

---

---

## Capítulo 7 – Implementação dos sistemas de controle

---

---

### 7.1 Introdução

Este capítulo trata da aplicação (experimental e simulada) dos controladores abordados no Capítulo 5 ao sistema experimental apresentado no Capítulo 6.

As Figuras 7.1 e 7.2 ilustram as respostas das unidades experimentais a uma perturbação tipo degrau.

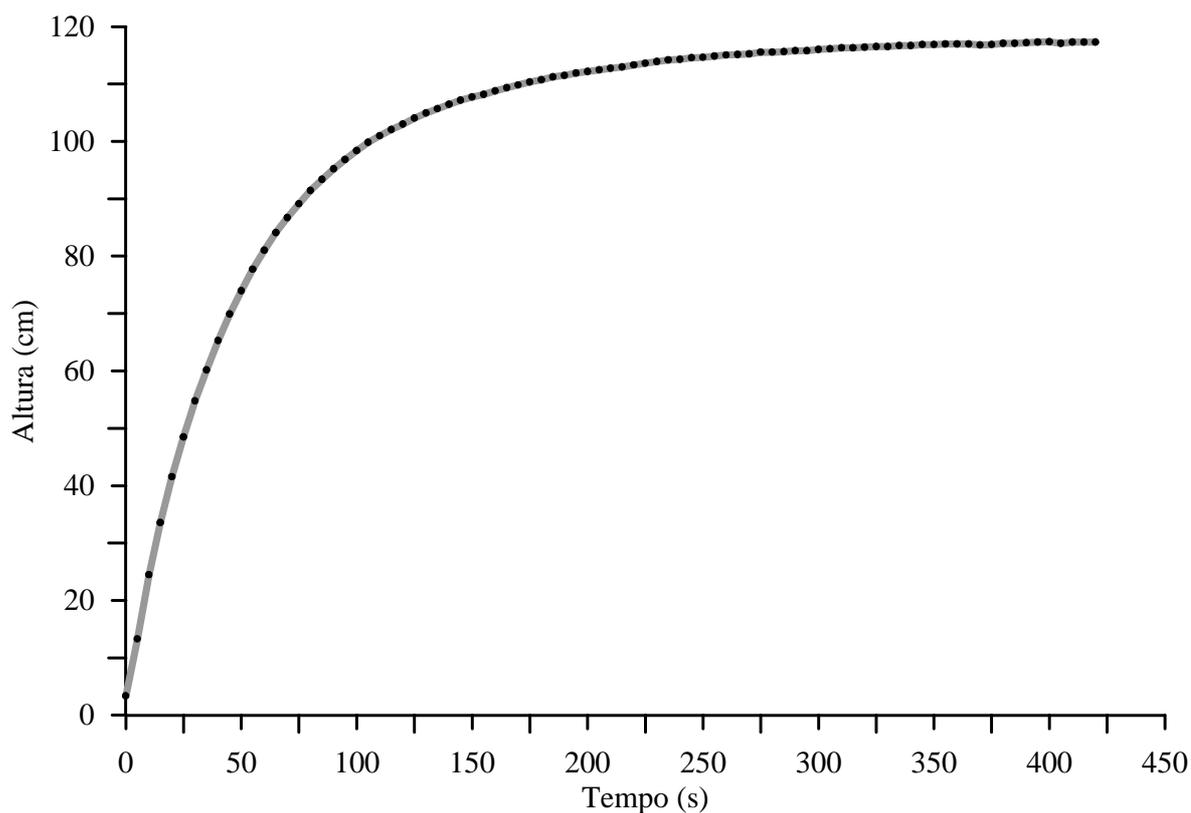


Figura 7.1: Resposta do tanque com área constante a uma perturbação degrau de 3 mA

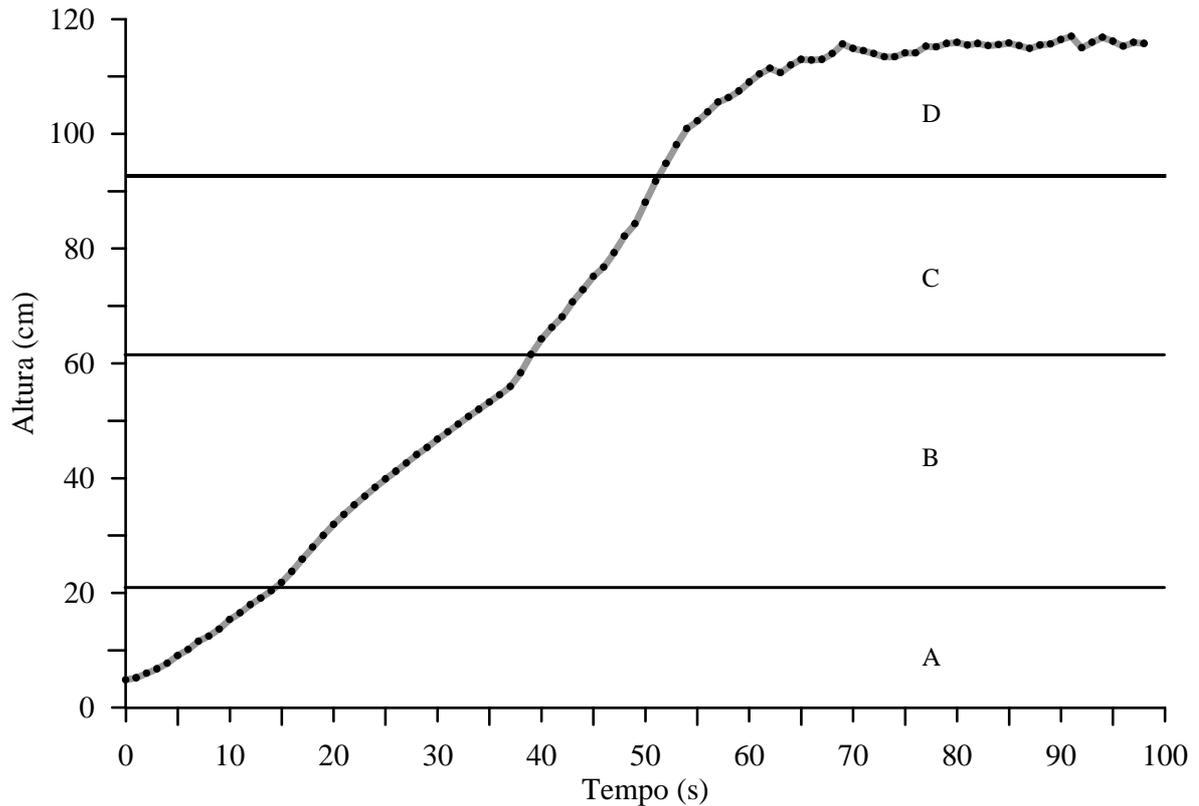


Figura 7.2: Resposta do tanque com área variável a uma perturbação degrau de 3,3 mA

Na Figura 7.2 A, B, C e D são as seções do tanque. Comparando as Figuras 7.1 e 7.2 pode-se perceber como a variação brusca da área transversal traz um comportamento dinâmico interessante para o estudo de controladores e algoritmos de estimação recursiva.

Este capítulo será dividido em duas partes principais. Na primeira (seção 7.2) os algoritmos de controle serão aplicados ao tanque de área constante e na segunda (seção 7.3) os algoritmos serão aplicados ao tanque de área variável. Cada seção (7.2 e 7.3) será dividida em outras duas subseções, uma terá os resultados obtidos através de simulação e na outra os resultados serão obtidos através da aplicação dos algoritmos à unidade experimental. Cada controlador será testado utilizando-se a estimação paramétrica *on-line* (adaptação) e *off-line* com o objetivo de se avaliar a influência da adaptação sobre o desempenho dos controladores em um sistema simples como o tanque de área constante e em um mais complicado como o tanque de área variável.

O controle adaptativo será implementado segundo o esquema de estimação direta ilustrado na Figura 7.3. Utilizou-se como estimador o algoritmo recursivo de mínimos quadrados com fator de esquecimento variável (Equações 3.52 a 3.56).

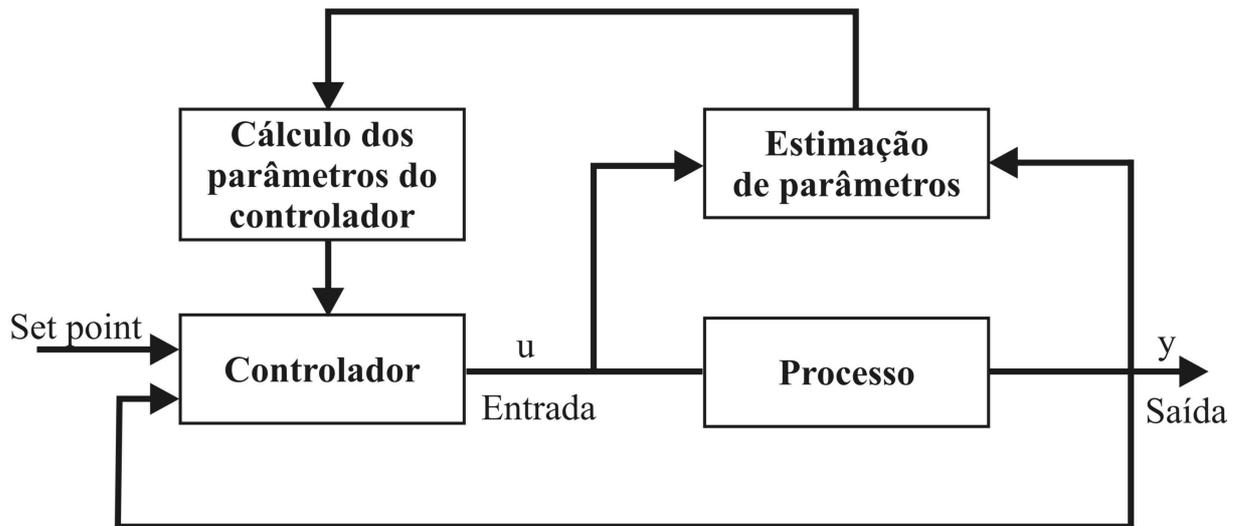


Figura 7.3: Esquema utilizado no controle adaptativo.

O algoritmo adaptativo utilizou como modelo a Equação 3.66. Geralmente funções discretas de segunda e terceira ordem são aplicadas. Altas ordens são indesejáveis, pois, requerem maior esforço computacional; mas, a utilização de ordens baixas para a descrição de processos não lineares é inadequada, pois podem tornar os parâmetros estimados não realistas (SEBORG *et al.*, 1986). Portanto, uma função de primeira ordem sem tempo (Equação 3.66) morto é apropriada, pois descreve bem os sistemas estudados (Capítulo 6), não traz dificuldades aos controladores e é de fácil implementação.

Para facilitar a identificação das seções, gráficos e tabelas será adicionado aos nomes dos mesmos uma sigla com a seguir.

Para o controlador:

CSDPC: Controlador via síntese direta com parâmetros constantes;

CSDA: Controlador via síntese direta com adaptação;

MPCPCR: MPC com parâmetros constantes e restrições;

MPCAR: MPC com adaptação e restrições.

Para o tanque:

TAC: Tanque de área constante

TAV: Tanque de área variável

Para o tipo de resultado:

S: Simulado;

E: Experimental

Assim, por exemplo se for simulando o controlador via síntese direta com adaptação para o tanque de área variável a sigla será (CSDA-TAV-S). A sintonia dos controladores foi realizada por tentativa e erro.

## 7.2 Tanque de área constante

### 7.2.1 Resultados simulados

Nas simulações foi adicionado ruído aleatório com amplitude máxima de  $\pm 0,2$  cm ao sinal de saída.

#### 7.2.1.a Controlador via síntese direta com parâmetros constantes (CSDPC-TAC-S)

Foram utilizados os seguintes parâmetros para o controlador:

Tabela 7.1: Parâmetros utilizados no CSDPC (CSDPC-TAC-S)

Parâmetro	Valor
K	39,24 cm/mA
$\tau$	50,81 s
$\tau_c$	0,5 $\tau$
$U_{\min}$	10 mA
$U_{\max}$	14 mA
$\Delta t$	5 s

Os resultados estão ilustrados nas figuras a seguir:

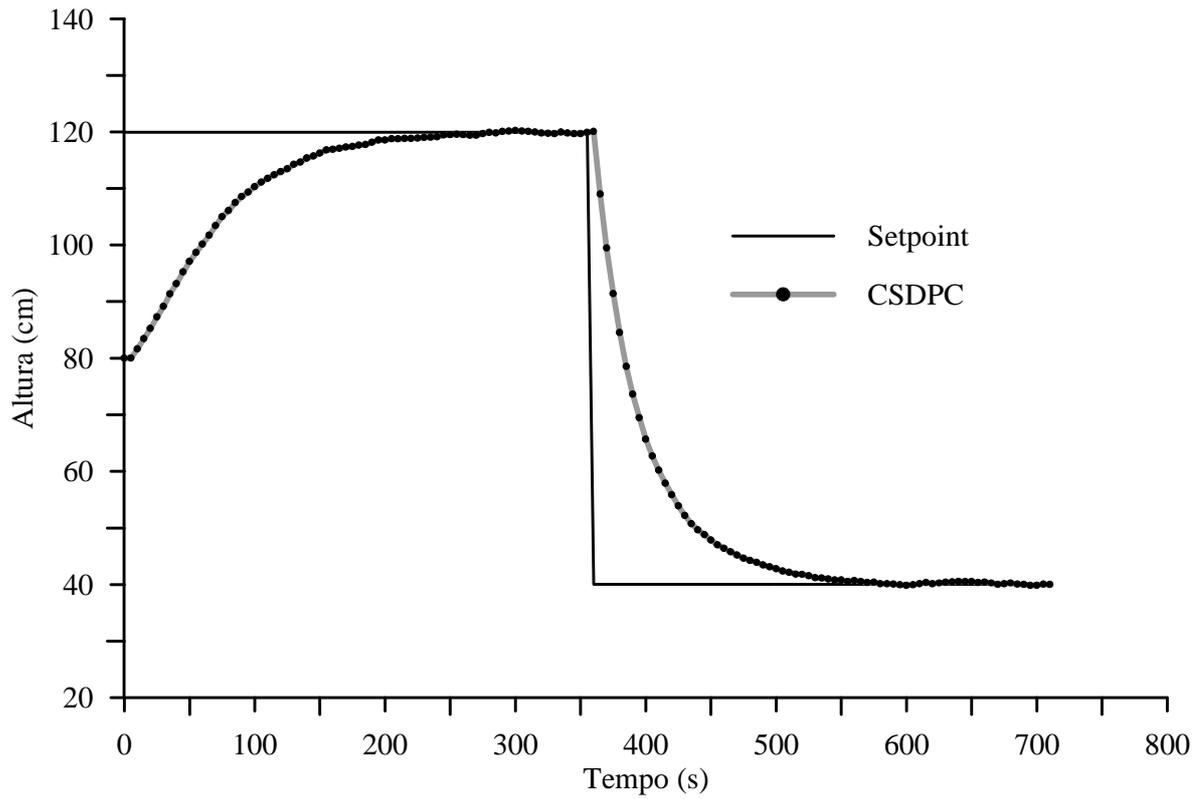


Figura 7.4: Desempenho do CSDPC (CSDPC-TAC-S)

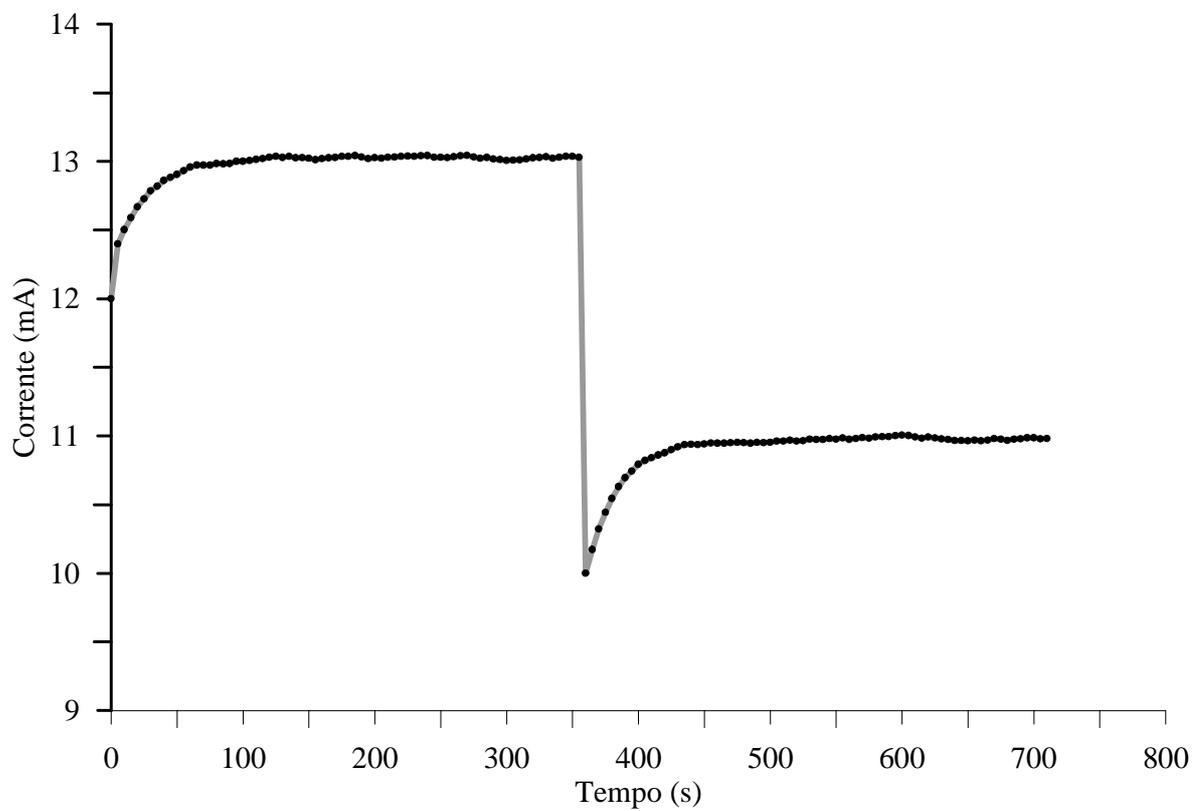


Figura 7.5: Ações de controle do CSDPC (CSDPC-TAC-S)

