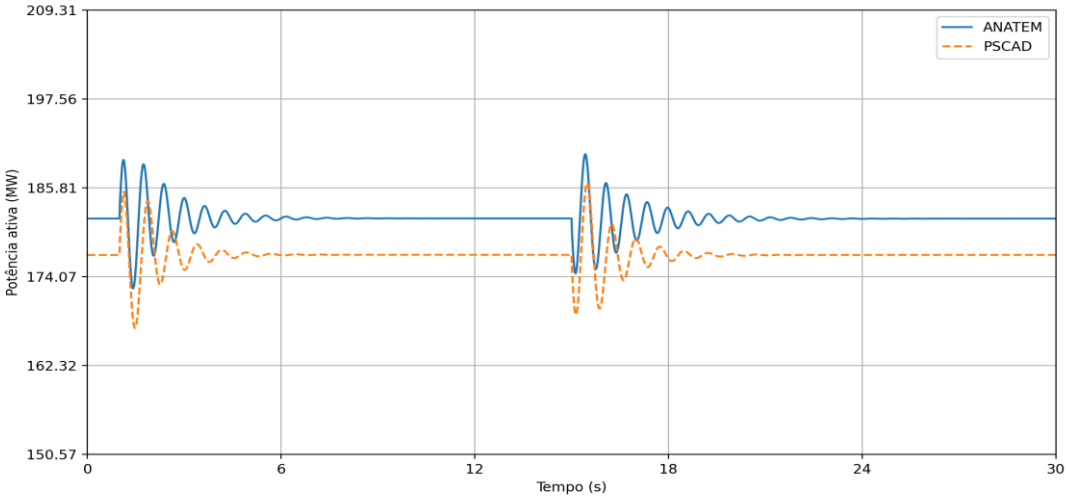

Figura 4-1005 – Potência ativa

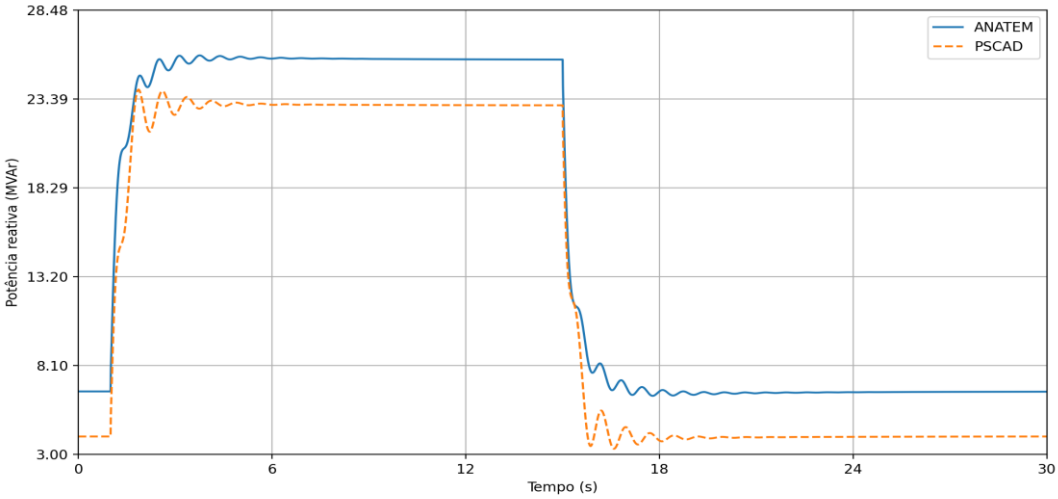

Figura 4-1006 – Potência reativa

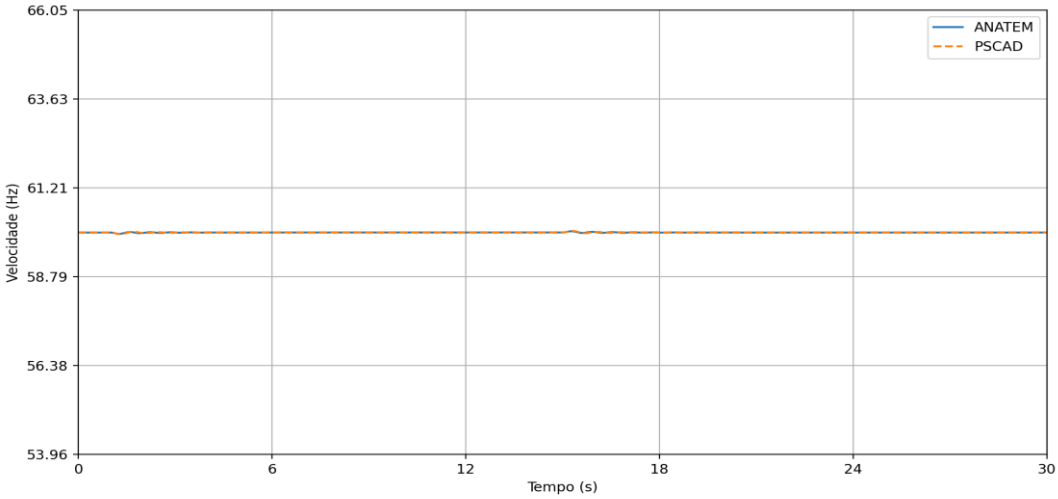

Figura 4-1007 – Velocidade da máquina

4.39.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

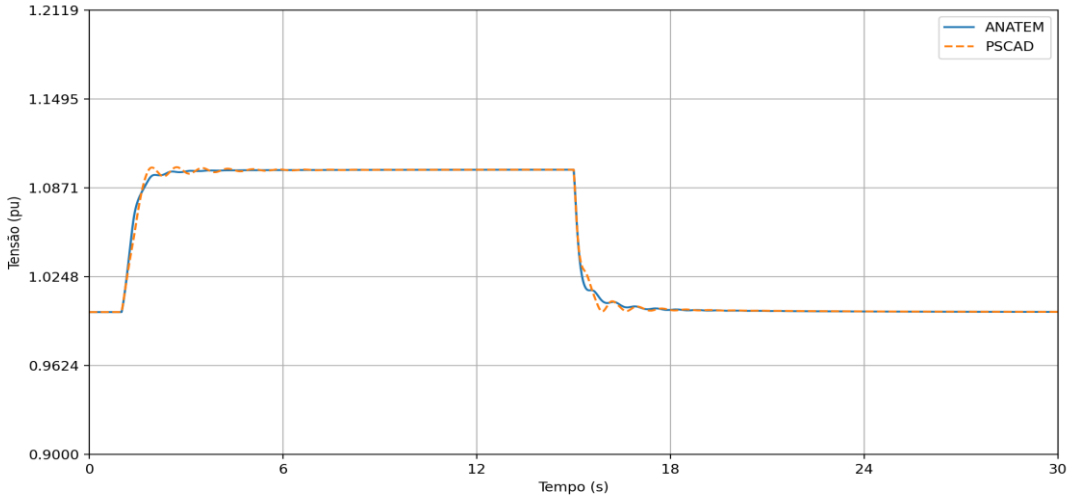

Figura 4-1008 – Tensão terminal

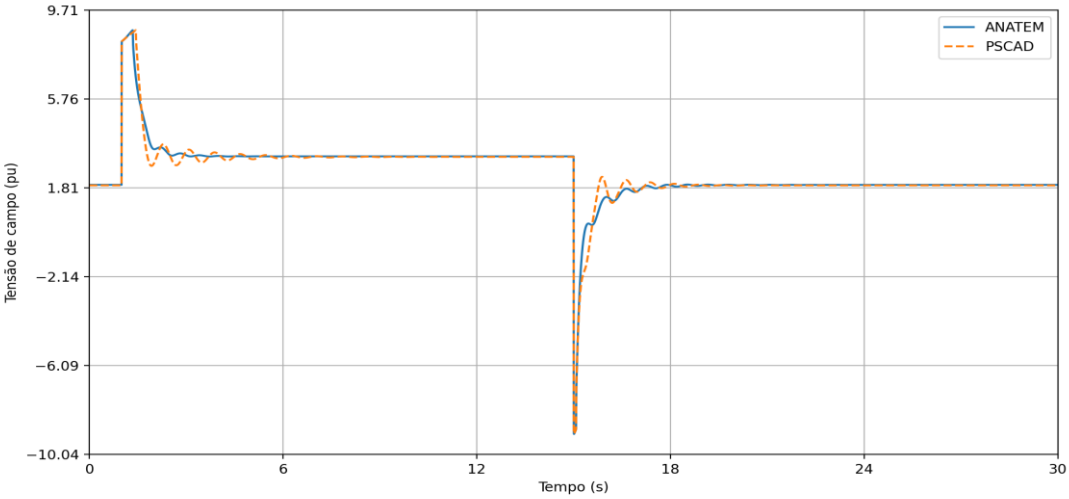

Figura 4-1009 – Tensão de campo

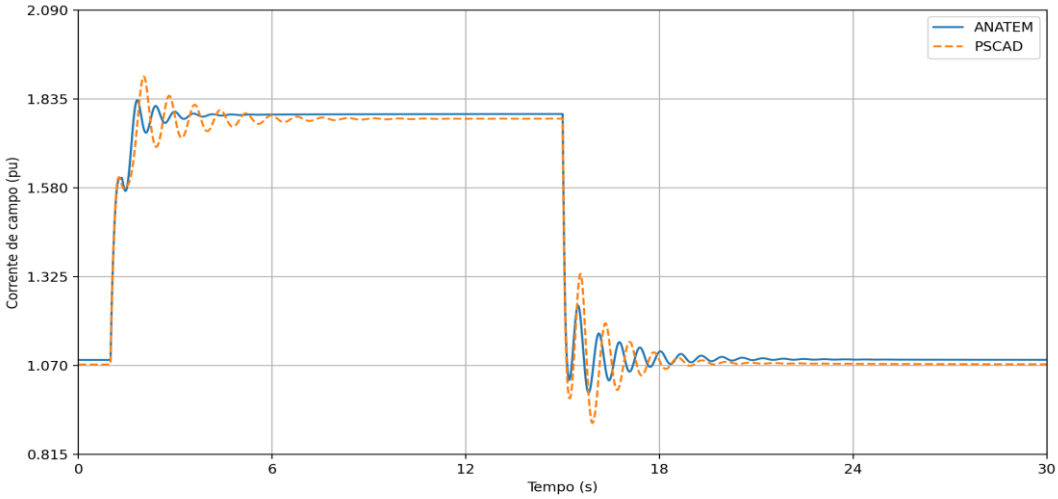

Figura 4-1010 – Corrente de campo

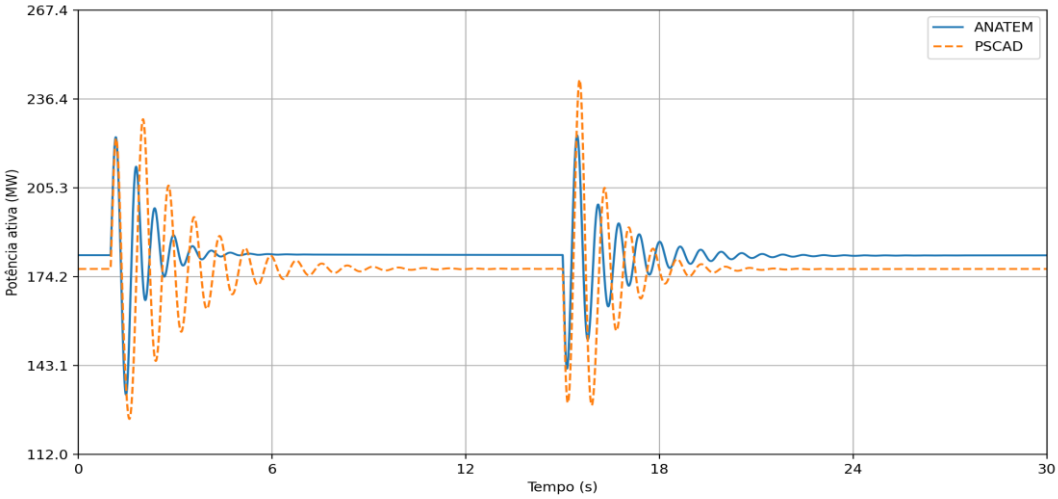

Figura 4-1011 – Potência ativa

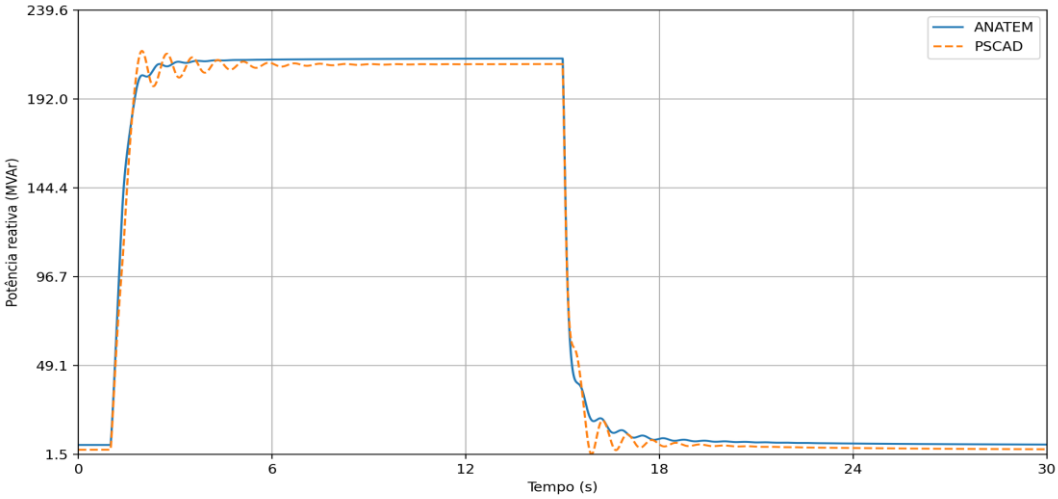

Figura 4-1012 – Potência reativa

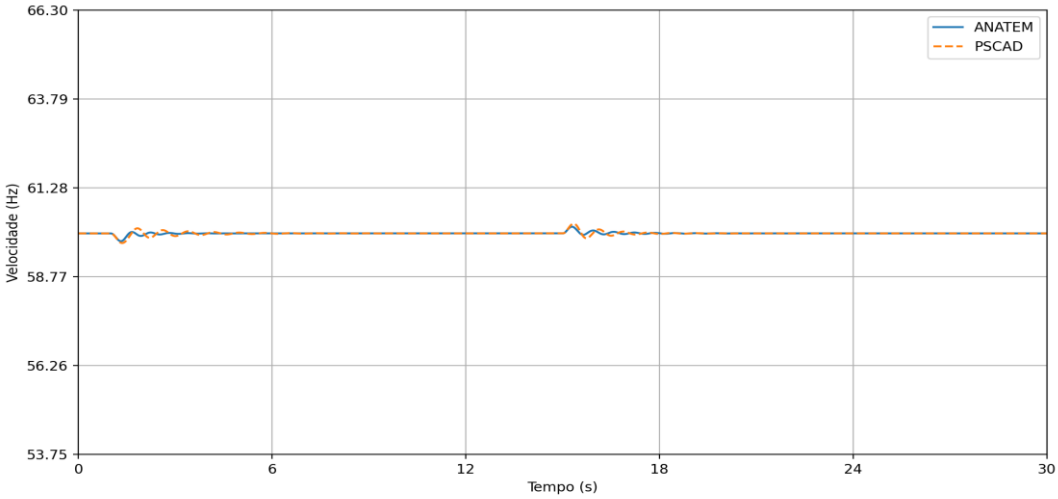

Figura 4-1013 – Velocidade da máquina

4.39.4.3 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão, com PSS ligado

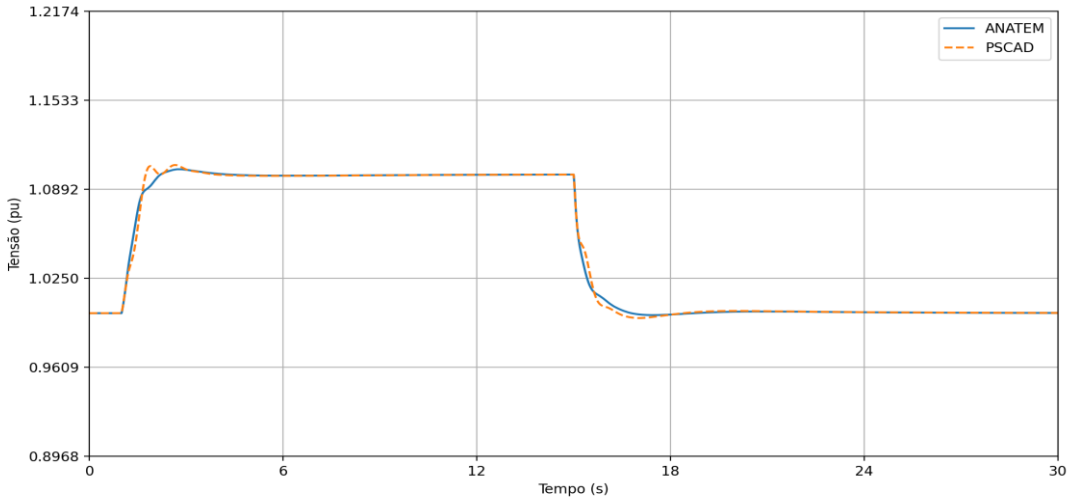

Figura 4-1014 – Tensão terminal

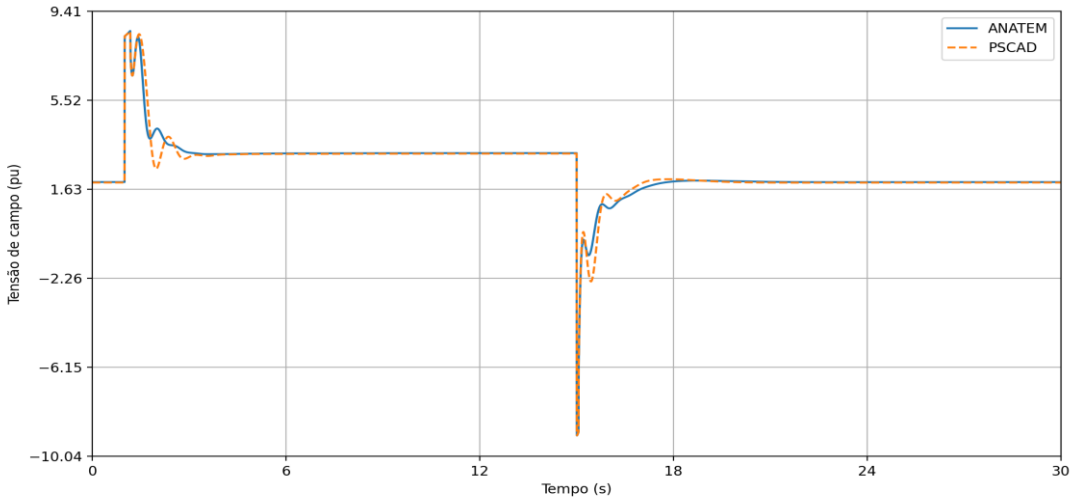

Figura 4-1015 – Tensão de campo

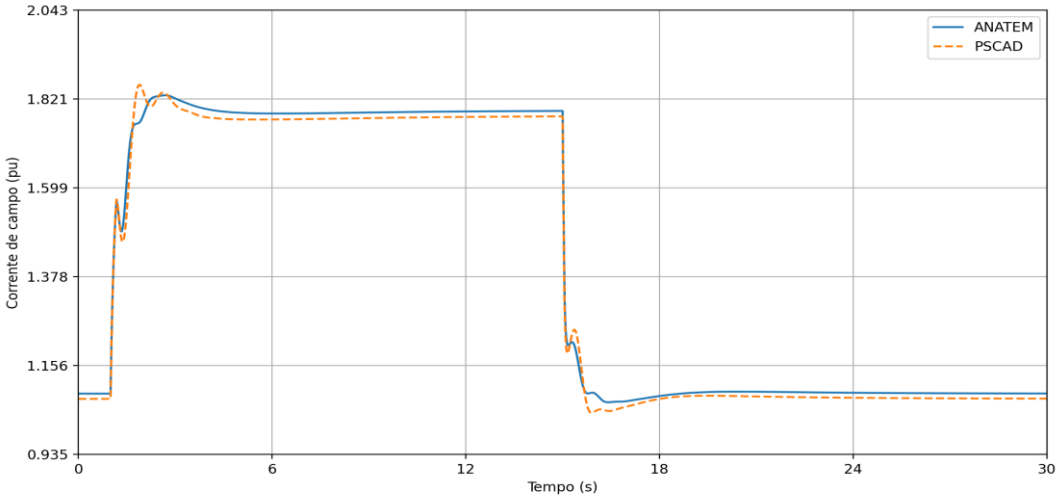

Figura 4-1016 – Corrente de campo

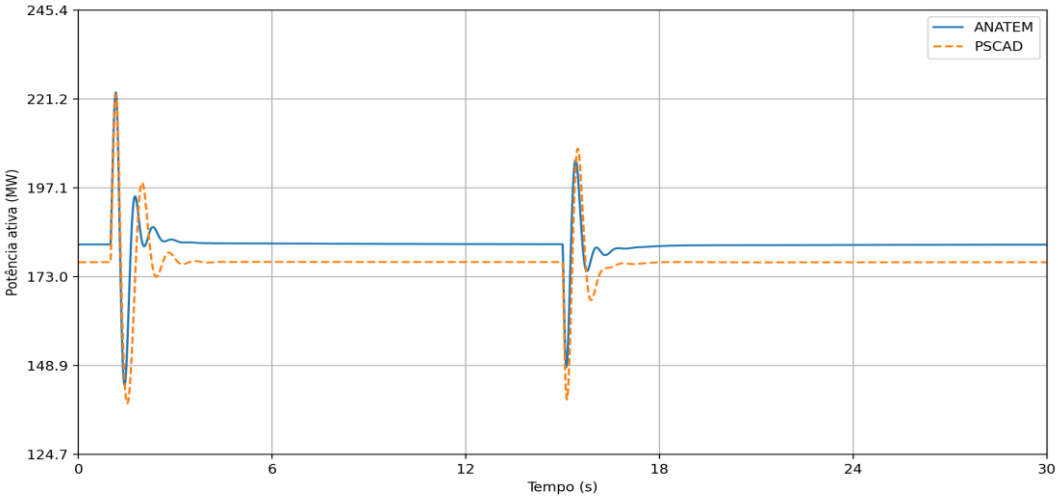

Figura 4-1017 – Potência ativa

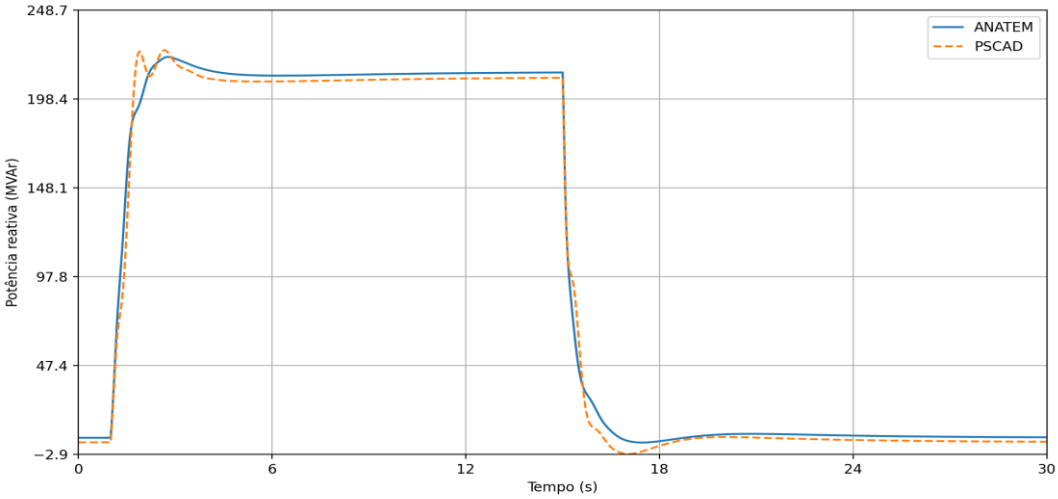

Figura 4-1018 – Potência reativa

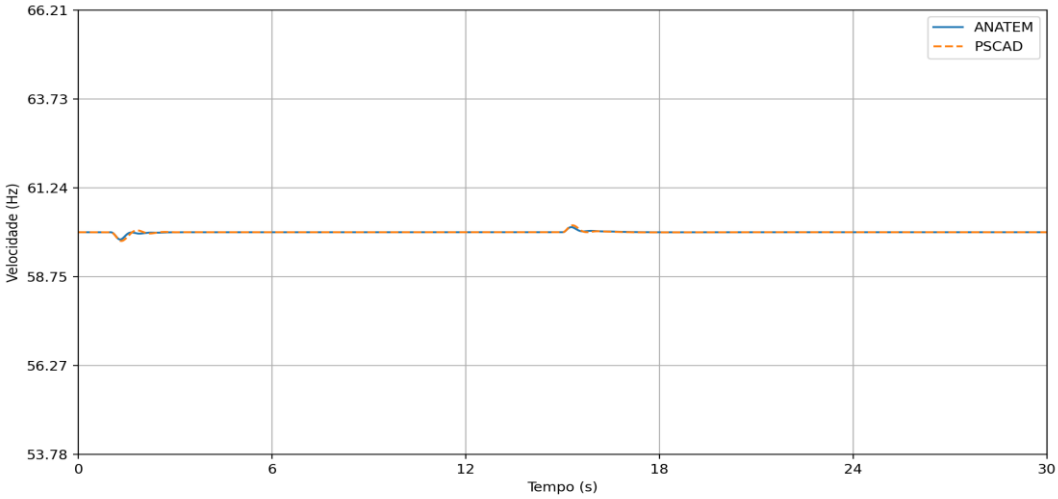

Figura 4-1019 – Velocidade da máquina

4.40 CS EMBORCAÇÃO

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Emborcação, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.40.1 Modelo do CS Emborcação

A Tabela 4-118 apresenta os parâmetros do CS Emborcação disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-118 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	92,89	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	68,99	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	31,99	I(KA)	13,12	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	25,59	H(s)	4,722	
xl(%)	13,99	D(pu)	0	
T'd(s)	5	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,14	Reatância de Potier
T''d(s)	0,065	xd(pu)	0,929	
T''q(s)	0,085	xd_(pu)	0,32	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	5	T'd
H(s)	4,722	xd__(pu)	0,256	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,065	T''d
S(MVA)	313,6	Xq(pu)	0,69	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,256	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,085	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.40.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-119, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Emborcação estão apresentados na Tabela

4-120. A partir dos parâmetros da Tabela 4-119, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-120. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-1020.

Tabela 4-119 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Emborcação	
Ag	**Y1**	0,02
Bg	**Y2**	7,5
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-120 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,82	0,800
1,012	0,950
1,049	0,975
1,09	1,000
1,148	1,033
1,215	1,067
1,29	1,100
1,602	1,200
2,15	1,300

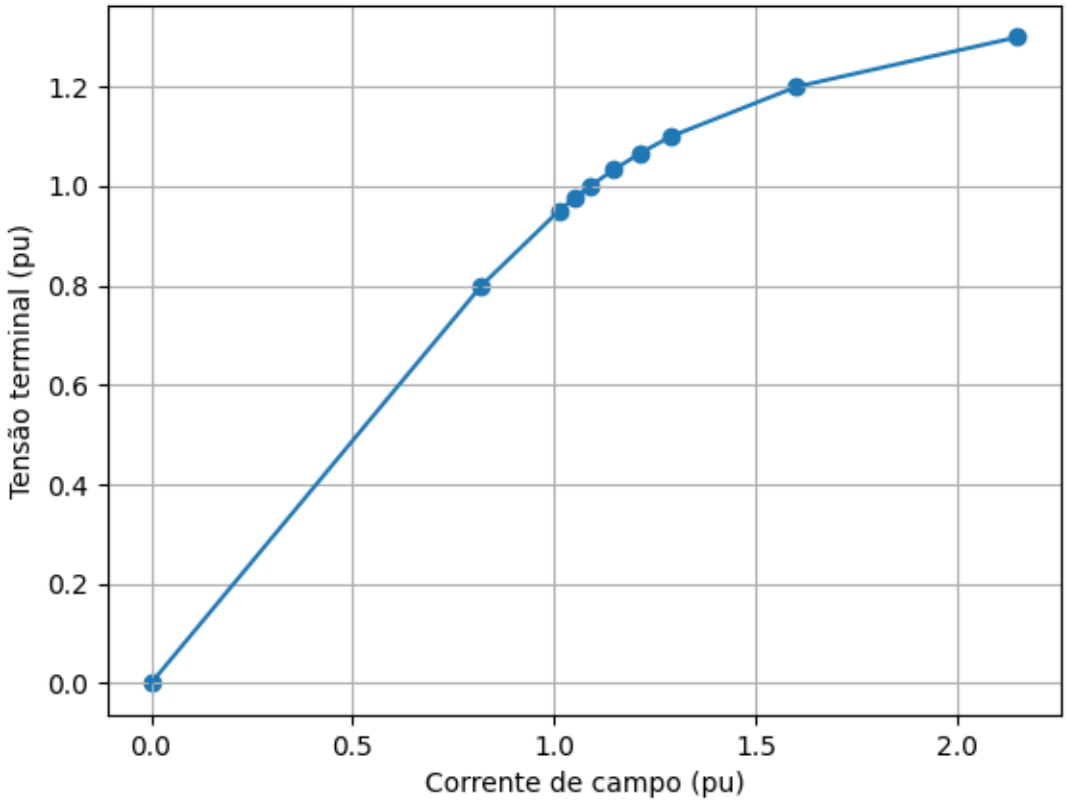

Figura 4-1020 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio, Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.40.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.40.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.40.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.40.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

