

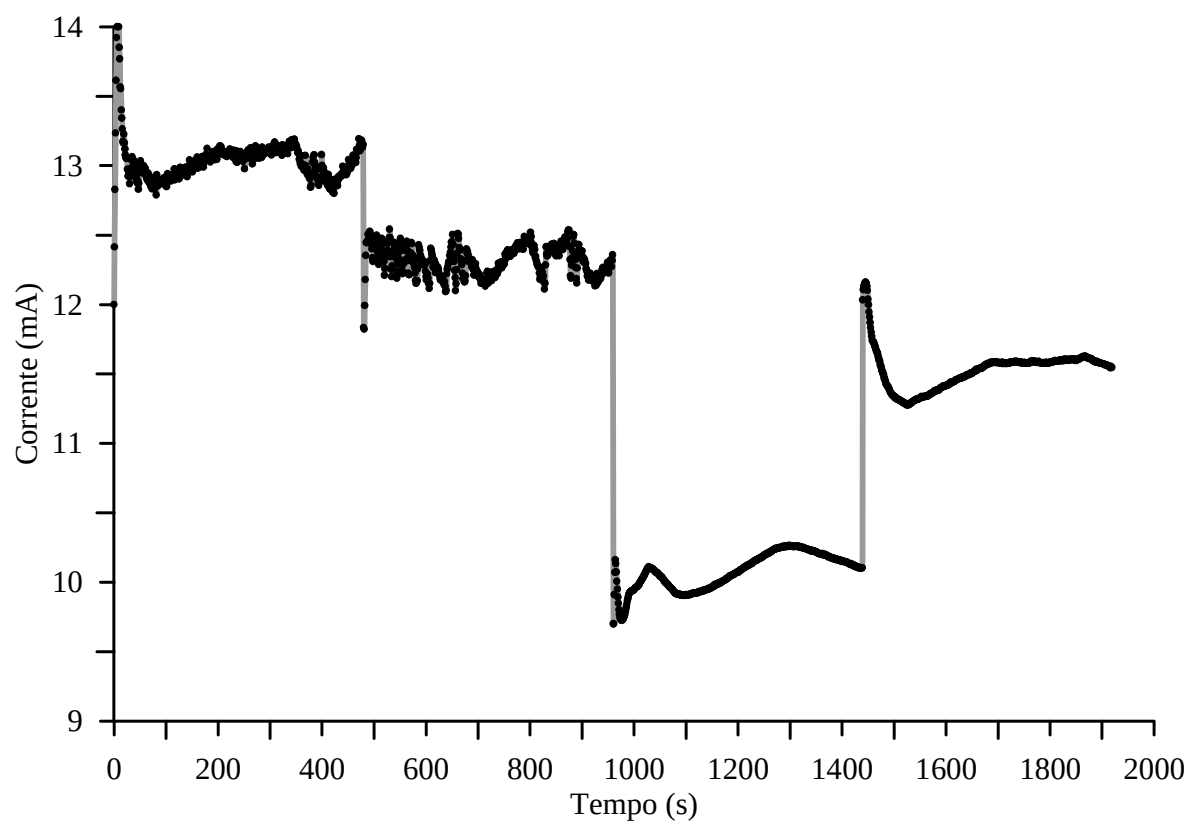


Figura 7.66: Ações de controle do CSDA (CSDA-TAV-E)