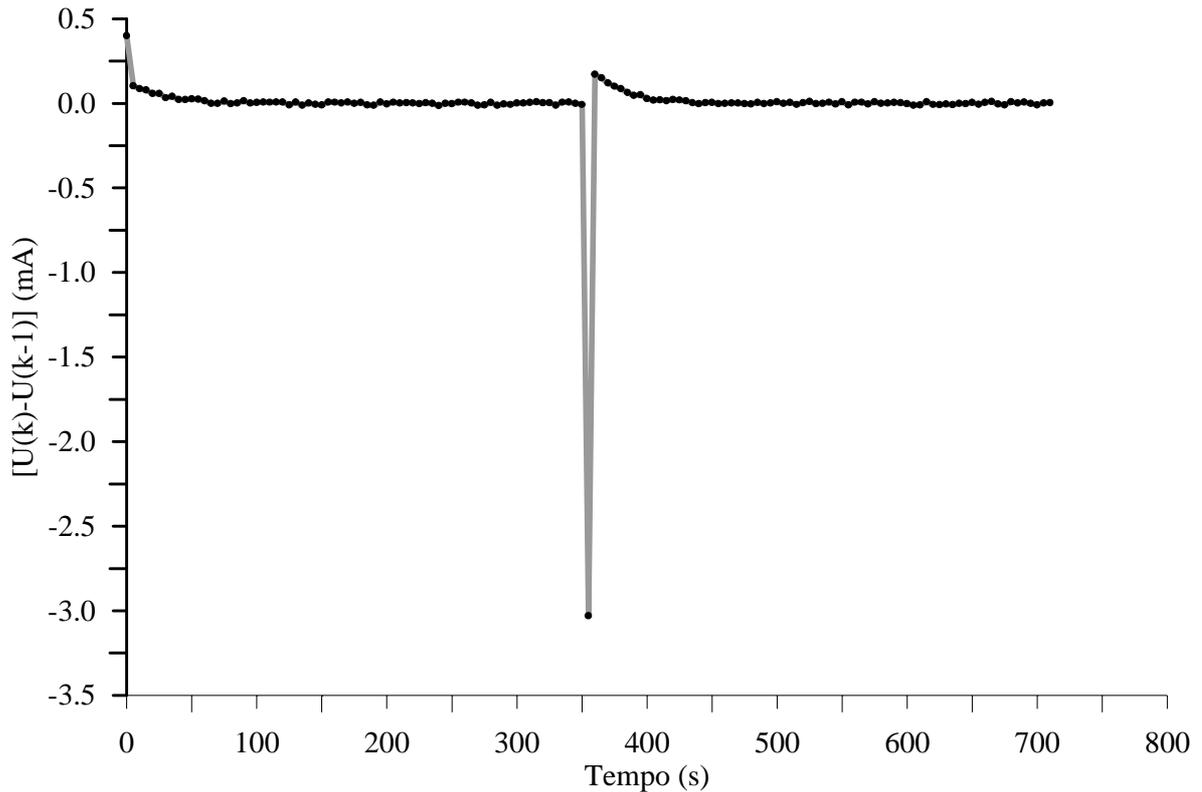


Figura 7.6: Variações das ações de controle do CSDPC (CSDPC-TAC-S)

### 7.2.1.b Controlador via síntese direta com adaptação (CSDA-TAC-S)

No CSDA para os casos simulados e experimentais o parâmetro  $q$  (Equação 5.5) variou de acordo com os parâmetros adaptados. Neste caso se for desejado que a constante de tempo do laço fechado seja:

$$\tau_c = \frac{\tau}{g} \quad (7.1)$$

Substituindo 7.1 em 5.5 e o posteriormente em resolvendo a Equação 3.59 para  $\tau$  e substituindo em 7.1 chega-se a:

$$q = (-a)^g \quad (7.2)$$

Foram utilizados os seguintes parâmetros para o estimador e o controlador:

Tabela 7.2: Parâmetros utilizados no CSDA (CSDA-TAC-S)

Parâmetro	Valor
$\Sigma_0$	40
$\xi$	5
$\alpha$	10000
$g$	2
$U_{\min}$	10 mA
$U_{\max}$	14 mA
$\Delta t$	5 s

Os resultados estão ilustrados nas figuras a seguir:

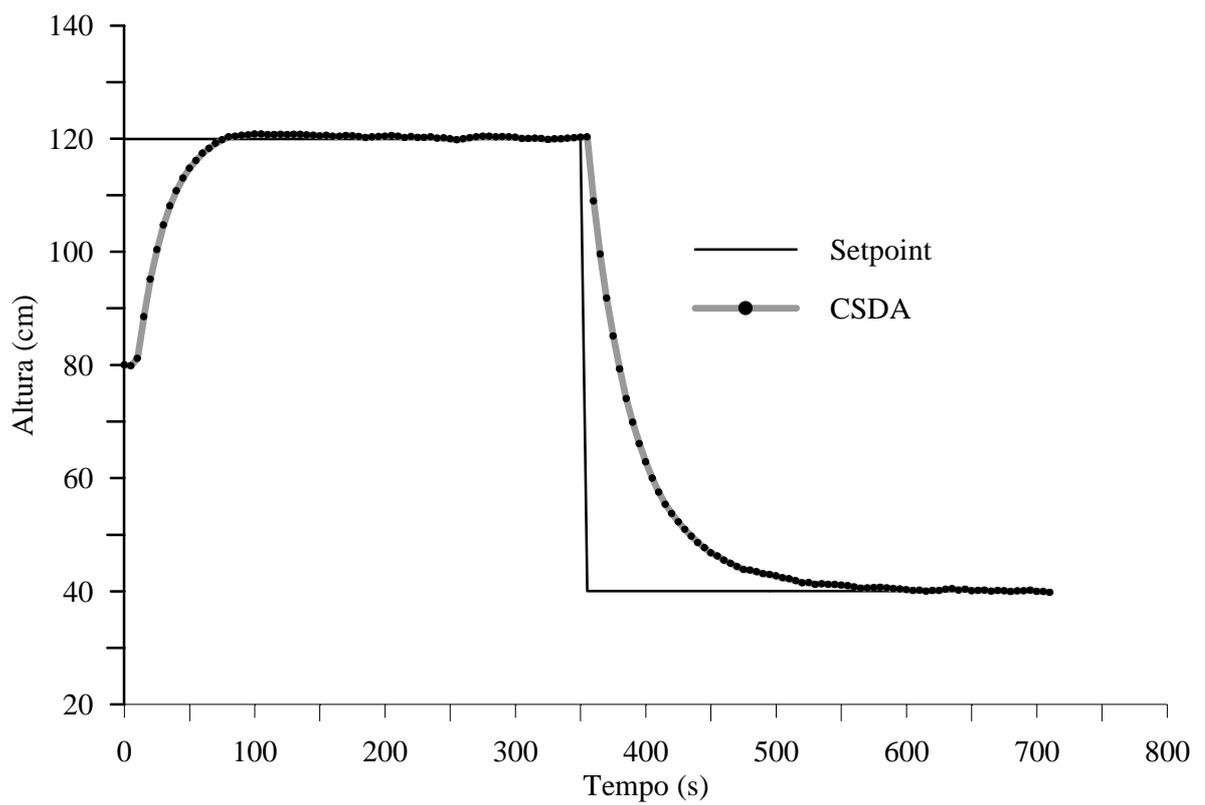


Figura 7.7: Desempenho do CSDA (CSDA-TAC-S)

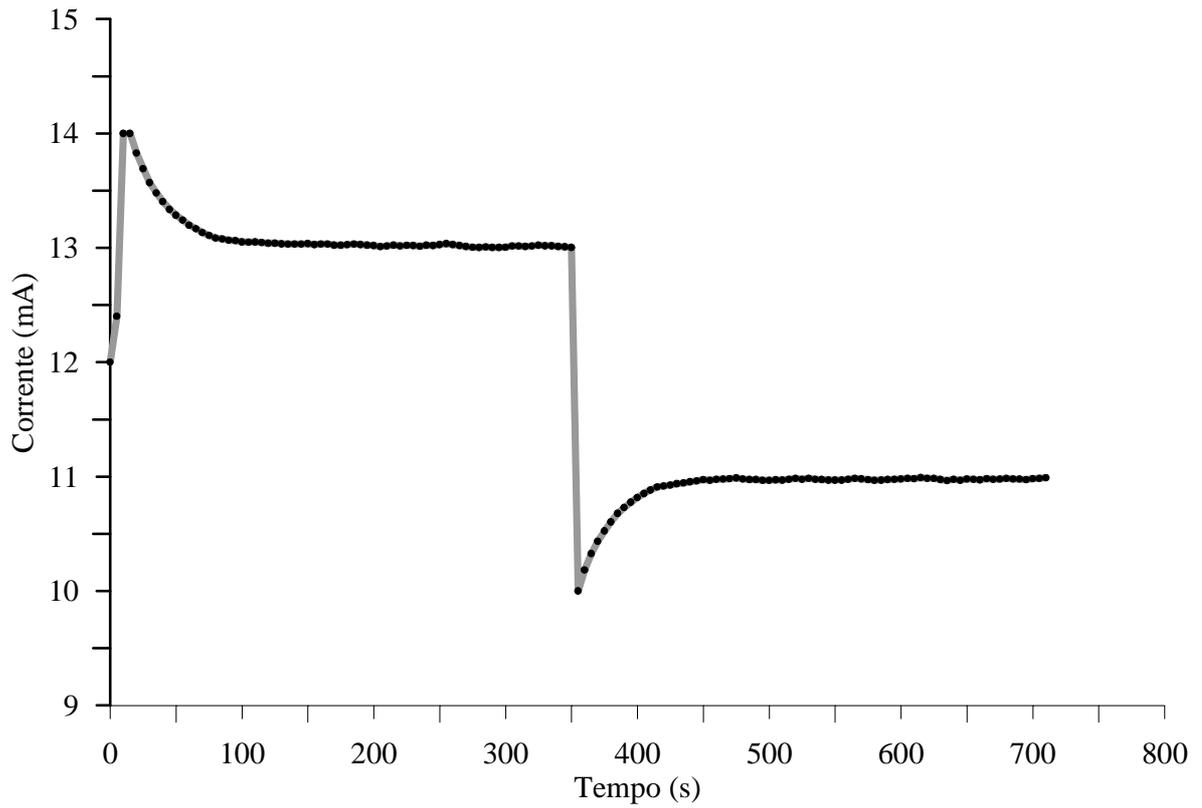


Figura 7.8: Ações de controle do CSDA (CSDA-TAC-S)

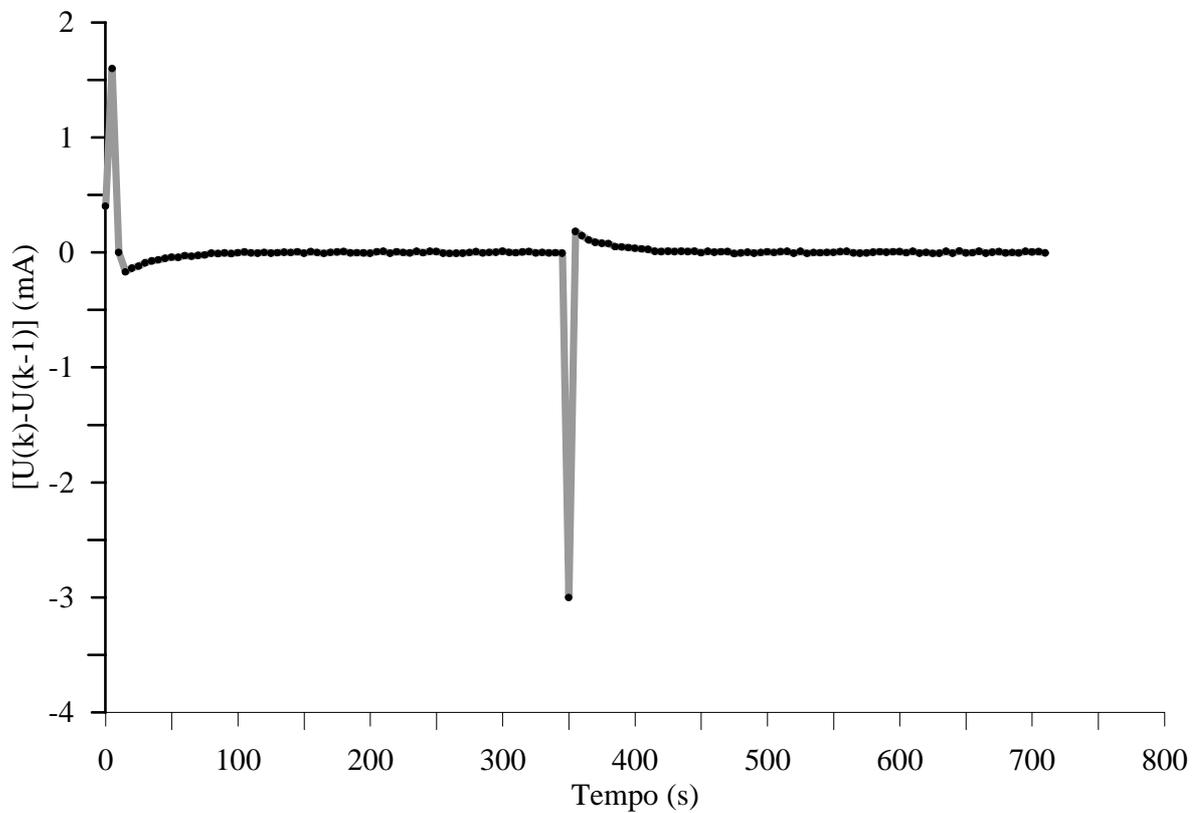
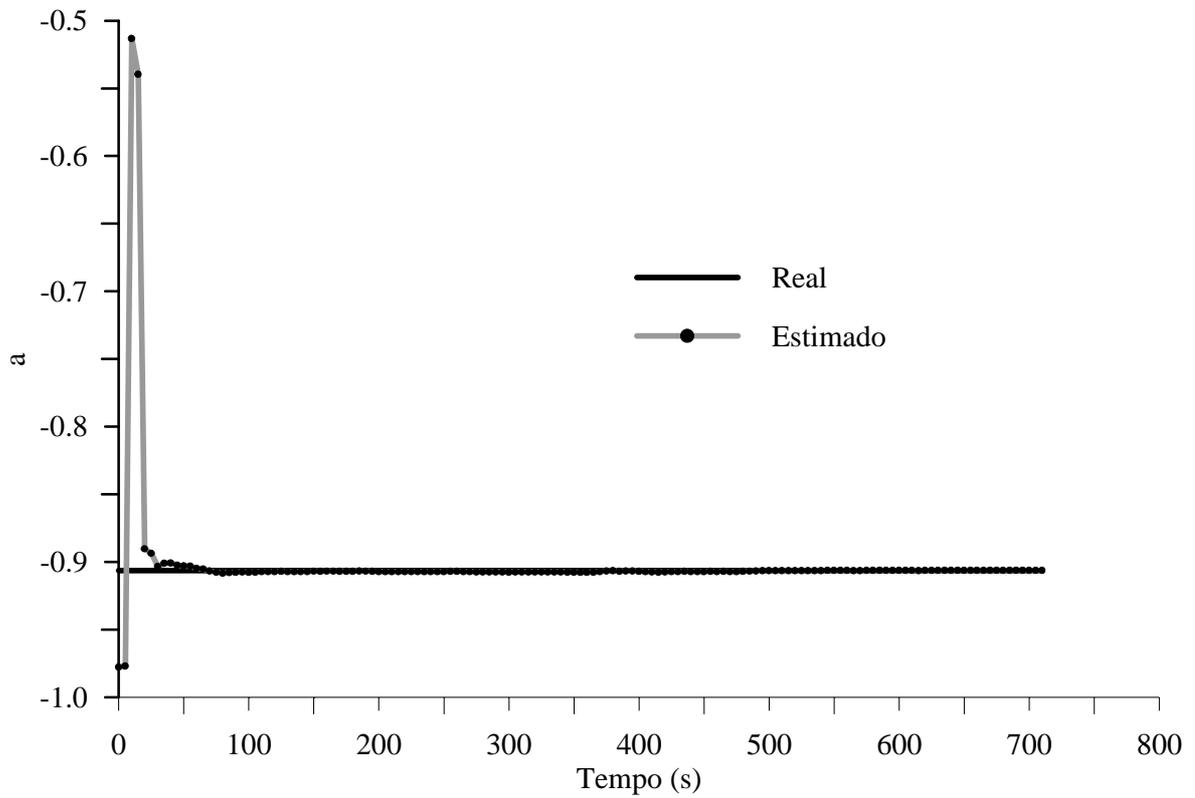
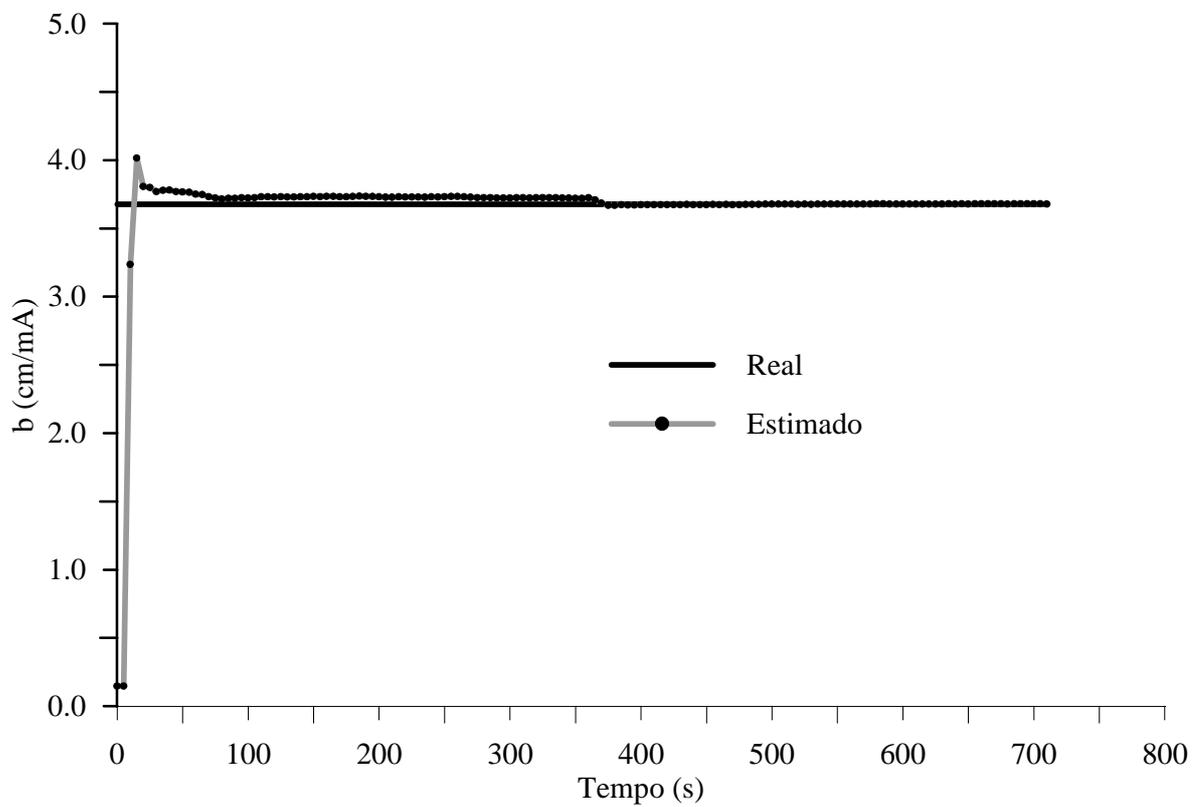


Figura 7.9: Variações das ações de controle do CSDA (CSDA-TAC-S)

Figura 7.10: Parâmetro  $a$ , real e estimado (CSDA-TAC-S)Figura 7.11: Parâmetro  $b$ , real e estimado (CSDA-TAC-S)

O CSDA foi mais rápido do que o CSDPC no início do teste devido aos parâmetros estimados pela adaptação nos primeiros passos, note nas Figuras 7.5 e 7.8 a diferença nas ações de controle destes dois controladores. Logo após adaptação estabilizar (convergir para os parâmetros reais) os dois controladores apresentaram desempenhos semelhantes.