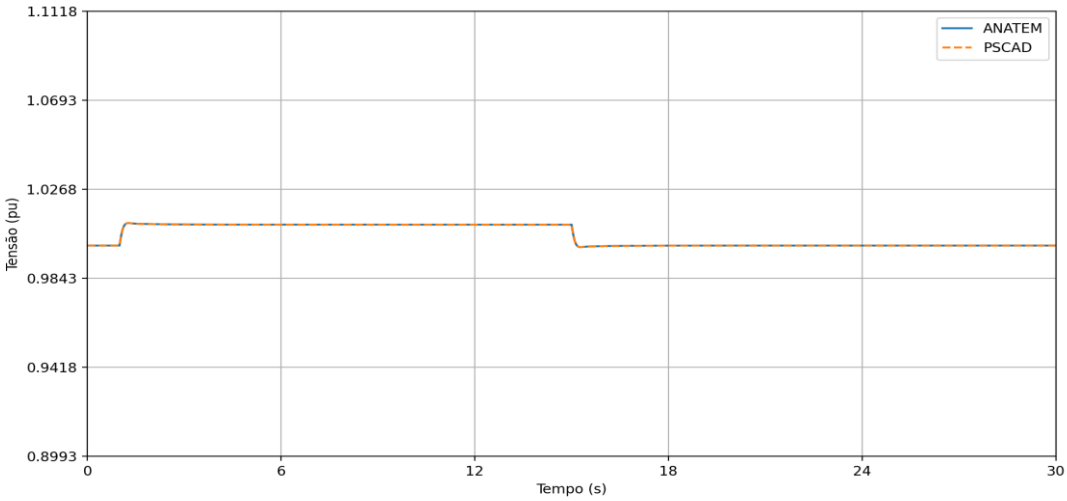

Figura 4-1021 – Tensão terminal

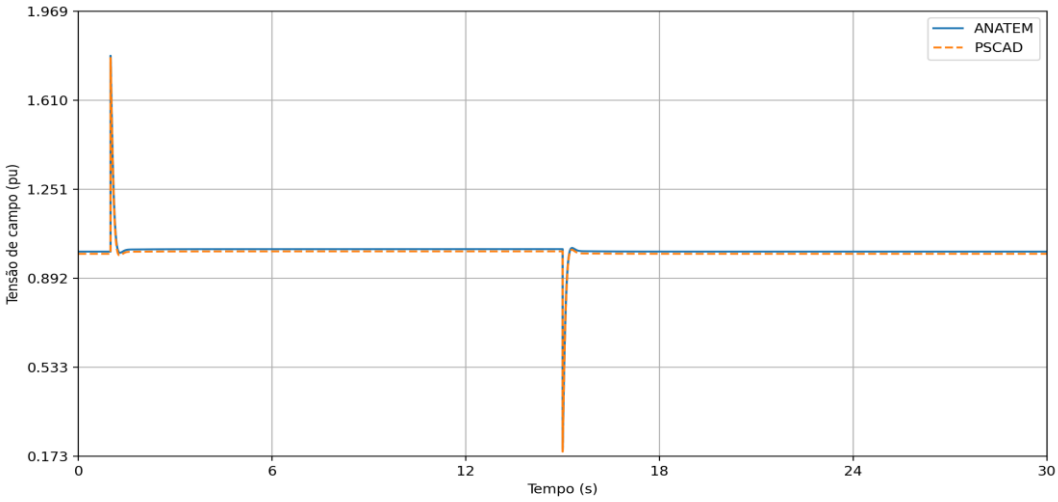

Figura 4-1022 – Tensão de campo

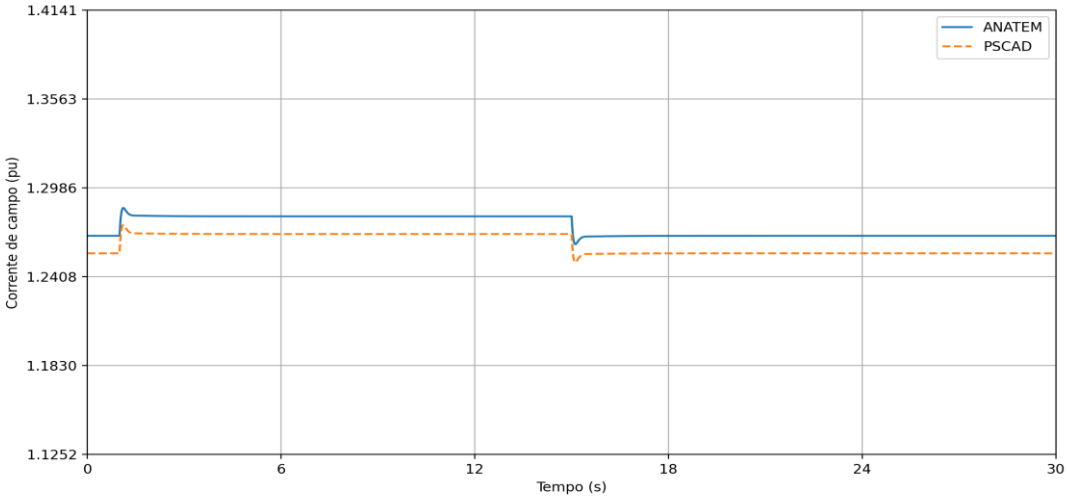

Figura 4-1023 – Corrente de campo

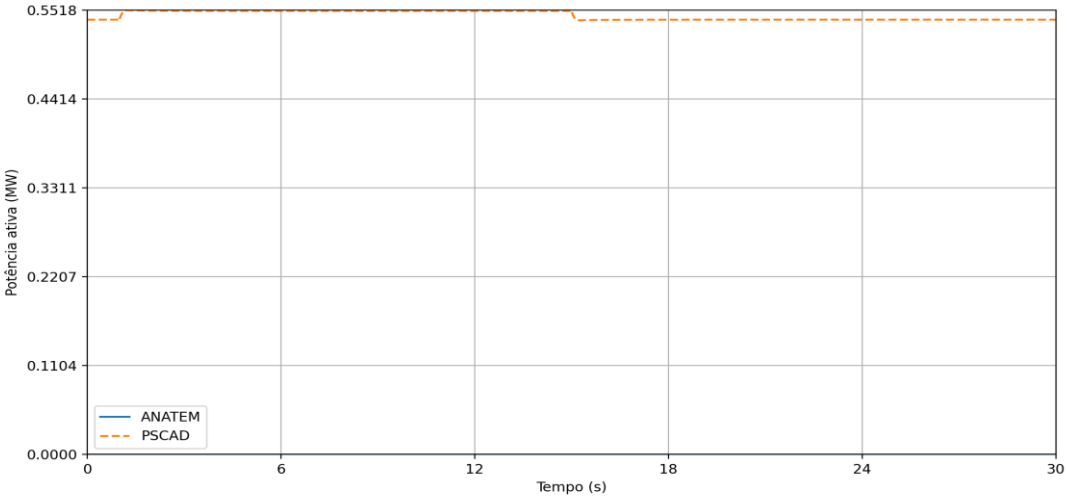

Figura 4-1024 – Potência ativa

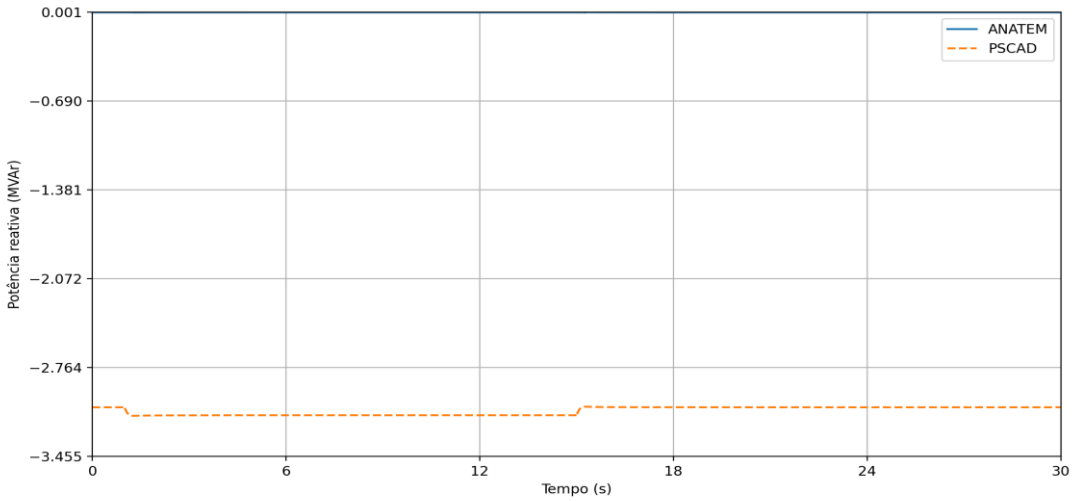

Figura 4-1025 – Potência reativa

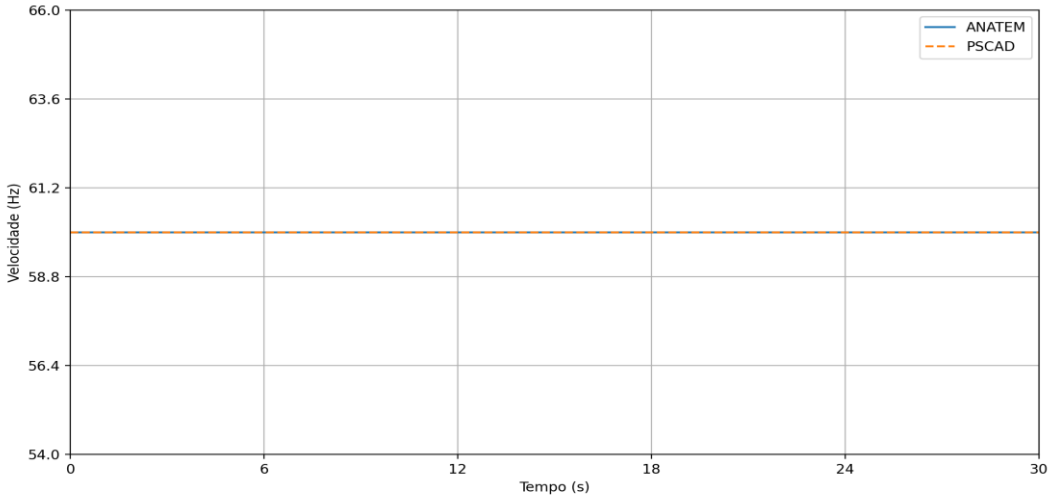

Figura 4-1026 – Velocidade da máquina

4.40.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

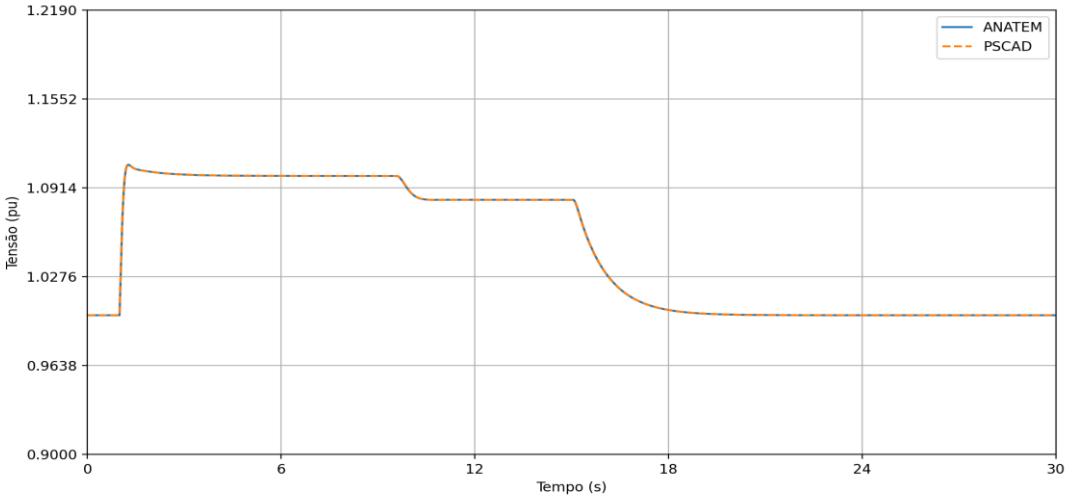

Figura 4-1027 – Tensão terminal

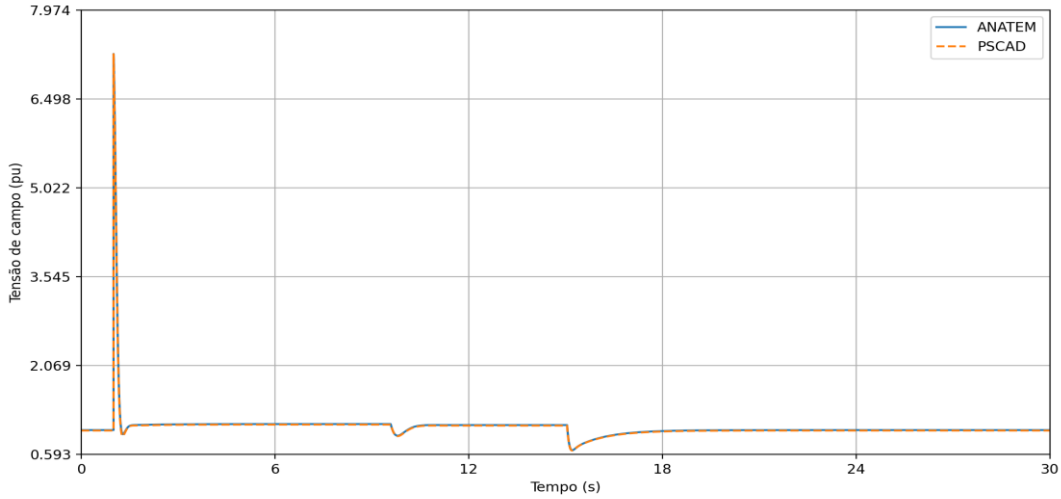

Figura 4-1028 – Tensão de campo

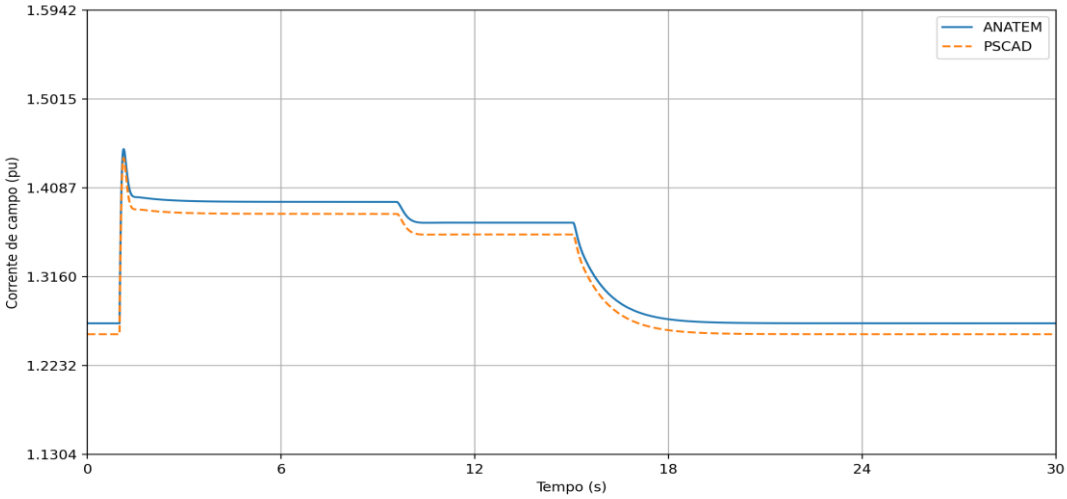

Figura 4-1029 – Corrente de campo

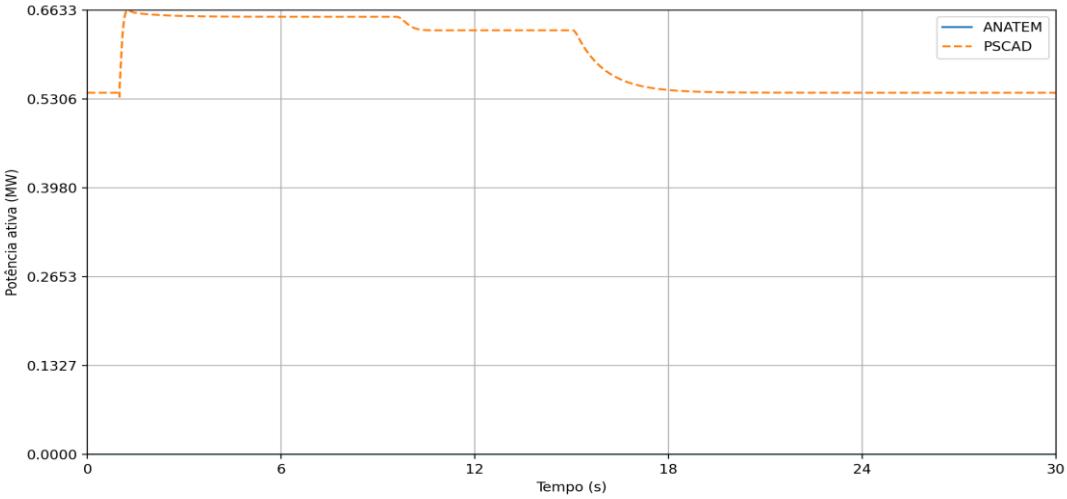

Figura 4-1030 – Potência ativa

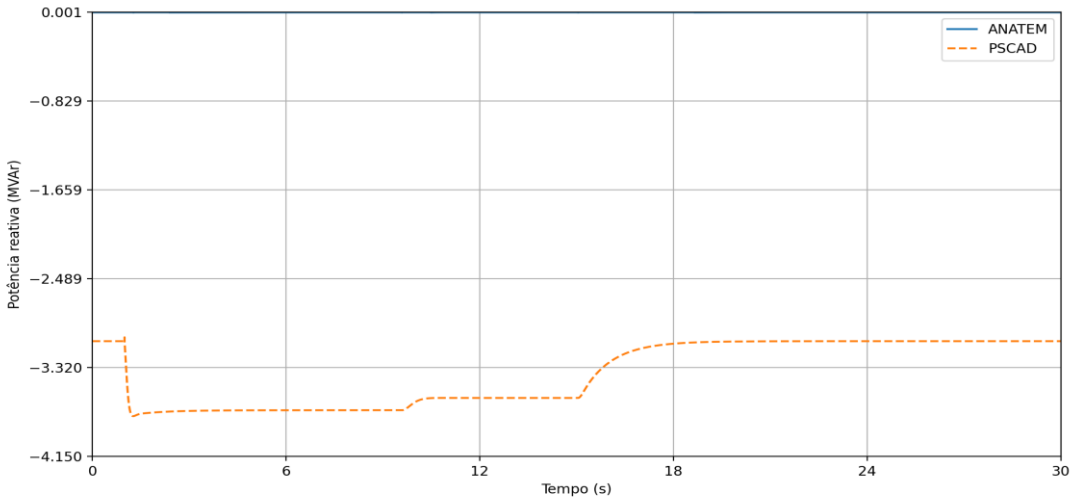

Figura 4-1031 – Potência reativa

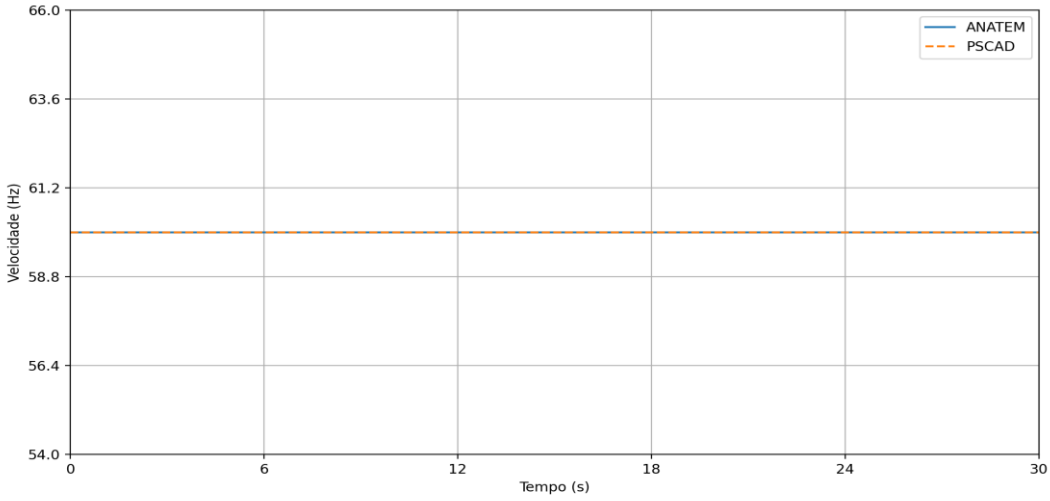

Figura 4-1032 – Velocidade da máquina

4.40.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.40.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.40.4.2.

4.40.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

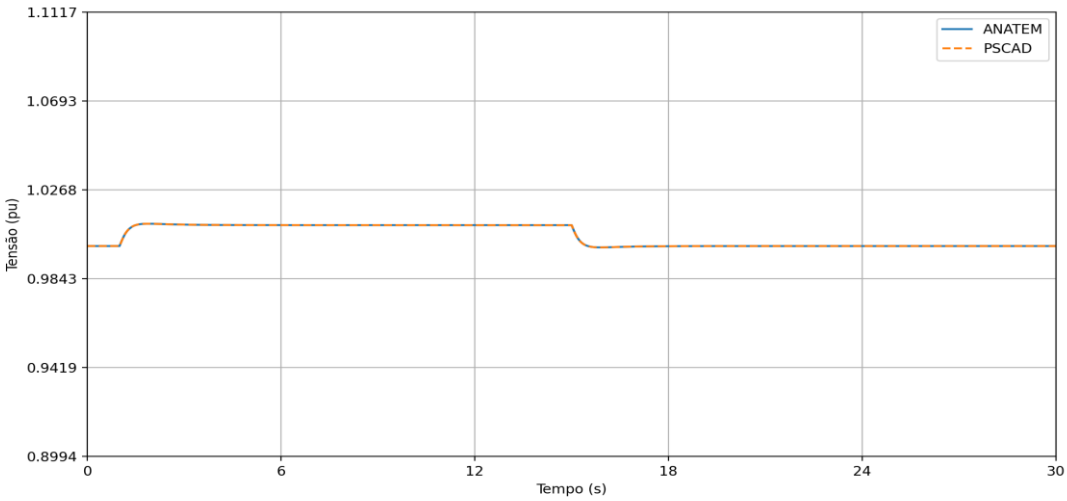

Figura 4-1033 – Tensão terminal

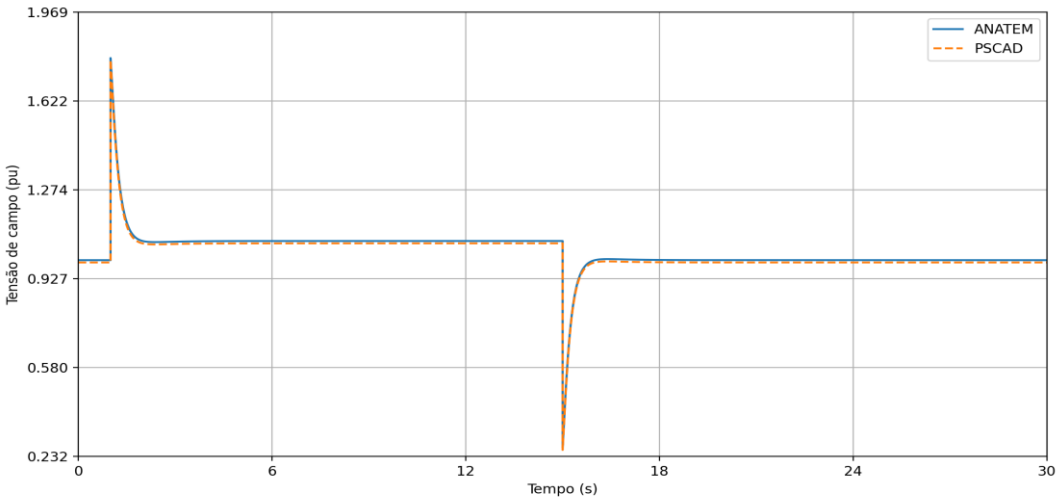

Figura 4-1034 – Tensão de campo

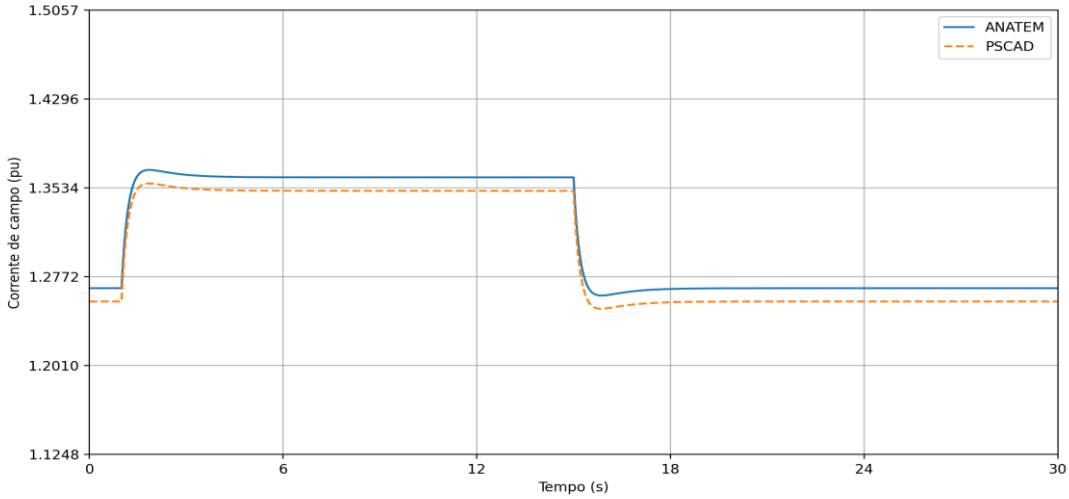

Figura 4-1035 – Corrente de campo

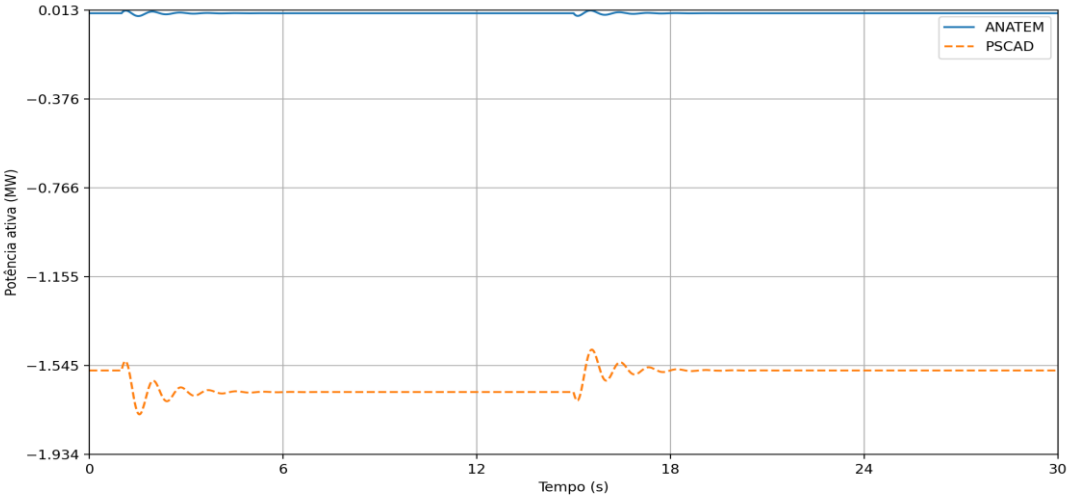

Figura 4-1036 – Potência ativa

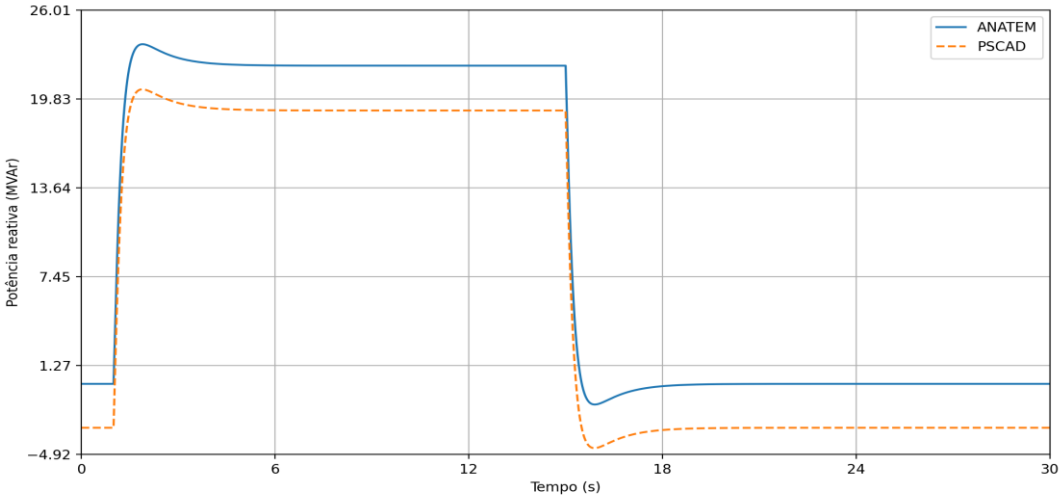

Figura 4-1037 – Potência reativa

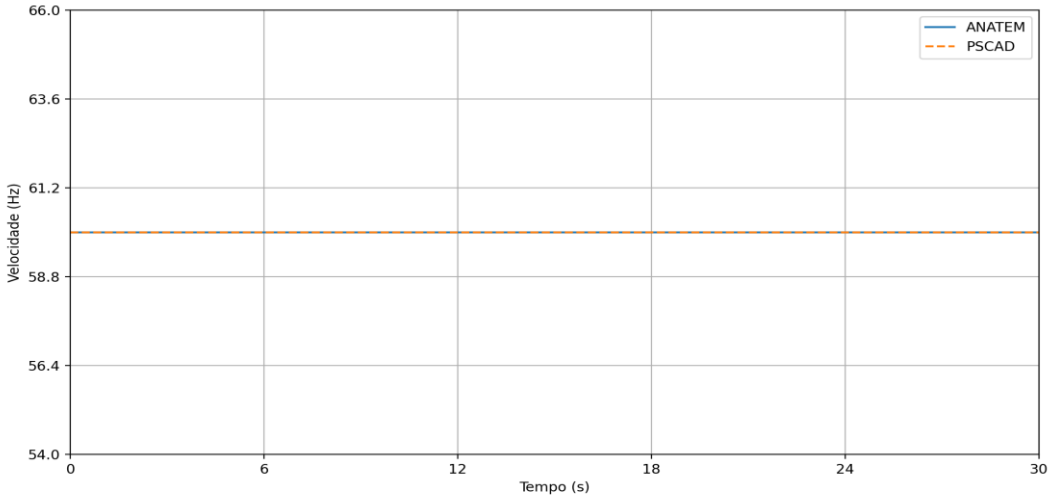

Figura 4-1038 – Velocidade da máquina

4.40.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

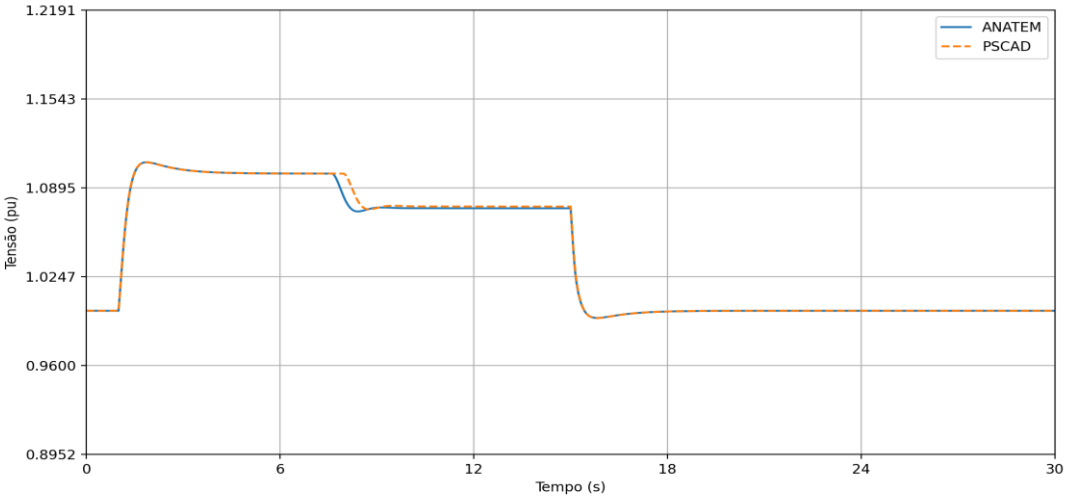

Figura 4-1039 – Tensão terminal

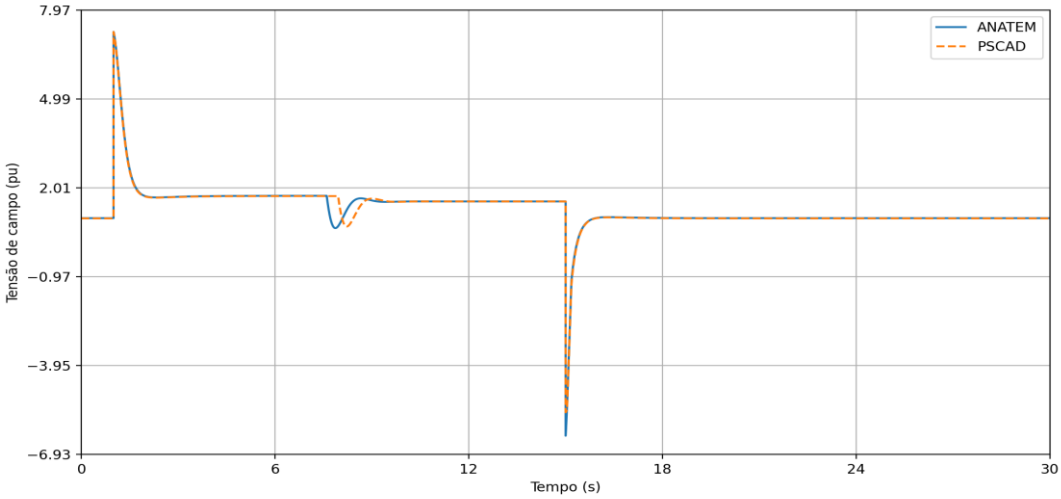

Figura 4-1040 – Tensão de campo

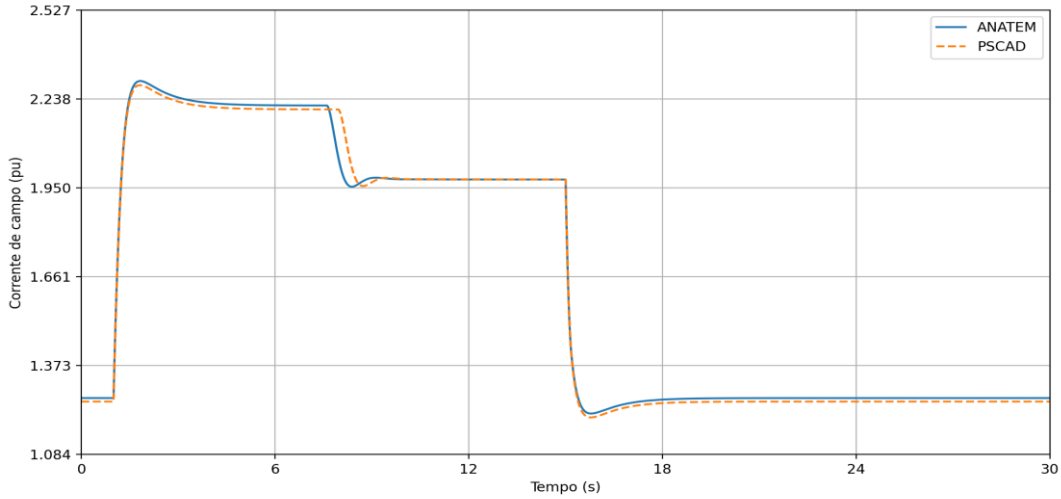

Figura 4-1041 – Corrente de campo

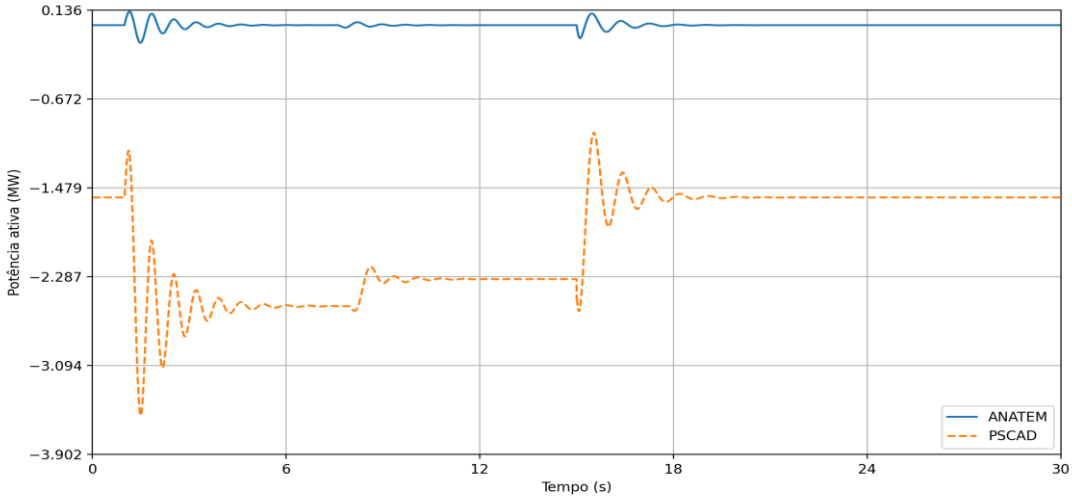

Figura 4-1042 – Potência ativa

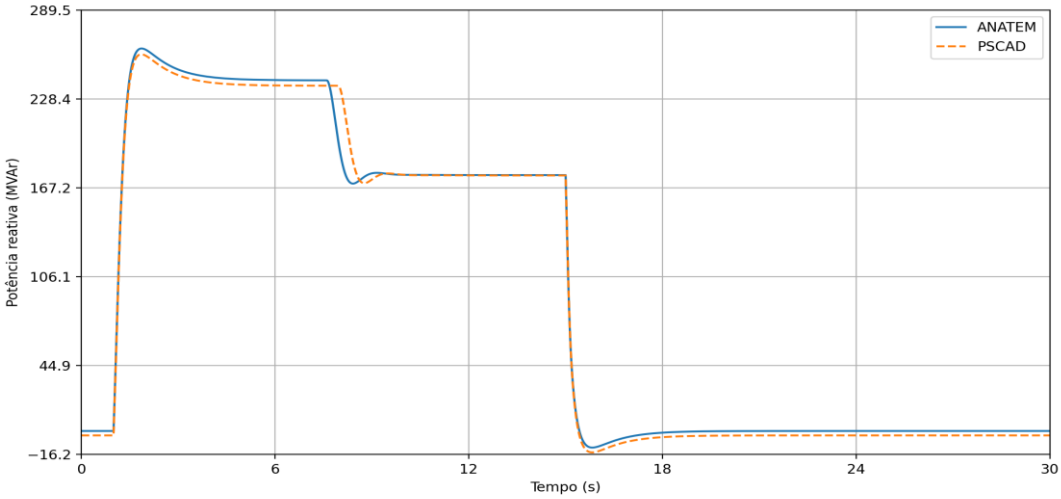

Figura 4-1043 – Potência reativa

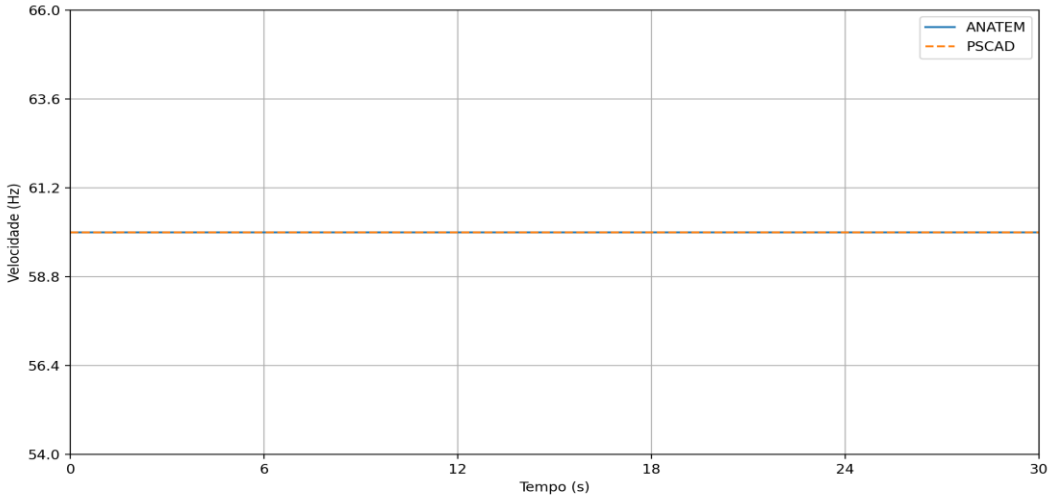

Figura 4-1044 – Velocidade da máquina

4.41 CS NOVA PONTE

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Nova Ponte, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.41.1 Modelo do CS Nova Ponte

A Tabela 4-121 apresenta os parâmetros do CS Nova Ponte disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-121 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	100	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	69	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	30	I(KA)	7,489	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	20	H(s)	4,91	
xl(%)	14	D(pu)	0	
T'd(s)	5,7	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,14	Reatância de Potier
T''d(s)	0,06	xd(pu)	1	
T''q(s)	0,16	xd_(pu)	0,3	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	5,7	T'd
H(s)	4,91	xd__(pu)	0,2	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,06	T''d
S(MVA)	179	Xq(pu)	0,69	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,2	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,16	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.41.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-122, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Nova Ponte estão apresentados na Tabela 4-123.