### 7.2.1.c MPC com parâmetros constantes e restrições (MPCPCR-TAC-S)

Foram utilizados os seguintes parâmetros para o controlador baseado na função de transferência do processo:

Tabela 7.3: Parâmetros utilizados no MPCPCR (MPCPCR-TAC-S)

Parâmetro	Valor
K	39,24 cm/mA
$\tau$	50,81 s
M	5
P	30
Q	1
R	1500
$U_{\min}$	10 mA
$U_{\max}$	14 mA
$\Delta U_{\max}$	1 mA
$\Delta t$	5 s

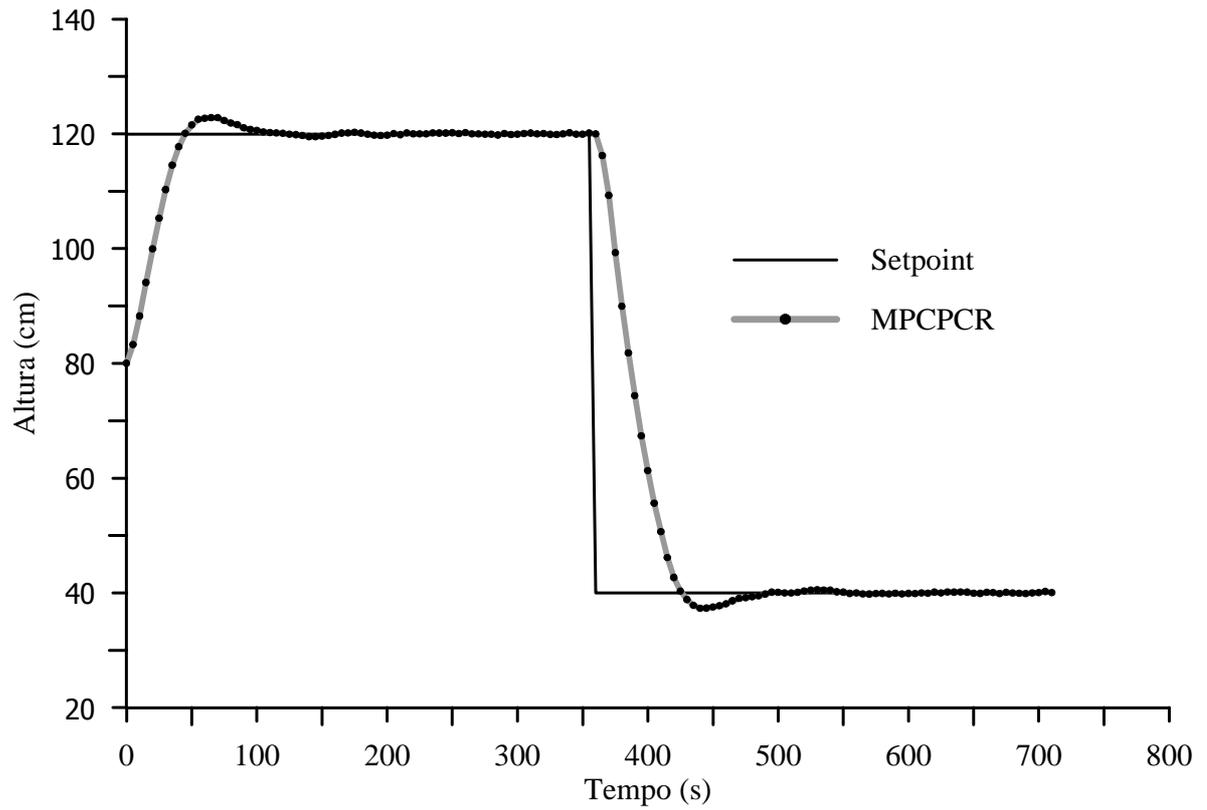


Figura 7.12: Desempenho do MPCPCR (MPCPCR-TAC-S)

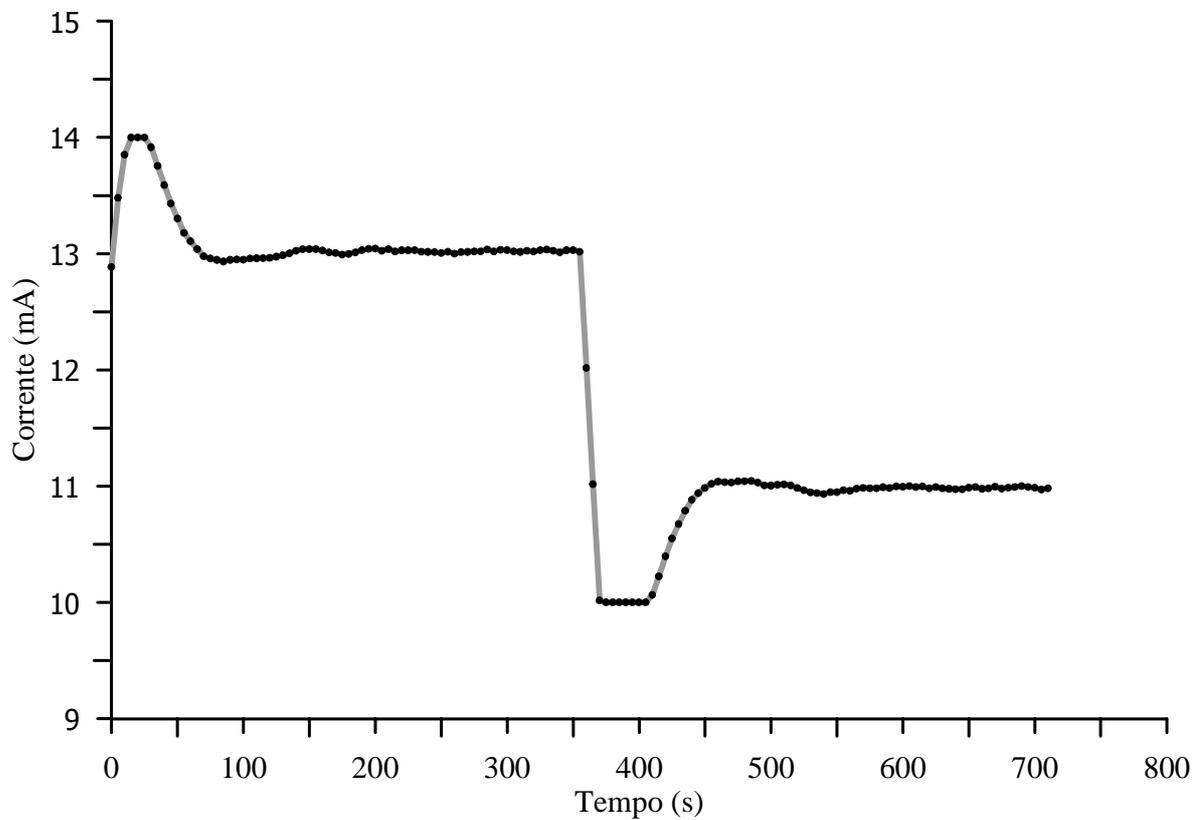


Figura 7.13: Ações de controle do MPCPCR (MPCPCR-TAC-S)

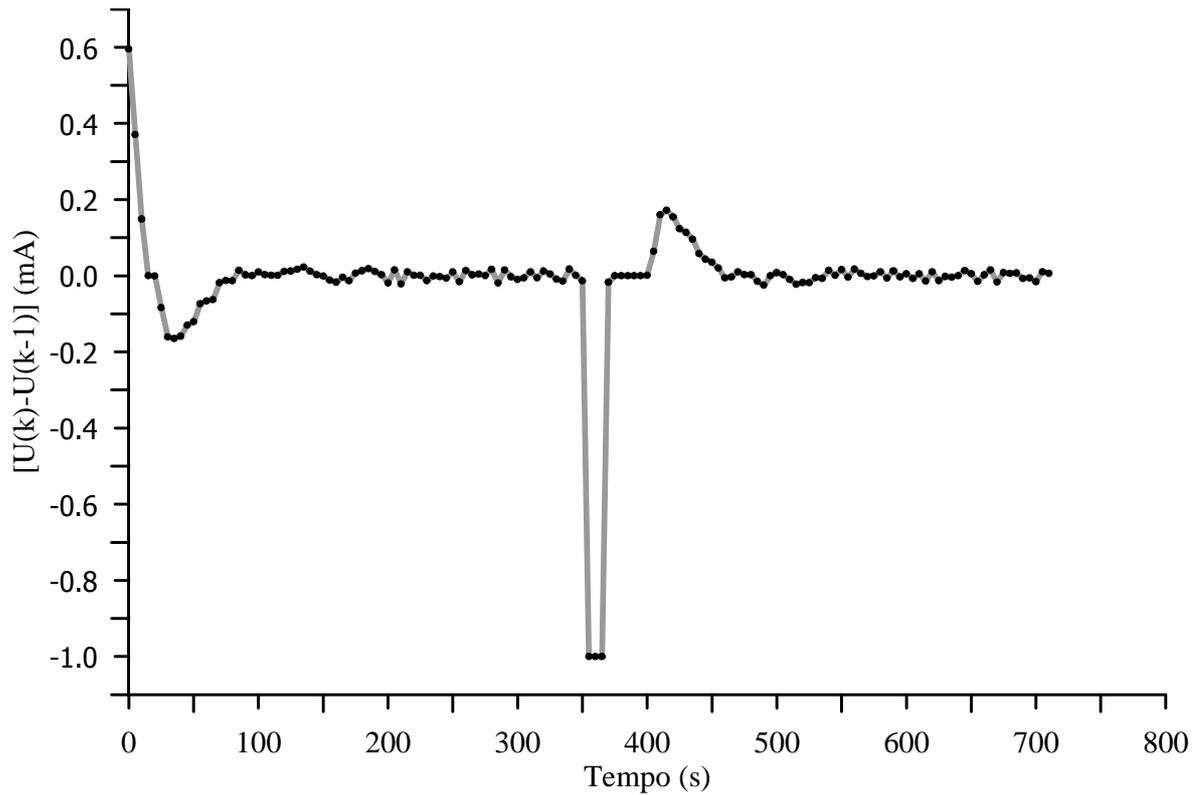


Figura 7.14: Variações das ações de controle do MPCPCR (MPCPCR-TAC-S)

#### 7.2.1.d MPC com adaptação e restrições (MPCAR-TAC-S)

Tabela 7.4: Parâmetros utilizados no MPCAR (MPCAR-TAC-S)

Parâmetro	Valor
$\Sigma_0$	40
$\xi$	5
$\alpha$	10000
M	5
P	30
Q	1
R	1500
$\Delta U_{\max}$	1
$U_{\min}$	10 mA
$U_{\max}$	14 mA
$\Delta t$	5 s

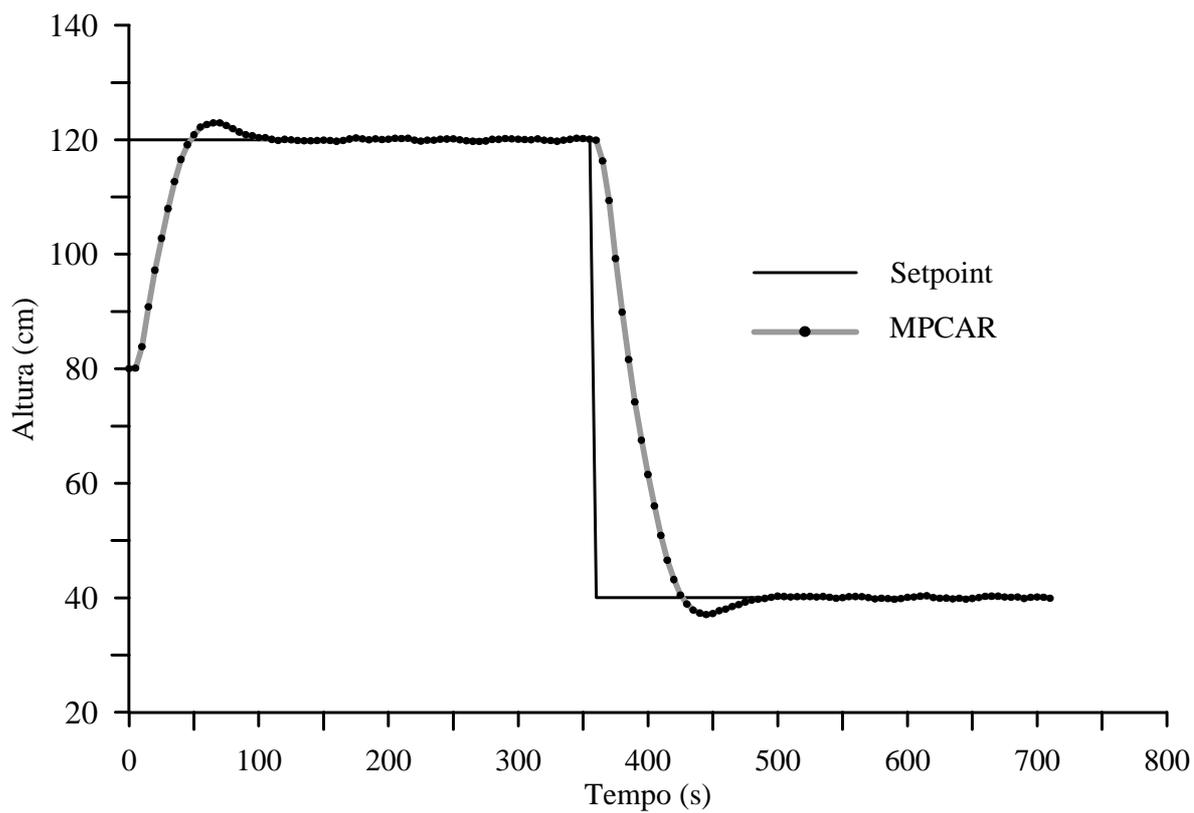


Figura 7.15: Desempenho do MPCAR (MPCAR-TAC-S)

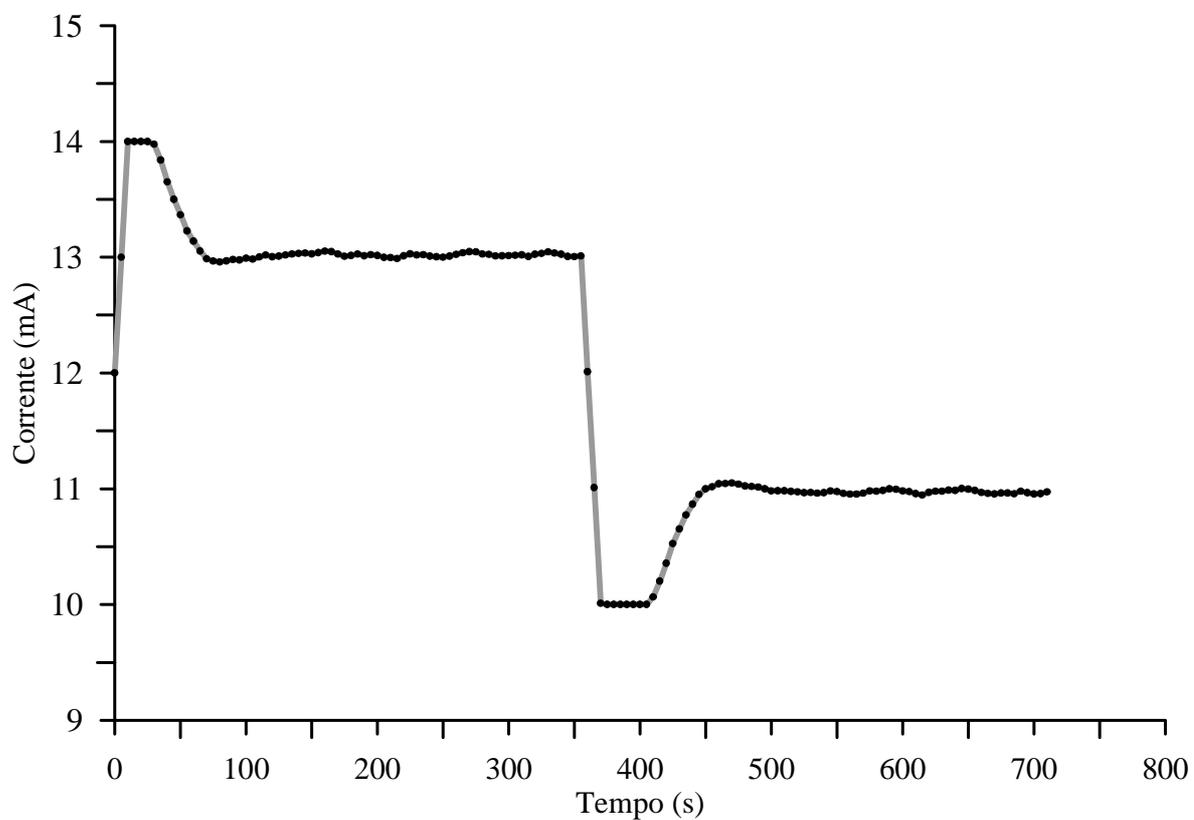


Figura 7.16: Ações de controle do MPCAR (MPCAR-TAC-S)

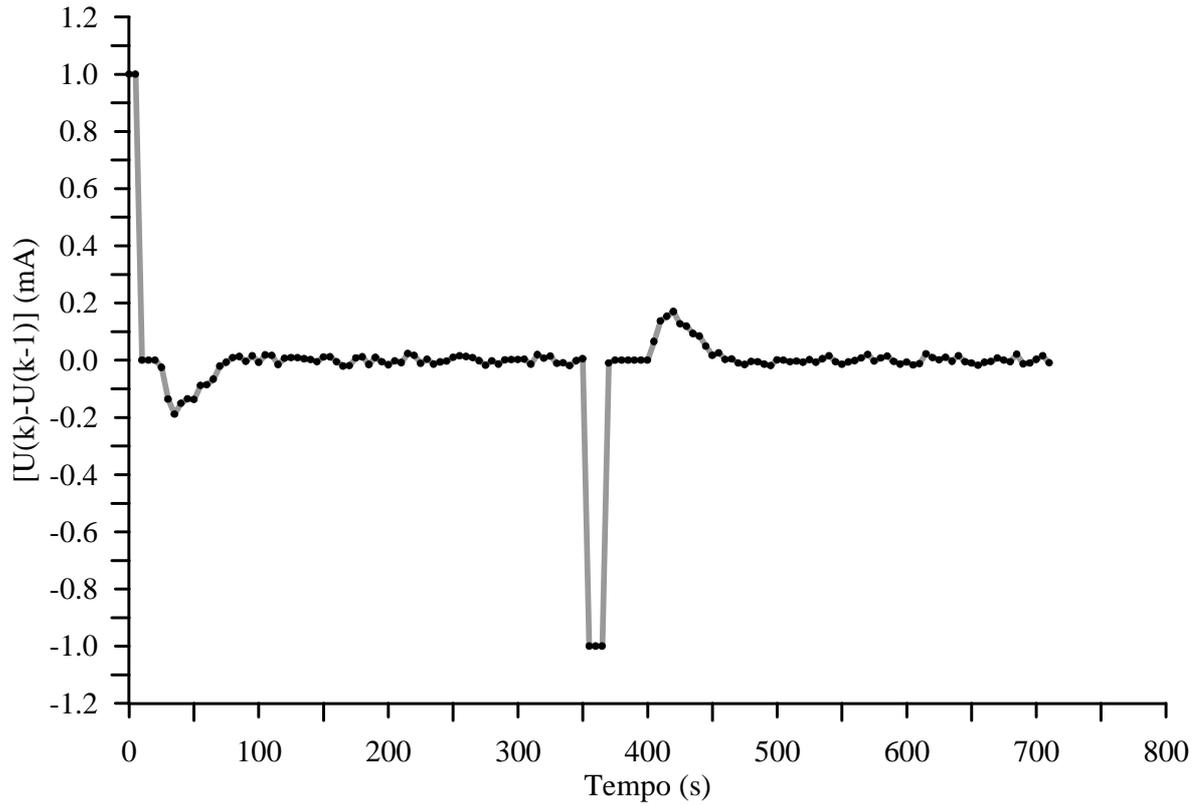


Figura 7.17: Variações das ações de controle do MPCAR (MPCAR-TAC-S)

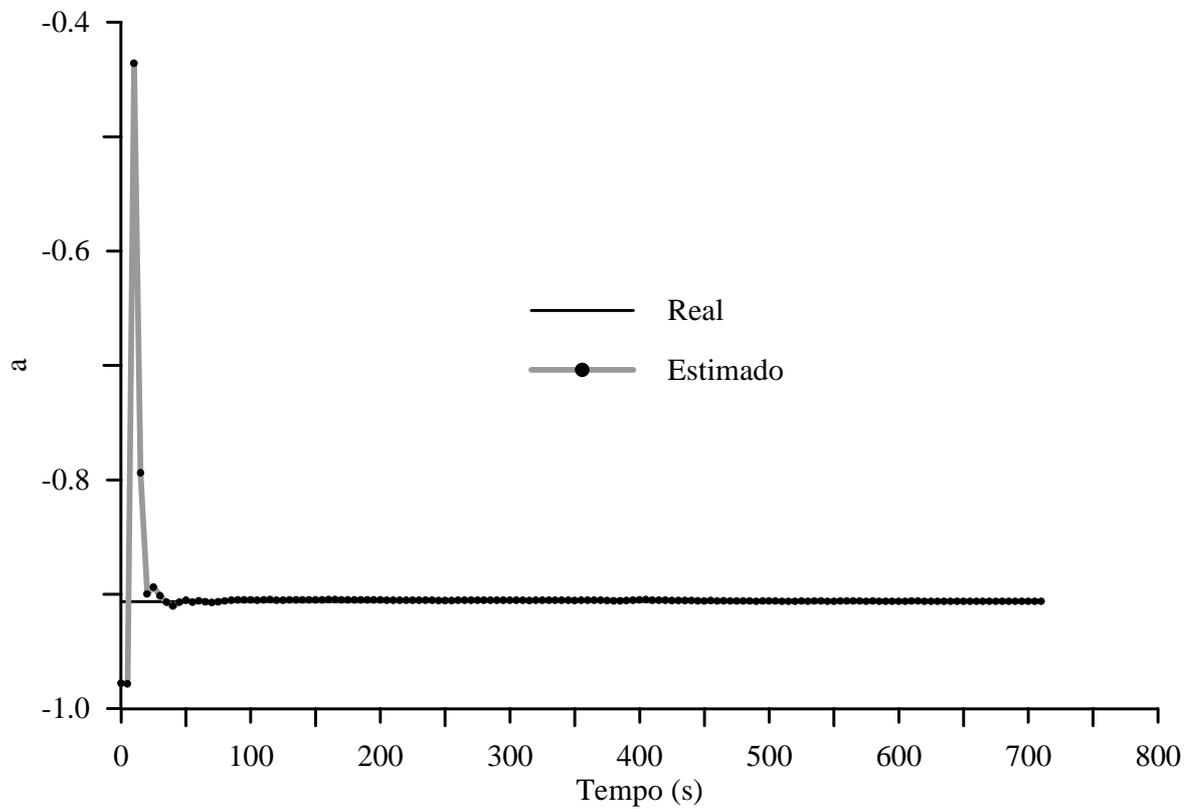


Figura 7.18: Parâmetro  $a$ , real e estimado (MPCAR-TAC-S)

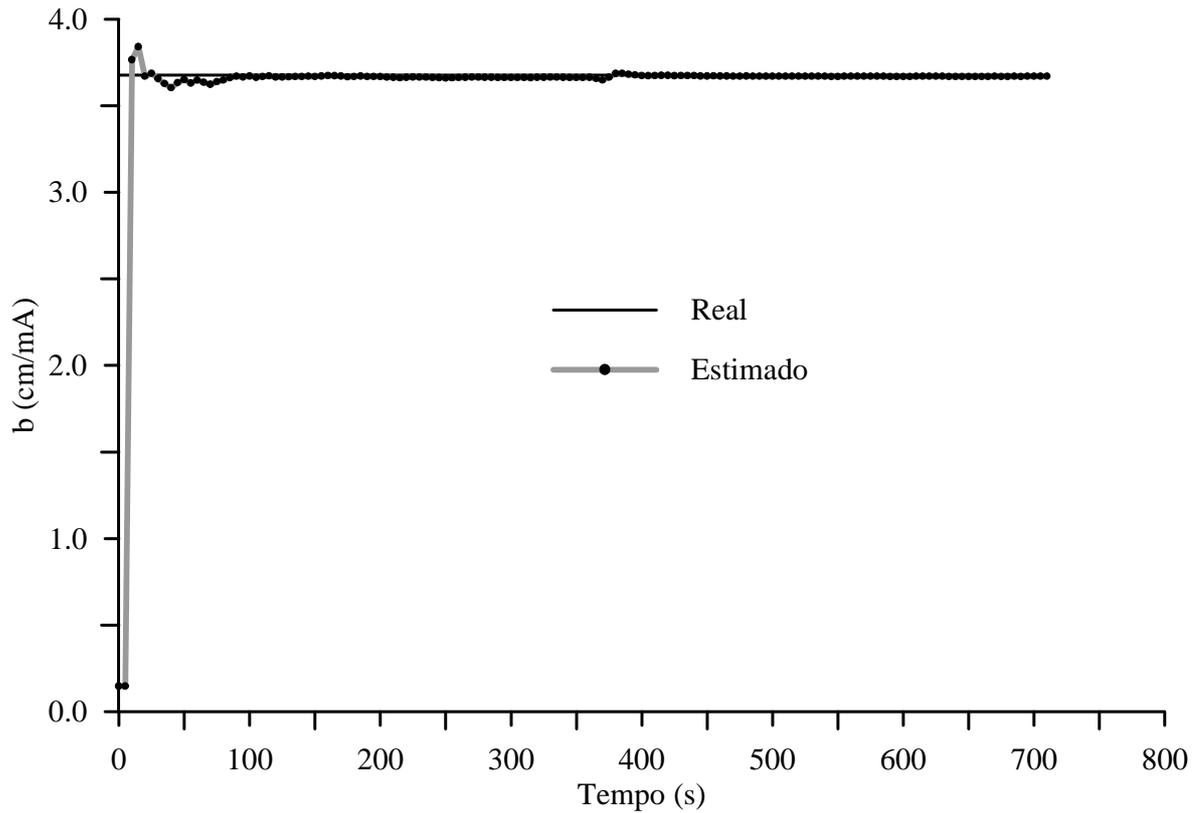


Figura 7.19: Parâmetro  $b$ , real e estimado (MPCAR-TAC-S)

O MPCPCR e o MPCAR obtiveram o mesmo desempenho. Ambos apresentaram *overshoot* e *undershoot* devido às restrições impostas. Note nos Gráficos 7.13 e 7.16 como há a saturação da corrente no início da mudança de *setpoint*.

Os MPC's obtiveram melhor desempenho que os CSD's principalmente quando são observadas as ações de controle dos mesmos. Os CSD's geraram ações de controle muito agressivas quando comparadas com as dos MPC's.

## 7.2.2 Resultados experimentais

### 7.2.2.a Controlador via síntese direta com parâmetros constantes (CSDPC-TAC-E)

Foram utilizados os mesmos parâmetros da Tabela 7.1.

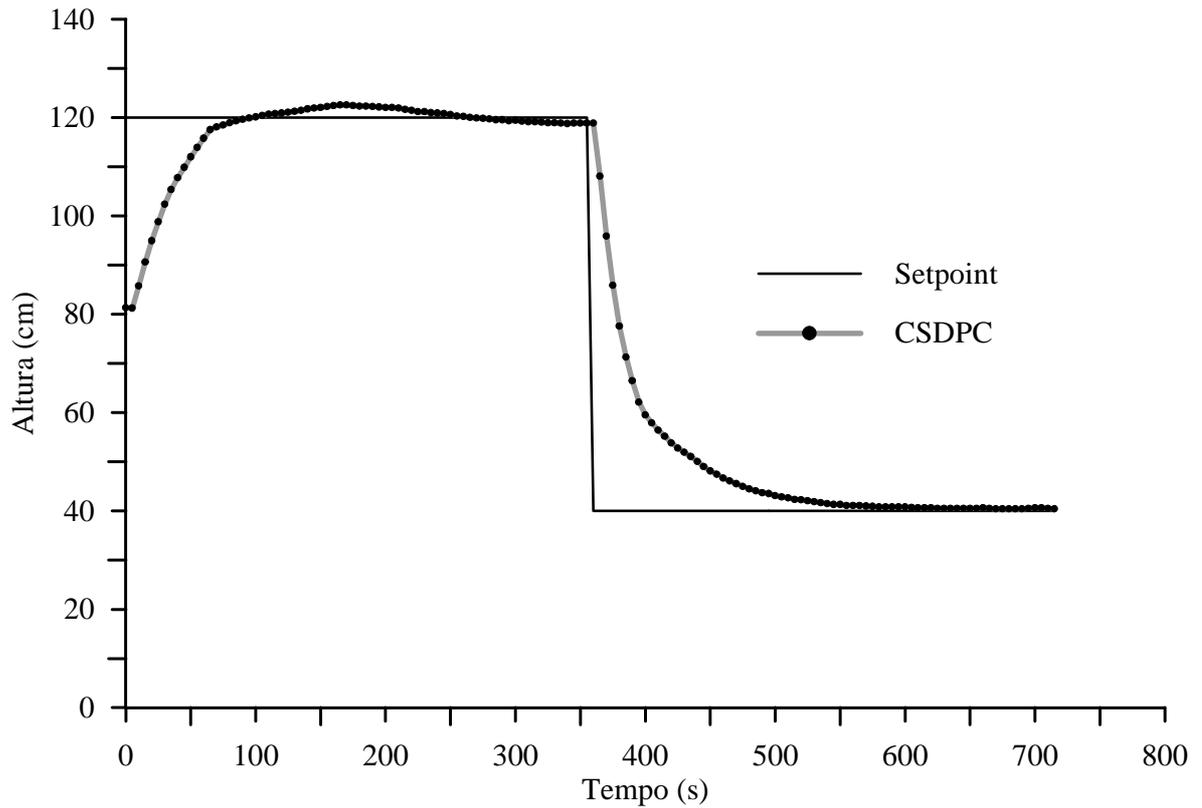


Figura 7.20: Desempenho do CSDPC (CSDPC-TAC-E)

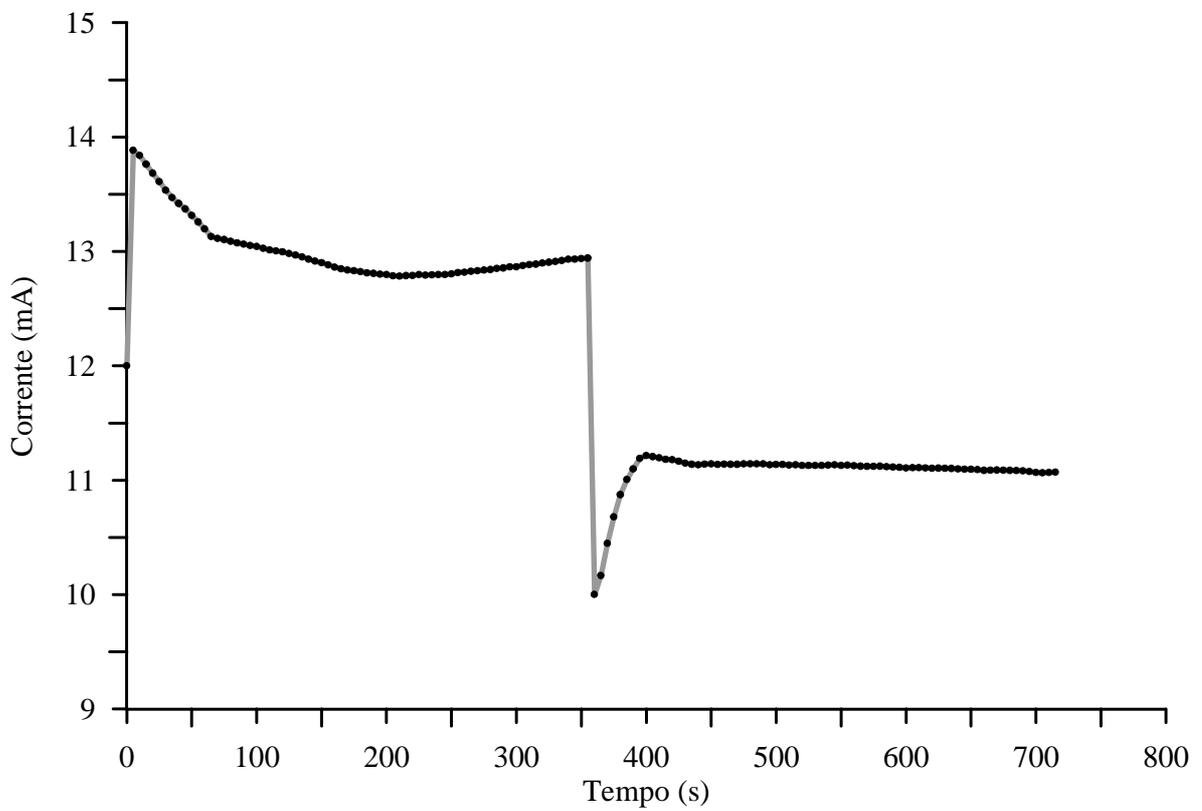


Figura 7.21: Ações de controle do CSDPC (CSDPC-TAC-E)

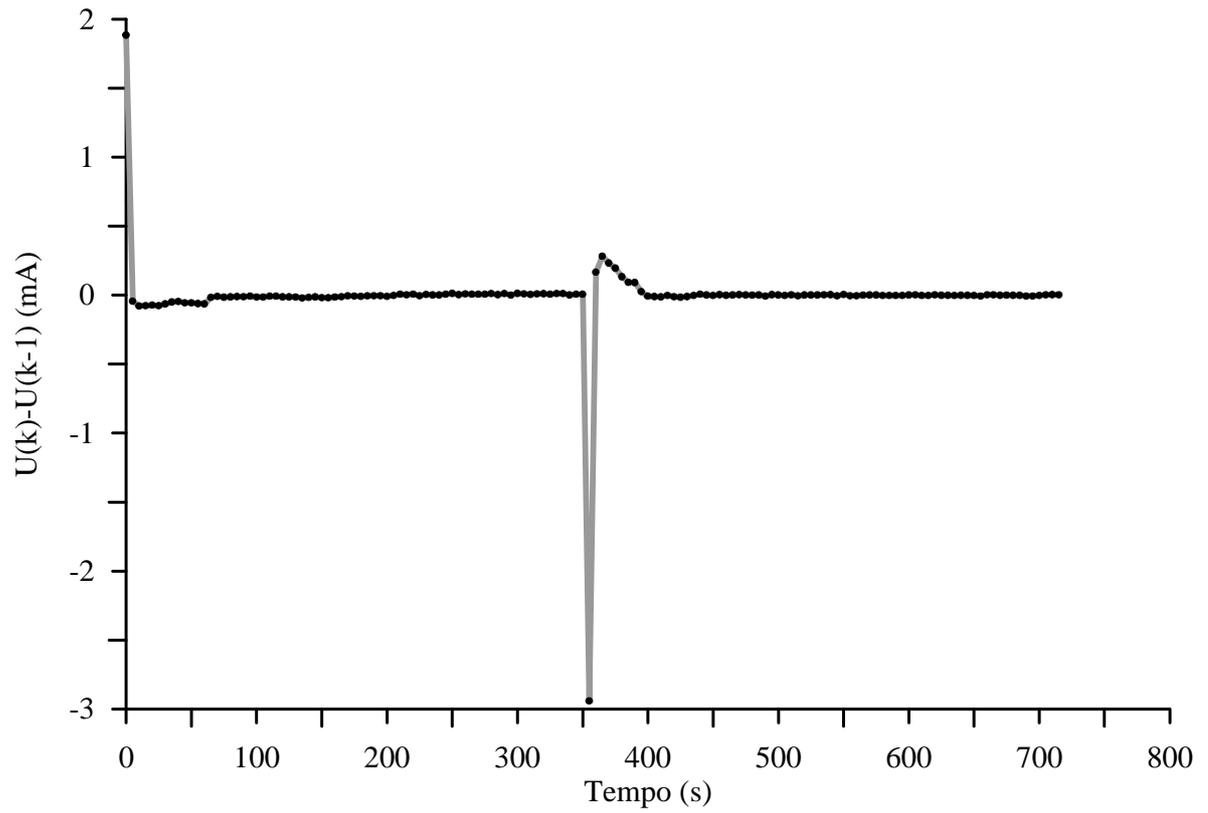


Figura 7.22: Variações das ações de controle do CSDPC (CSDPC-TAC-E)

### 7.2.2.b Controlador via síntese direta com adaptação (CSDA)

Foram utilizados os parâmetros da Tabela 7.2.

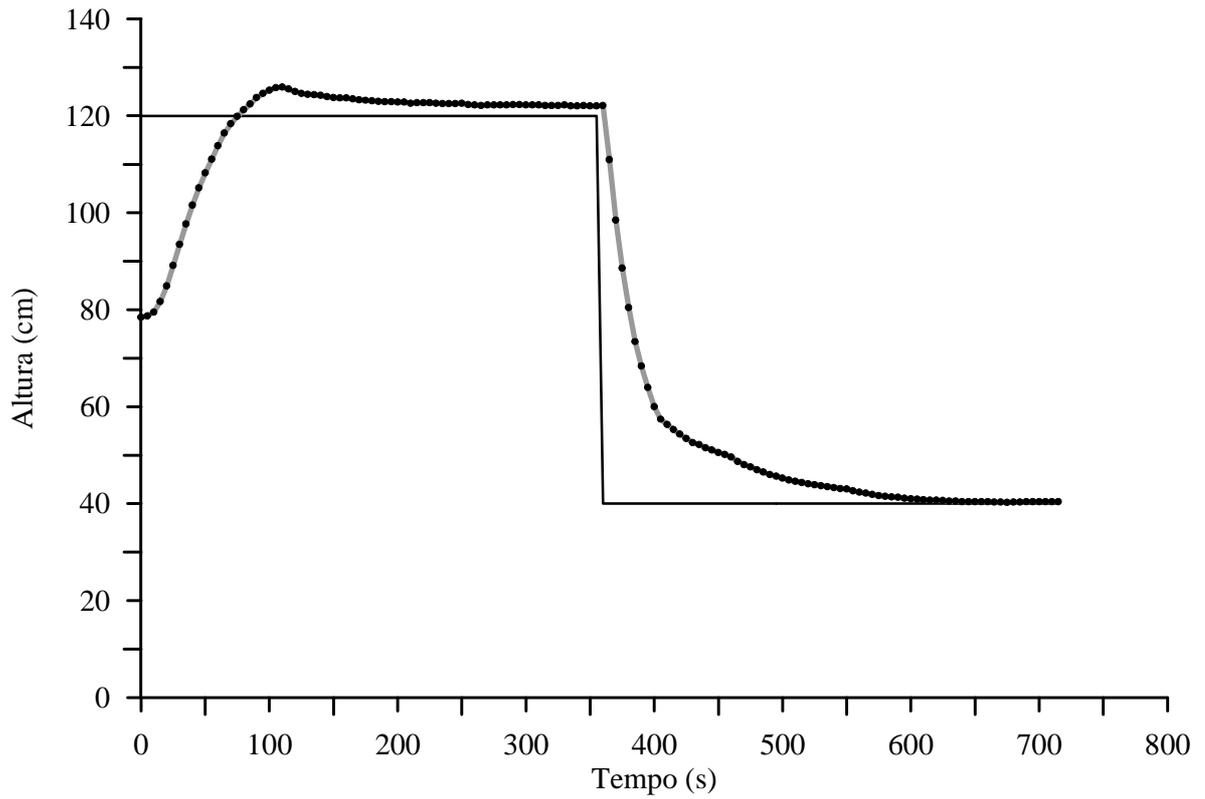


Figura 7.23: Desempenho do CSDA (CSDA-TAC-E)