A partir dos parâmetros da Tabela 4-122, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-123. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-1045.

Tabela 4-122 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Nova Ponte	
Ag	**Y1**	0,0248
Bg	**Y2**	6,6089
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-123 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,825	0,800
1,017	0,950
1,054	0,975
1,093	1,000
1,149	1,033
1,212	1,067
1,28	1,100
1,549	1,200
1,975	1,300

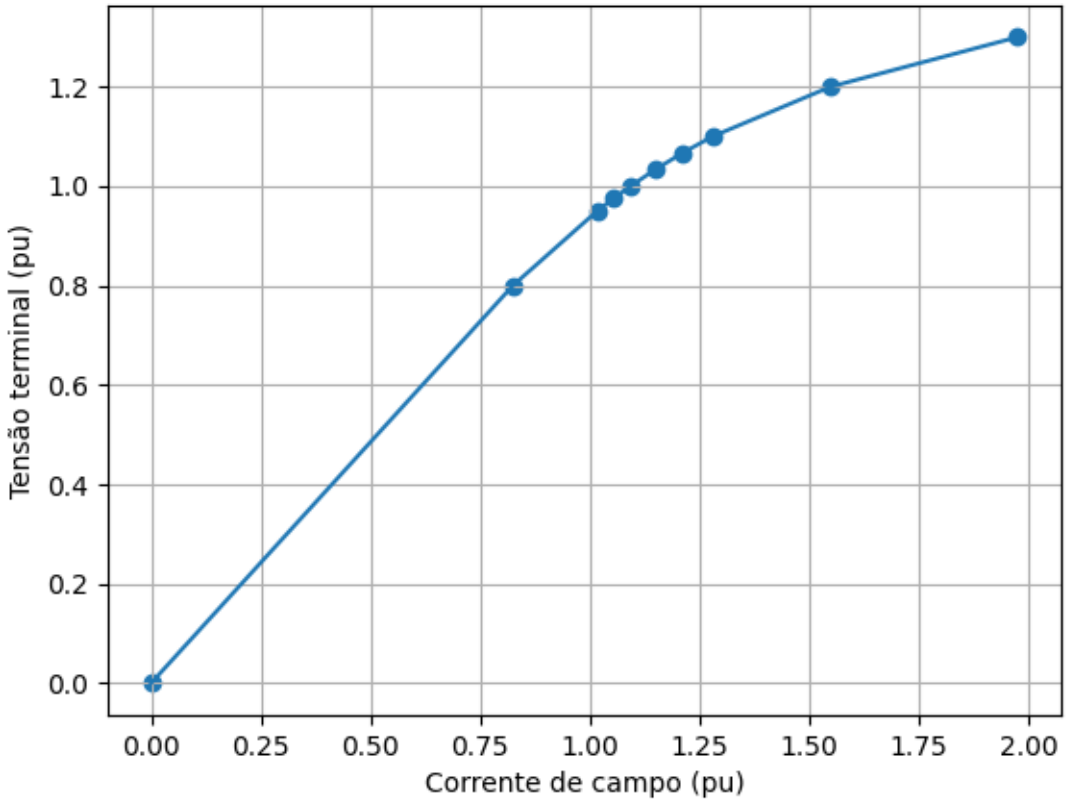

Figura 4-1045 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio, Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.41.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.41.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.41.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.41.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

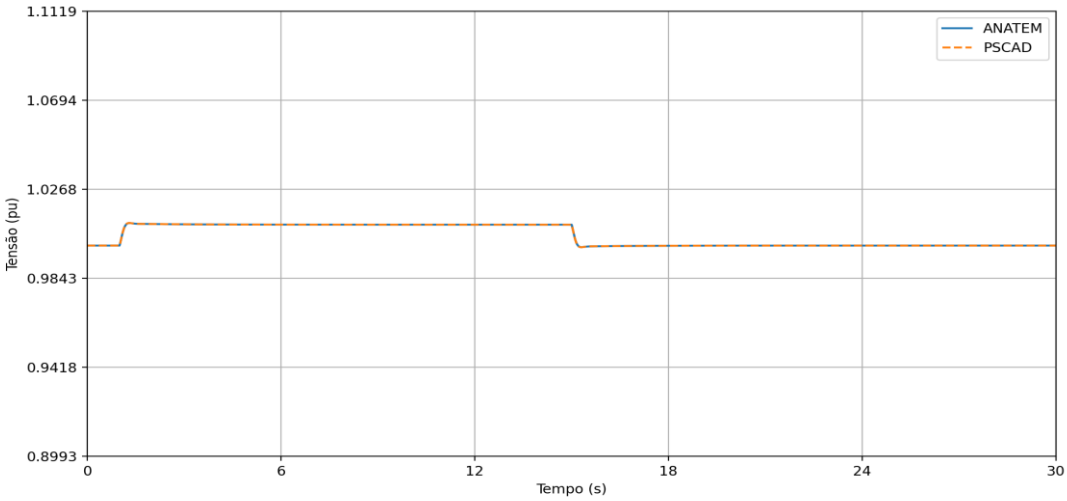

Figura 4-1046 – Tensão terminal

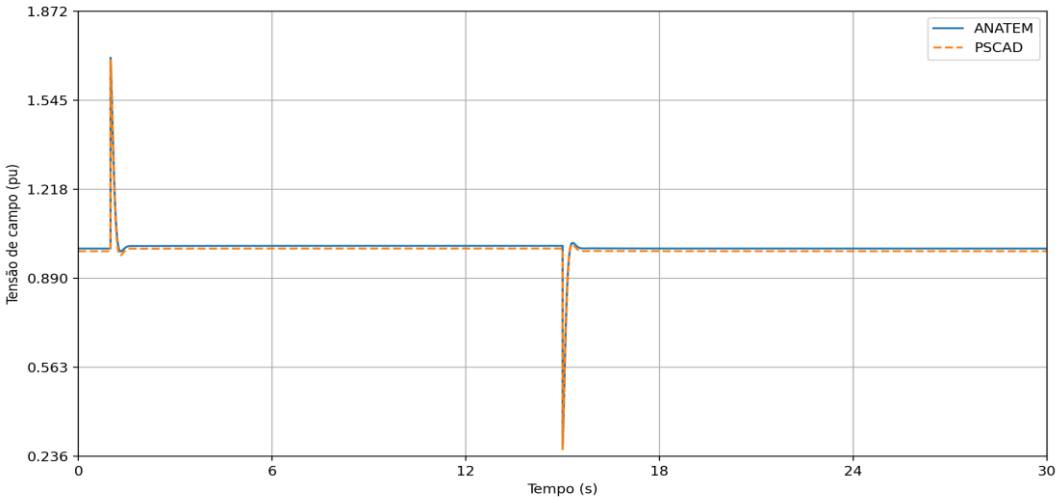

Figura 4-1047 – Tensão de campo

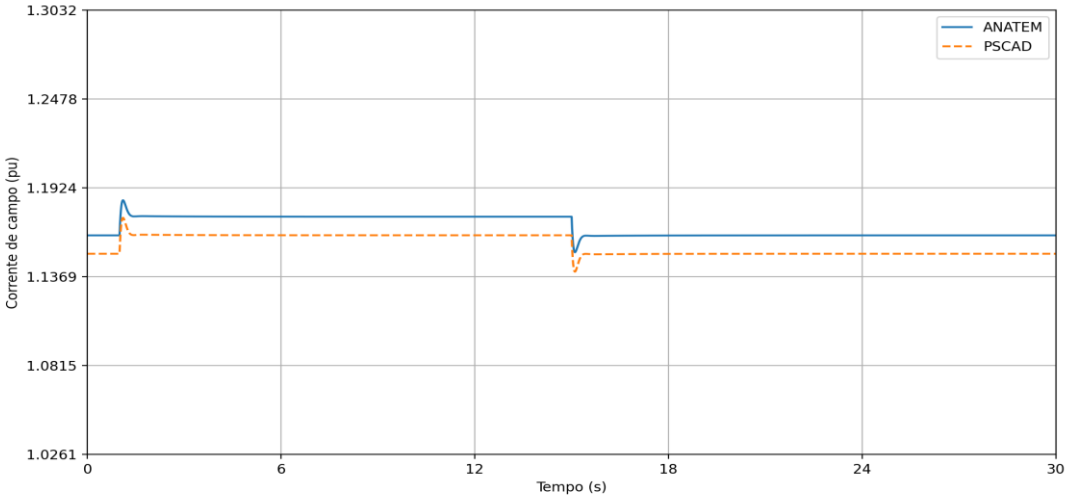

Figura 4-1048 – Corrente de campo

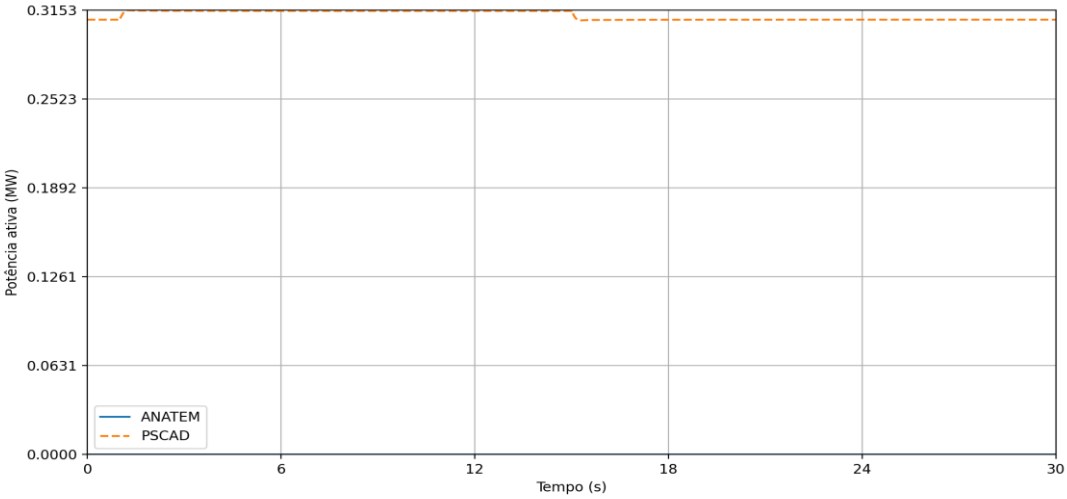

Figura 4-1049 – Potência ativa

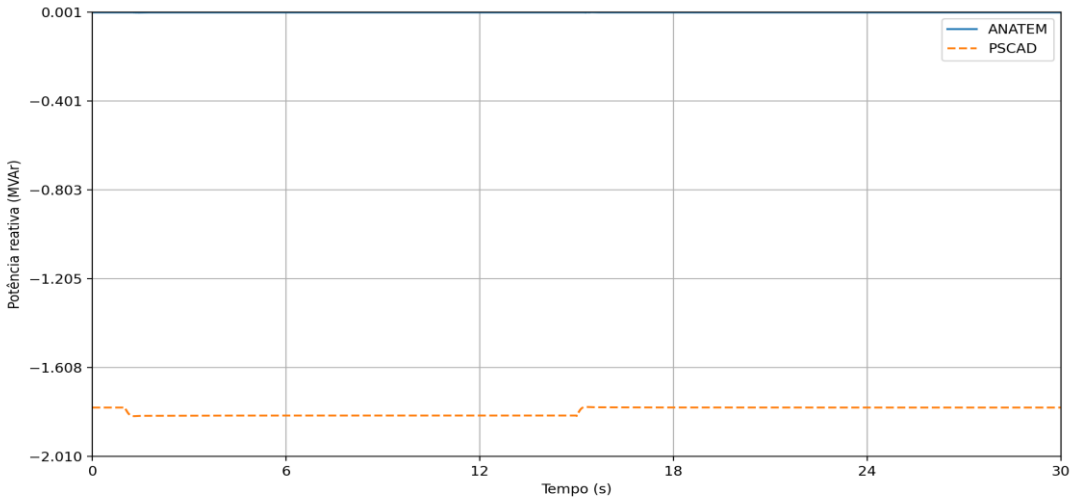

Figura 4-1050 – Potência reativa

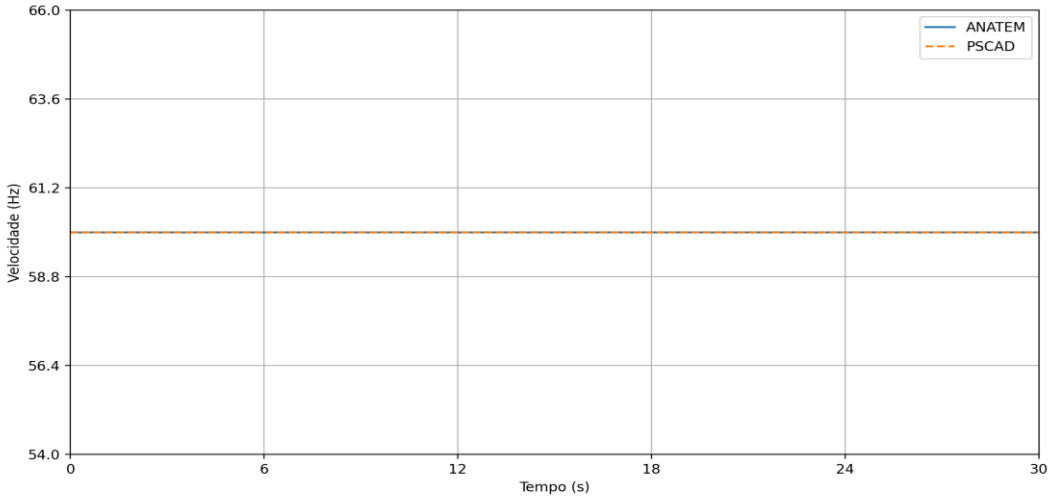

Figura 4-1051 – Velocidade da máquina

4.41.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

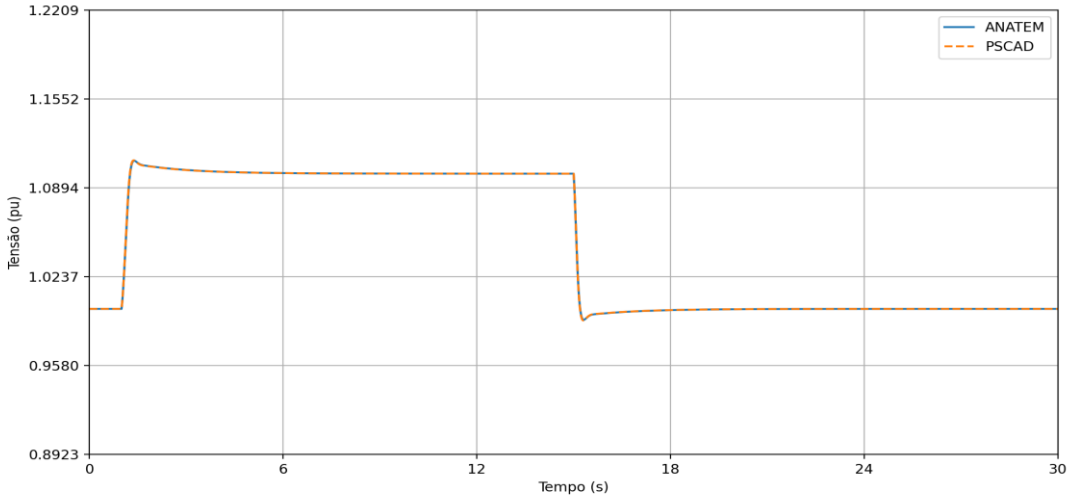

Figura 4-1052 – Tensão terminal

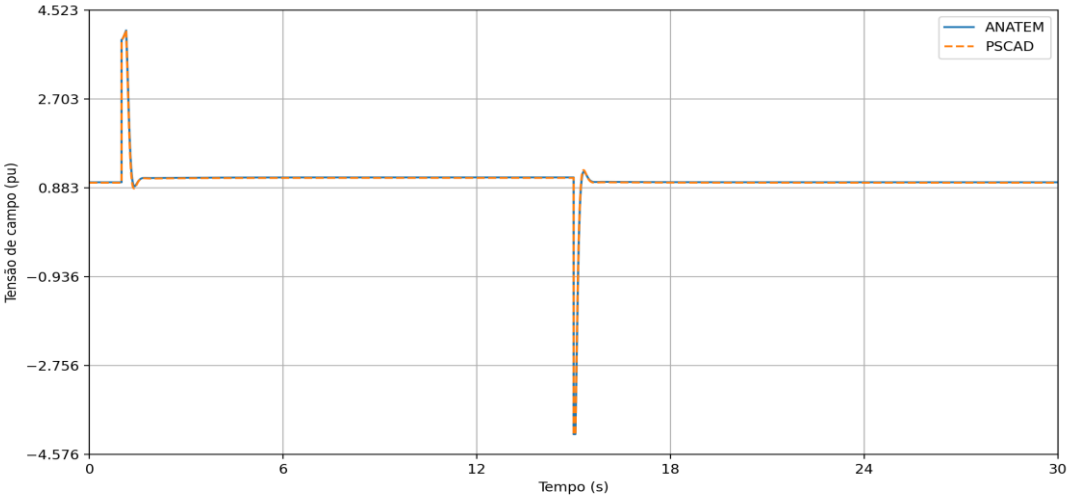

Figura 4-1053 – Tensão de campo

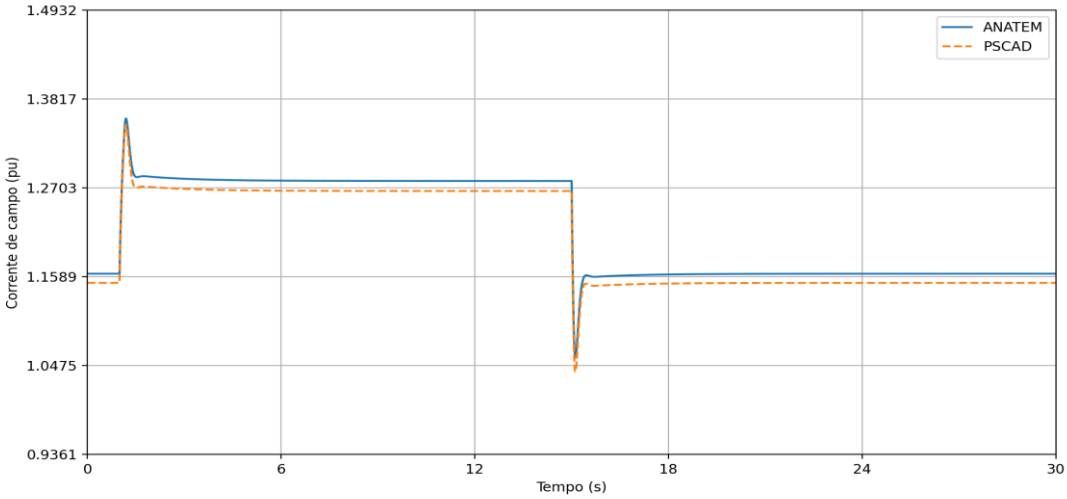

Figura 4-1054 – Corrente de campo

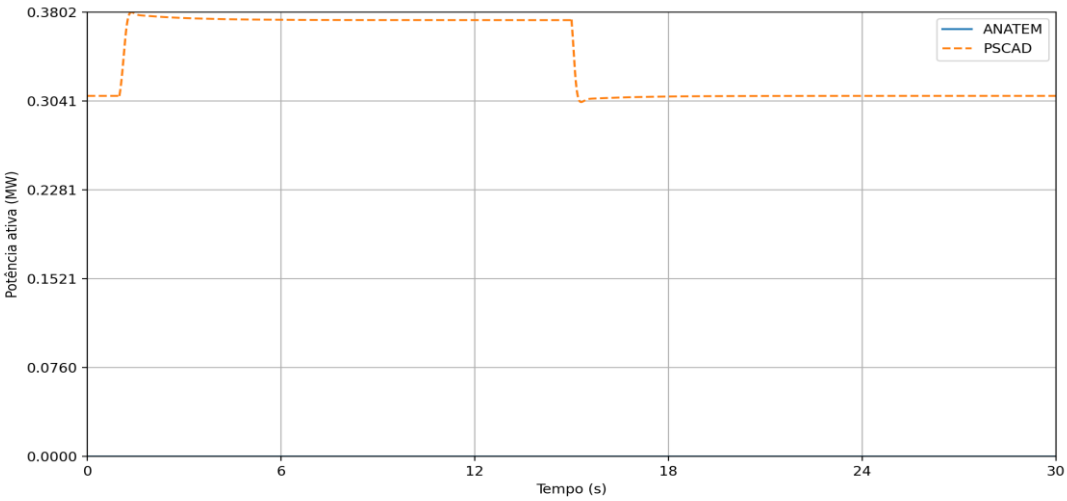

Figura 4-1055 – Potência ativa

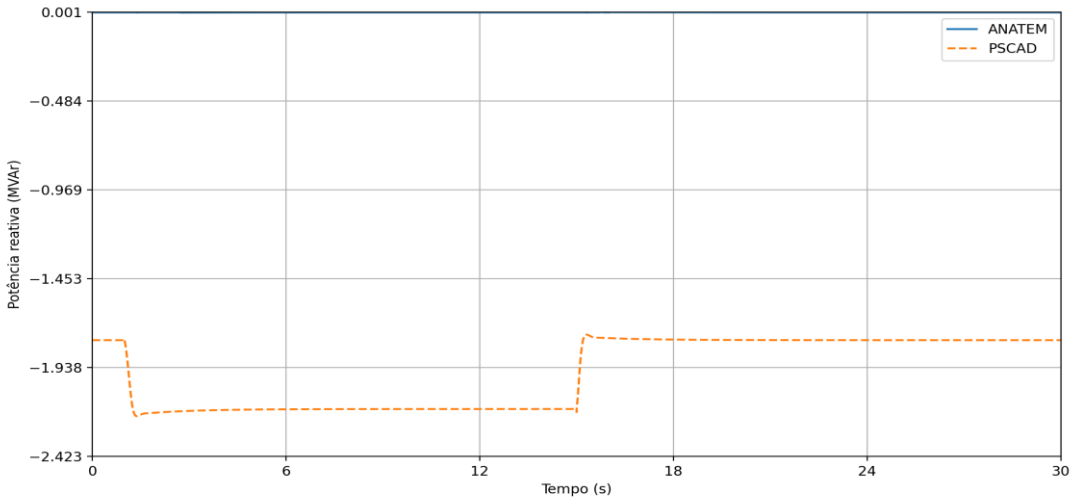

Figura 4-1056 – Potência reativa

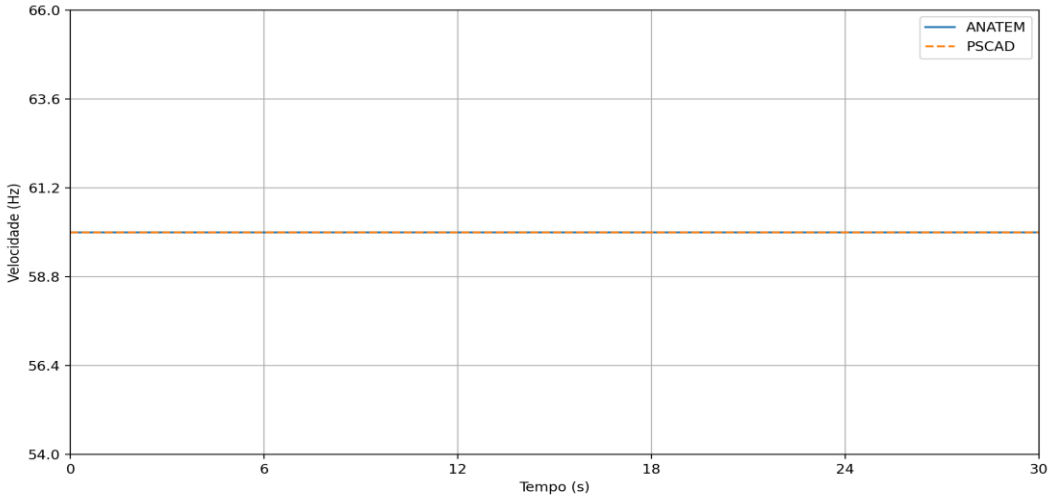

Figura 4-1057 – Velocidade da máquina

4.41.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.41.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.41.4.2.