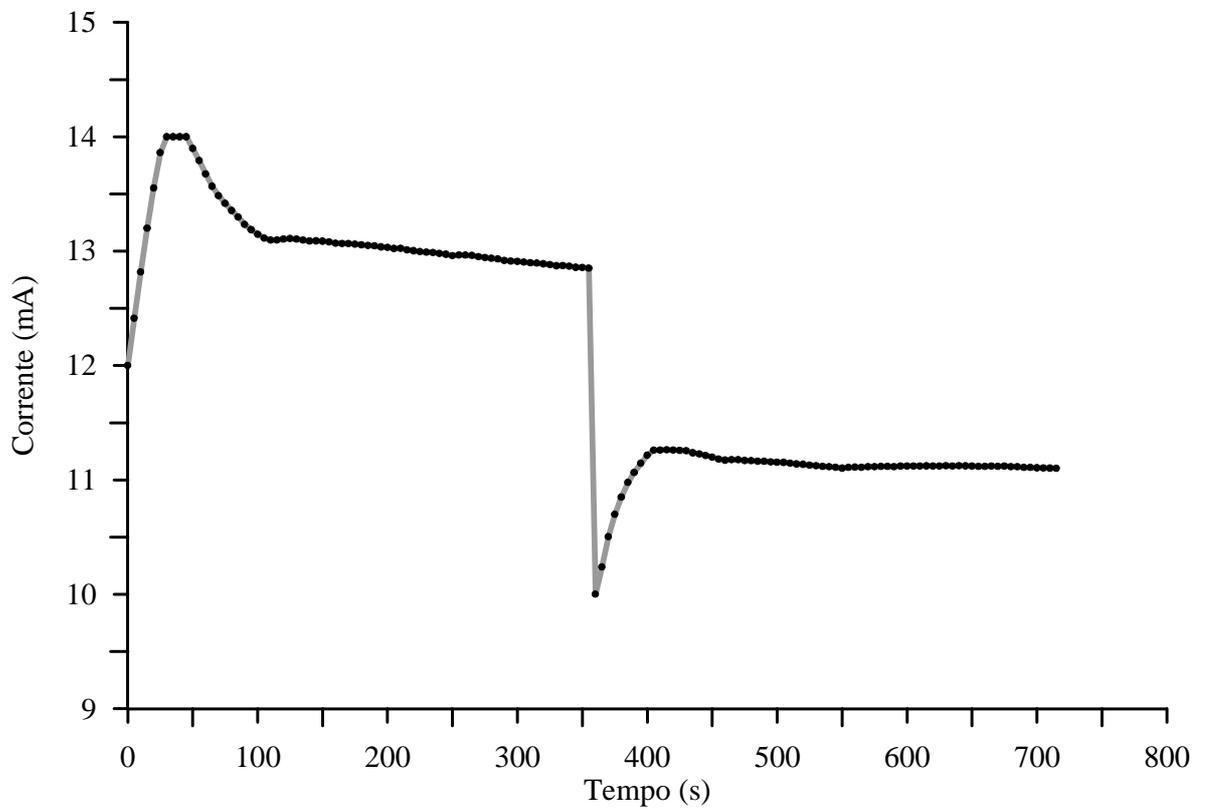


Figura 7.24: Ações de controle do CSDA (CSDA-TAC-E)

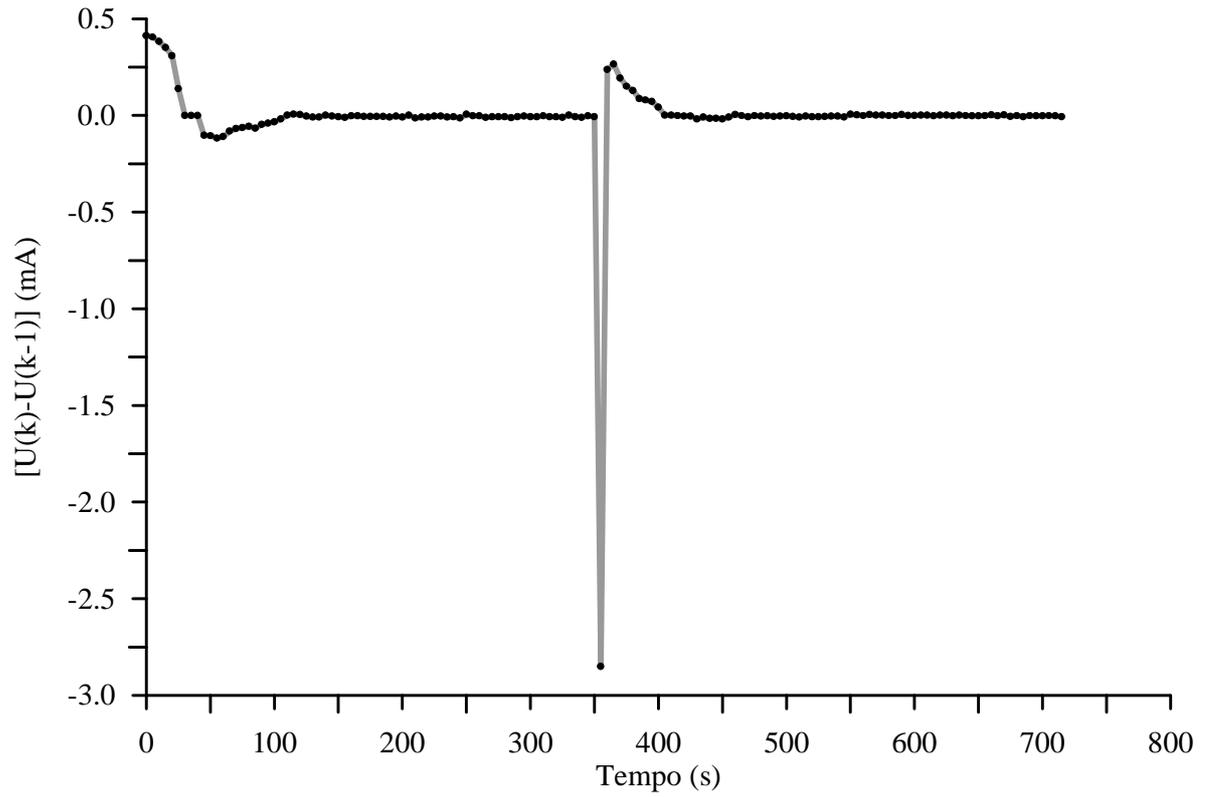


Figura 7.25: Variações das ações de controle do CSDA (CSDA-TAC-E)

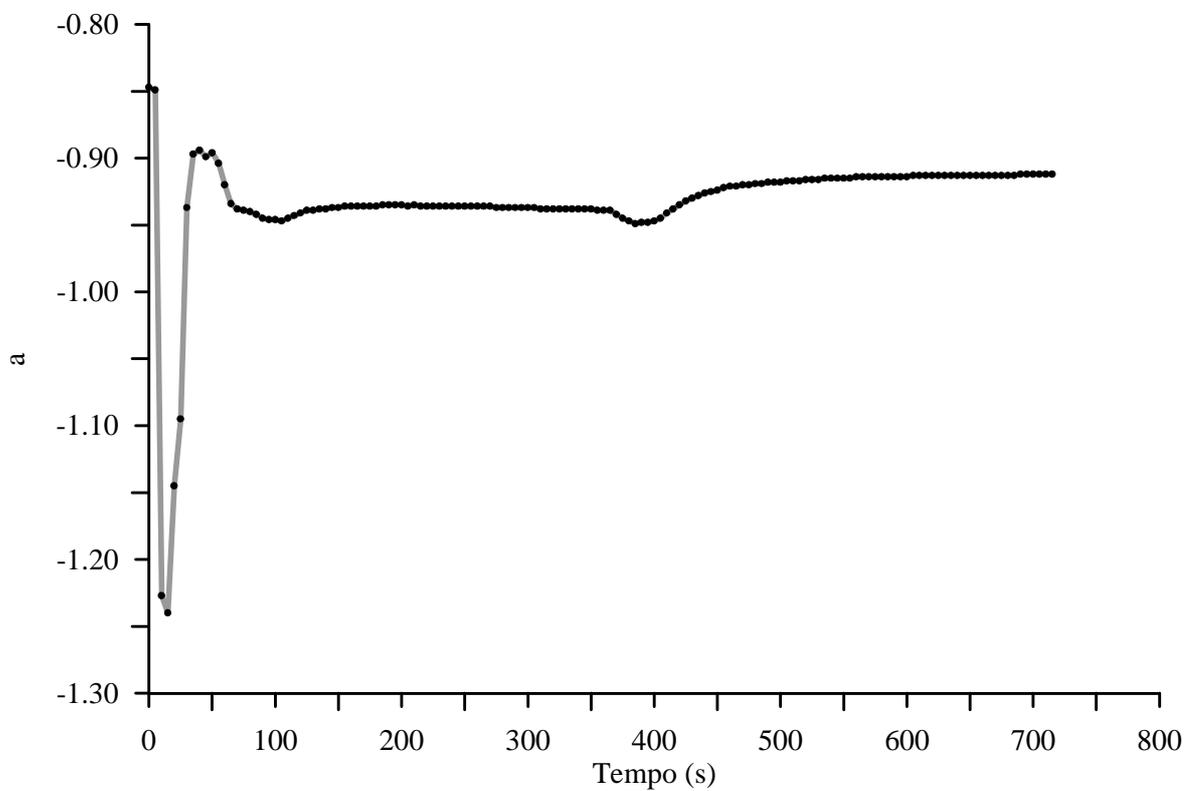


Figura 7.26: Parâmetro  $a$  estimado (CSDA-TAC-E)

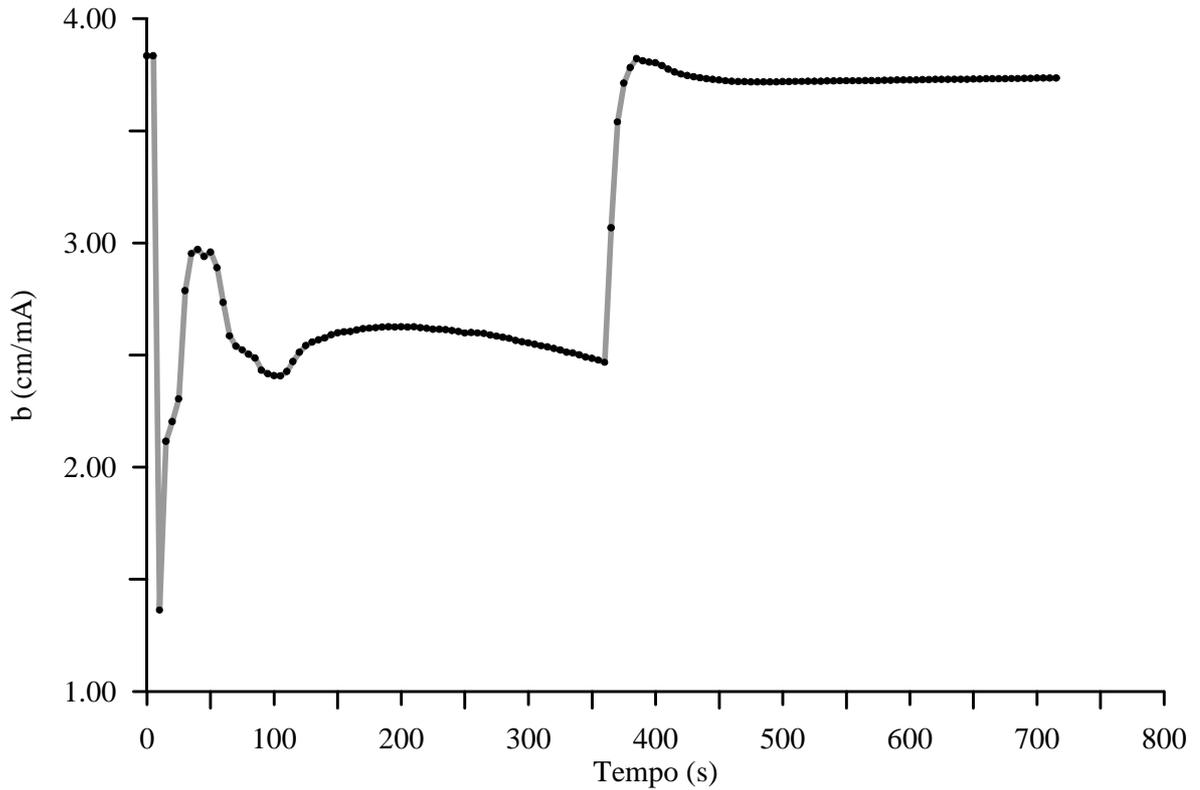


Figura 7.27: Parâmetro b estimado (CSDA-TAC-E)

No caso experimental o CSDA foi mais lento que o CSDPC. Na Figura 7.23 no começo (primeiro degrau) parece estar acontecendo *off-set* mas observando a Figura 7.24 nota-se que a corrente está caindo. Esta ação morosa do CSDA pode ser explicada observando-se a Figura 7.27, não houve tempo para o parâmetro b convergir para o valor real no primeiro degrau, note que na segunda mudança de *setpoint* os desempenhos do CSDPC e do CSDA foram parecidos.

### 7.2.2.c MPC com parâmetros constantes e restrições (MPCPCR-TAC-E)

Foram utilizados os parâmetros da Tabela 7.3

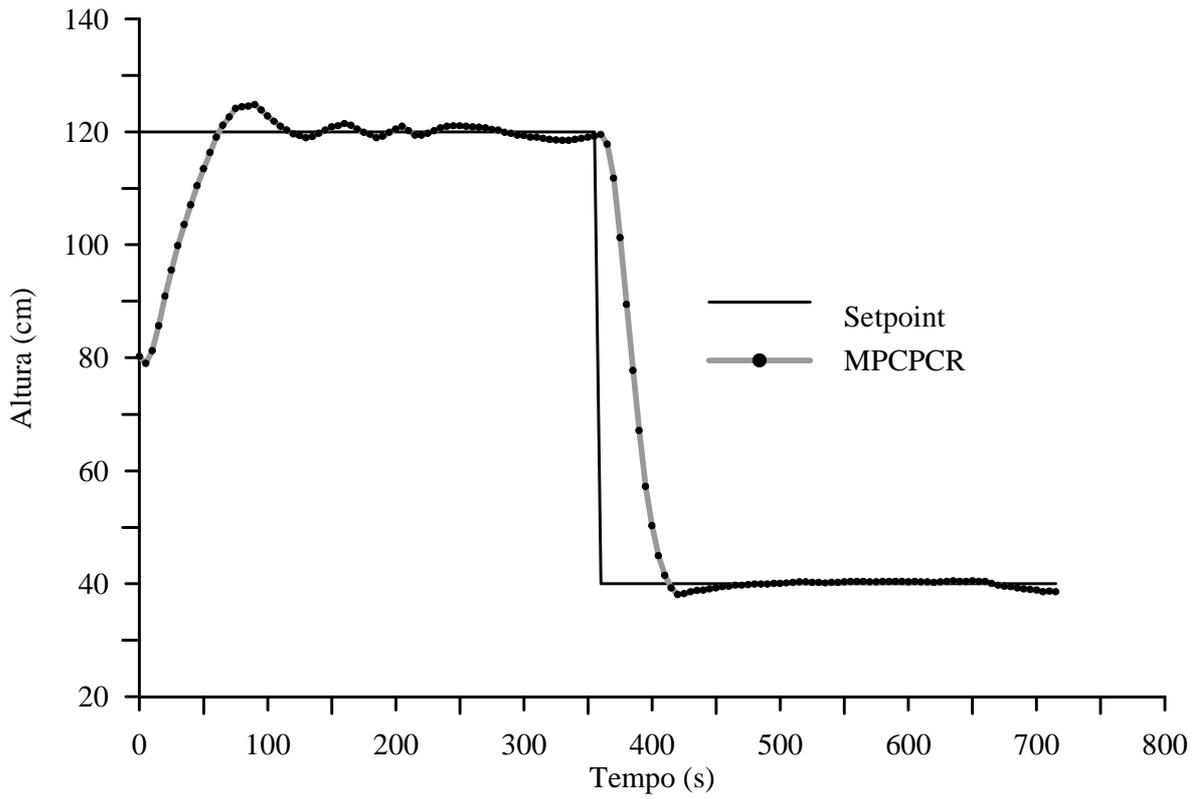


Figura 7.28: Desempenho do MPCPCR (MPCPCR-TAC-E)

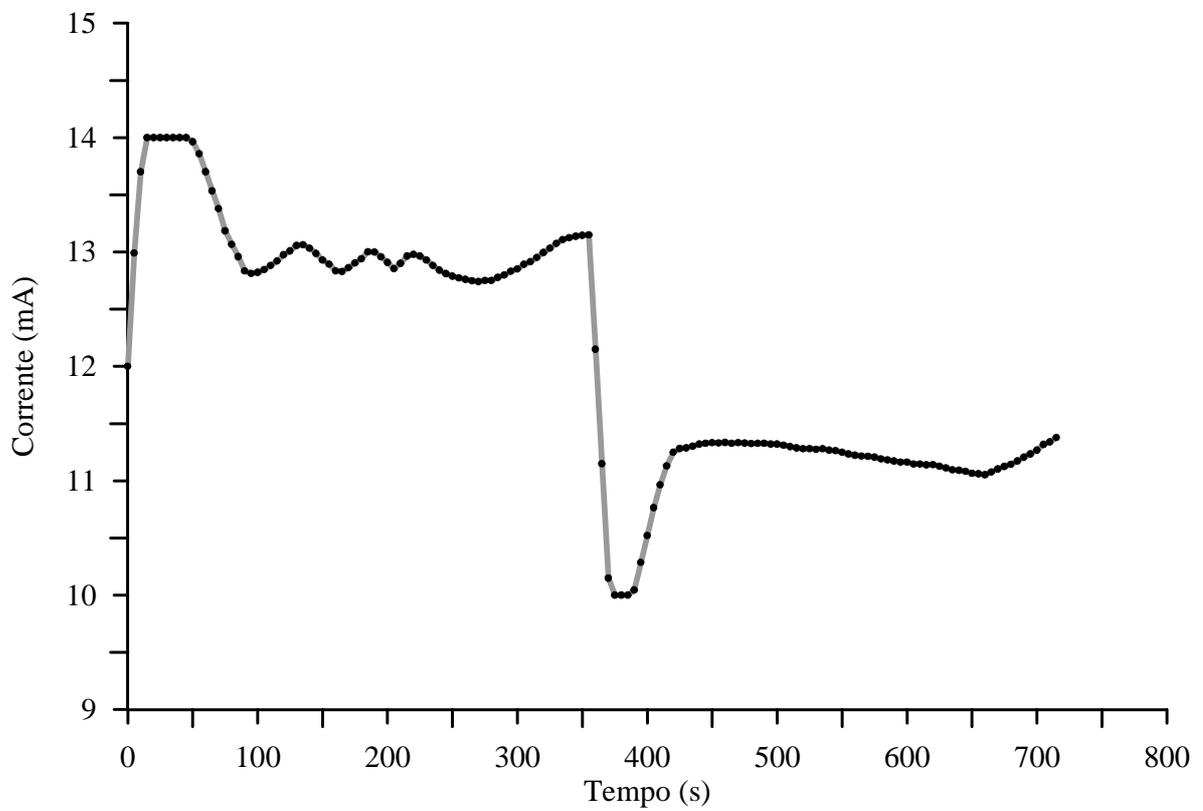


Figura 7.29: Ações de controle do MPCPCR (MPCPCR-TAC-E)