4.41.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

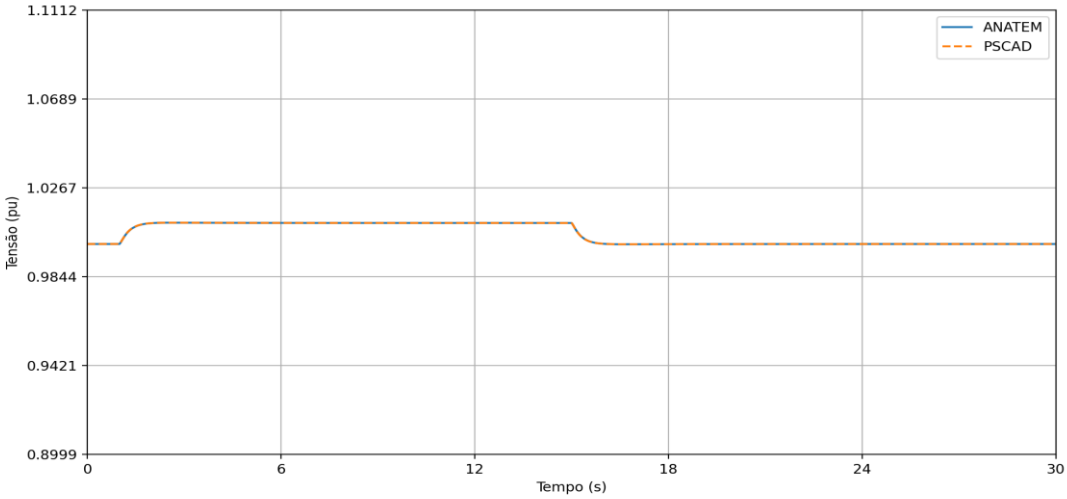

Figura 4-1058 – Tensão terminal

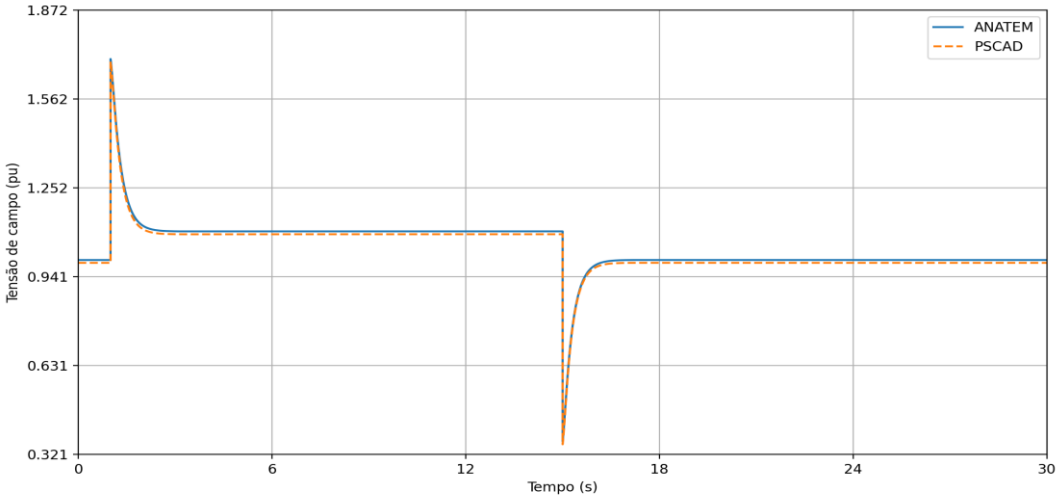

Figura 4-1059 – Tensão de campo

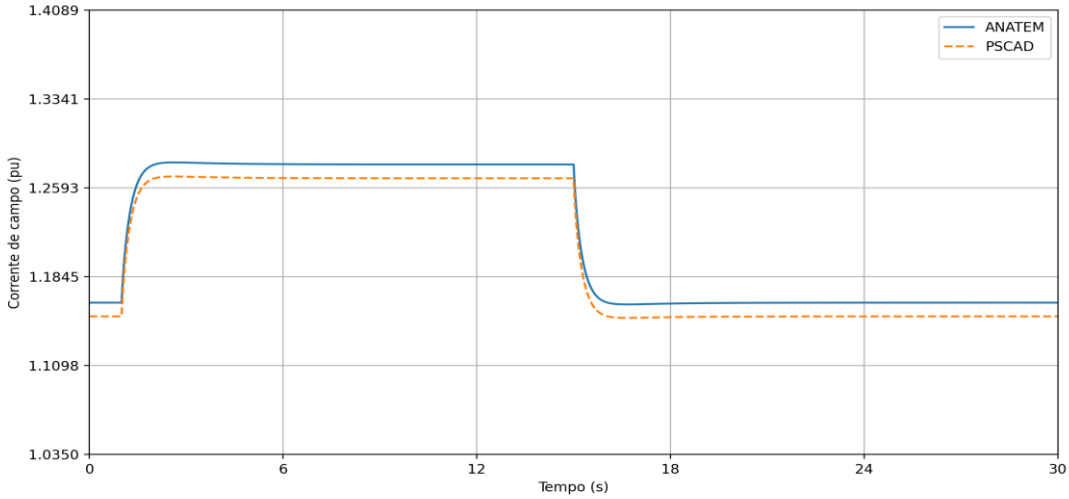

Figura 4-1060 – Corrente de campo

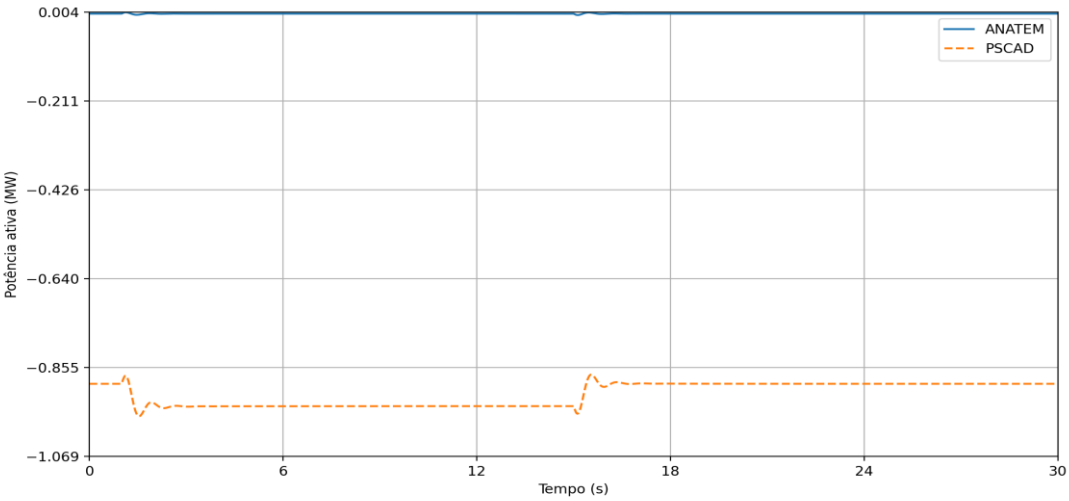

Figura 4-1061 – Potência ativa

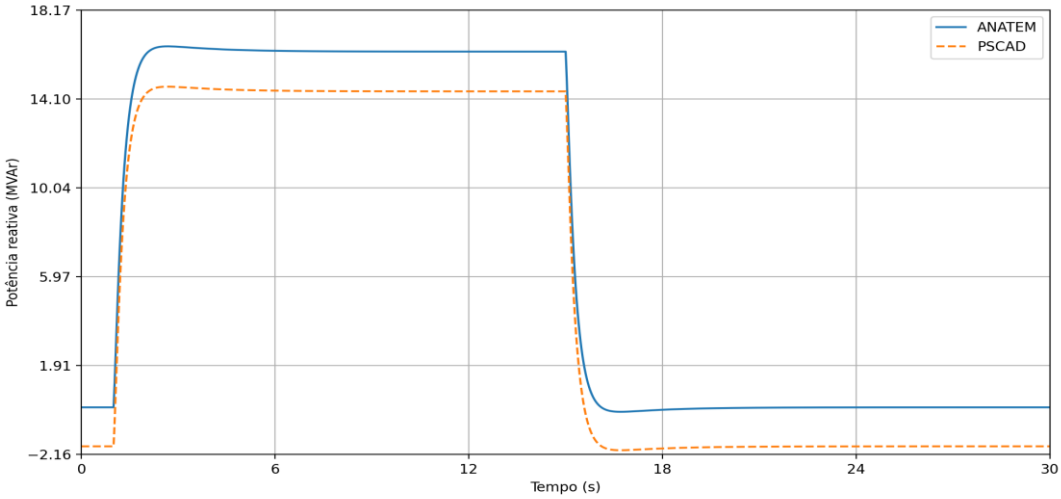

Figura 4-1062 – Potência reativa

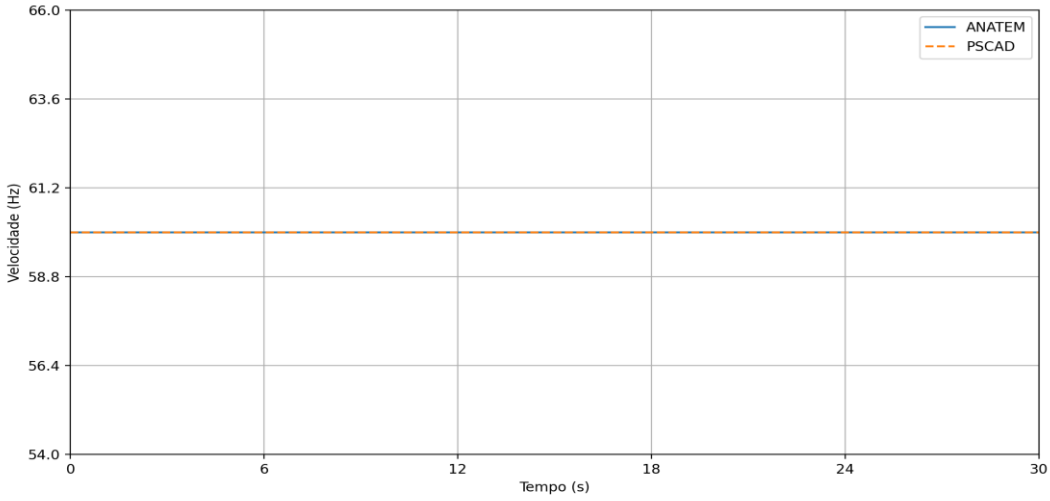

Figura 4-1063 – Velocidade da máquina

4.41.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

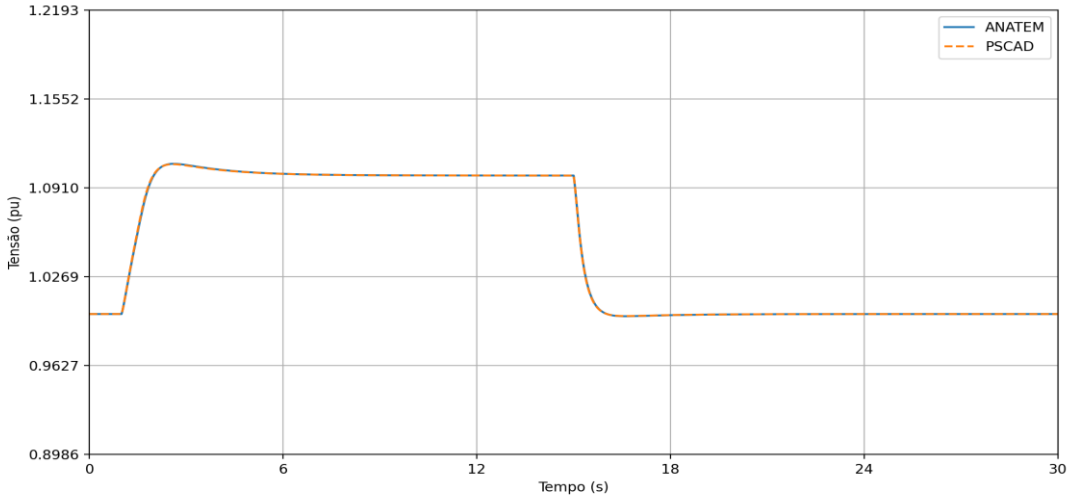

Figura 4-1064 – Tensão terminal

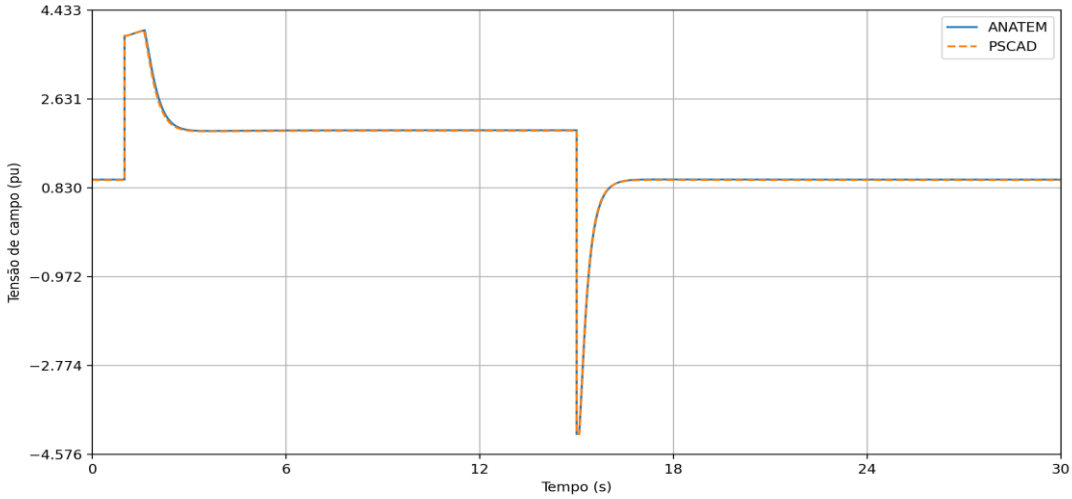

Figura 4-1065 – Tensão de campo

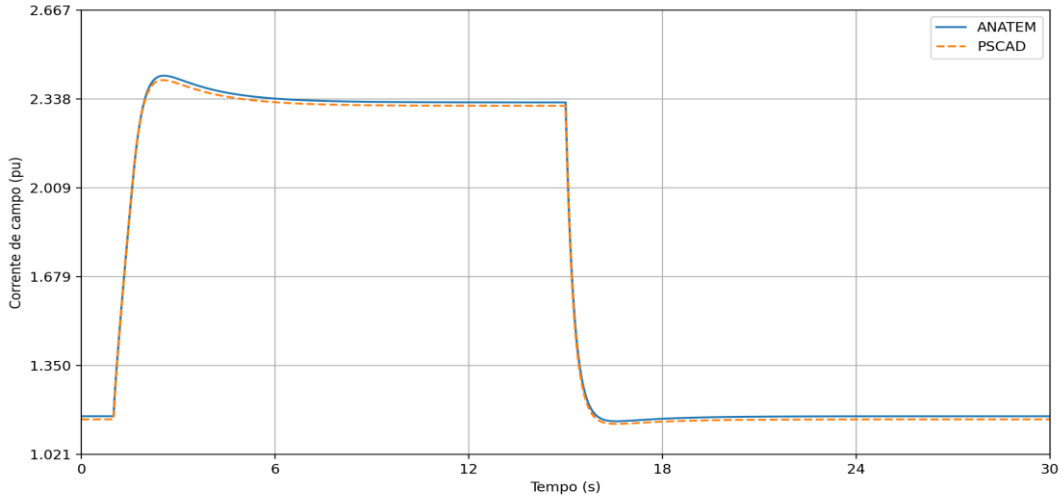

Figura 4-1066 – Corrente de campo

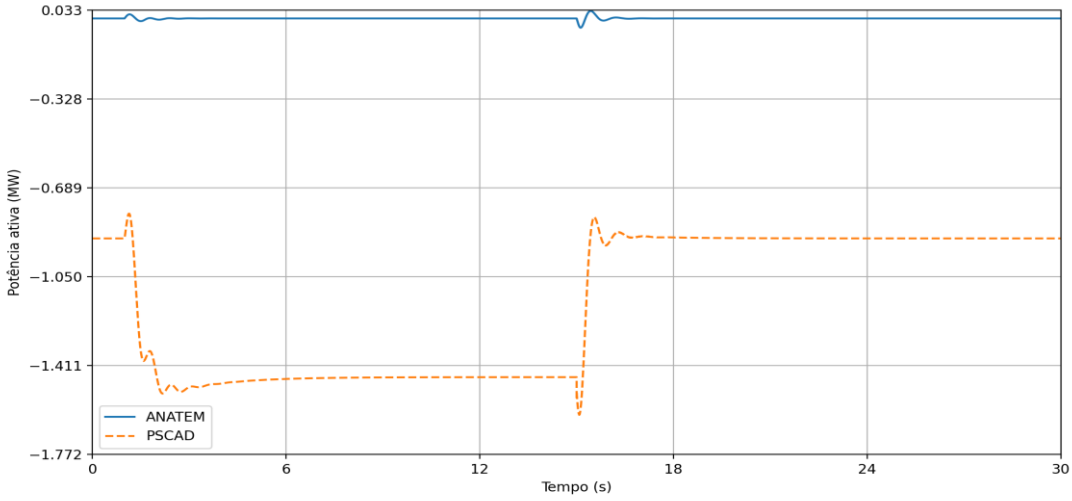

Figura 4-1067 – Potência ativa

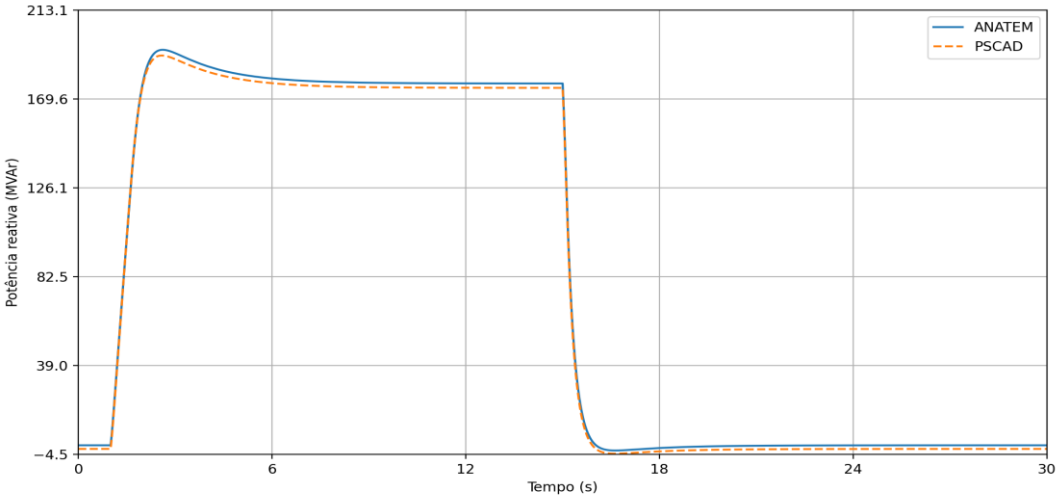

Figura 4-1068 – Potência reativa

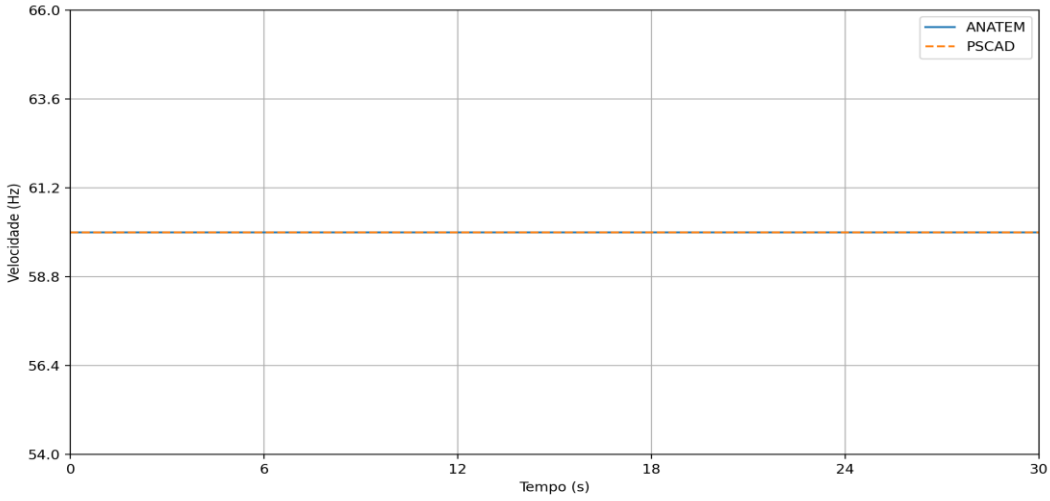

Figura 4-1069 – Velocidade da máquina

4.42 CS VOLTA GRANDE

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Volta Grande, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.42.1 Modelo do CS Volta Grande

A Tabela 4-124 apresenta os parâmetros do CS Volta Grande disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-124 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	107	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	68,9	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	32	I(KA)	4,184	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	22,7	H(s)	5,6	
xl(%)	15,3	D(pu)	0	
T'd(s)	3,26	Ra(pu)	0	
		xp(pu)	0,153	Reatância de Potier
T''d(s)	0,03	xd(pu)	1,07	
T''q(s)	0,065	xd_(pu)	0,32	x'd
Ra(%)	0	Td0_(s)	3,26	T'd
H(s)	5,6	xd__(pu)	0,227	x''d
D(pu)	0	Td0__(s)	0,03	T''d
S(MVA)	100	Xq(pu)	0,689	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,227	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,065	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.42.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-125, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Volta Grande estão apresentados na Tabela

4-126. A partir dos parâmetros da Tabela 4-125, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-126. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-1070.

Tabela 4-125 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Volta Grande	
Ag	**Y1**	0,058
Bg	**Y2**	6,922
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-126 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,858	0,800
1,114	0,950
1,17	0,975
1,232	1,000
1,324	1,033
1,435	1,067
1,563	1,100
2,124	1,200
3,147	1,300

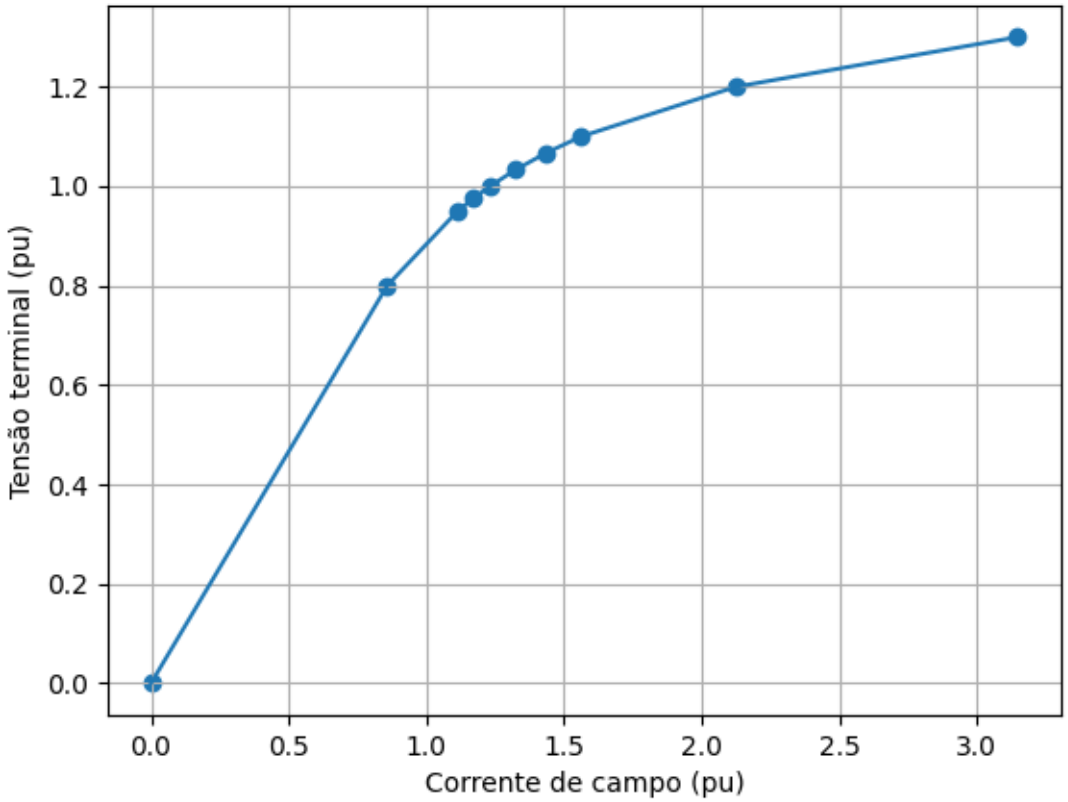

Figura 4-1070 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.42.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.42.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.42.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.42.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

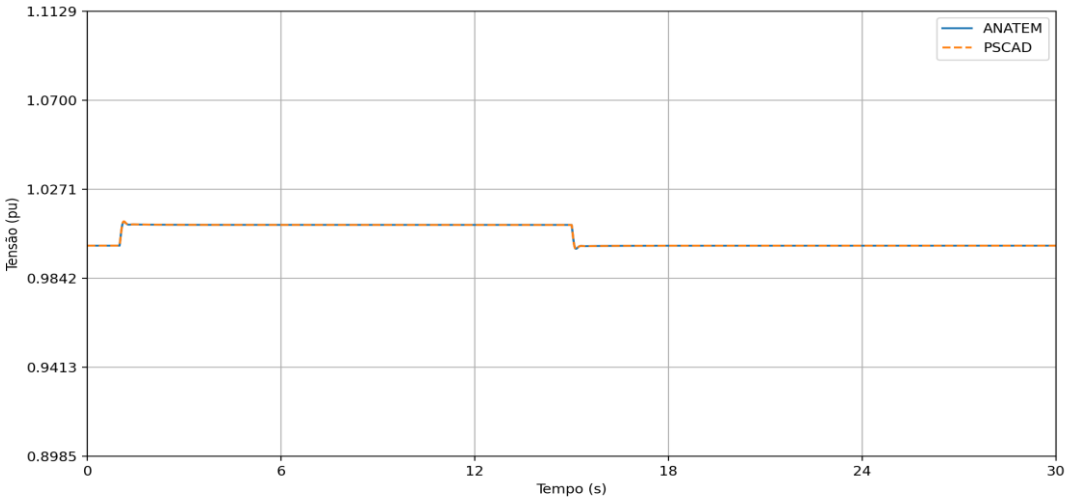

Figura 4-1071 – Tensão terminal

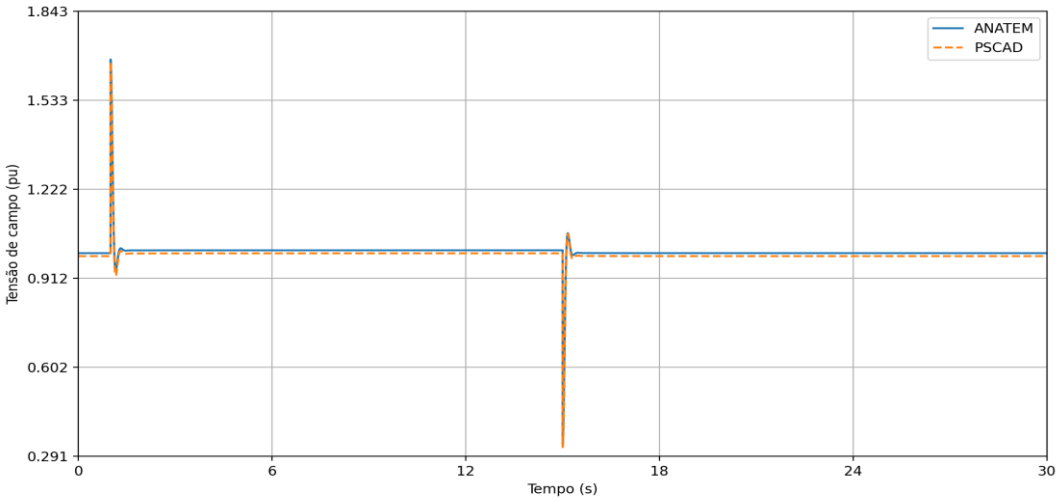

Figura 4-1072 – Tensão de campo

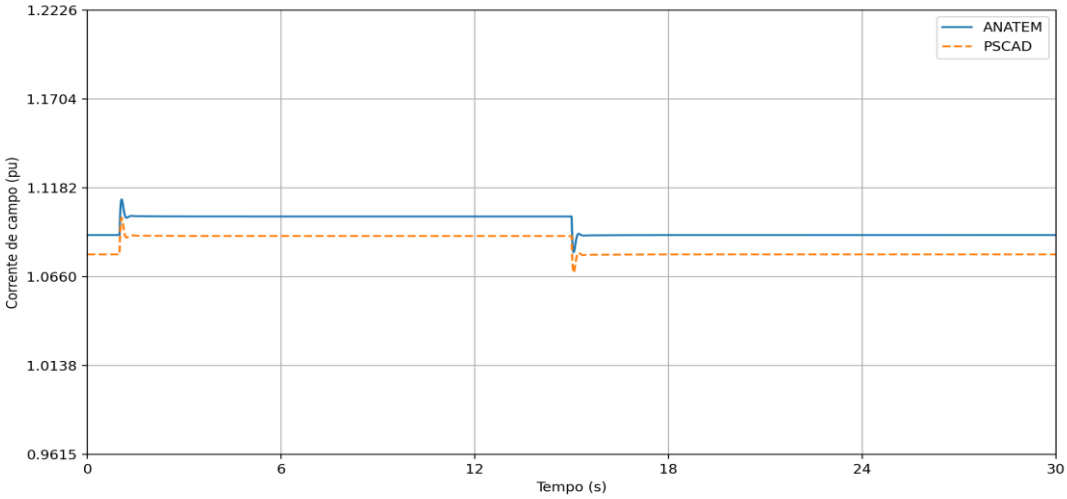

Figura 4-1073 – Corrente de campo

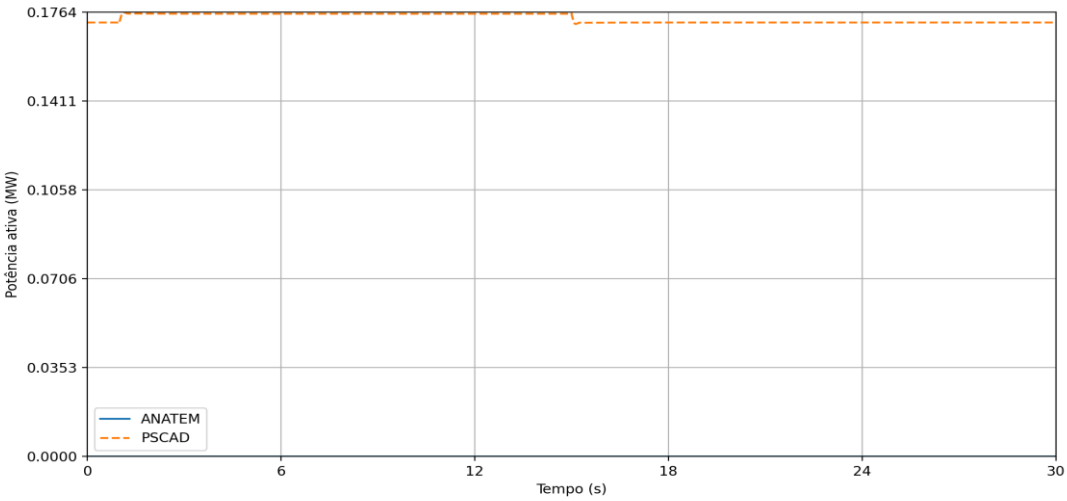

Figura 4-1074 – Potência ativa

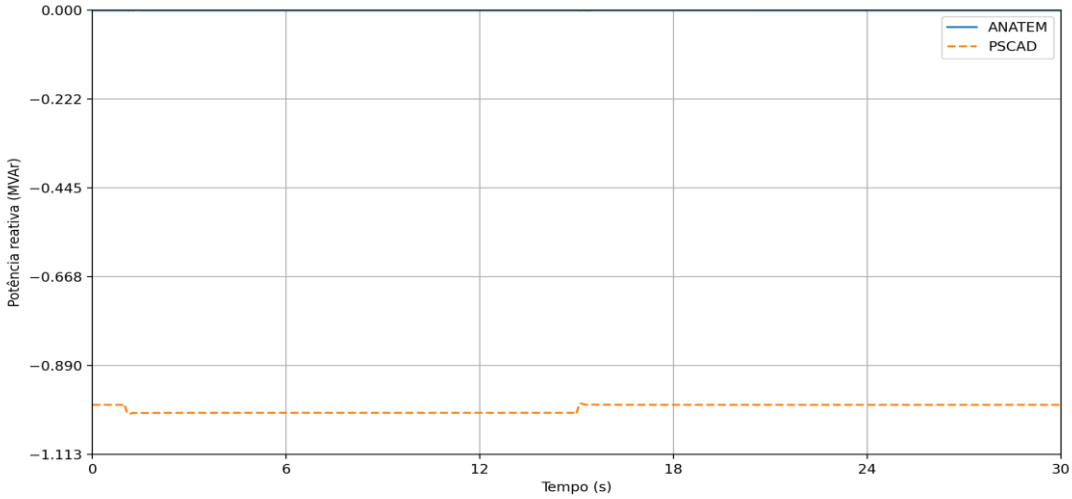

Figura 4-1075 – Potência reativa

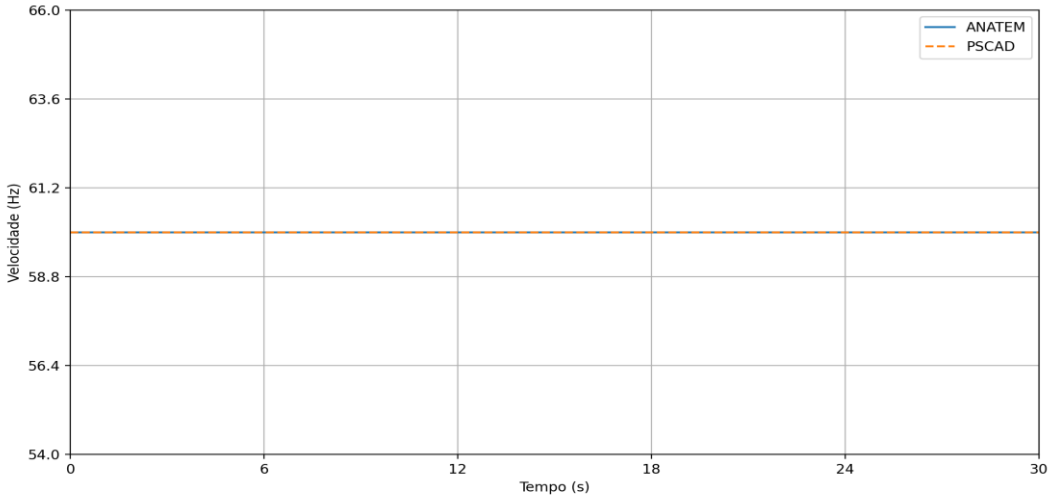

Figura 4-1076 – Velocidade da máquina

4.42.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

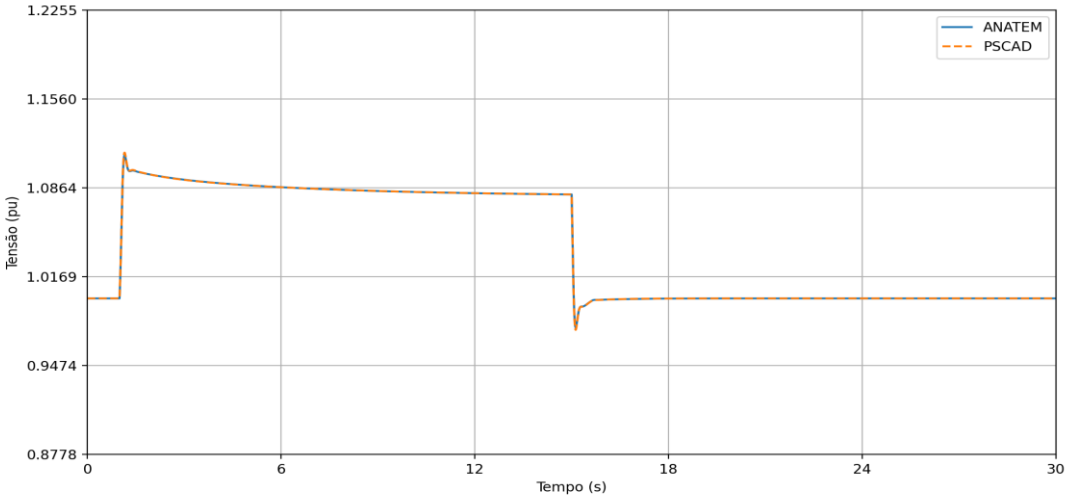

Figura 4-1077 – Tensão terminal

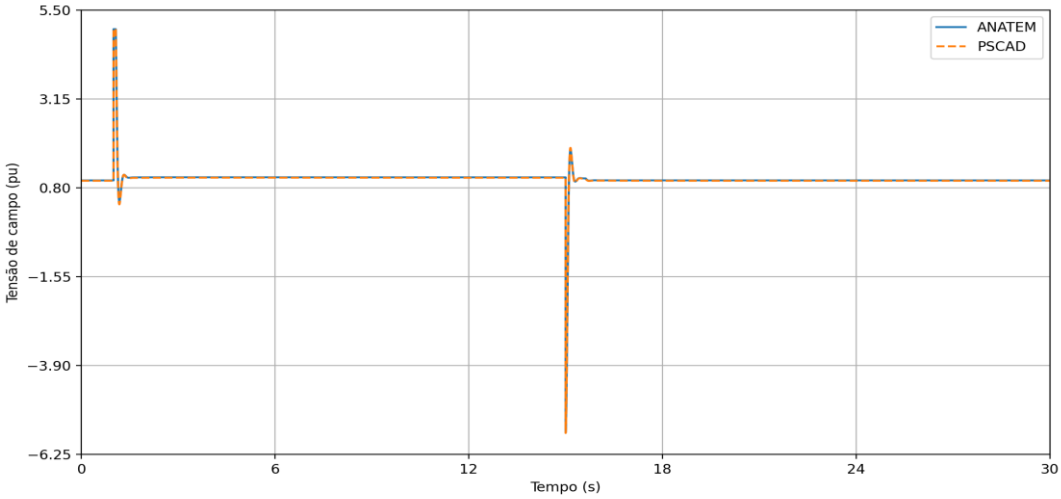

Figura 4-1078 – Tensão de campo

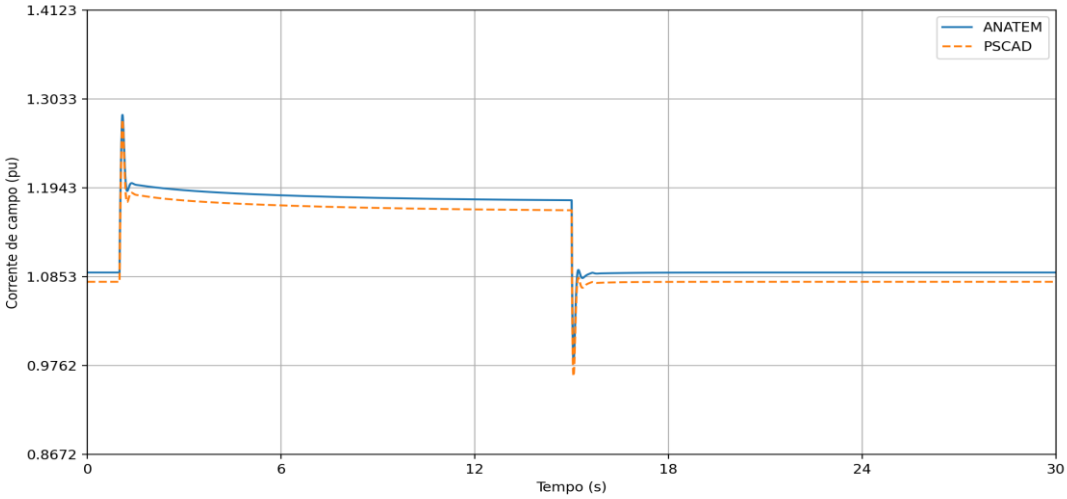

Figura 4-1079 – Corrente de campo

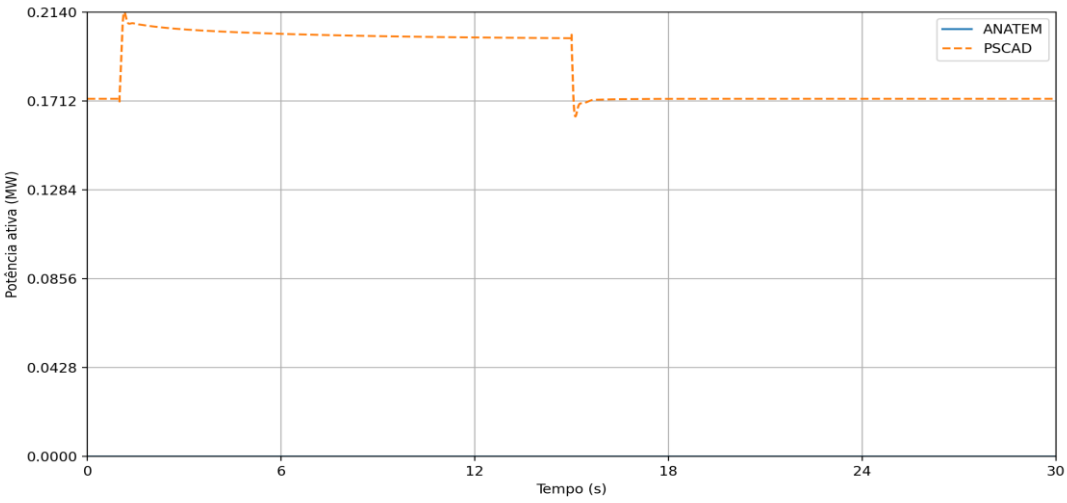

Figura 4-1080 – Potência ativa

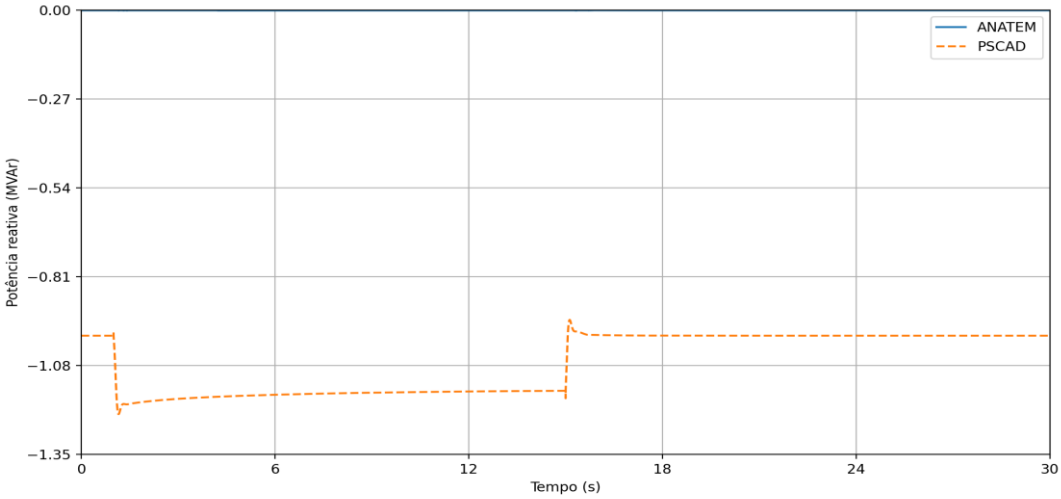

Figura 4-1081 – Potência reativa

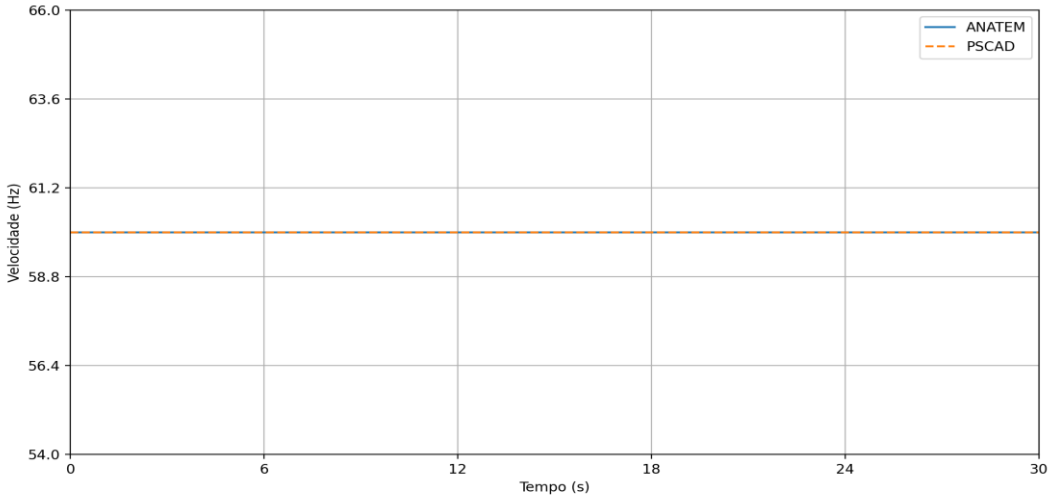

Figura 4-1082 – Velocidade da máquina

4.42.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.42.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.42.4.2.

4.42.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

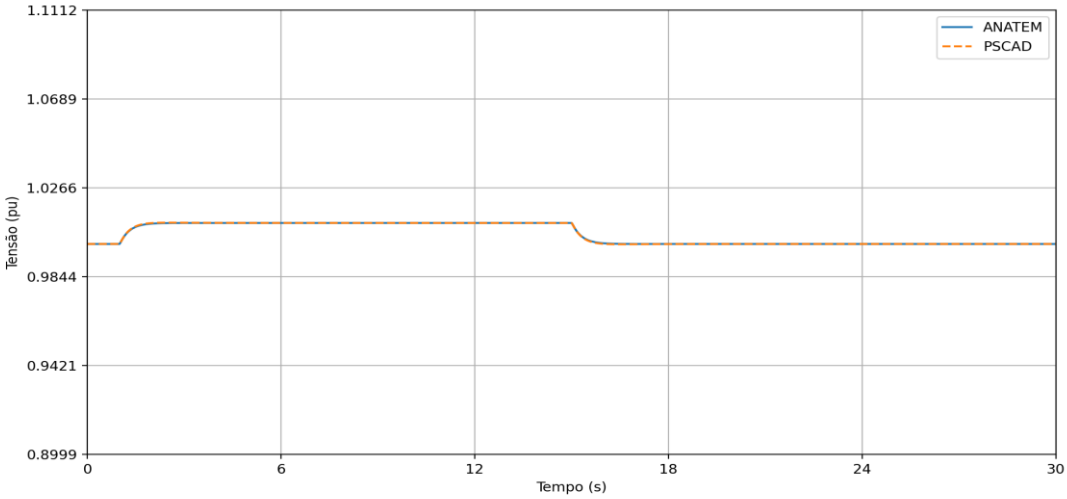

Figura 4-1083 – Tensão terminal

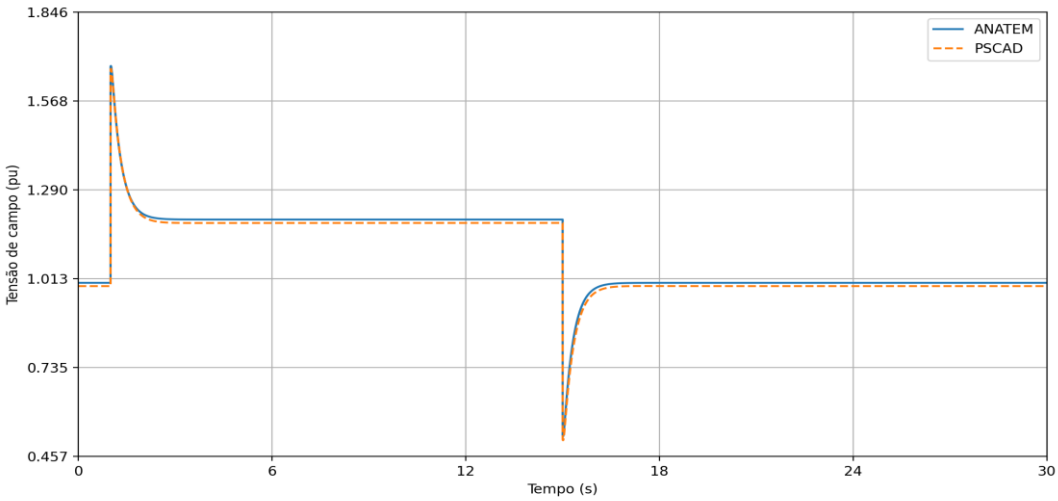

Figura 4-1084 – Tensão de campo

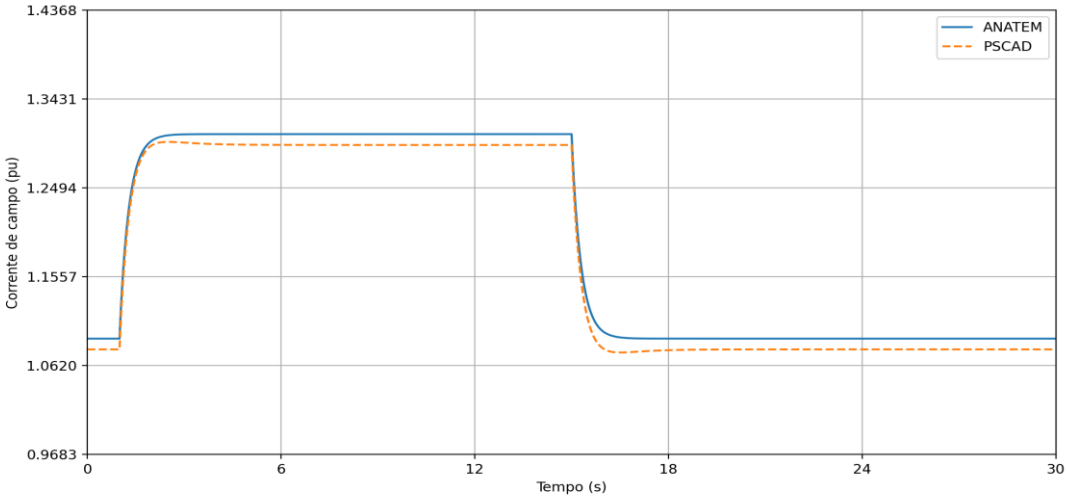

Figura 4-1085 – Corrente de campo

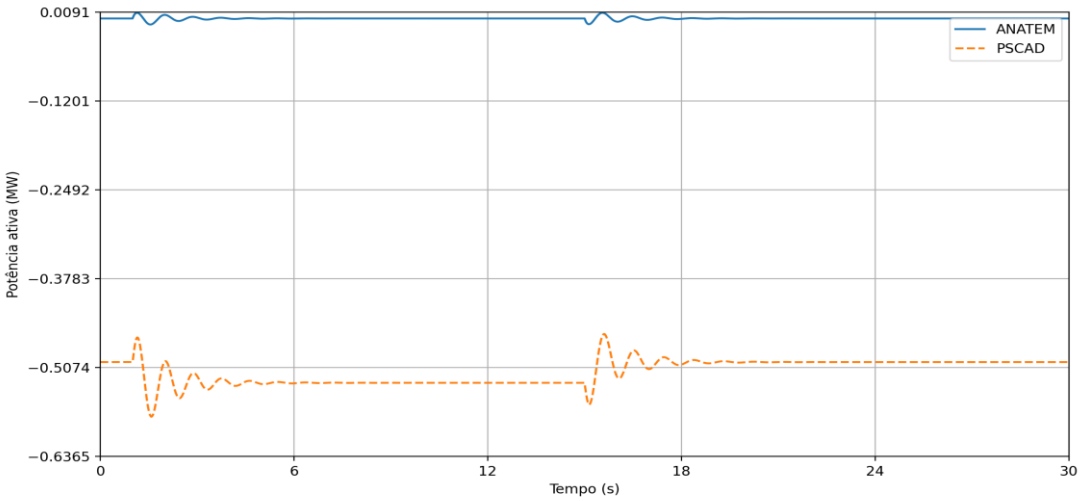

Figura 4-1086 – Potência ativa

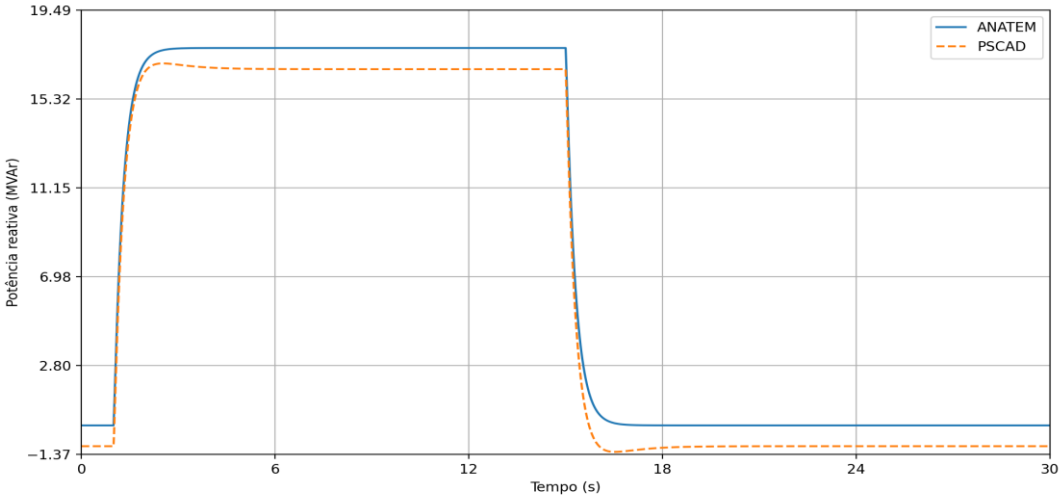

Figura 4-1087 – Potência reativa

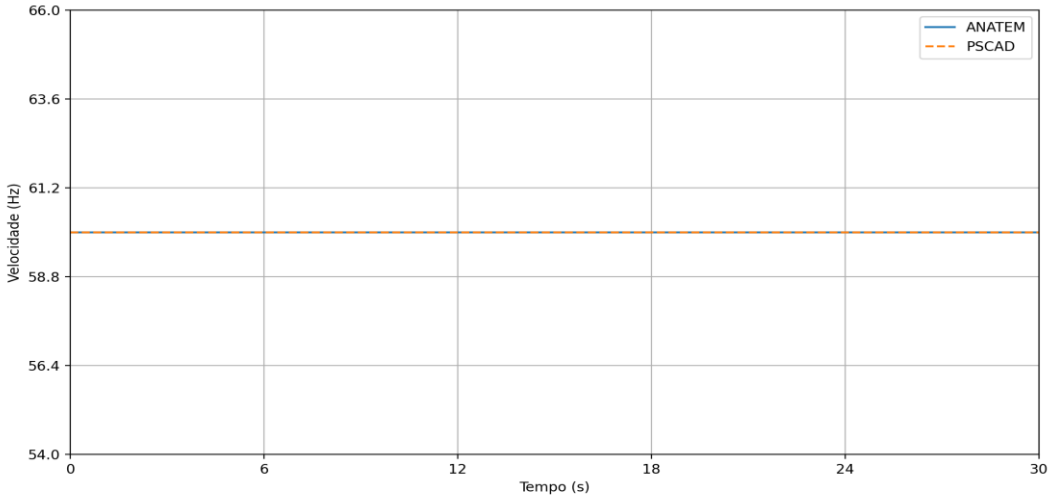

Figura 4-1088 – Velocidade da máquina

4.42.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

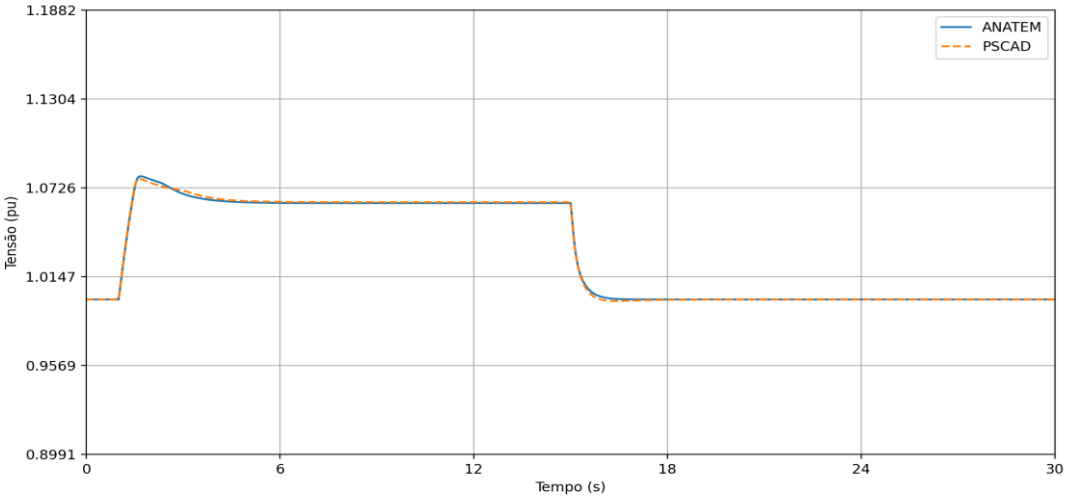

Figura 4-1089 – Tensão terminal

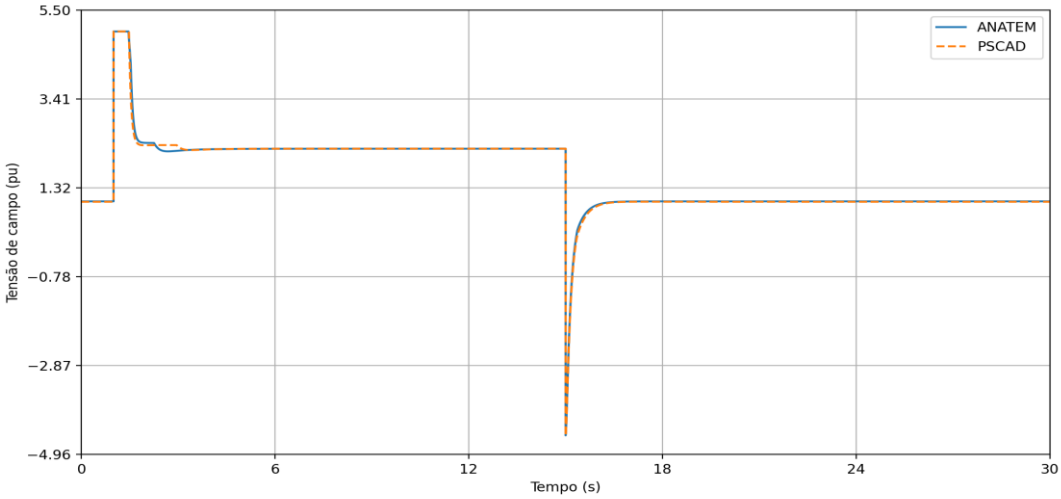

Figura 4-1090 – Tensão de campo

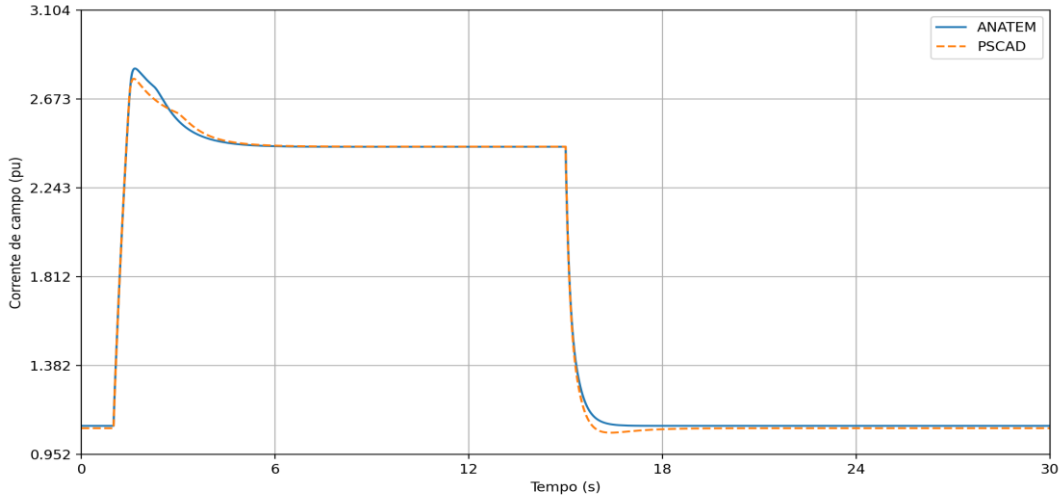

Figura 4-1091 – Corrente de campo

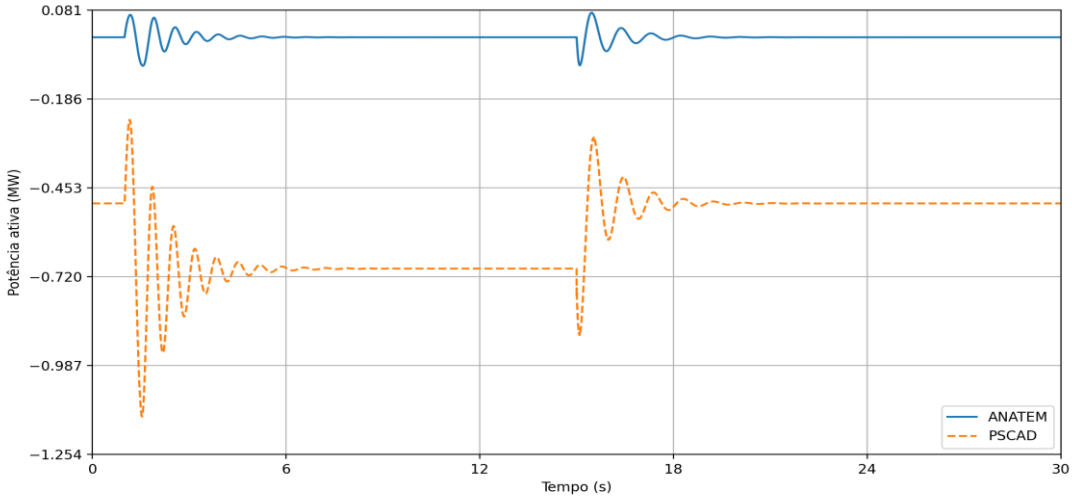

Figura 4-1092 – Potência ativa

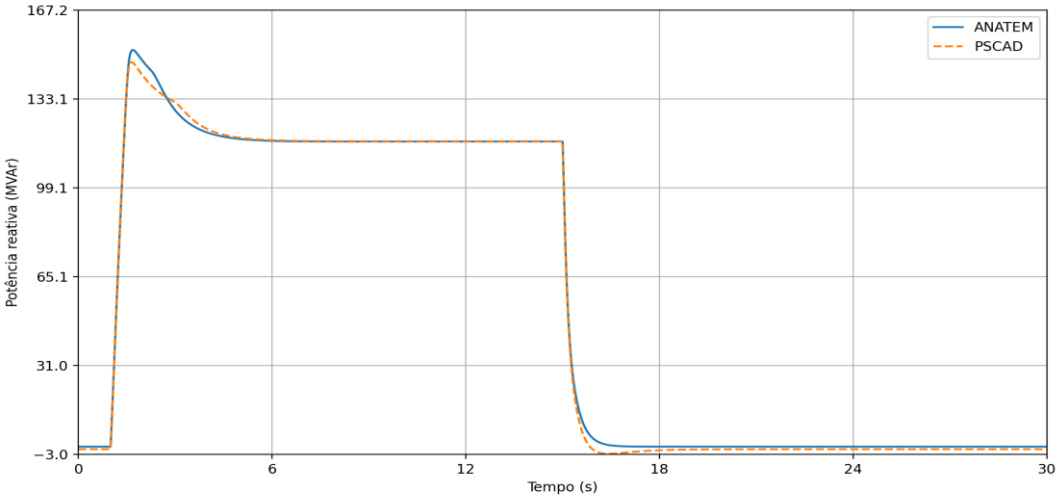

Figura 4-1093 – Potência reativa

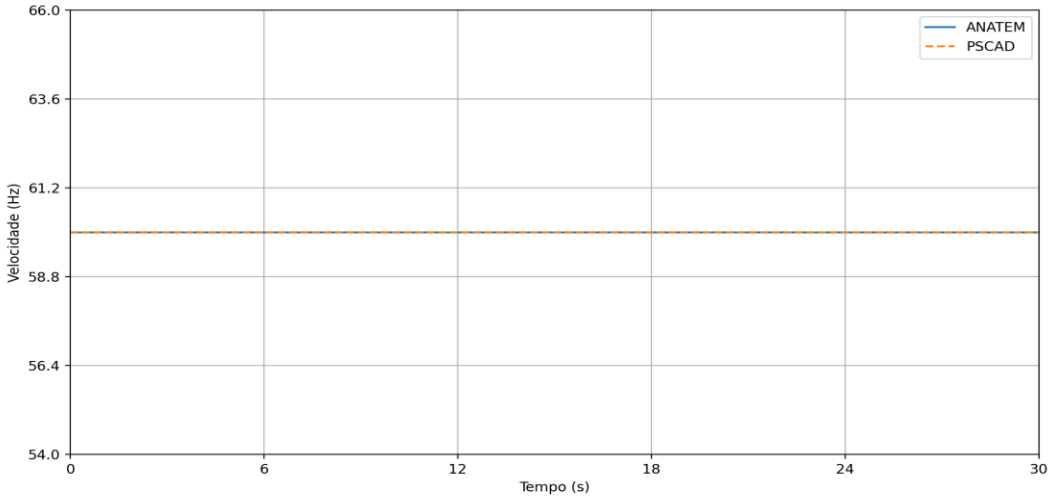

Figura 4-1094 – Velocidade da máquina

4.43 CS GRAÇA ARANHA

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Graça Aranha, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.43.1 Modelo do CS Graça Aranha

A Tabela 4-127 apresenta os parâmetros do CS Graça Aranha disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-127 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	111	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	93	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	25	I(KA)	12,551	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	22	H(s)	2,2	
xl(%)	12	D(pu)	0,1	
T'd(s)	6	Ra(pu)	0,002	
		xp(pu)	0,12	Reatância de Potier
T''d(s)	0,25	xd(pu)	1,11	
T''q(s)	0,41	xd_(pu)	0,25	x'd
Ra(%)	0,18	Td0_(s)	6	T'd
H(s)	2,2	xd__(pu)	0,22	x''d
D(pu)	0,1	Td0__(s)	0,25	T''d
S(MVA)	300	Xq(pu)	0,93	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,22	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,41	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.43.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-128, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Graça Aranha estão apresentados na Tabela

4-129. A partir dos parâmetros da Tabela 4-128, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-129. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-1095.

Tabela 4-128 – Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Graça Aranha	
Ag	**Y1**	0,0172
Bg	**Y2**	6,0267
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-129 – Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,817	0,800
0,992	0,950
1,024	0,975
1,057	1,000
1,103	1,033
1,153	1,067
1,205	1,100
1,392	1,200
1,65	1,300

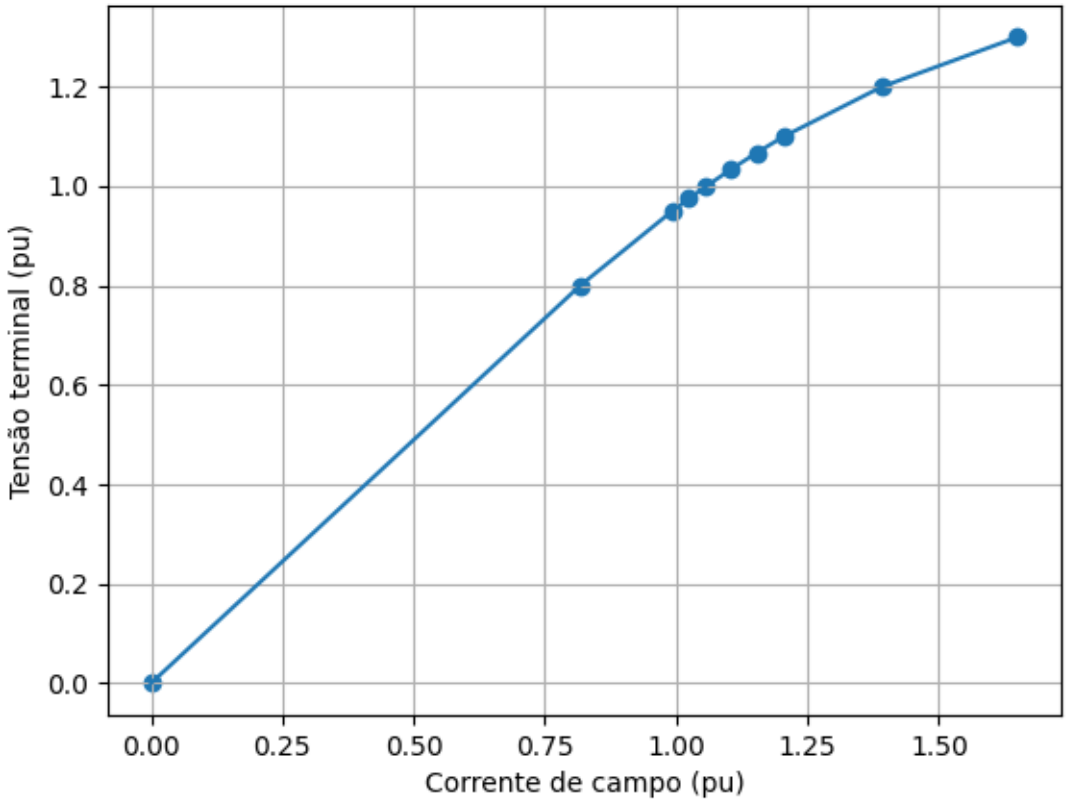

Figura 4-1095 – Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.43.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.43.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.43.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.43.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