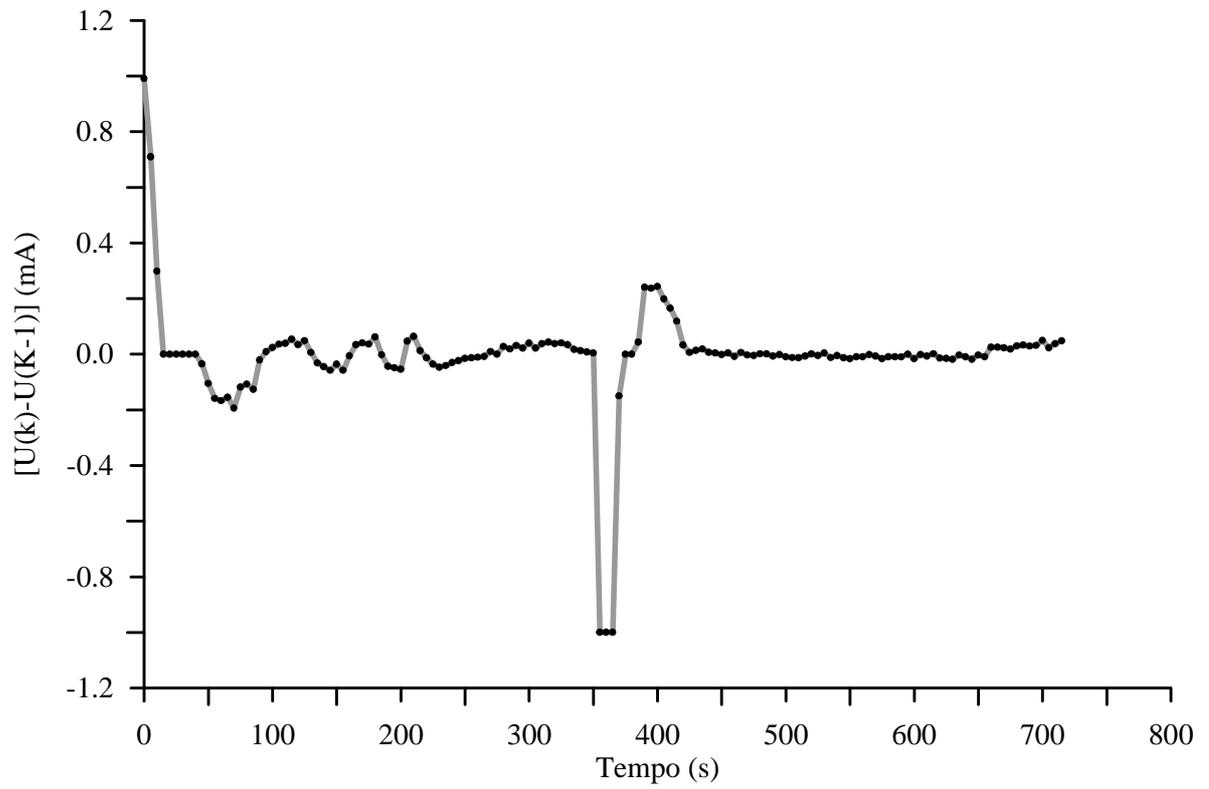


Figura 7.30: Variações das ações de controle do MPCPCR (MPCPCR-TAC-E)

#### 7.2.2.d MPC com adaptação e restrições (MPCAR)

Foram utilizados os mesmos parâmetros da Tabela 7.4.

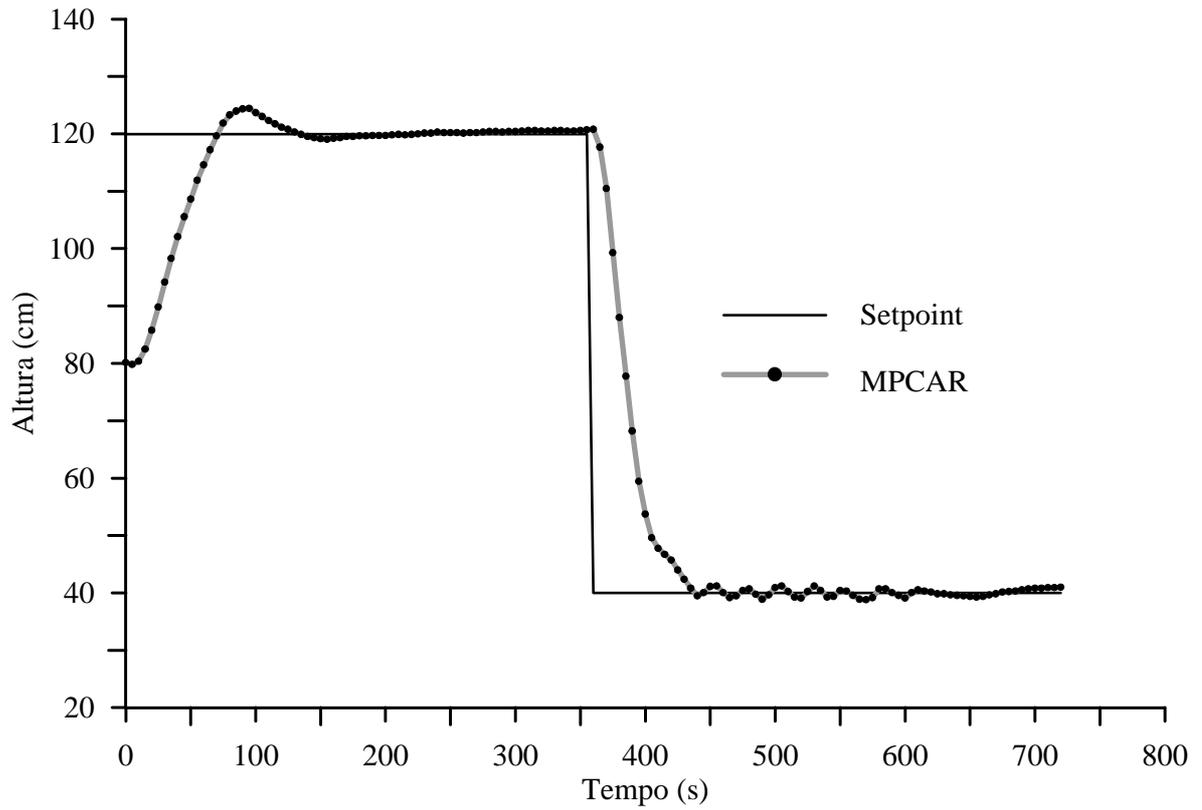


Figura 7.31: Desempenho do MPCAR (MPCAR-TAC-E)

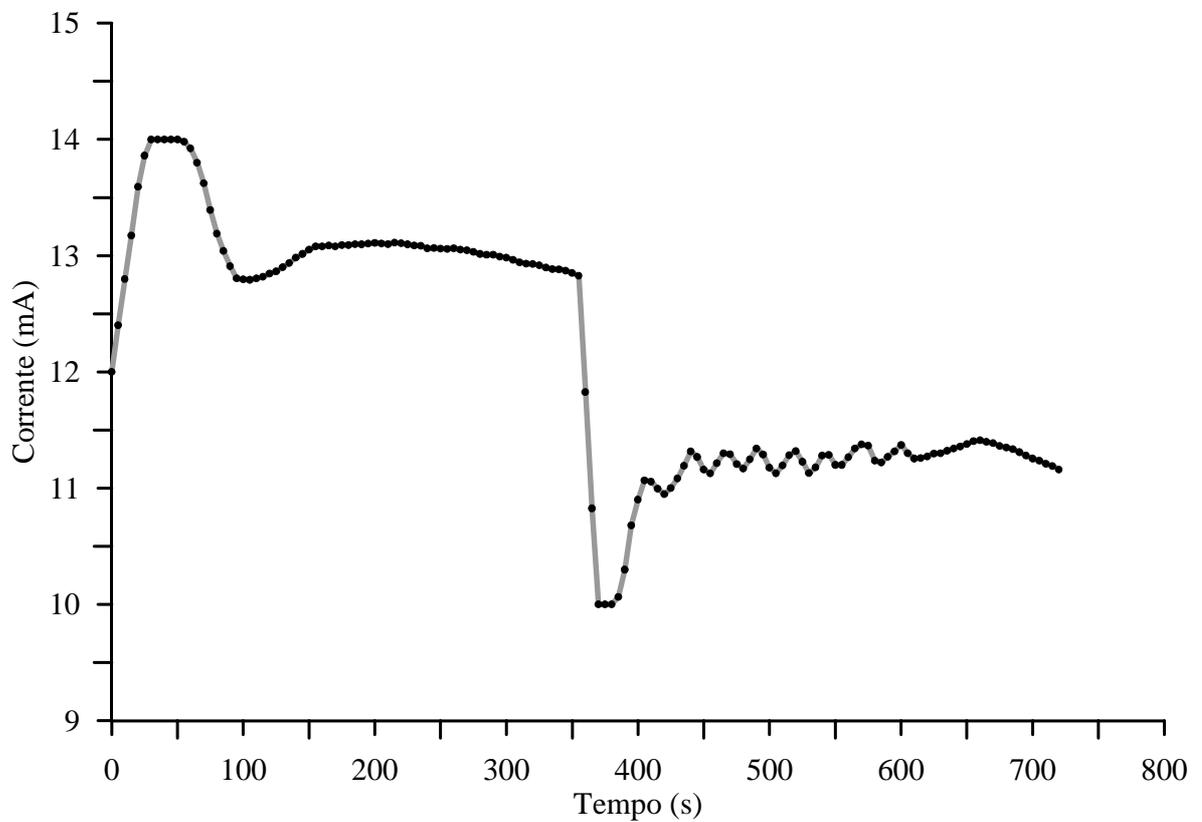


Figura 7.32: Ações de controle do MPCAR (MPCAR-TAC-E)

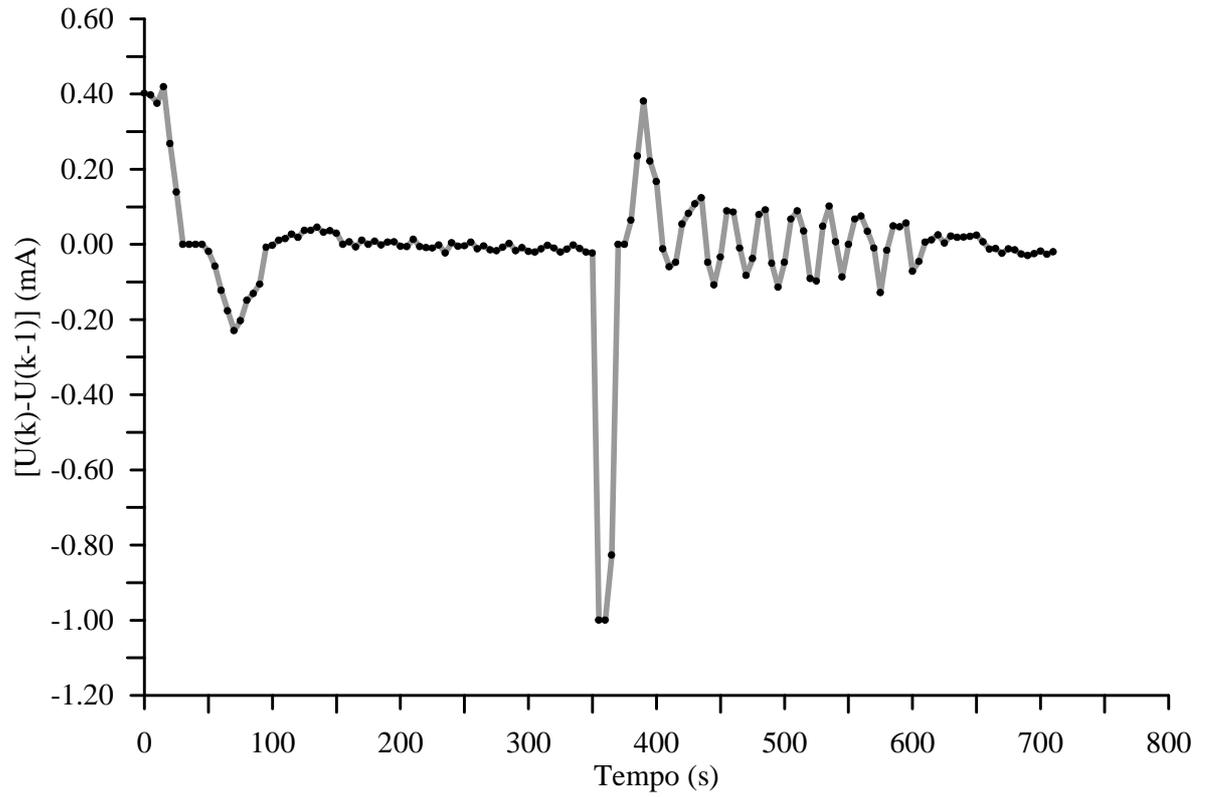


Figura 7.33: Variações das ações de controle do MPCAR (MPCAR-TAC-E)

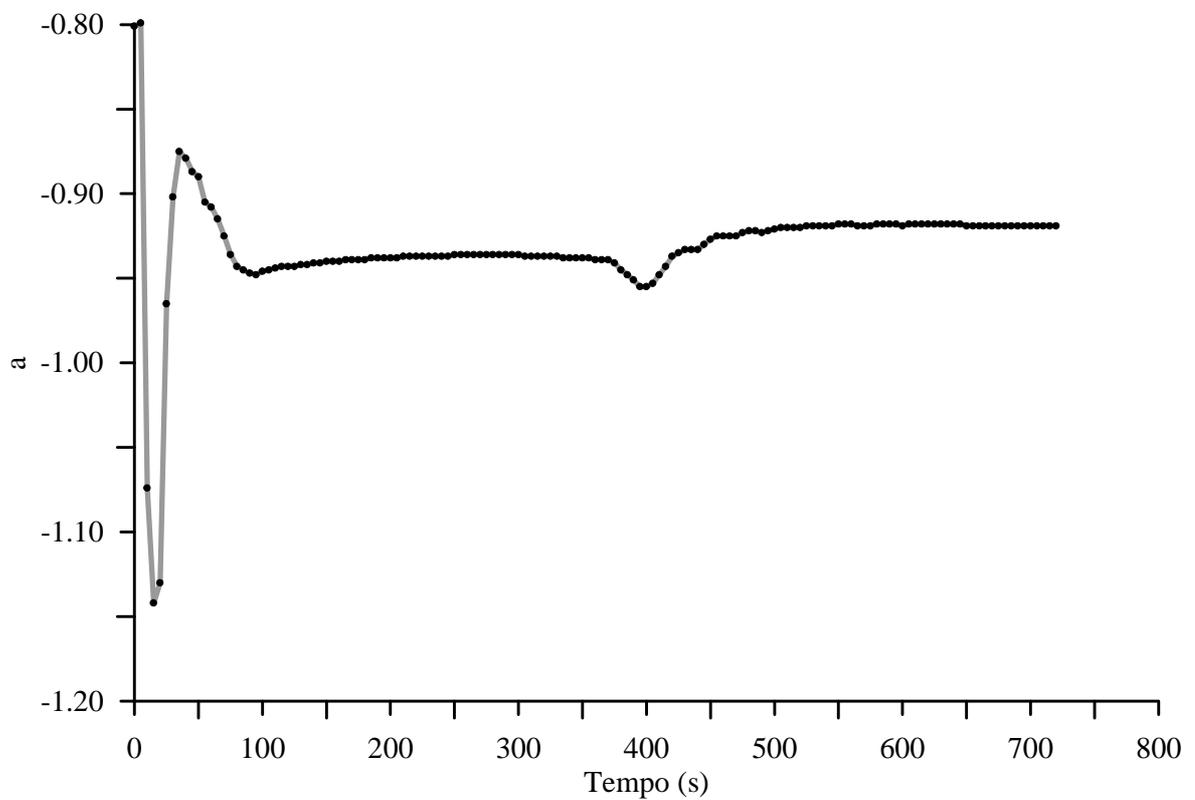


Figura 7.34: Parâmetro  $a$  estimado (MPCAR-TAC-E)

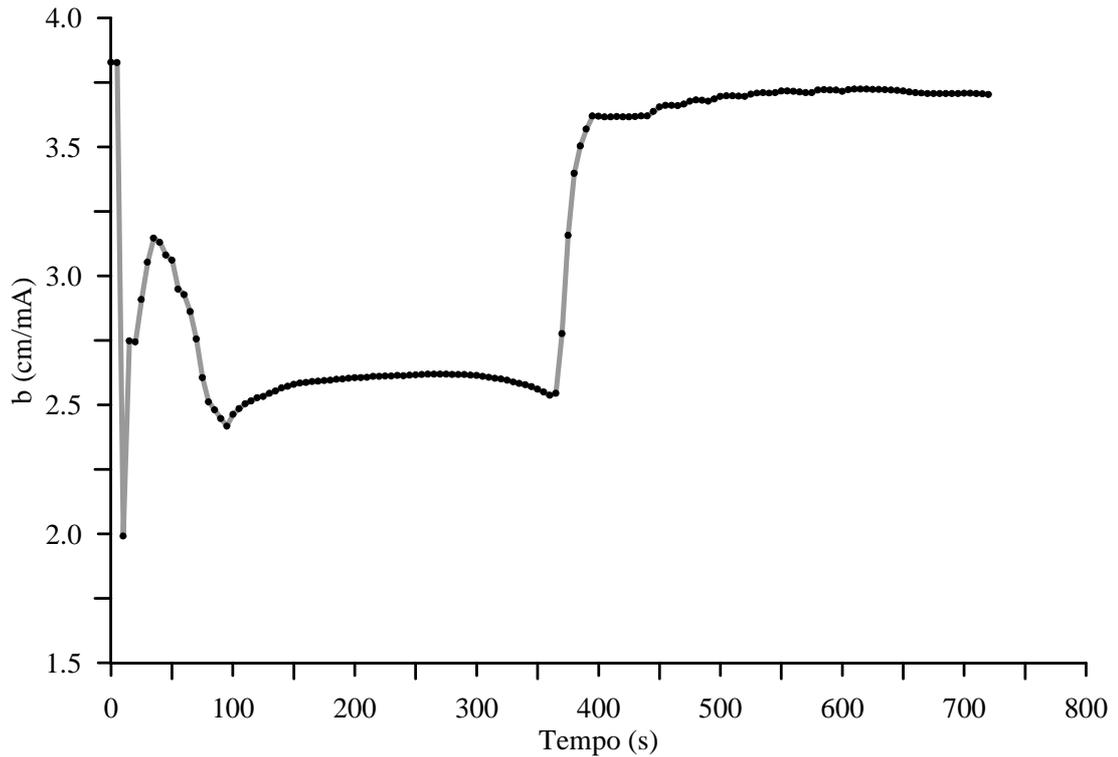


Figura 7.35: Parâmetro b estimado (MPCAR-TAC-E)

O MPCPCR tem desempenho parecido com o do MPCAR. São observadas oscilações nestes dois controladores que não ocorreram nas simulações. Os MPC's são muito mais sensíveis ao erro do que os CSD's. A provável causa das oscilações terem ocorrido é a histerese da válvula de controle. A Figura 7.36 mostra o comportamento da válvula em sua abertura e fechamento.