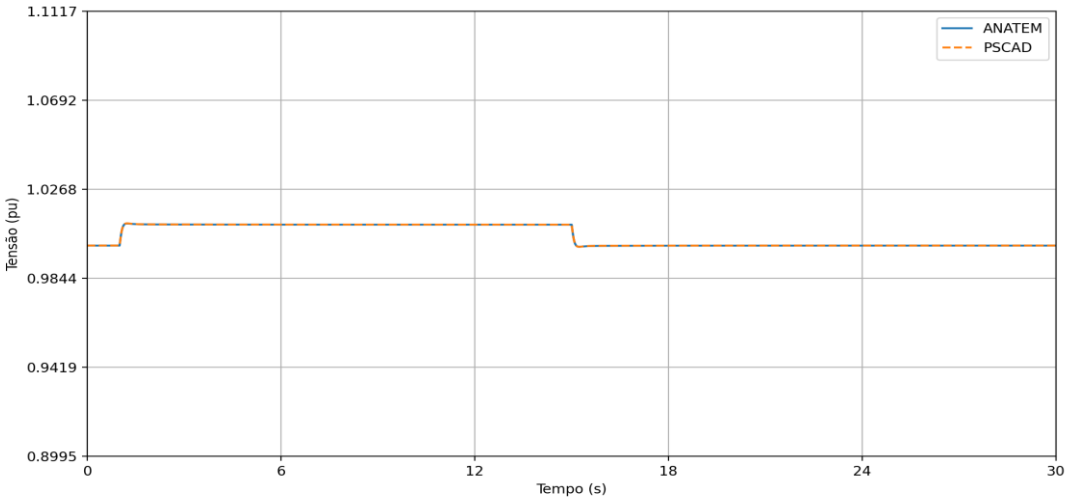

Figura 4-1096 – Tensão terminal

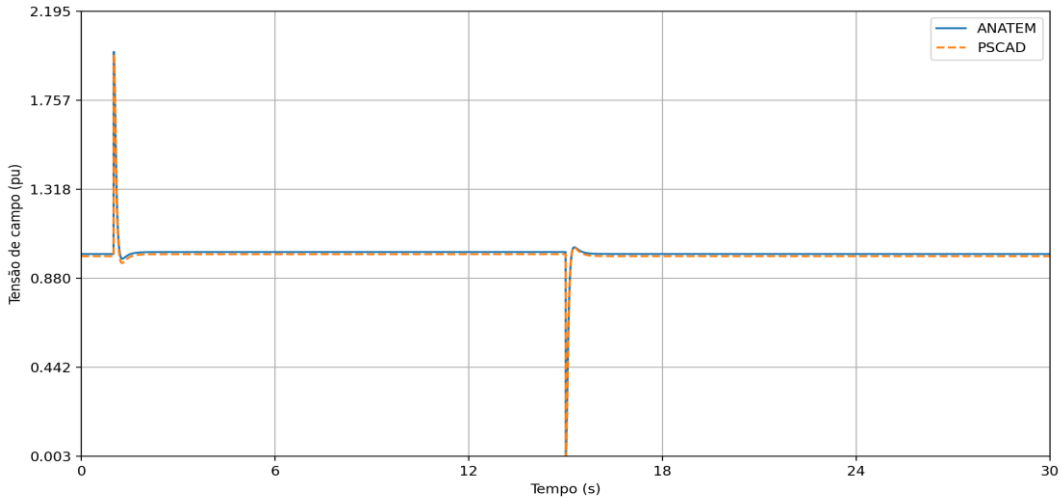

Figura 4-1097 – Tensão de campo

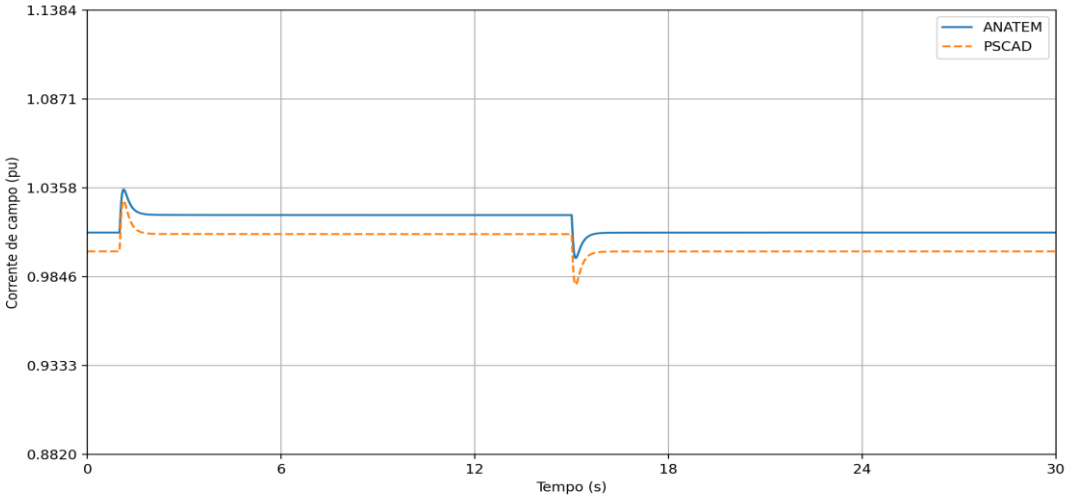

Figura 4-1098 – Corrente de campo

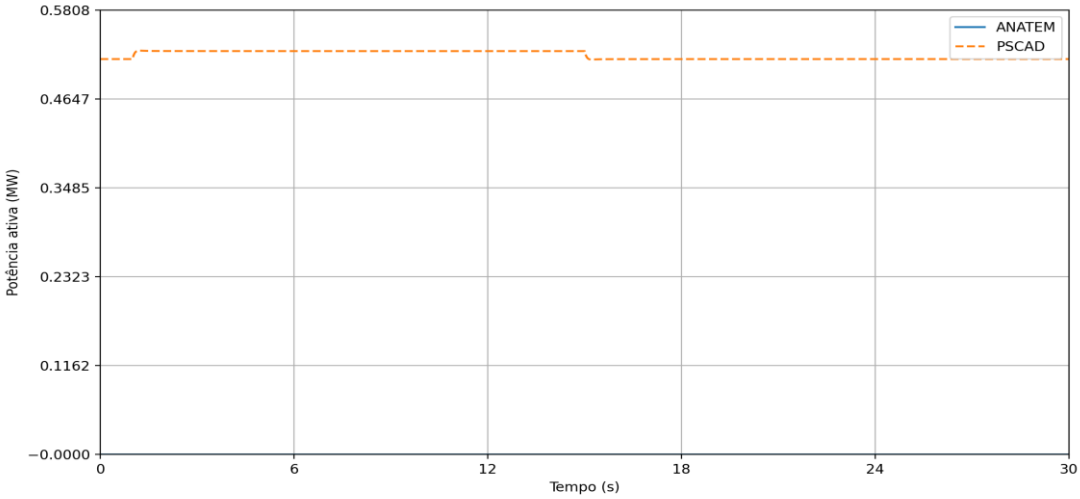

Figura 4-1099 – Potência ativa

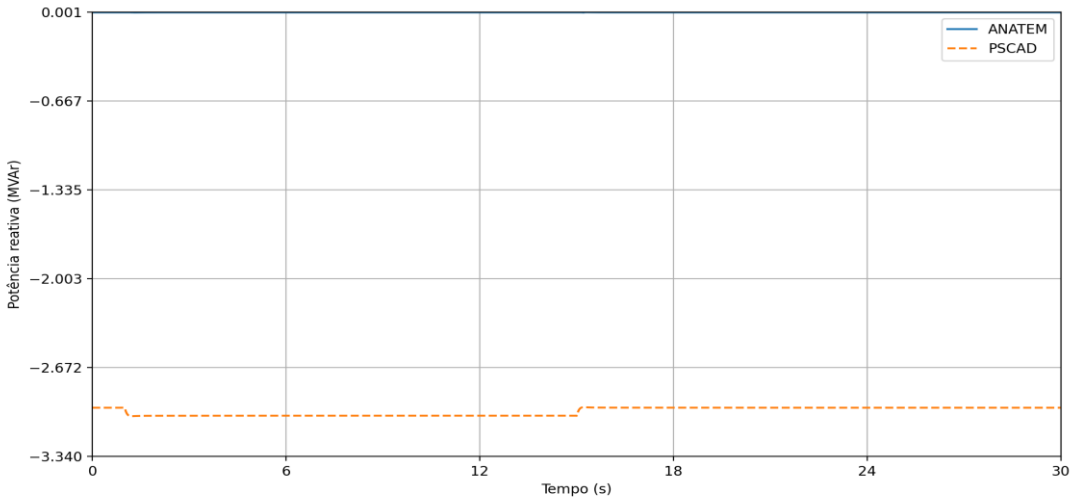

Figura 4-1100 – Potência reativa

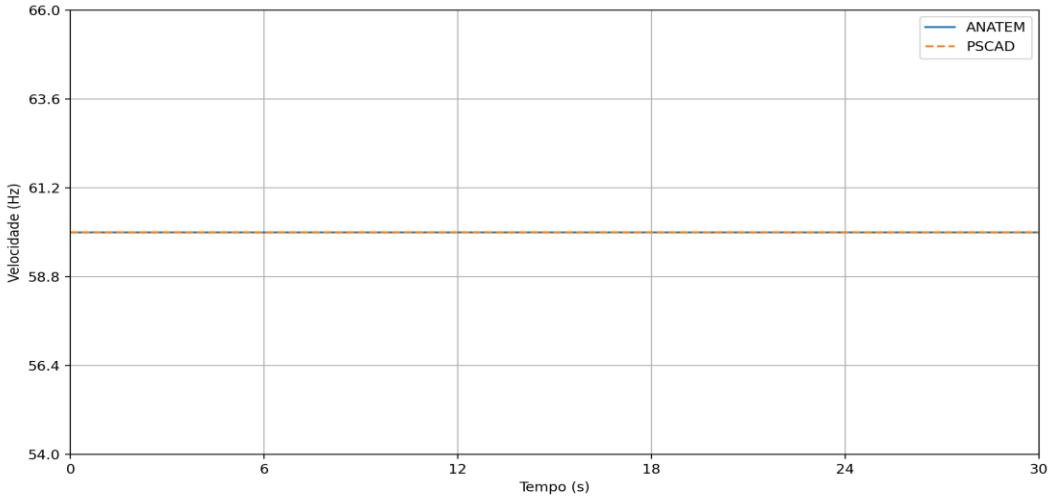

Figura 4-1101 – Velocidade da máquina

4.43.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

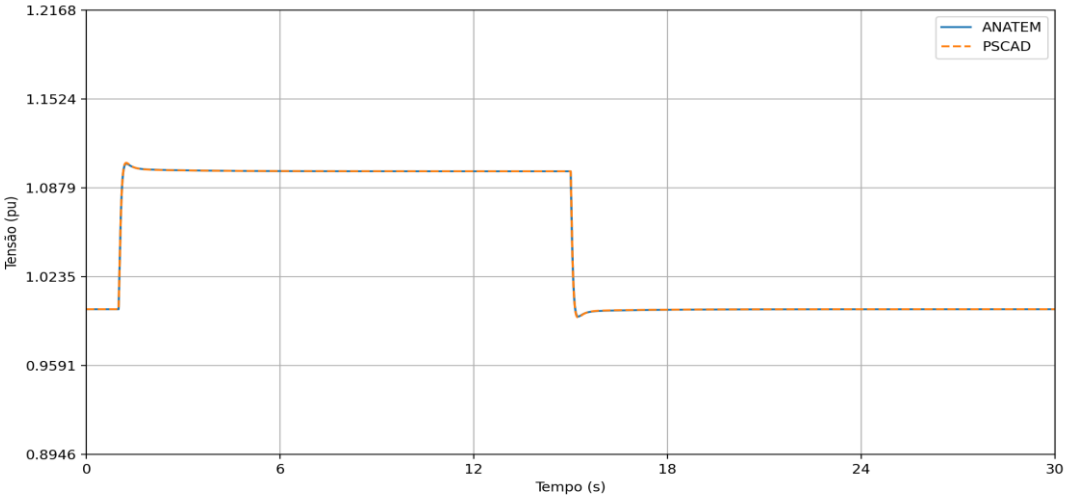

Figura 4-1102 – Tensão terminal

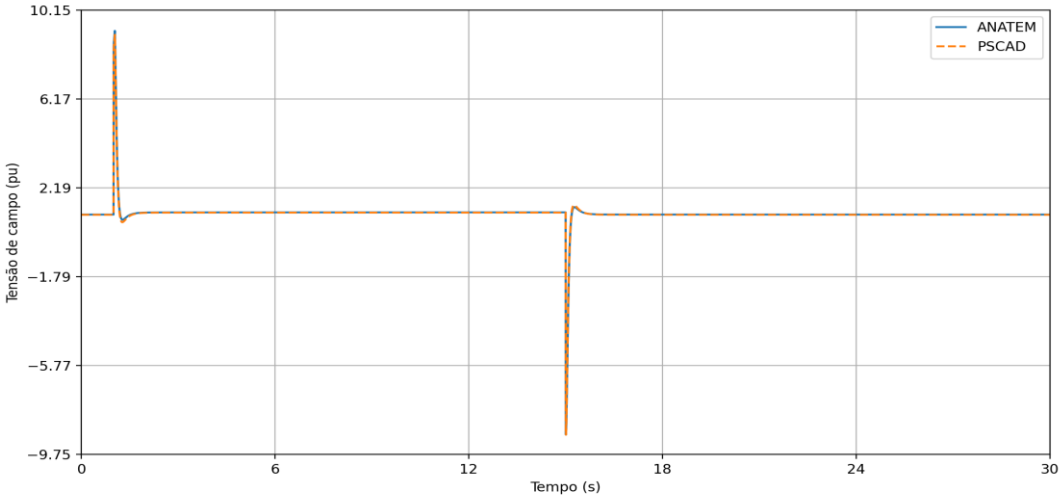

Figura 4-1103 – Tensão de campo

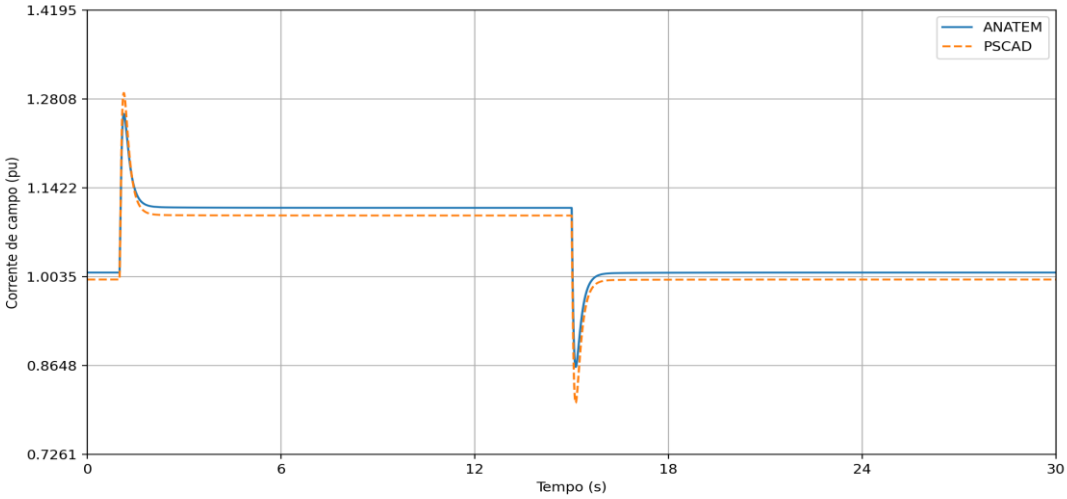

Figura 4-1104 – Corrente de campo

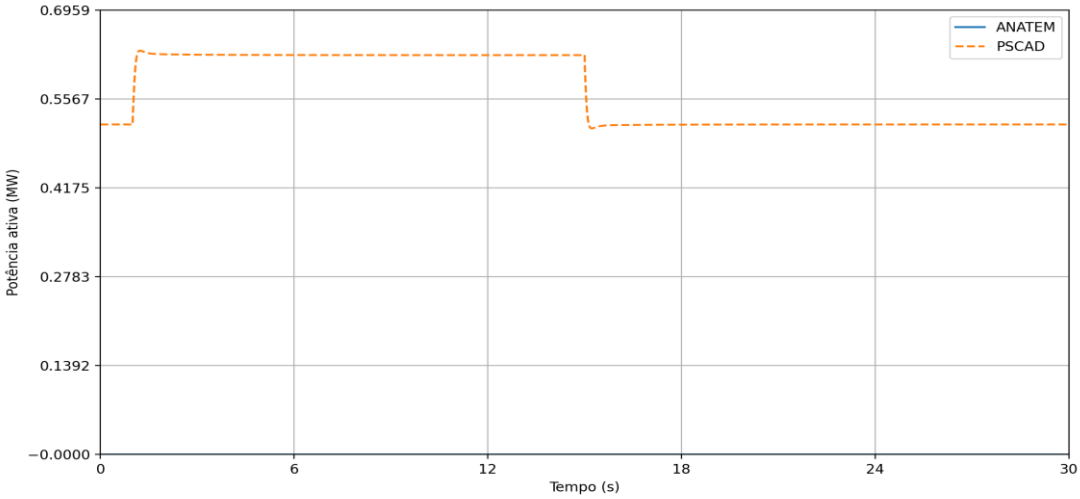

Figura 4-1105 – Potência ativa

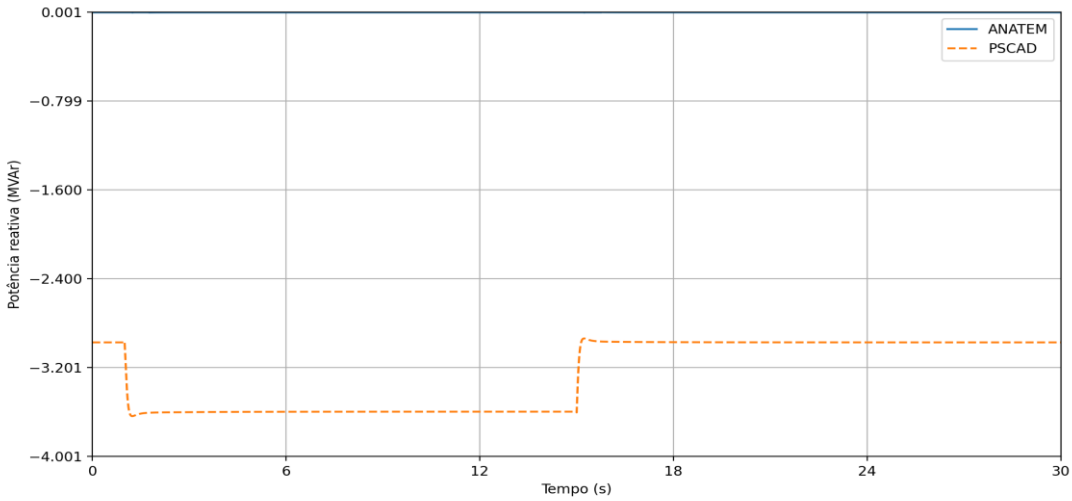

Figura 4-1106 – Potência reativa

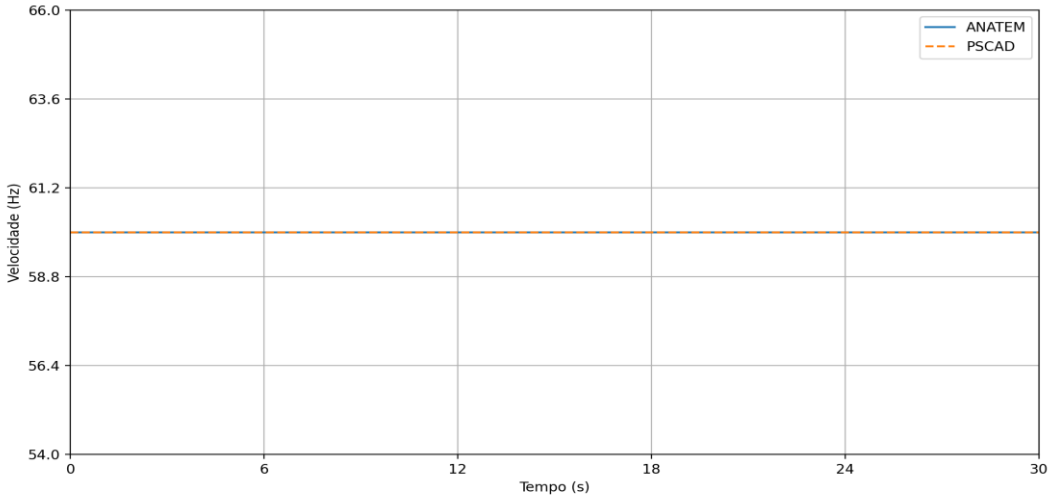

Figura 4-1107 – Velocidade da máquina

4.43.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.43.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.43.4.2.

4.43.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

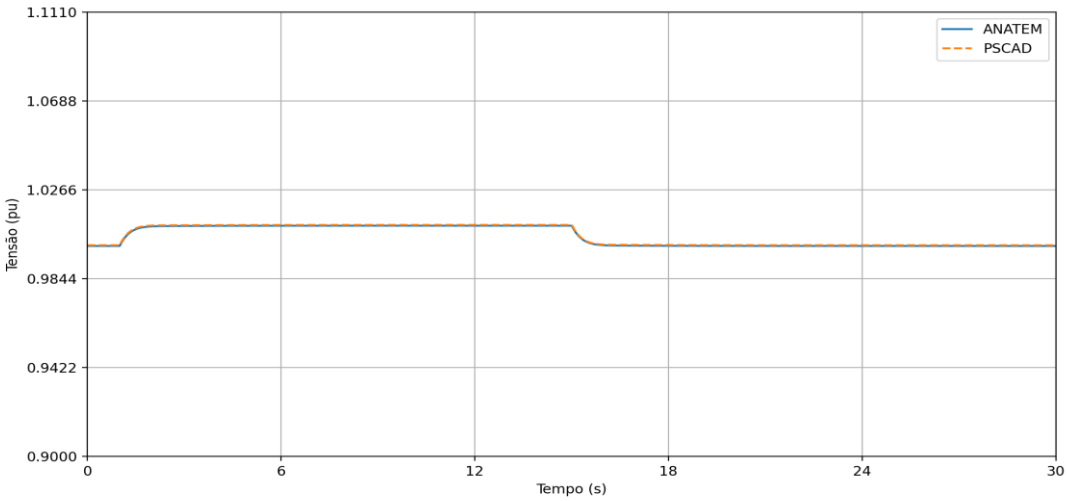

Figura 4-1108 – Tensão terminal

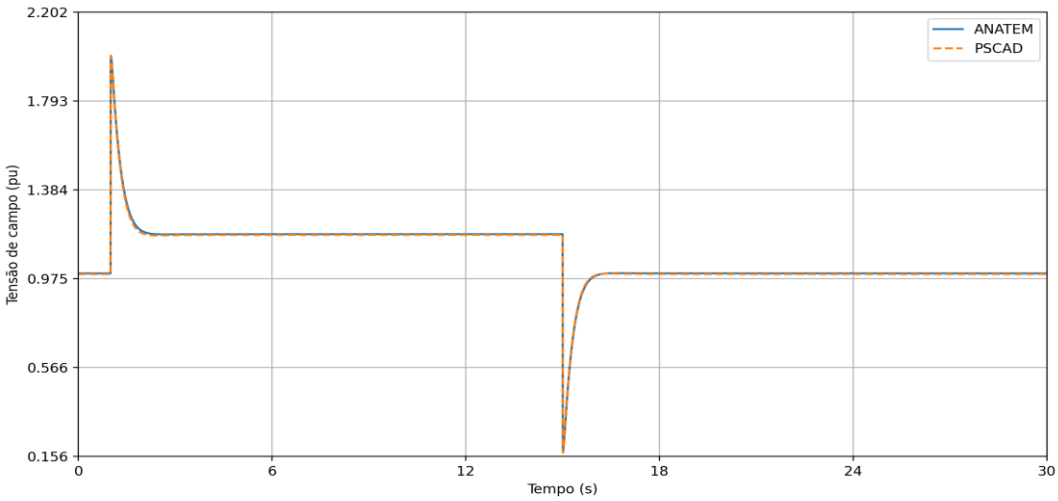

Figura 4-1109 – Tensão de campo

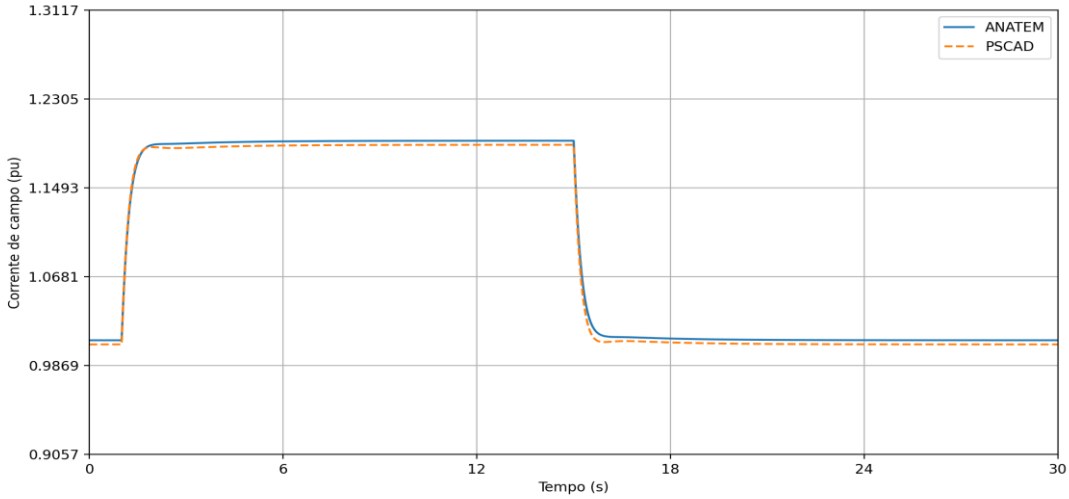

Figura 4-1110 – Corrente de campo

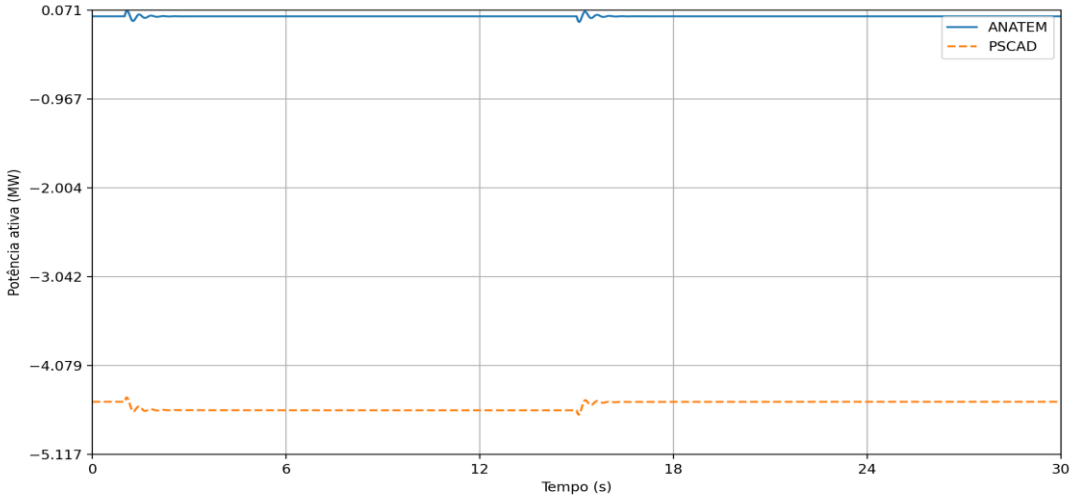

Figura 4-1111 – Potência ativa

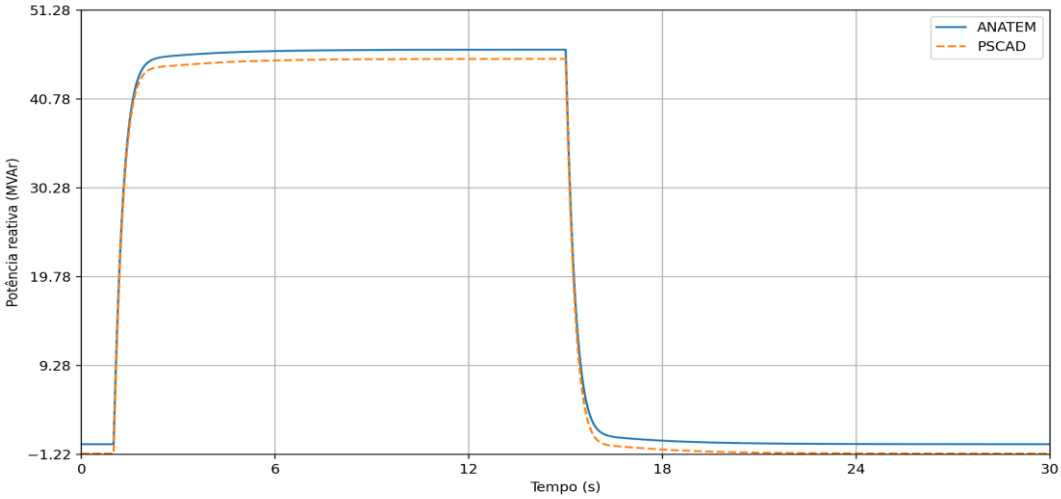

Figura 4-1112 – Potência reativa

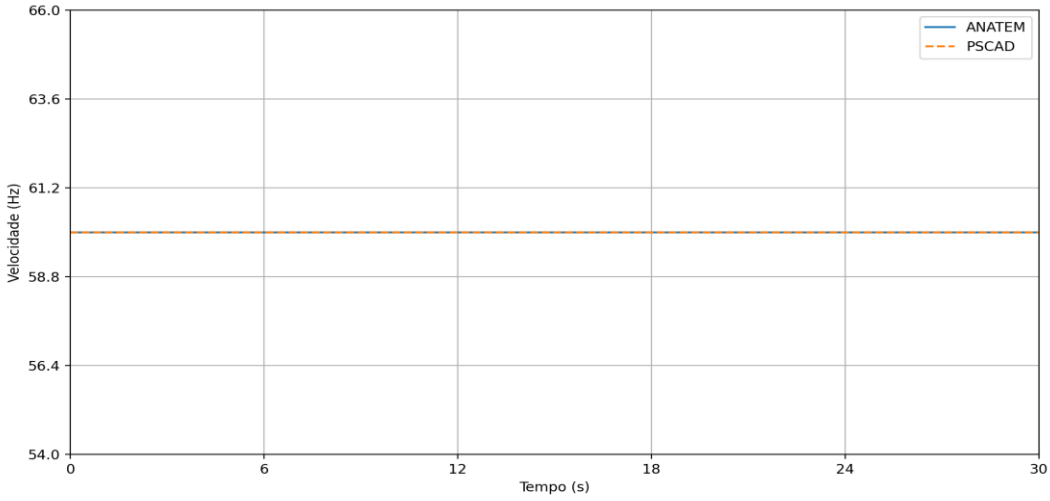

Figura 4-1113 – Velocidade da máquina

4.43.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

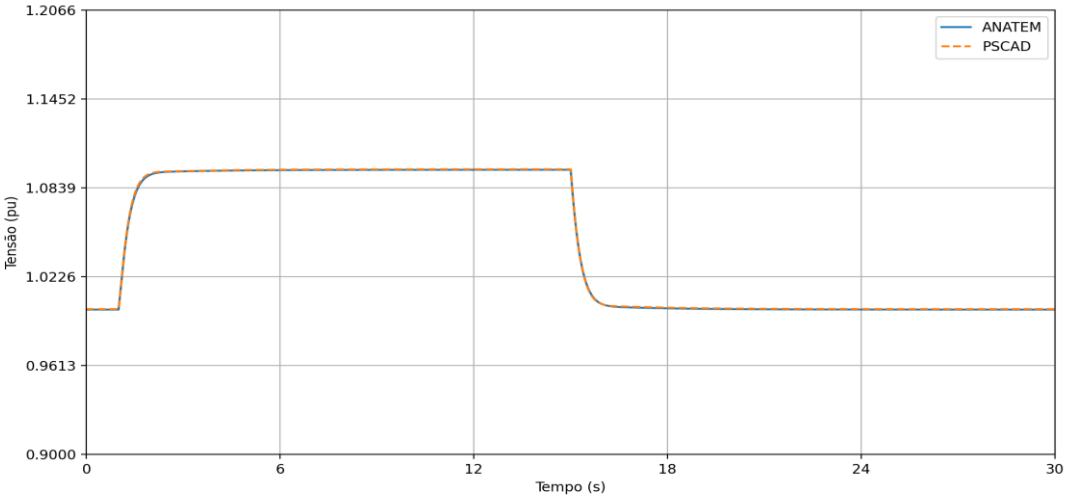

Figura 4-1114 – Tensão terminal

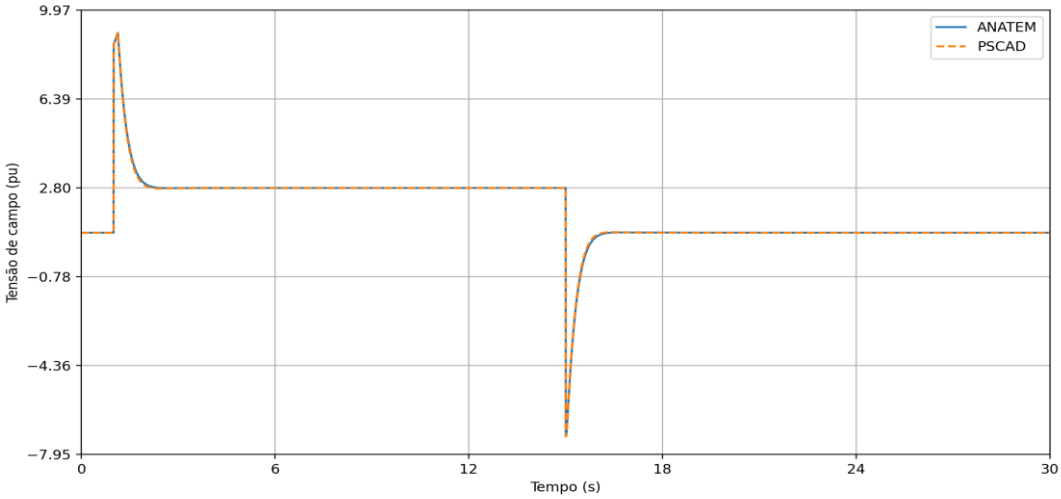

Figura 4-1115 – Tensão de campo

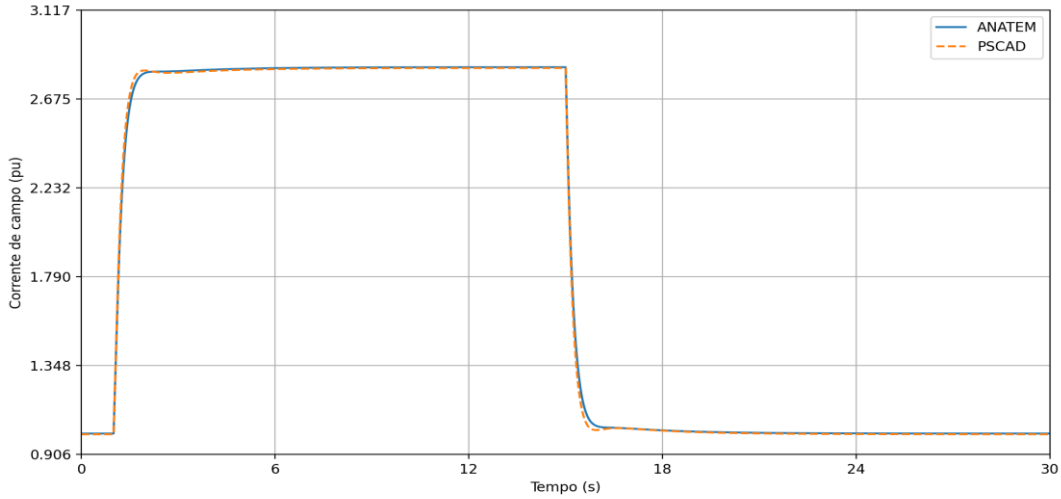

Figura 4-1116 – Corrente de campo

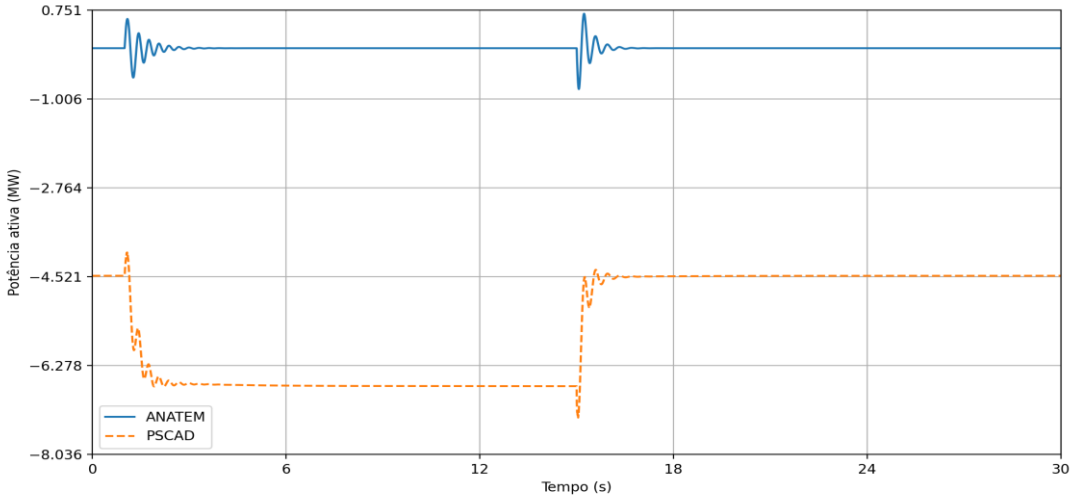

Figura 4-1117 – Potência ativa

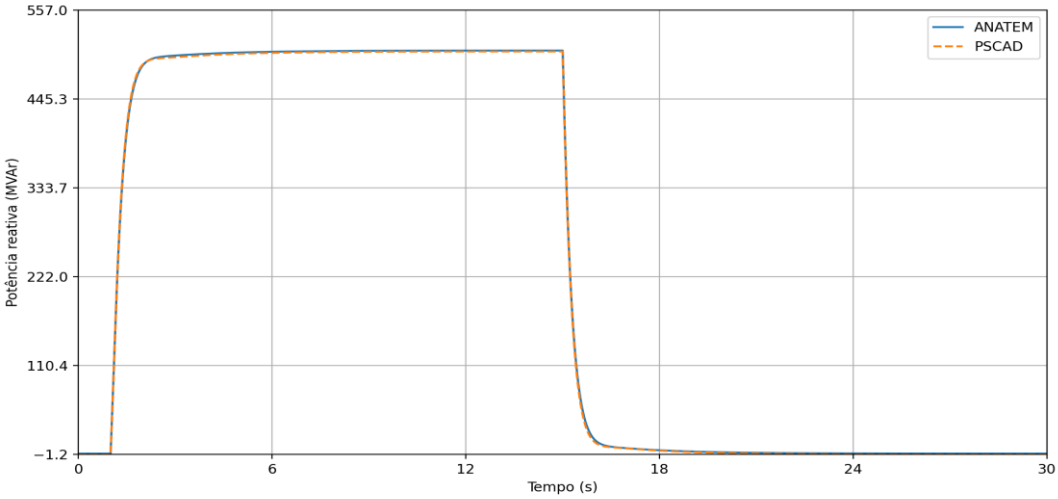

Figura 4-1118 – Potência reativa

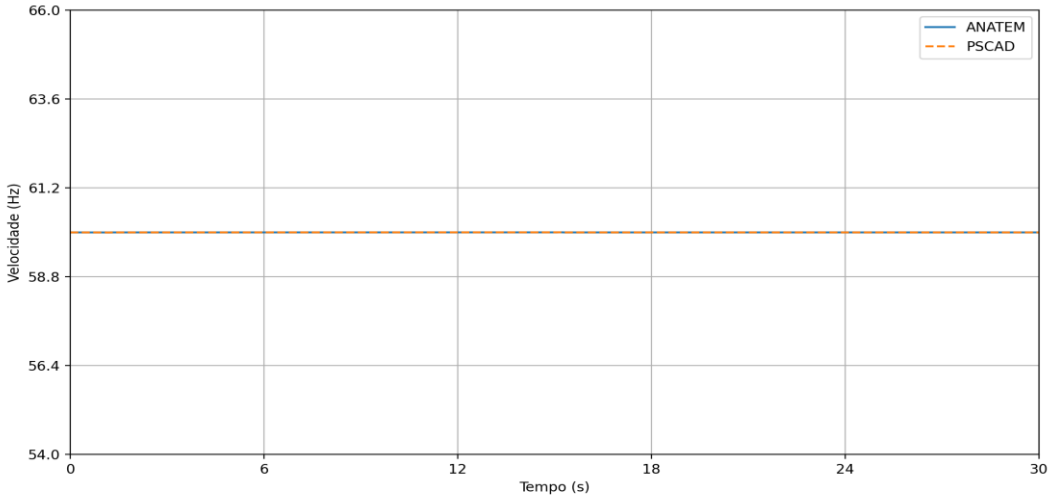

Figura 4-1119 – Velocidade da máquina

4.44 CS SILVANIA

Esta seção apresenta a validação dos modelos de máquina e controladores do CS Silvania, representados nos equivalentes de rede em PSCAD.

Para esta usina, foram traduzidos para PSCAD, os modelos de máquina e reguladores de tensão, disponíveis na base de dados de estabilidade transitória da EPE [1].

4.44.1 Modelo do CS Silvania

A Tabela 4-130 apresenta os parâmetros do CS Silvania disponível na base de dados da EPE junto a sua conversão para inserção no PSCAD.

Tabela 4-130 – Parâmetros da máquina síncrona

ANATEM		PSCAD		
Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**	**Observação**
xd(%)	111	Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
xq(%)	93	V_{fase}(KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
x'd(%)	25	I(KA)	12,551	
		OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
x''d(%)	22	H(s)	2,2	
xl(%)	12	D(pu)	0,1	
T'd(s)	6	Ra(pu)	0,002	
		xp(pu)	0,12	Reatância de Potier
T''d(s)	0,25	xd(pu)	1,11	
T''q(s)	0,41	xd_(pu)	0,25	x'd
Ra(%)	0,18	Td0_(s)	6	T'd
H(s)	2,2	xd__(pu)	0,22	x''d
D(pu)	0,1	Td0__(s)	0,25	T''d
S(MVA)	300	Xq(pu)	0,93	
V_{linha}(KV)	13,8			
		xq__(pu)	0,22	x''q = x''d
		Tq0__(s)	0,41	T''q
		AGFC	1	Fator de entreferro

4.44.2 Curva de saturação

A curva de saturação do PSCAD foi calculada a partir dos parâmetros A, B e C, apresentados na Tabela 4-131, da curva de saturação do ANATEM. O modelo da curva está apresentado na Figura 3-3 e os parâmetros da curva de saturação do CS Silvania estão apresentados na Tabela 4-132. A

partir dos parâmetros da Tabela 4-131, calcula-se os dados a serem introduzidos no PSCAD, apresentados na Tabela 4-132. A plotagem do gráfico está apresentada na Figura 4-1120.