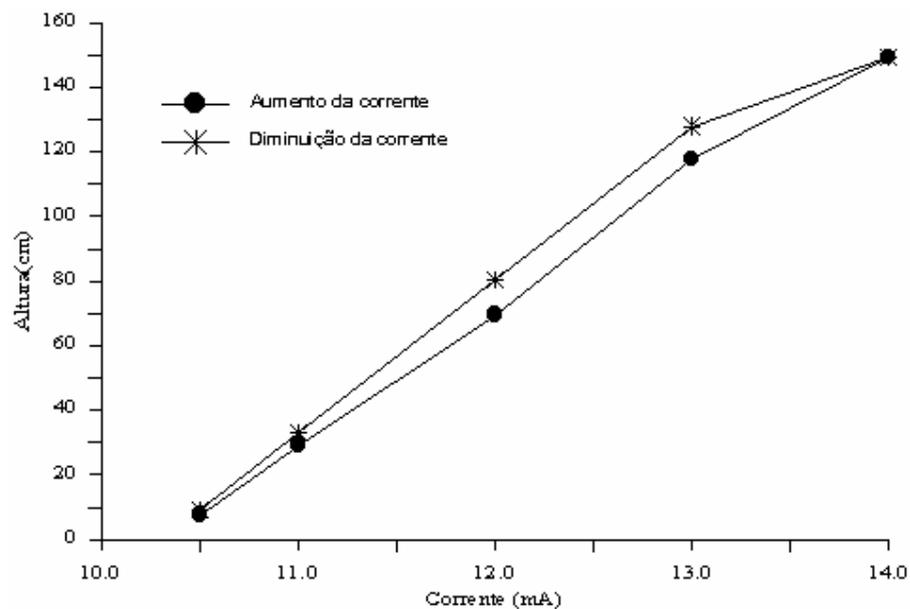


Figura 7.36: Histerese da válvula de controle (Tanque de área constante)

Observa-se que em alguns casos para a mesma corrente a altura chega ter a diferença de 10 cm. Isto explica o motivo dos MPC's não se comportarem bem quando o erro é pequeno. Experimentalmente pôde-se notar que a válvula de controle não respondia a pequenas variações de corrente (como por exemplo  $U(k)-U(k-1) = 0,1 \text{ mA}$ ), por isso os controladores iam aumentando a mesma até que em um determinado instante a válvula abria e o sistema respondia abruptamente. A partir deste momento o controlador sentia o erro e novamente respondia com o fechamento da válvula e o problema voltava a se repetir. Mas como comentado anteriormente, este problema foi mais pronunciado nos MPC's, os CSD's foram menos sensíveis a este tipo de problema.

O efeito da histerese foi amplificado pela faixa de corrente estreita que foi utilizada.

Como foi previsto nas simulações, os MPC's apresentaram melhor desempenho que os CSD's, principalmente quando são observadas as ações de controle. Os MPC's agredem menos o elemento final de controle.

### **7.3 Tanque com área variável**

#### **7.3.1 Resultados simulados**

Para representar o processo, foi utilizado o modelo identificado do tanque de área variável descrito no Capítulo 6.

Nas simulações a seguir foi adicionado ruído aleatório à variável de saída. Nas duas seções com menor diâmetro o ruído teve amplitude máxima de  $\pm 0.5 \text{ cm}$  e nas outras duas com maior diâmetro a amplitude máxima foi de  $\pm 0.2 \text{ cm}$ .

##### **7.3.1.a Controlador via síntese direta com parâmetros constantes (CSDPC-TAV-S)**

Aqui serão ilustradas duas simulações: a primeira utilizando os parâmetros da última seção (diâmetro menor) do tanque com área variável e a segunda utilizando os parâmetros da primeira seção (diâmetro maior).

- Primeira simulação:

Tabela 7.5: Parâmetros utilizados na primeira simulação do CSDPC (CSDPC-TAV-S)

Parâmetro	Valor
$K$	38,72 cm/mA
$\tau$	6,05 s
$\tau_c$	0,5 $\tau$
$U_{\min}$	9,7 mA
$U_{\max}$	14 mA
$\Delta t$	1 s

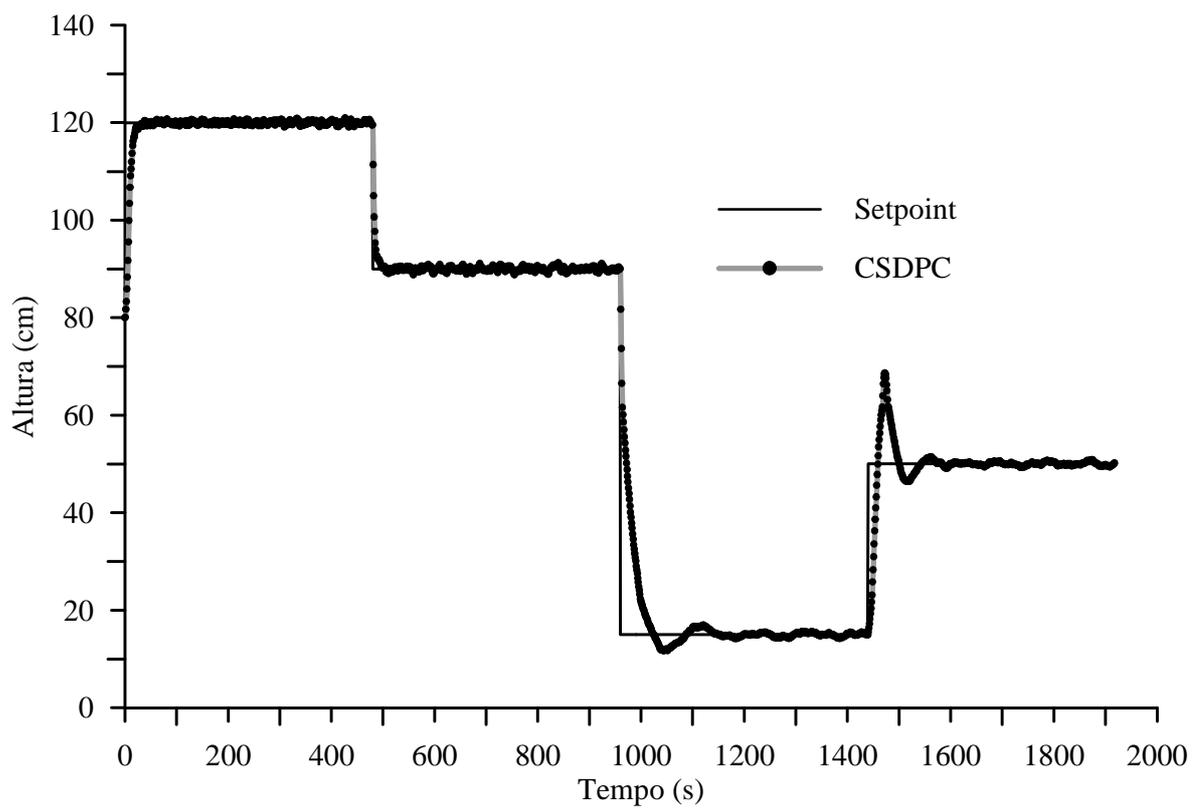


Figura 7.37: Desempenho do CSDPC na primeira simulação (CSDPC-TAV-S)

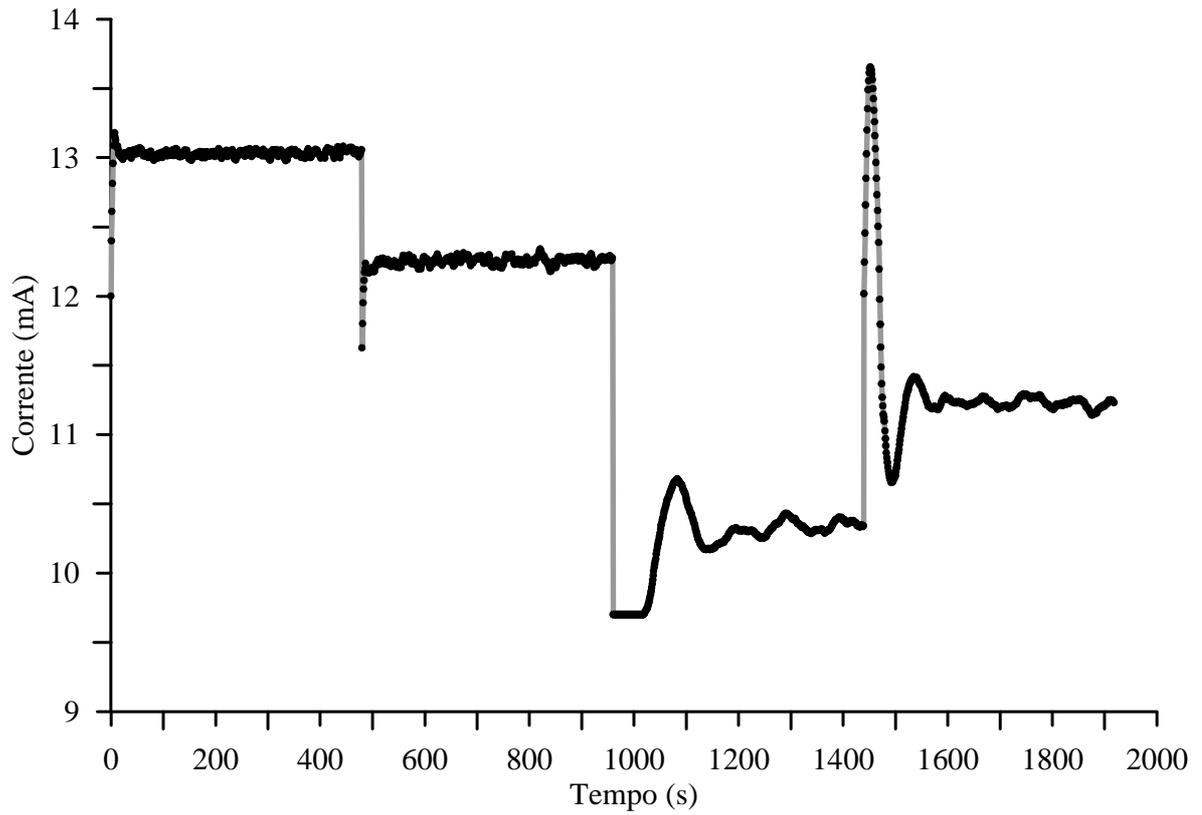


Figura 7.38: Ações de controle do CSDPC na primeira simulação (CSDPC-TAV-S)

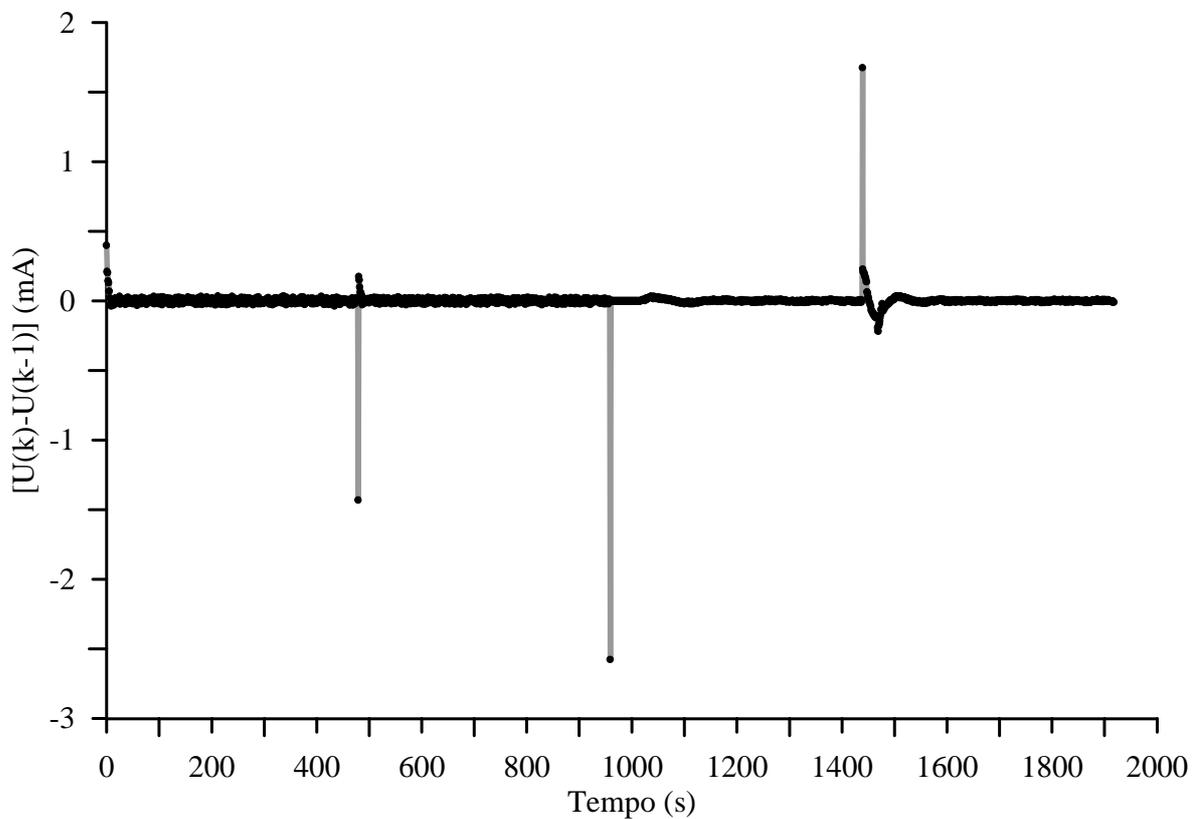


Figura 7.39: Variações das ações de controle do CSDPC na primeira simulação (CSDPC-TAV-S)

- Segunda simulação:

Tabela 7.6: Parâmetros utilizados no CSDPC na segunda simulação (CSDPC-TAV-S)

Parâmetro	Valor
$K$	38,72 cm/mA
$\tau$	96,90 s
$\tau_c$	0,5 $\tau$
$U_{\min}$	9,7 mA
$U_{\max}$	14 mA
$\Delta t$	1 s

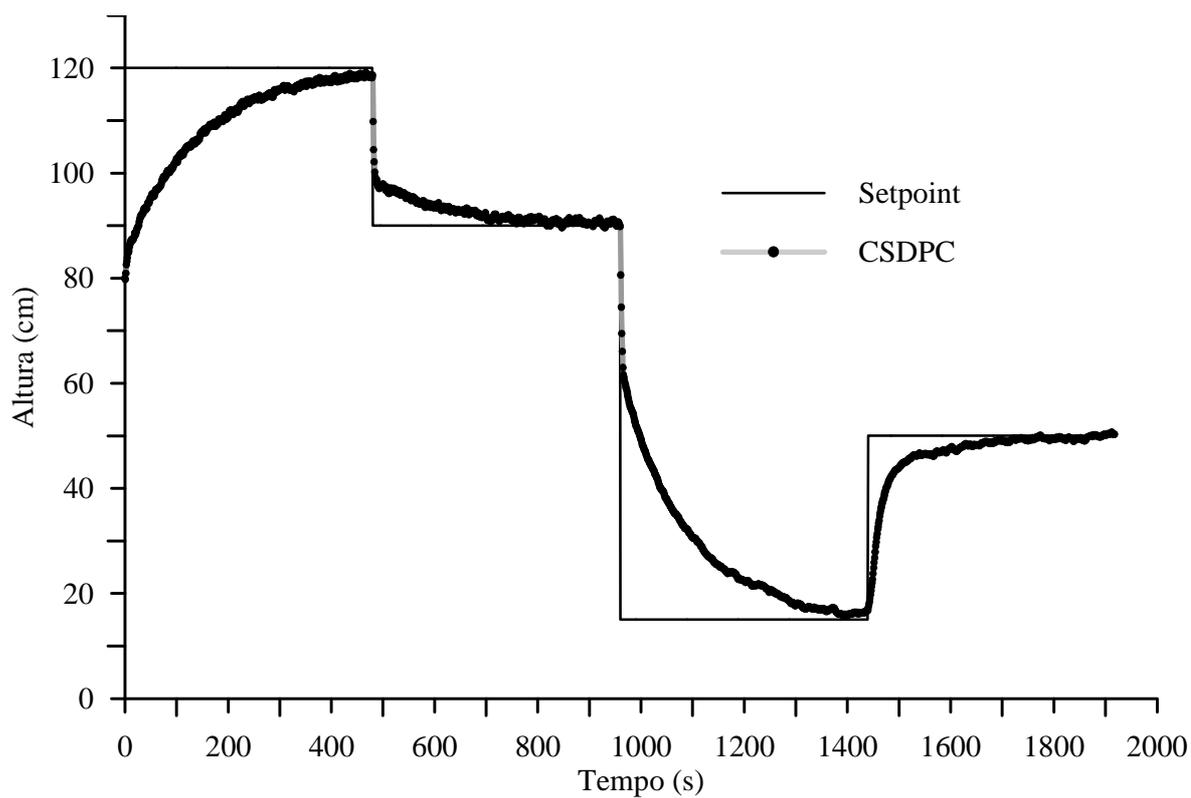


Figura 7.40: Desempenho do CSDPC na segunda simulação (CSDPC-TAV-S)

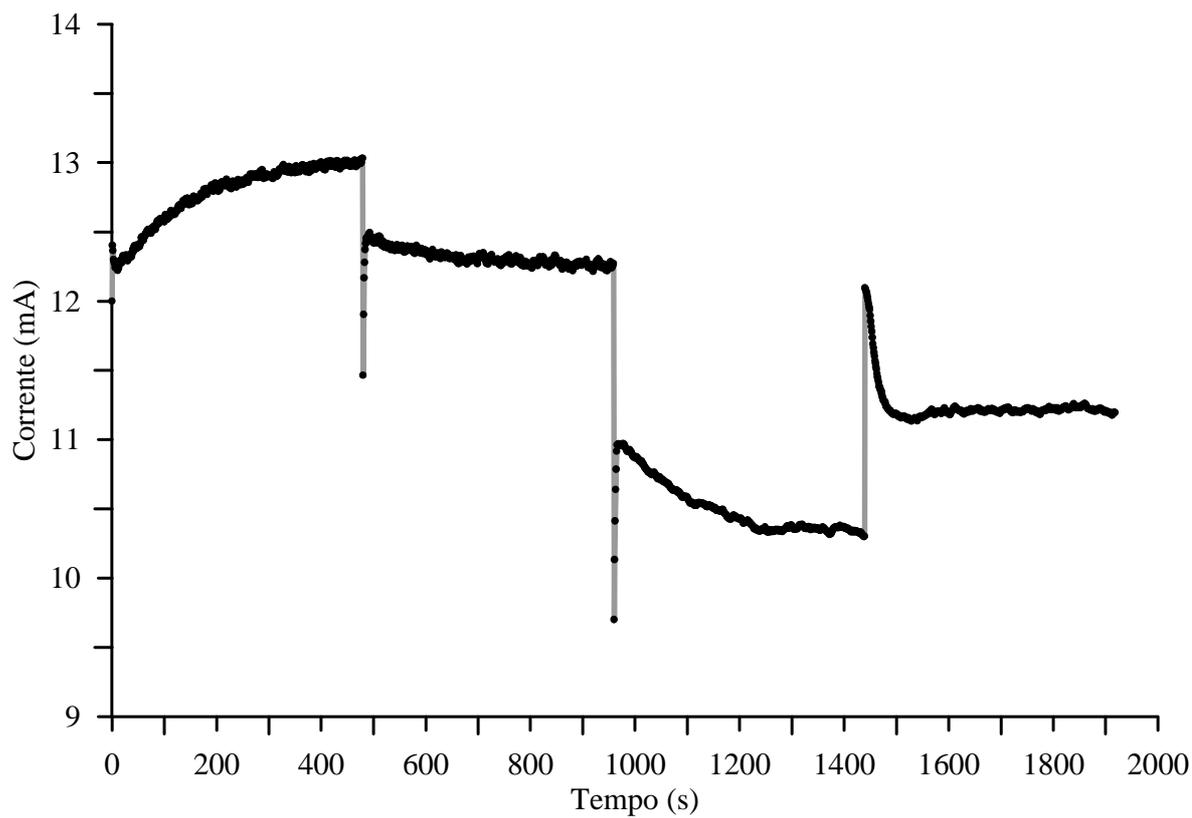


Figura 7.41: Ações de controle do CSDPC na segunda simulação (CSDPC-TAV-S)

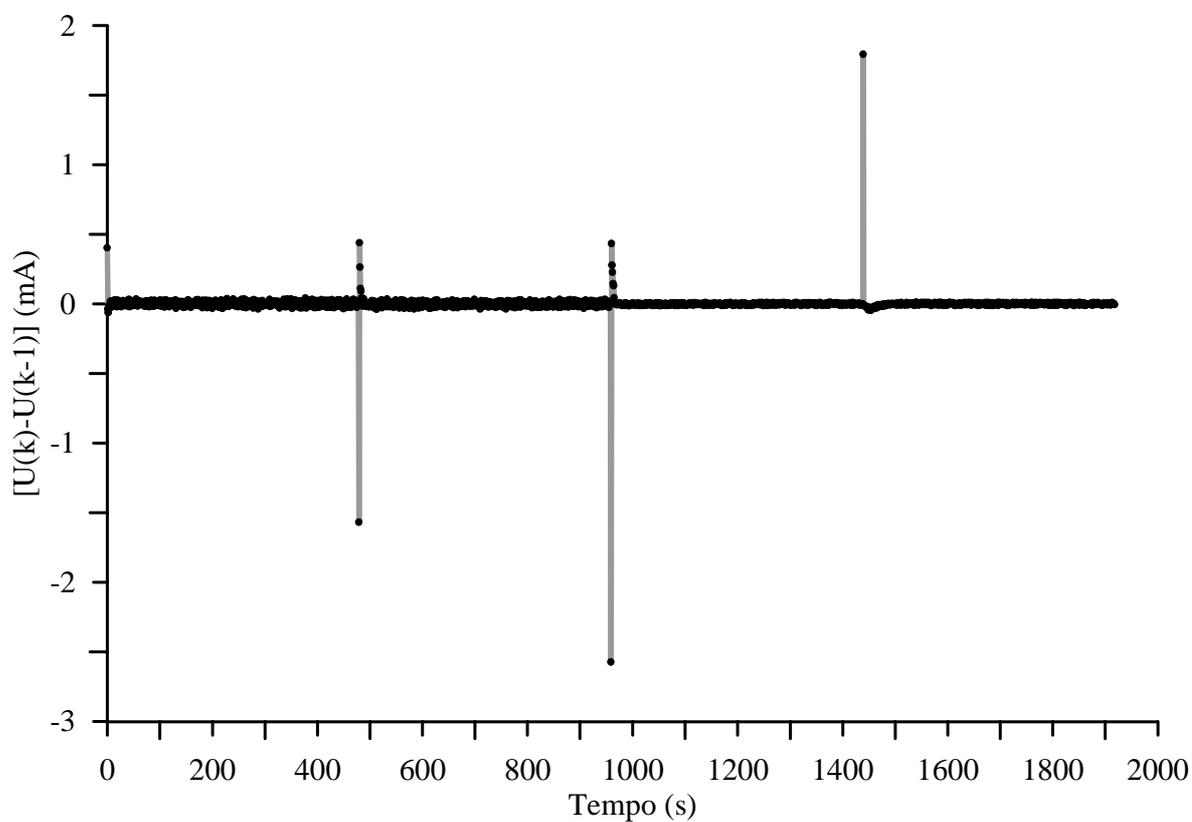


Figura 7.42: Variações das ações de controle do CSDPC na segunda simulação (CSDPC-TAV-S)

Pode ser observado que ao se ajustar o controlador para a parte superior, o desempenho do mesmo cai na parte inferior e vice-versa. Note na Figura 7.37 como houve *overshoot* e *undershoot* nas seções inferiores e na Figura 7.40 como o controlador ficou lento.

### 7.3.1.b Controlador via síntese direta com adaptação (CSDA-TAV-S)

Foram utilizados os seguintes parâmetros para o estimador e o controlador:

Tabela 7.7: Parâmetros utilizados no CSDA (CSDA-TAV-S)

Parâmetro	Valor
$\Sigma_0$	10
$\xi$	100
$\alpha$	10000
G	2
$U_{\min}$	9,7 mA
$U_{\max}$	14 mA
$\Delta t$	1 s

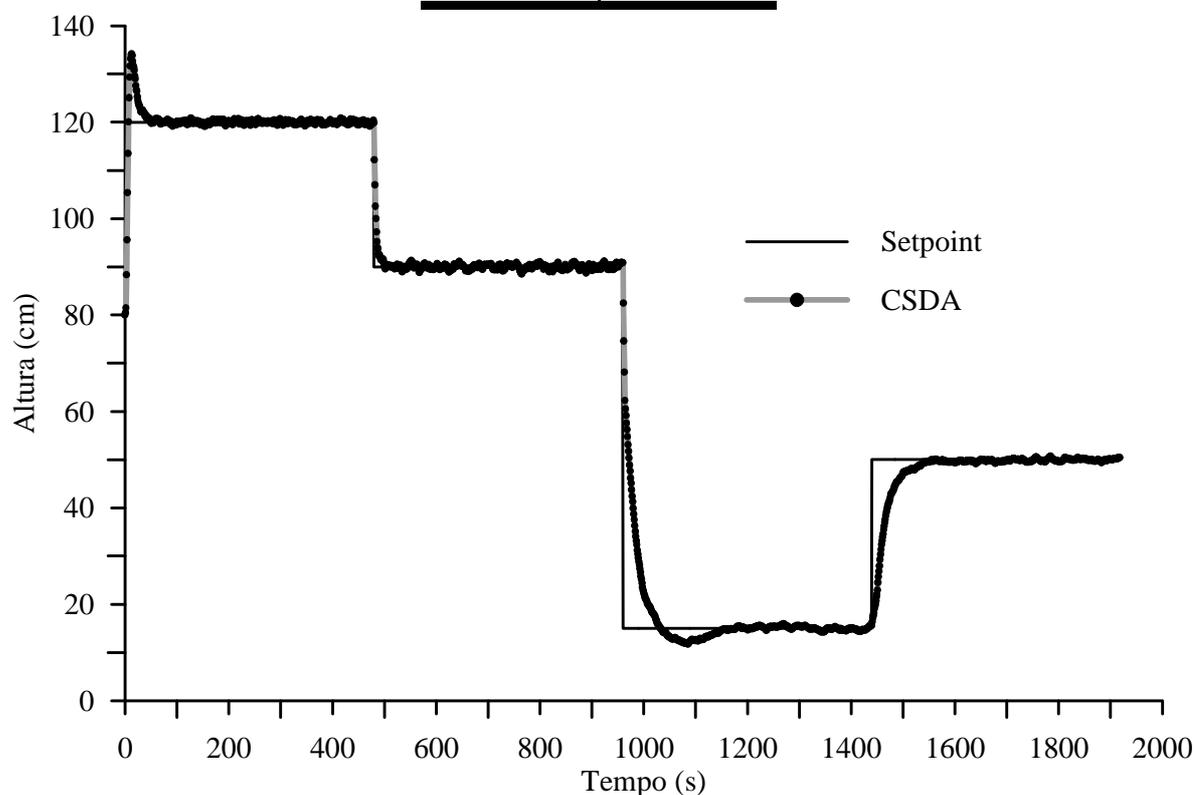


Figura 7.43: Desempenho do CSDA (CSDA-TAV-S)

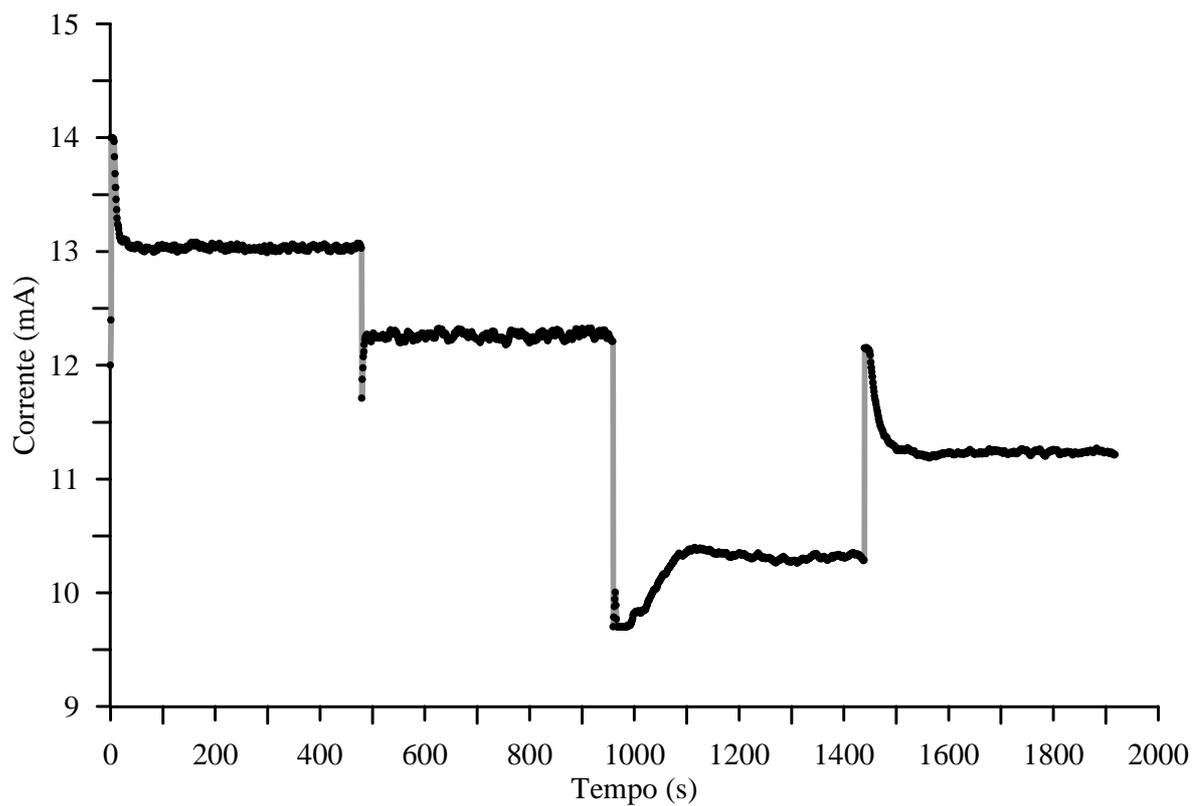


Figura 7.44: Ações de controle do CSDA (CSDA-TAV-S)

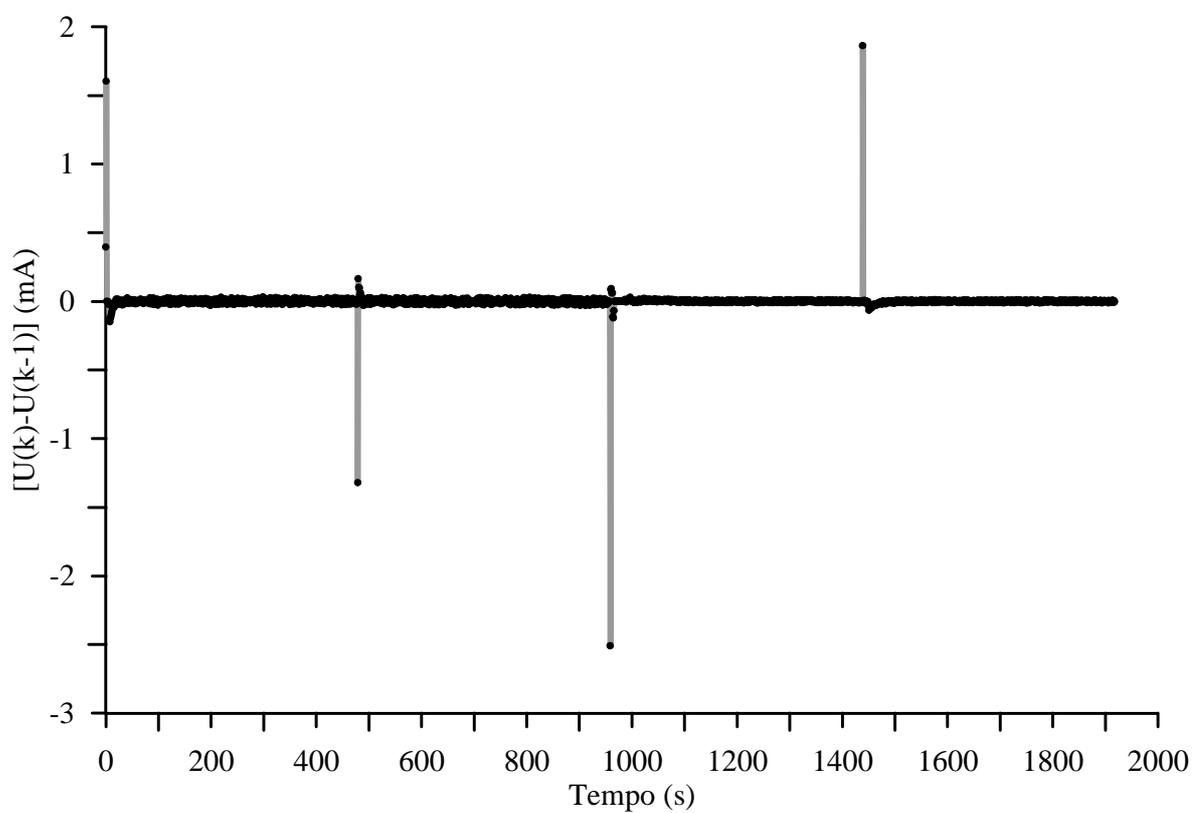
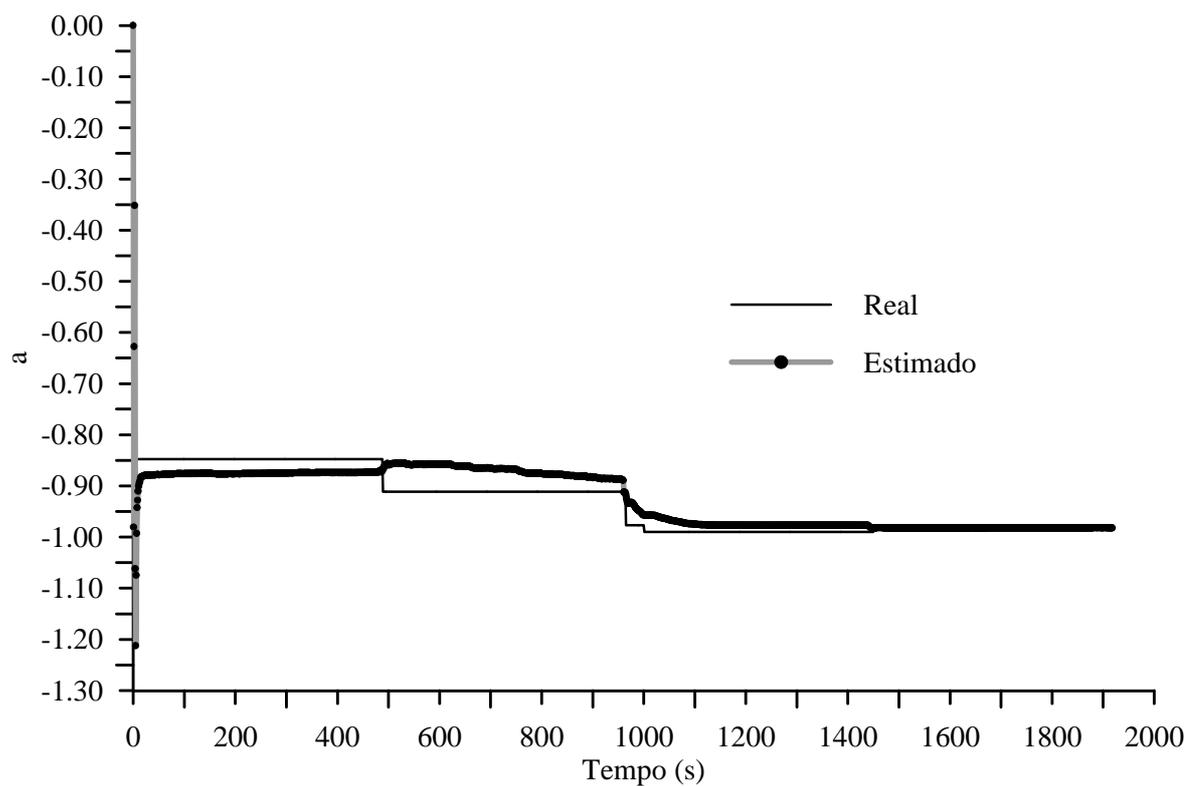
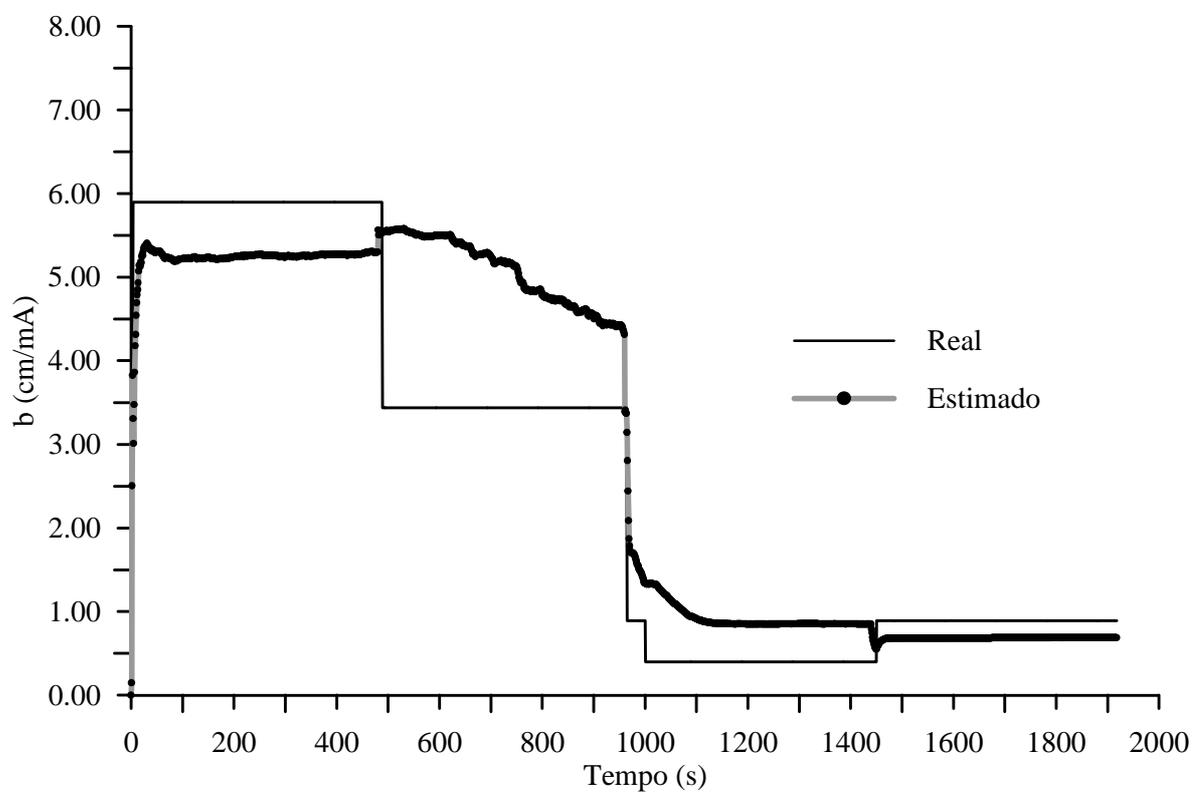


Figura 7.45: Variações das ações de controle do CSDA (CSDA-TAV-S)

Figura 7.46: Parâmetro  $a$ , real e estimado (CSDA-TAV-S)Figura 7.47: Parâmetro  $b$ , real e estimado (CSDA-TAV-S)