Tabela 4-131 - Parâmetros da curva de saturação

Dados	CS Silvania	
Ag	**Y1**	0,0172
Bg	**Y2**	6,0267
Cg	**X1**	0,8

Tabela 4-132 - Parâmetros da curva de saturação a ser inserida no PSCAD

IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,817	0,800
0,992	0,950
1,024	0,975
1,057	1,000
1,103	1,033
1,153	1,067
1,205	1,100
1,392	1,200
1,65	1,300

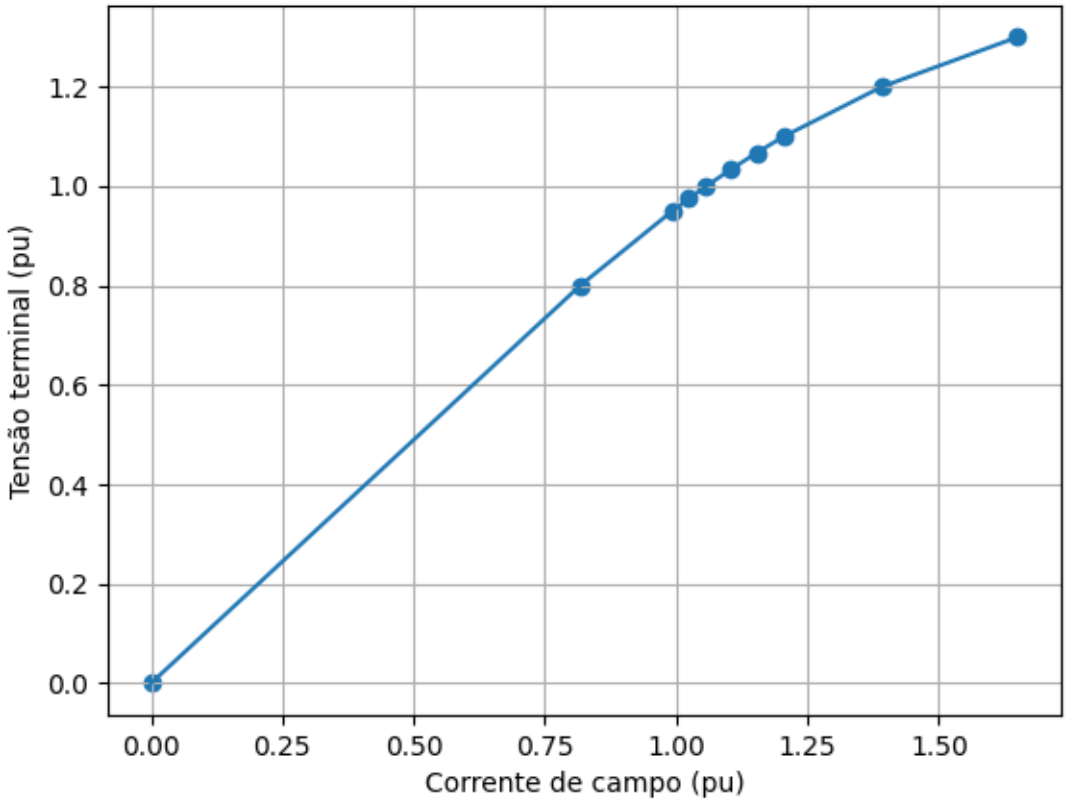

Figura 4-1120 - Plotagem da curva de saturação

Cabe ressaltar que estes parâmetros são para a máquina em vazio. Como os modelos de saturação do PSCAD e ANATEM são diferentes haverá diferenças na operação com carga.

4.44.3 Máquina em Vazio

A simulação da máquina em vazio é utilizada para validar o regulador de tensão, nesta simulação é aplicado um degrau na referência do regulador de tensão. Foram aplicados dois degraus um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.44.3.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.44.3.2. Foi utilizado o sistema da Figura 3-1 com a tensão terminal de 1,0 pu.

Ressalta-se que estas simulações foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

4.44.3.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

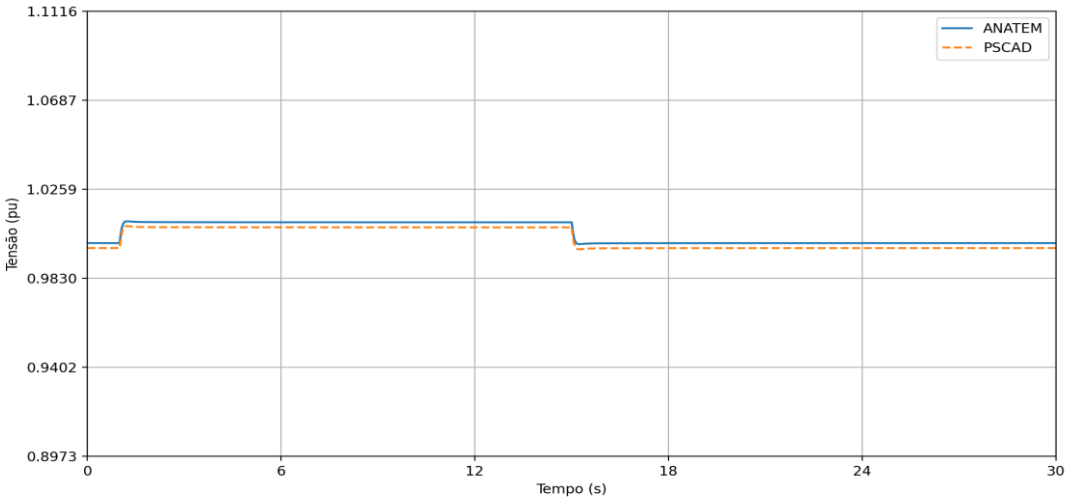

Figura 4-1121 - Tensão terminal

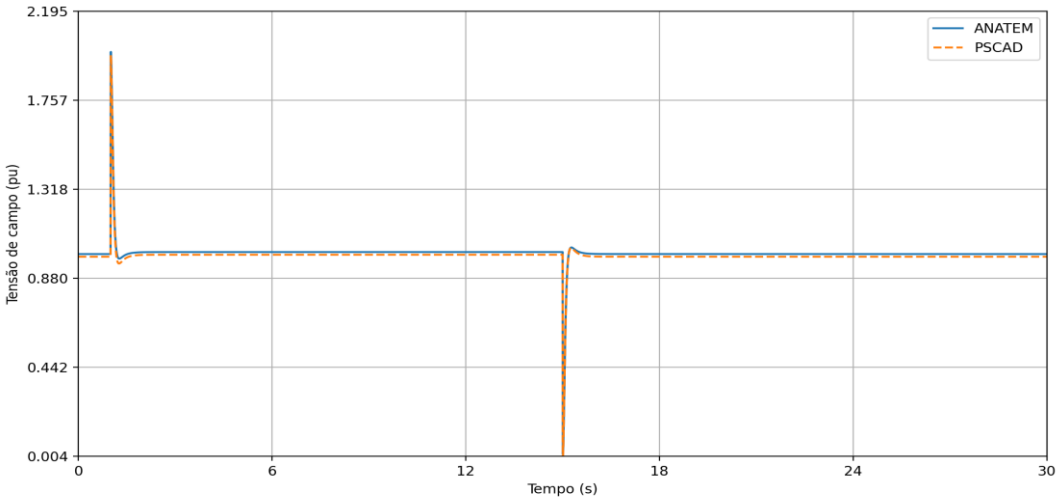

Figura 4-1122 - Tensão de campo

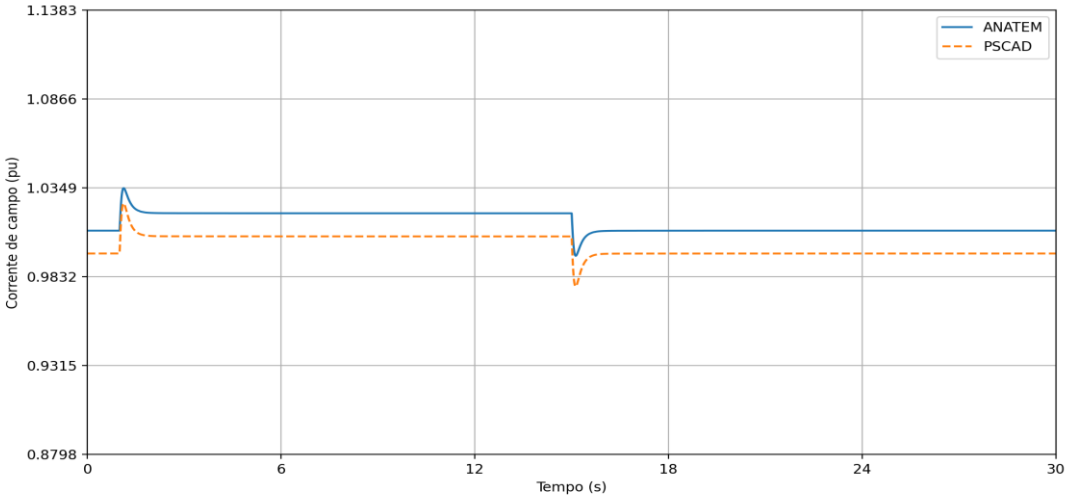

Figura 4-1123 - Corrente de campo

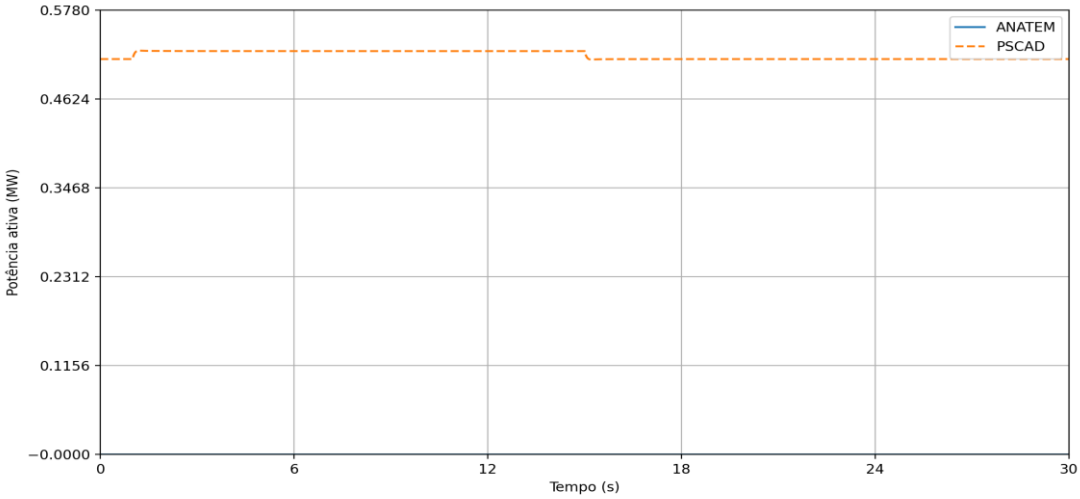

Figura 4-1124 - Potência ativa

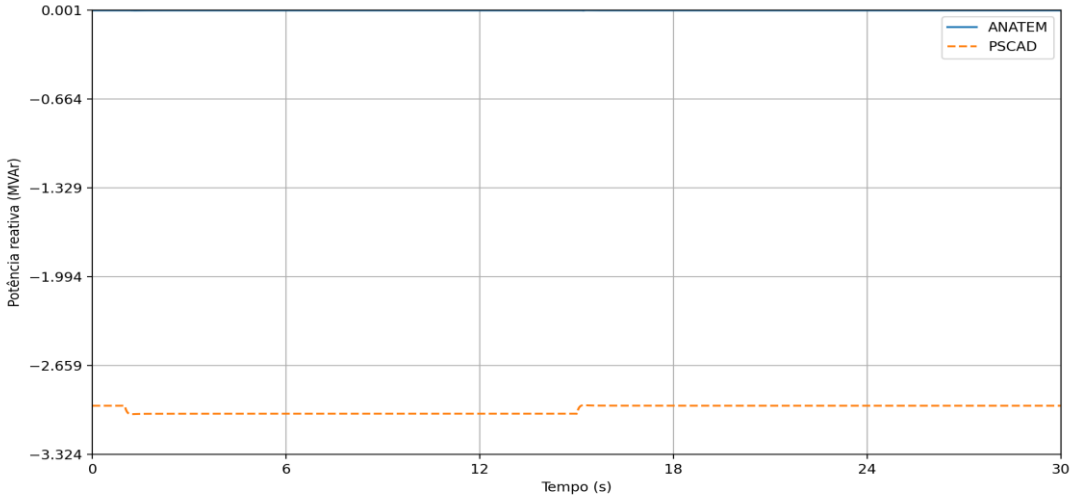

Figura 4-1125 - Potência reativa

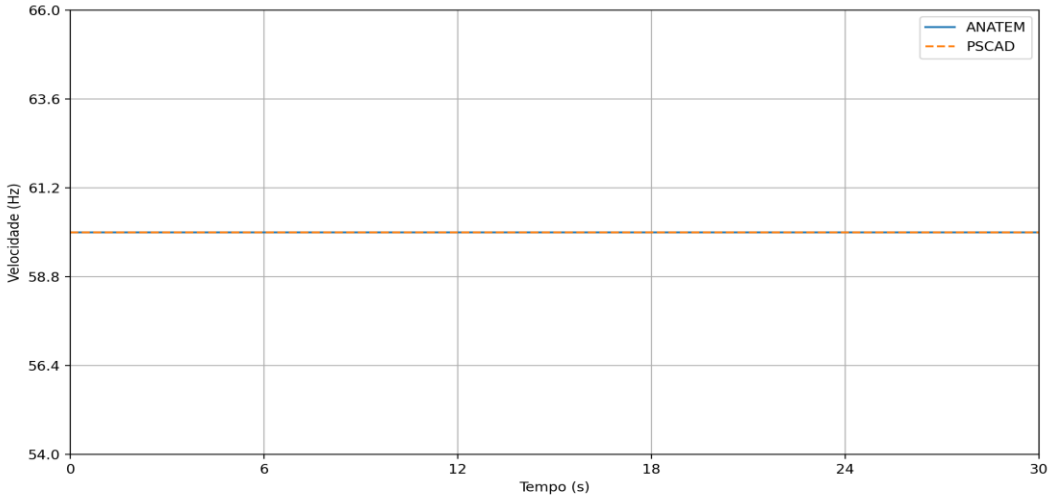

Figura 4-1126 - Velocidade da máquina

4.44.3.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

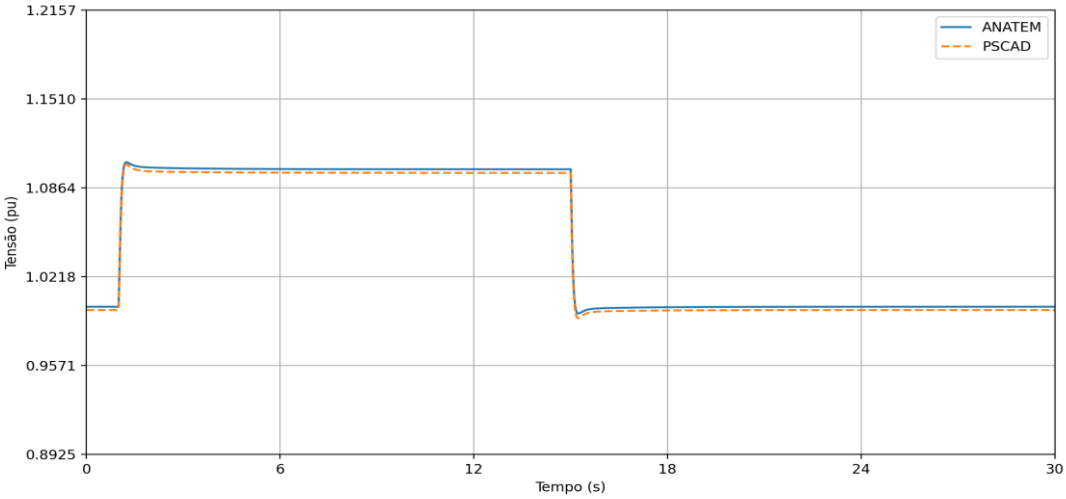

Figura 4-1127 - Tensão terminal

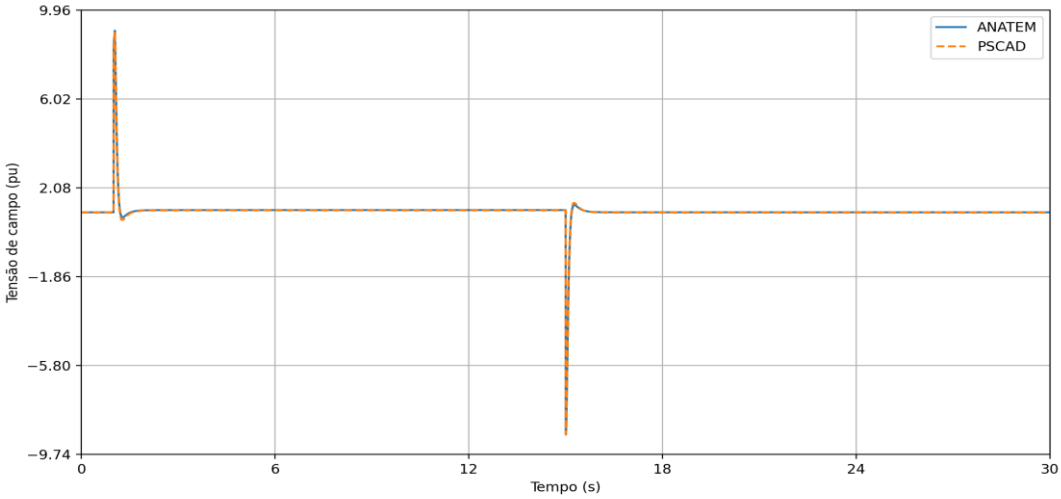

Figura 4-1128 - Tensão de campo

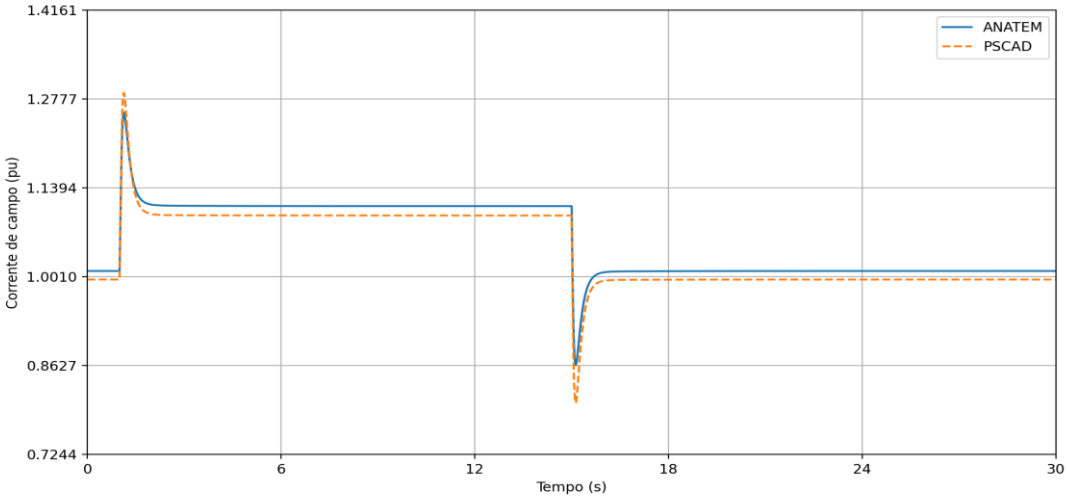

Figura 4-1129 - Corrente de campo

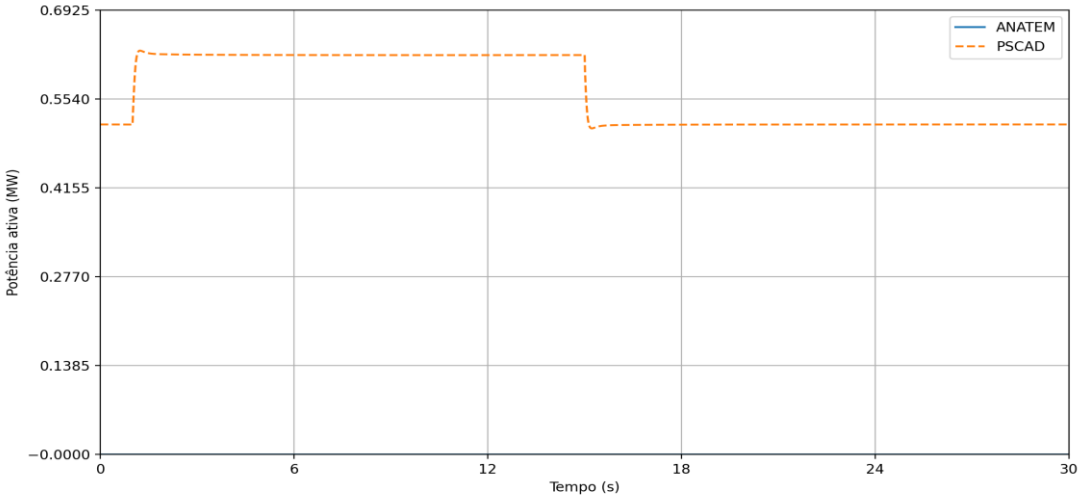

Figura 4-1130 - Potência ativa

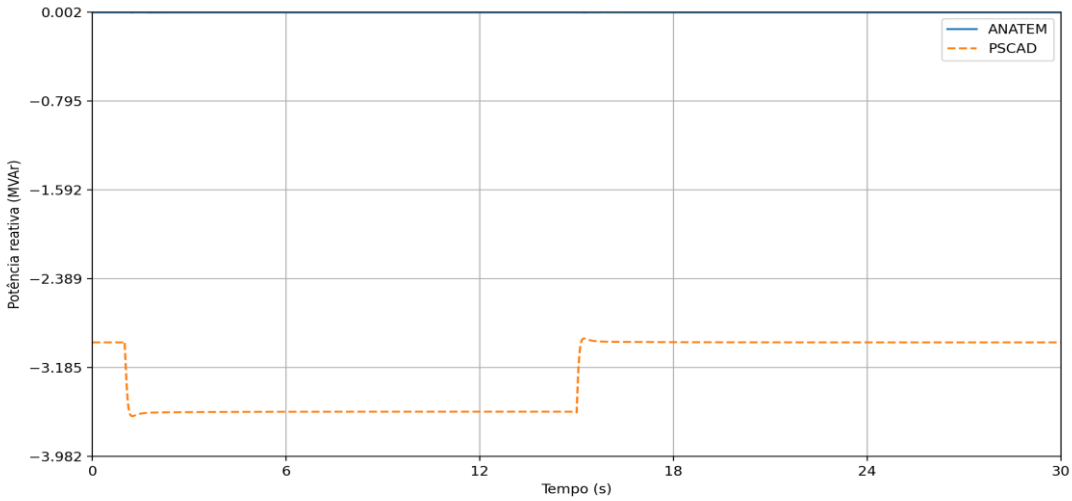

Figura 4-1131 - Potência reativa

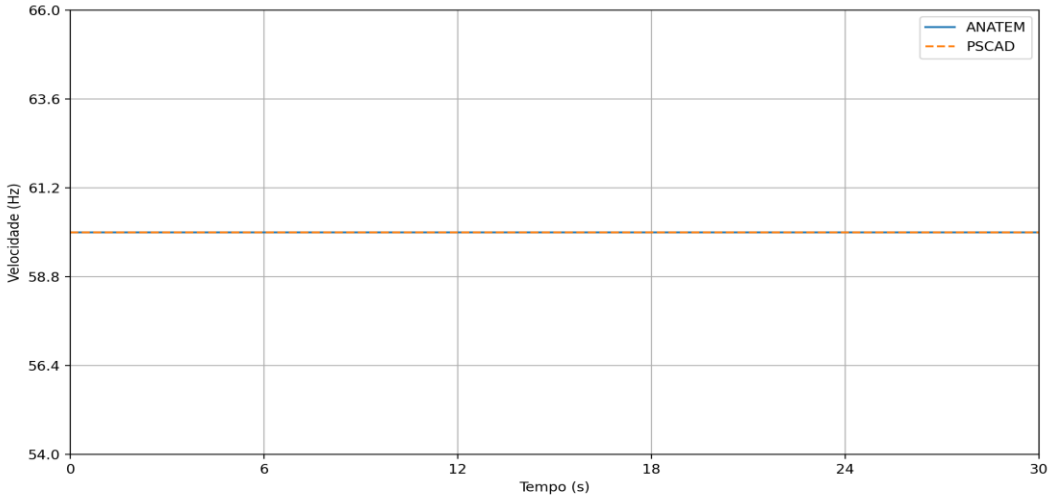

Figura 4-1132 - Velocidade da máquina

4.44.4 Sistema Máquina e Barra infinita

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com a máquina conectada à uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 3-2.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica da máquina e do regulador de tensão quando a máquina está ligada ao sistema. Ressalta-se que todas as simulações realizadas neste item foram realizadas sem o modelo da curva de saturação em ambos os programas.

Foram aplicados dois degraus na referência de tensão, um de ±1%, para avaliar a parte linear do regulador de tensão, apresentada na Seção 4.44.4.1, e outro de ±10%, para avaliar a parte não linear do regulador apresentada na Seção 4.44.4.2.

4.44.4.1 Degrau de ±1% na referência do regulador de tensão

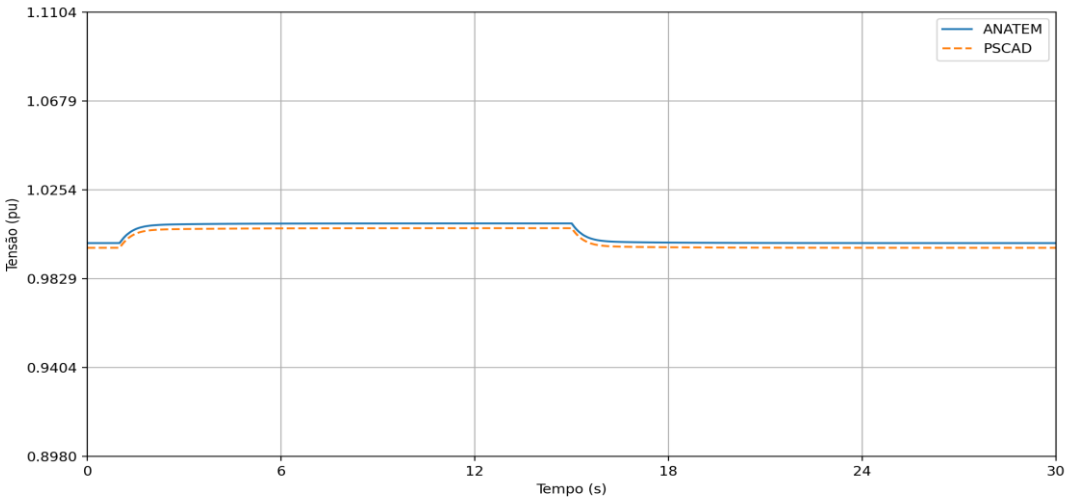

Figura 4-1133 - Tensão terminal

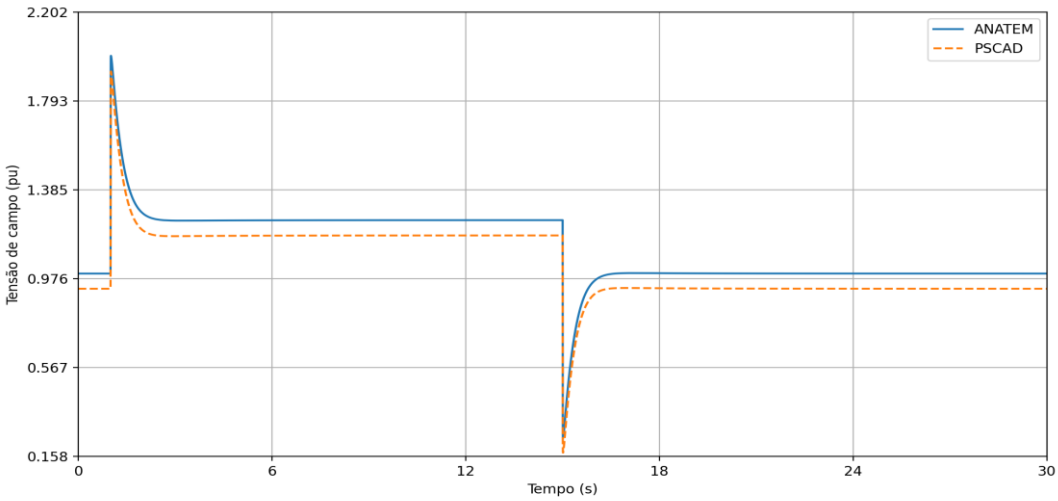

Figura 4-1134 - Tensão de campo

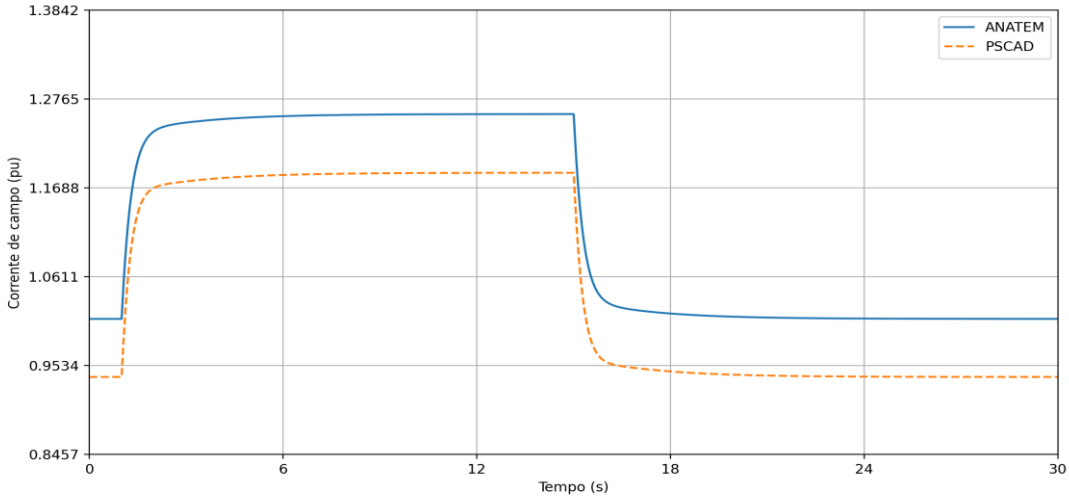

Figura 4-1135 - Corrente de campo

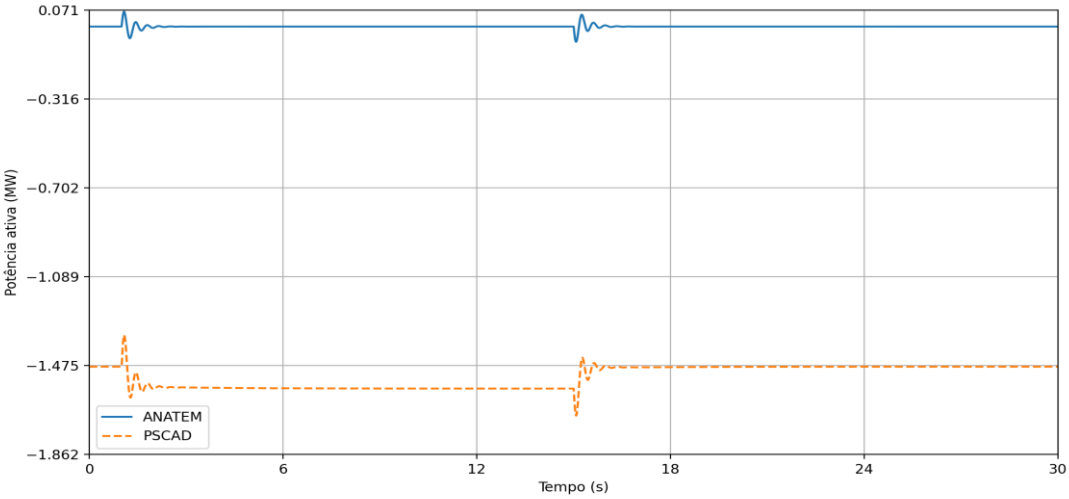

Figura 4-1136 - Potência ativa

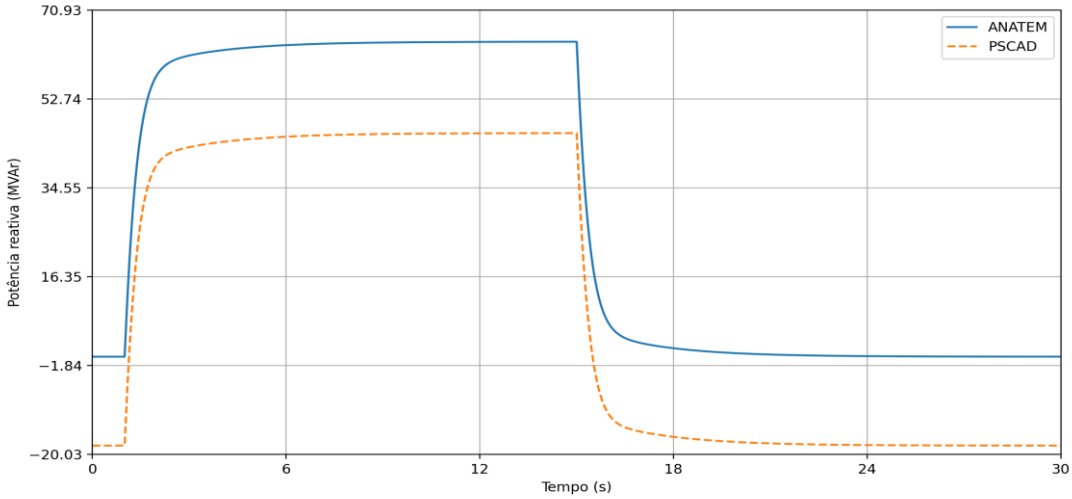

Figura 4-1137 - Potência reativa

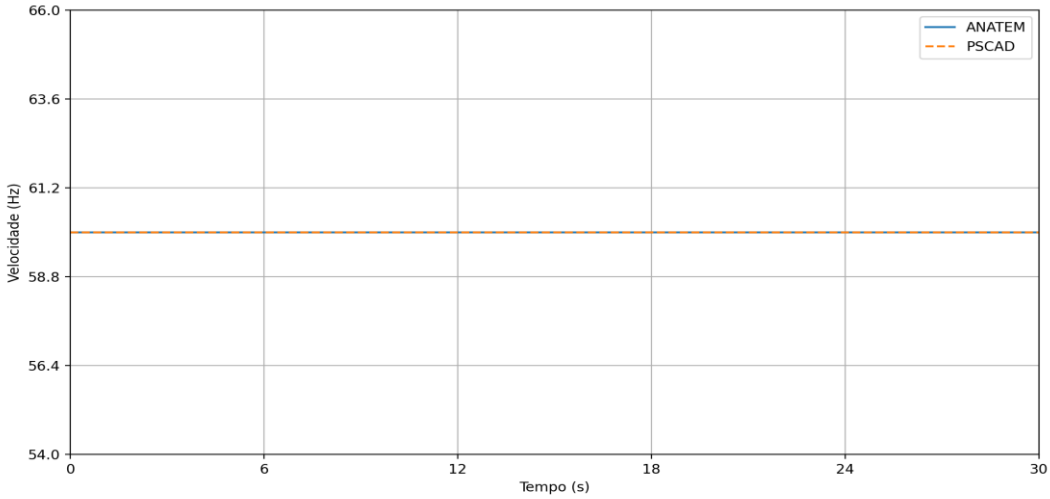

Figura 4-1138 - Velocidade da máquina

4.44.4.2 Degrau de ±10% na referência do regulador de tensão

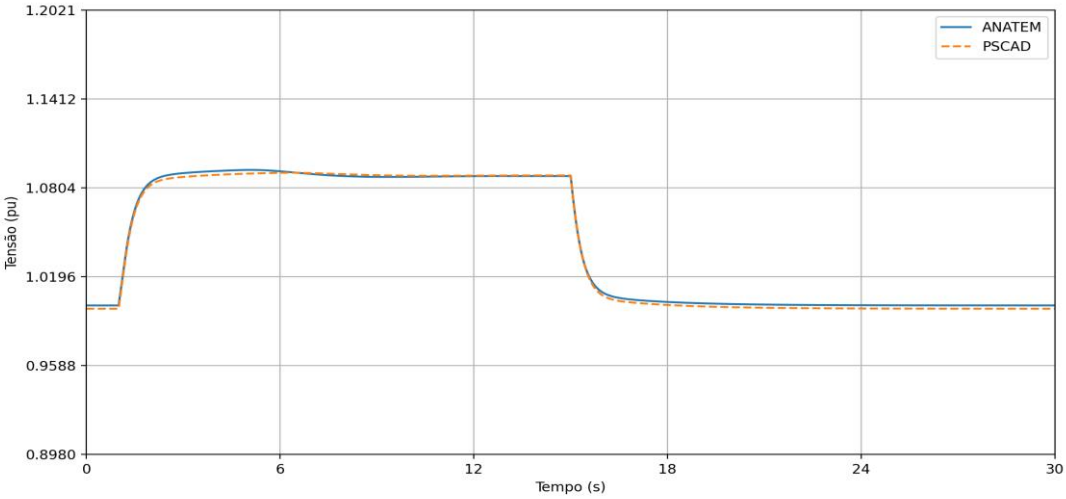

Figura 4-1139 - Tensão terminal

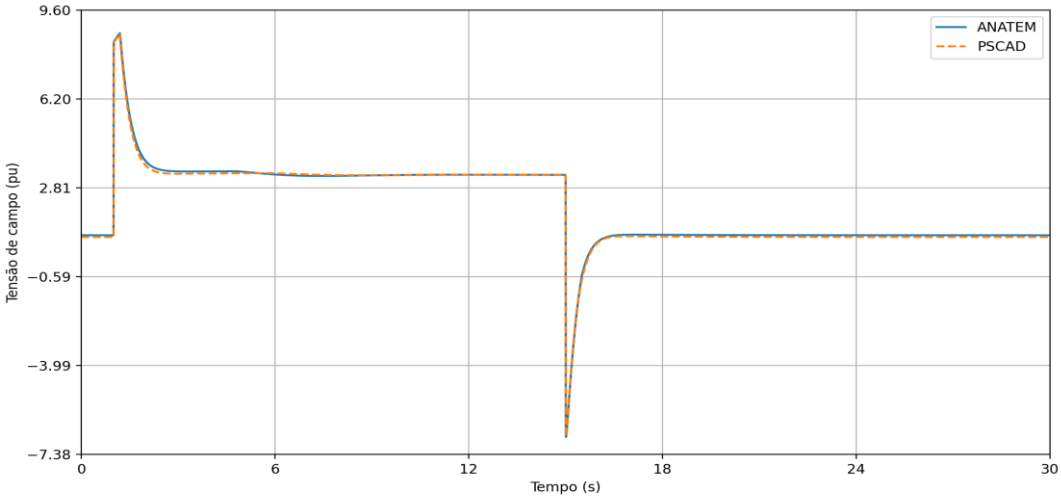

Figura 4-1140 - Tensão de campo

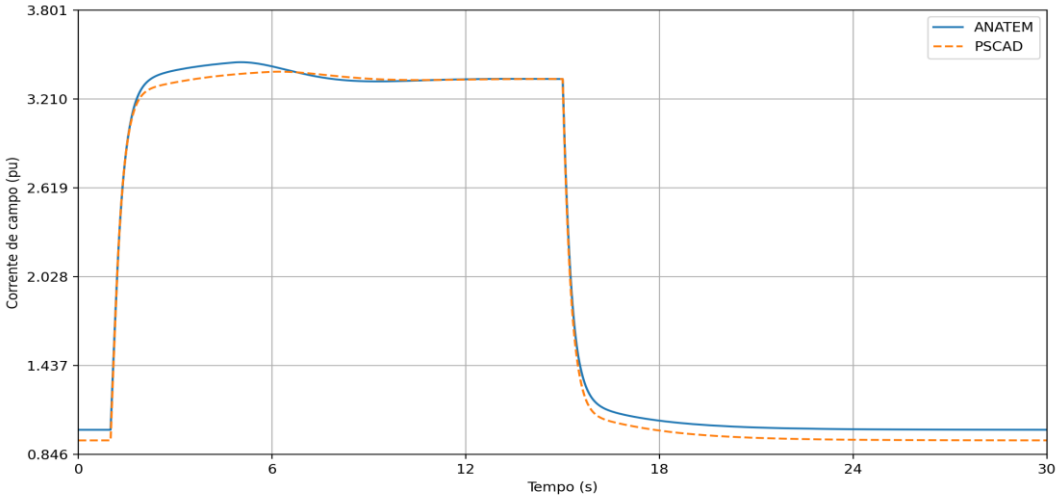

Figura 4-1141 - Corrente de campo

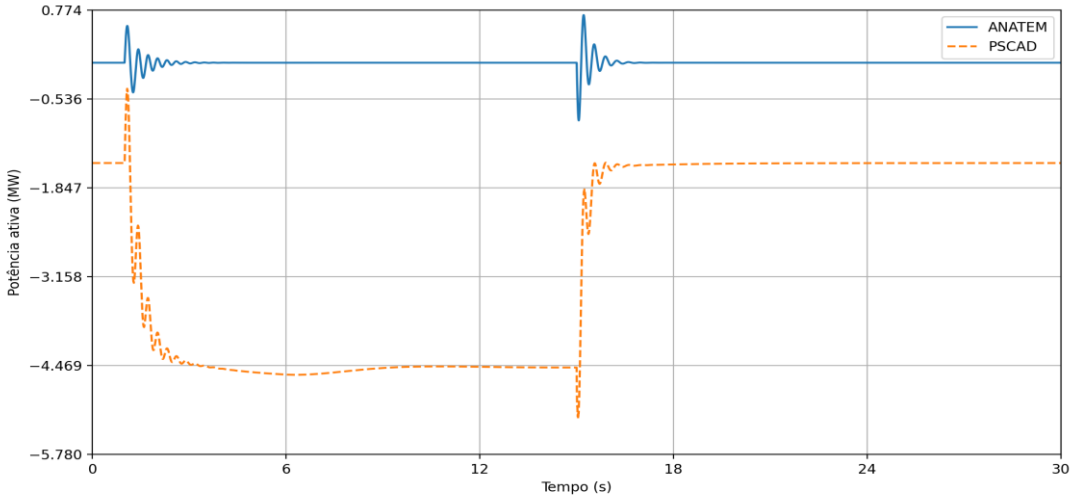

Figura 4-1142 - Potência ativa

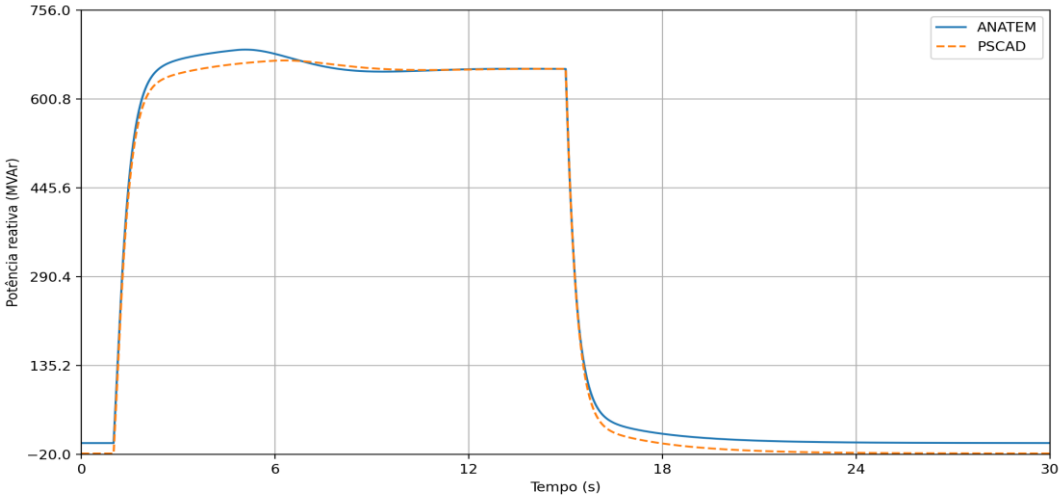

Figura 4-1143 - Potência reativa

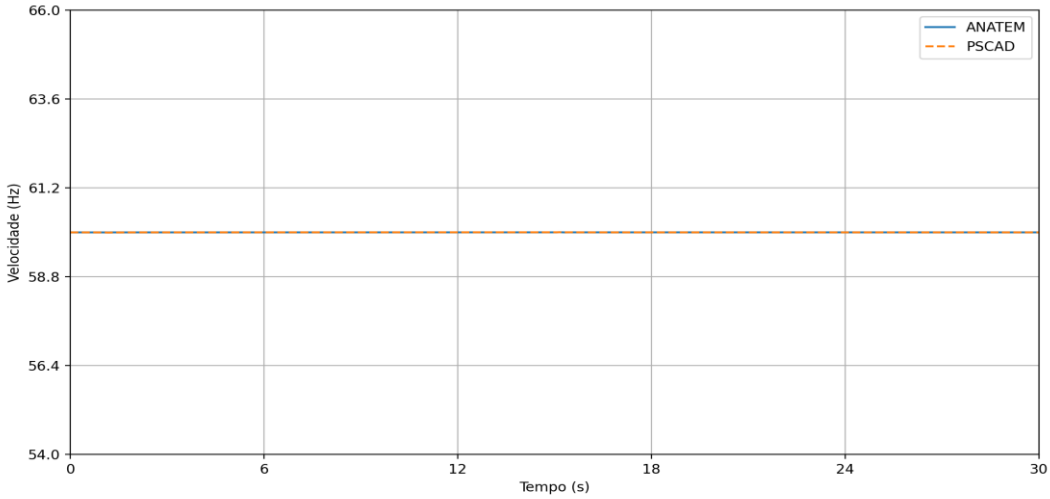

Figura 4-1144 - Velocidade da máquina

5 VALIDAÇÃO DOS COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVOS

Os compensadores estáticos de Fernão Dias e Itatiba possuem o mesmo modelo dinâmico em seus controles, possuindo apenas parâmetros diferentes, sendo assim, optou-se por apresentar os resultados de validação do CE Itatiba apenas.

5.1 SISTEMA UTILIZADO

Para validar o regulador de tensão, o sistema foi representado ligado à barra infinita por meio de uma impedância, conforme Figura 5.1. A impedância de ligação com a barra infinita é a impedância de curto-circuito, que representa o acoplamento deste compensador estático com o sistema no qual está conectado. Nesta representação é possível identificar a dinâmica do controle.

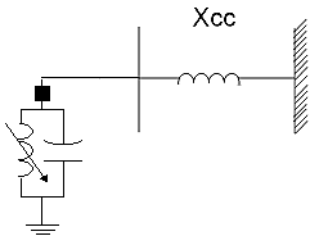

Figura 5.1 - Sistema Compensador Estático Barra Infinita

5.2 PREMISSAS UTILIZADAS

Para validar o controle do Compensador Estático foram realizadas as seguintes simulações:

- Degrau de ±2% na referência do regulador de tensão;
- Aplicação de Curto-Circuito.

As simulações listadas acima foram realizadas com o sistema definido no item 5.1.

Para avaliar o desempenho dinâmico do modelo foram disponibilizadas as seguintes grandezas:

- Tensão Média;
- Sinal de Erro;
- Sinal ICESM;
- Potência Reativa.

5.3 VALIDAÇÃO

A avaliação do desempenho dinâmico é realizada com o compensador estático conectado a uma barra infinita por meio de uma impedância de curto-circuito, como ilustra a Figura 5.1.

Nesta representação é possível identificar a dinâmica do regulador de tensão quando o compensador estático está ligado ao sistema. Utiliza-se este sistema também para validar a dinâmica do compensador estático durante um curto-circuito.

5.3.1 Degrau de tensão de ±2%

O degrau aplicado de ±2% na referência é utilizado para validar o regulador de tensão estando o compensador estático ligado ao sistema elétrico.

Verifica-se em todas as grandezas que o PSCAD e o ANATEM apresentam um comportamento semelhante.

5.3.1.1 Degrau de tensão positivo 2%

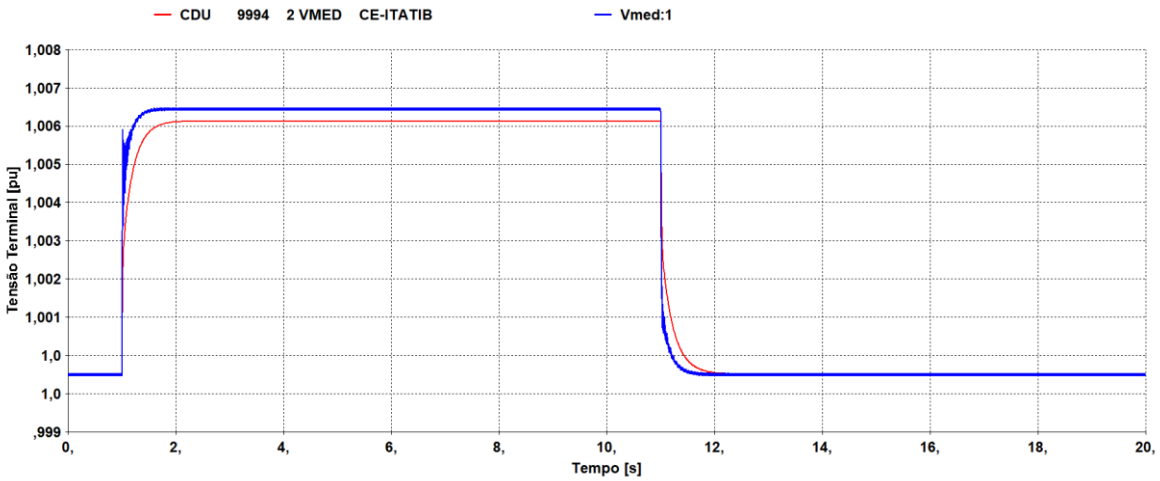

Figura 5.2 - Tensão Terminal

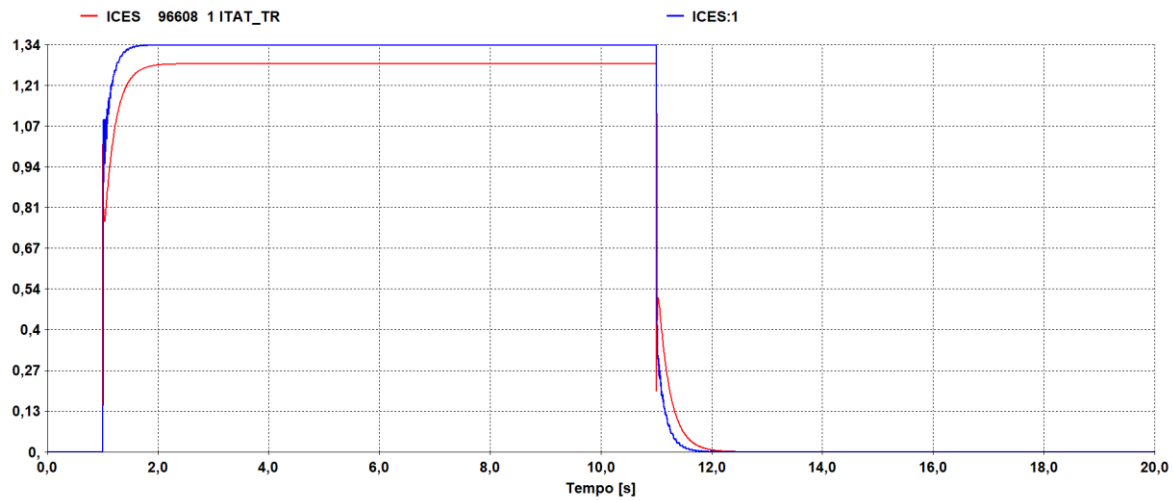

Figura 5.3 - Sinal ICES

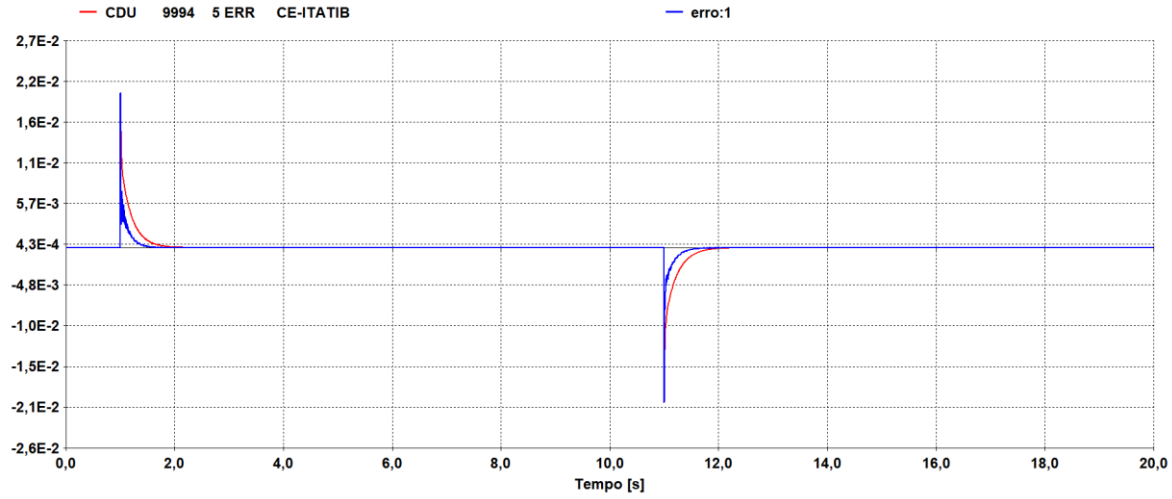

Figura 5.4 - Sinal de Erro

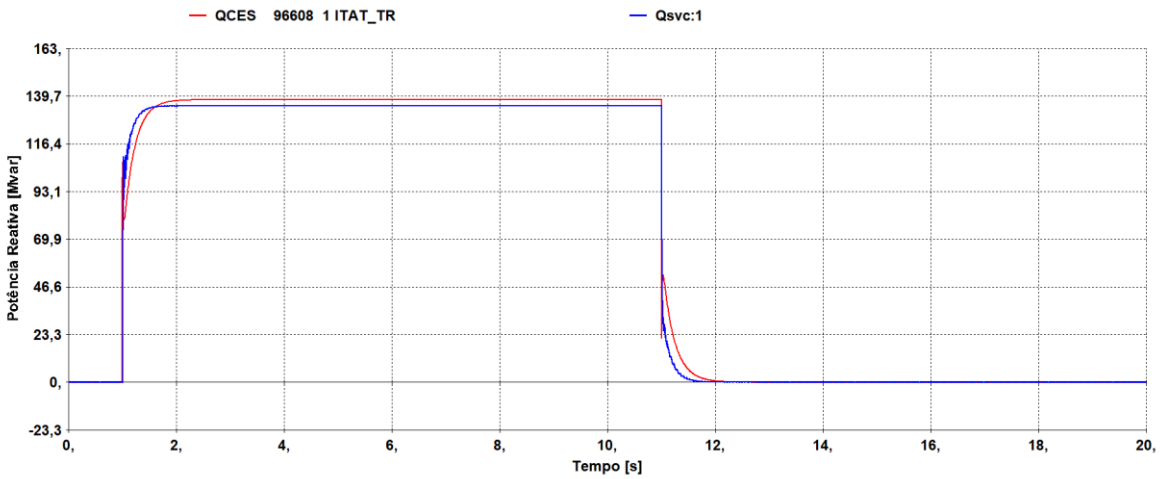

Figura 5.5 - Potência Reativa

5.3.1.2 Degrau de tensão negativo 2%

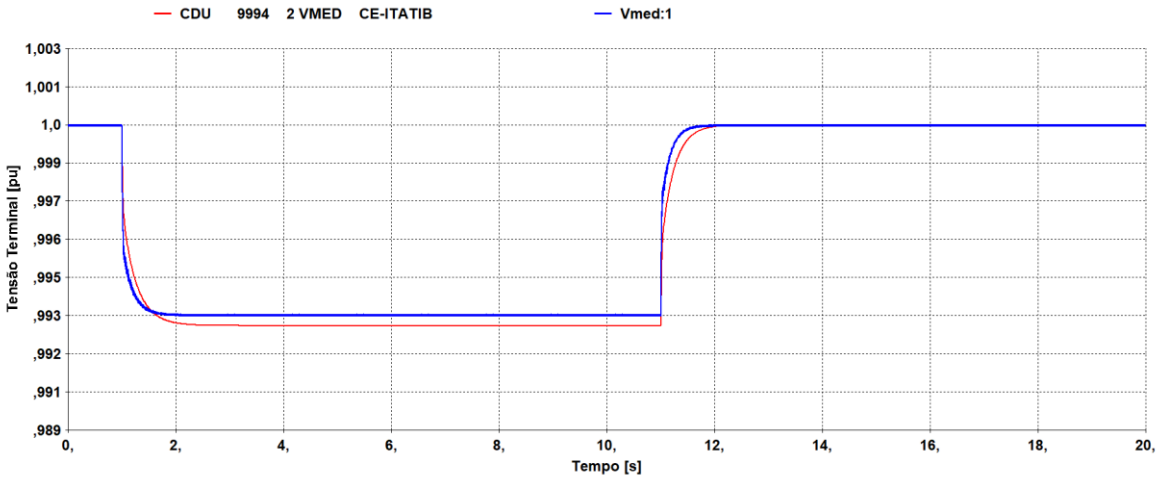

Figura 5.6 - Tensão Terminal

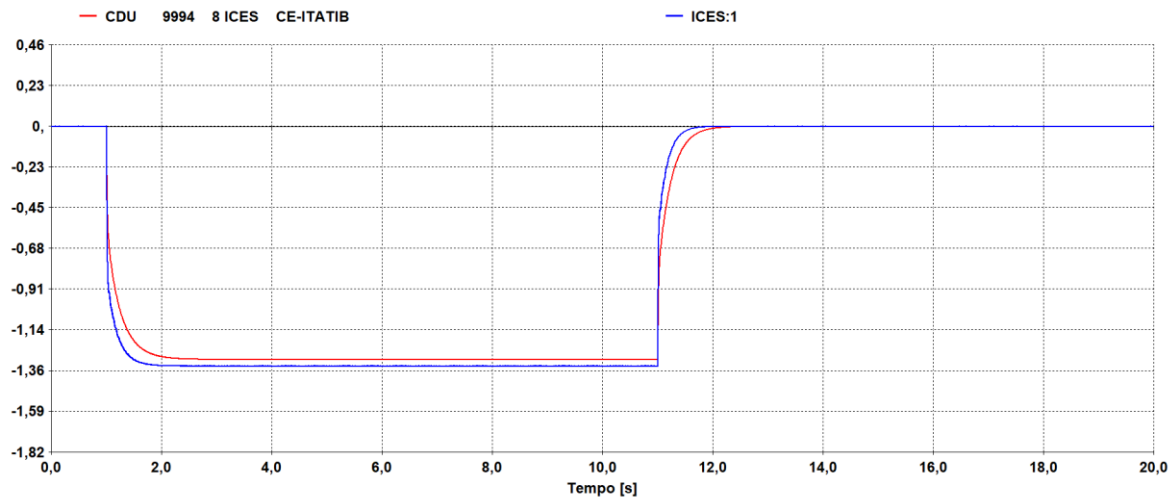

Figura 5.7 - Sinal ICES

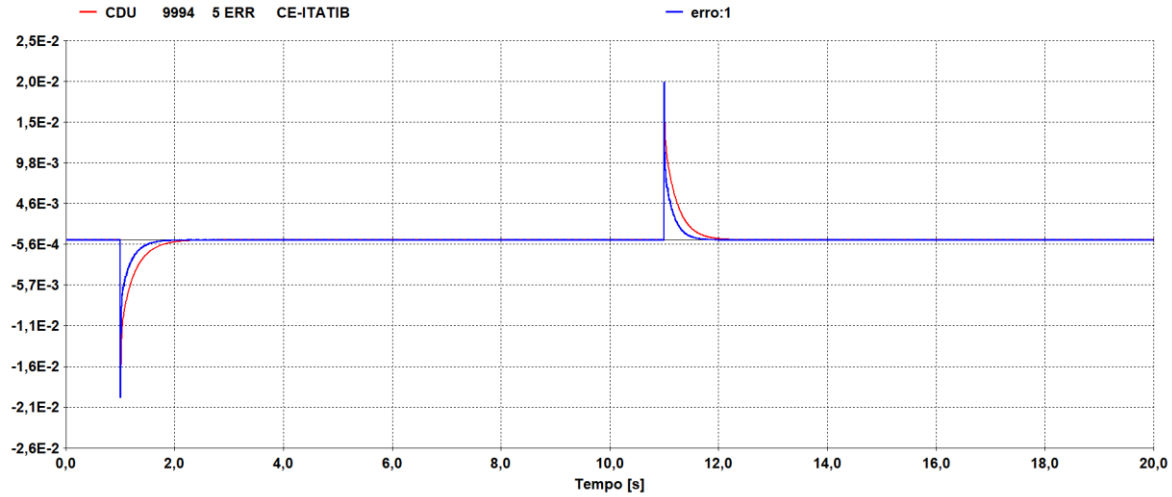

Figura 5.8 - Sinal de Erro

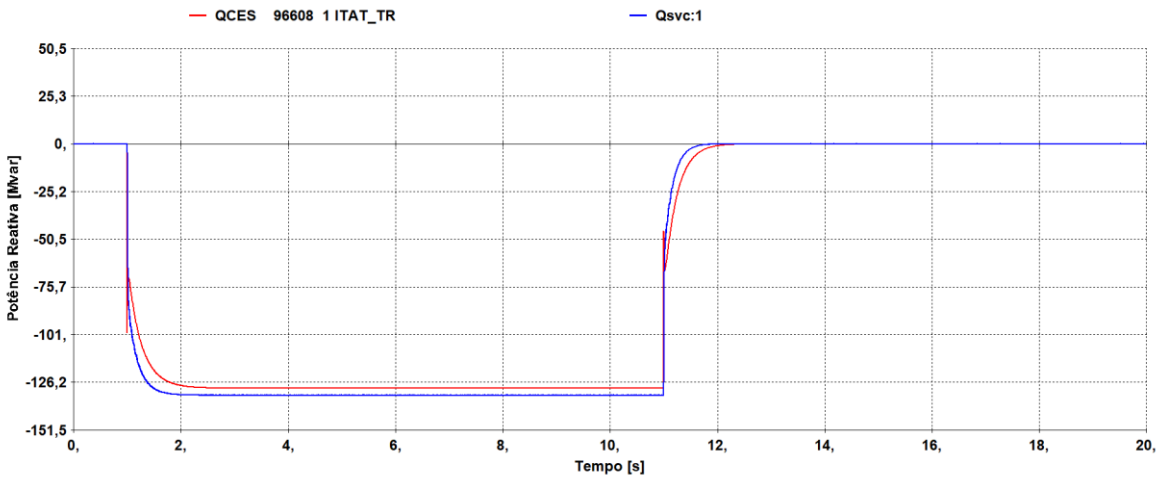

Figura 5.9 - Potência Reativa

5.3.2 Curto-circuito

No sistema compensador estático ligado a uma barra infinita através de uma impedância possibilita validar o modelo do regulador de tensão para um distúrbio de grandes proporções no sistema, ou seja, aplicação de curto-circuito.

5.3.2.1 Curto-circuito

Nesta simulação o curto-circuito tem a duração de 100 ms e foi aplicado na barra do sistema equivalente, Figura 5.1.

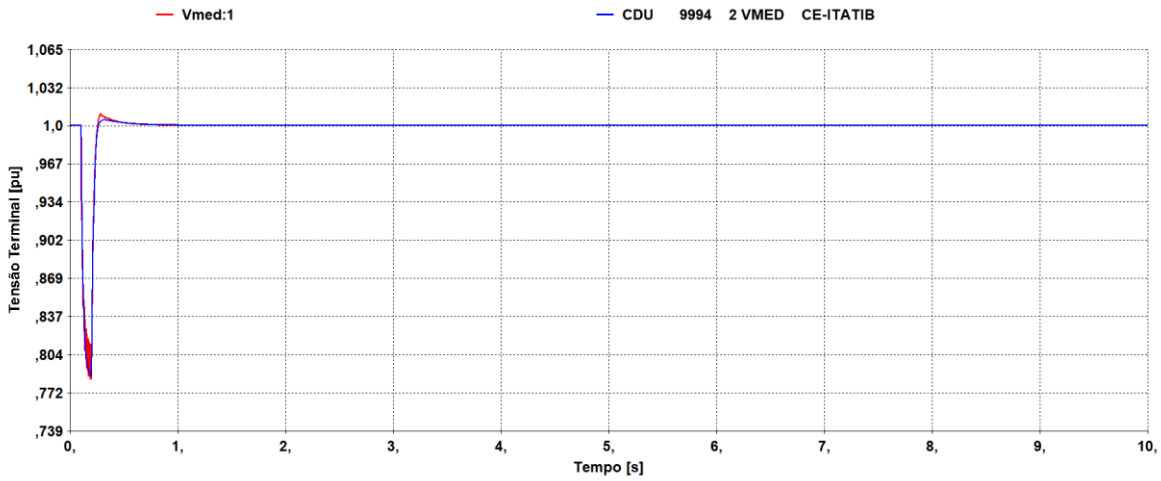

Figura 5.10 - Tensão Terminal

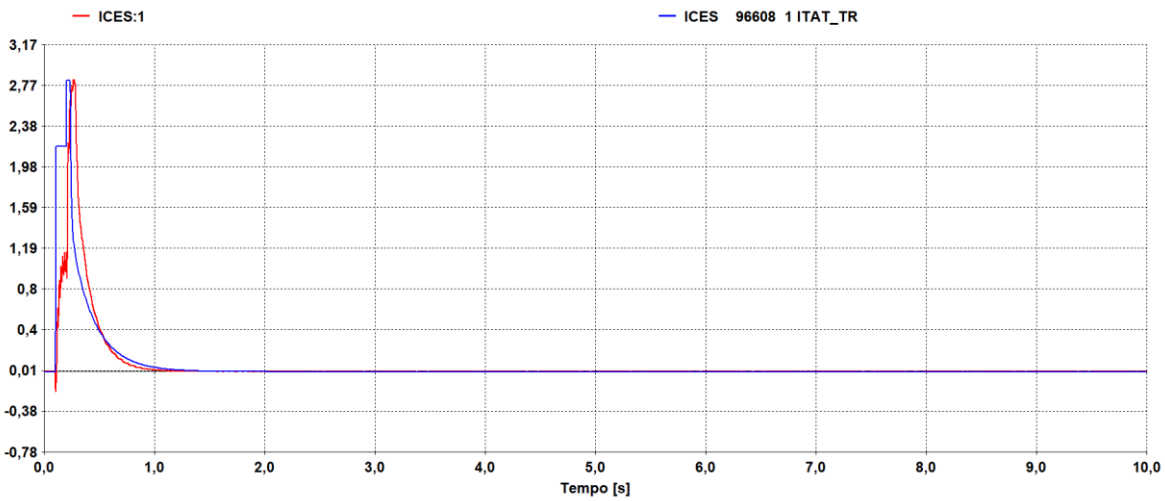

Figura 5.11 - Sinal ICES

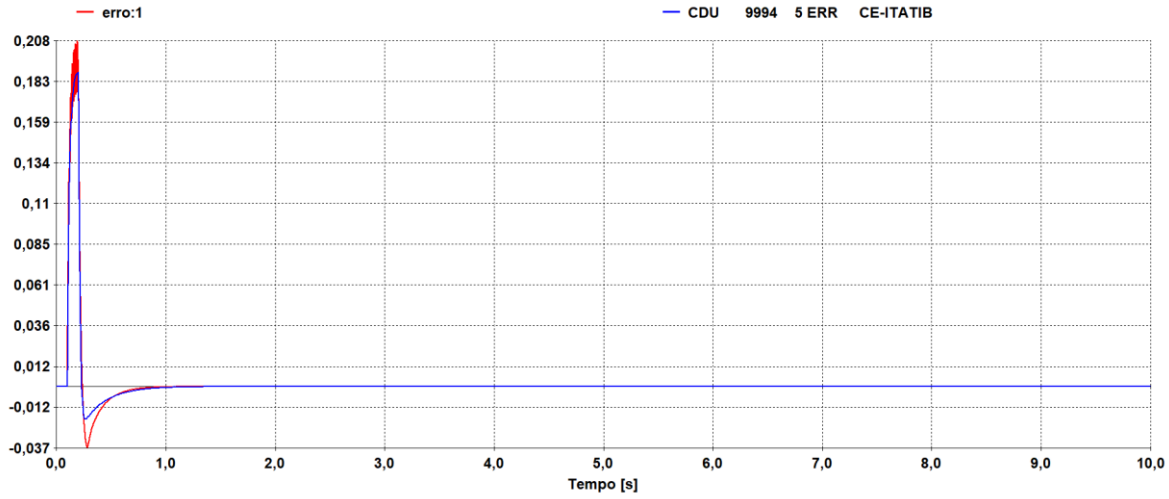

Figura 5.12 - Sinal de Erro

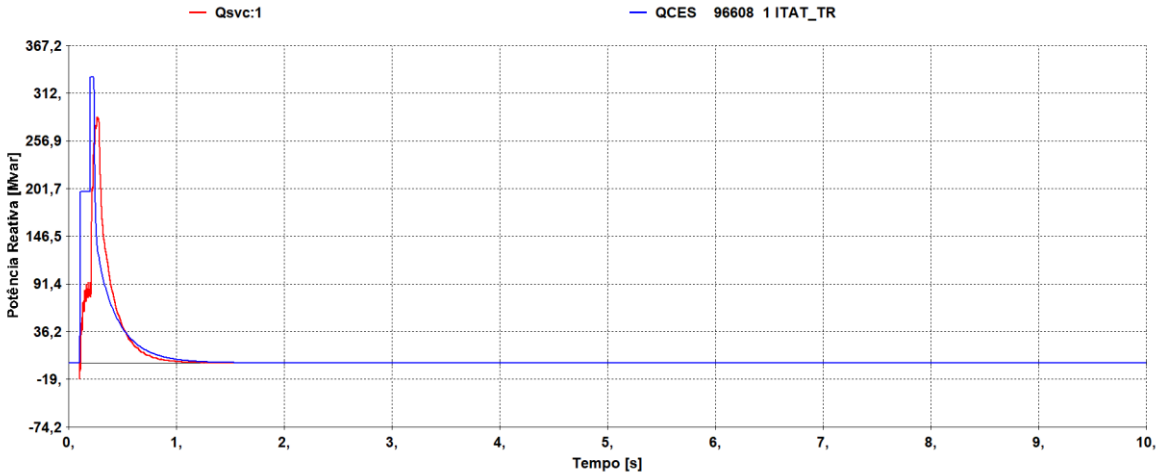

Figura 5.13 - Potência Reativa

6 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] 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,

[3] 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,

[4] Power System Control and Stability, P, M, Anderson A, A, Fouad, Second Edition

[5] Kundur, P, (1994), Power System Stability and Control, Power System Control and Stability, P, M, Anderson A, A, Fouad, Second Edition,

7 EQUIPE TÉCNICA

Participaram da elaboração deste trabalho os seguintes Engenheiros:

- ✓ Venilton Rodrigues de Oliveira – venilton.oliveira@jordaoenergia.com.br
- ✓ Gabryel Mota Garcia – gabryel.garcia@jordaoenergia.com.br
- ✓ Marcos Jorge Araujo de Souza – marcos.souza@jordaoenergia.com.br
- ✓ Rodrigo Escorcio Gomes – rodrigo.escorcio@jordaoenergia.com.br
- ✓ Vinicius Monteiro Viola – vinicius.viola@jordaoenergia.com.br
- ✓ Vinicius Neves de Figueiredo – vinicius.figueiredo@jordaoenergia.com.br