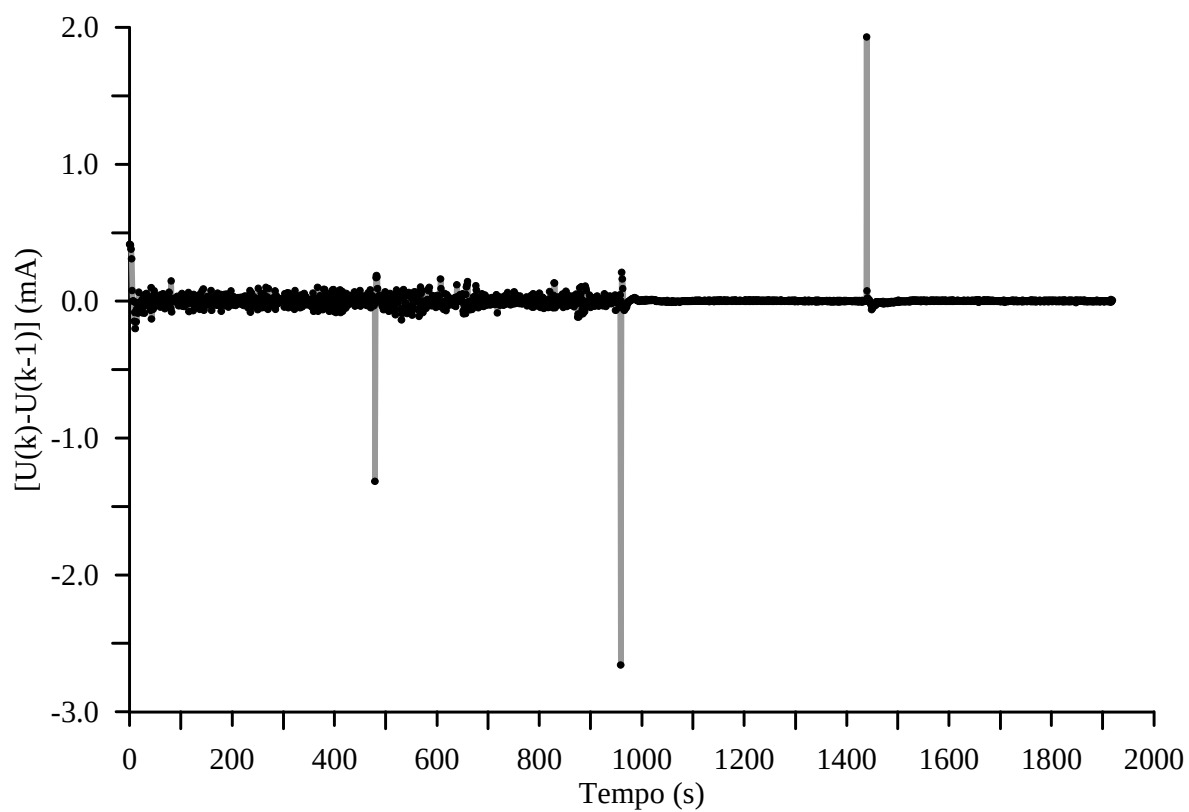
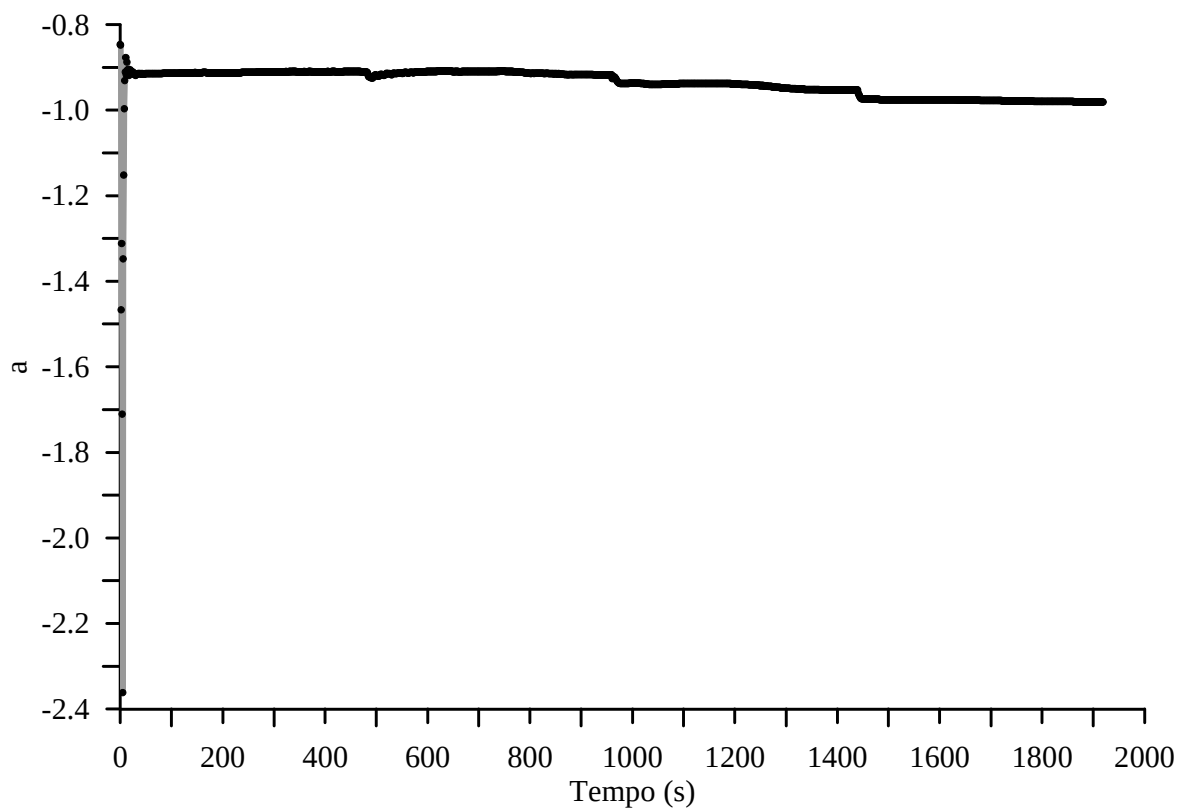
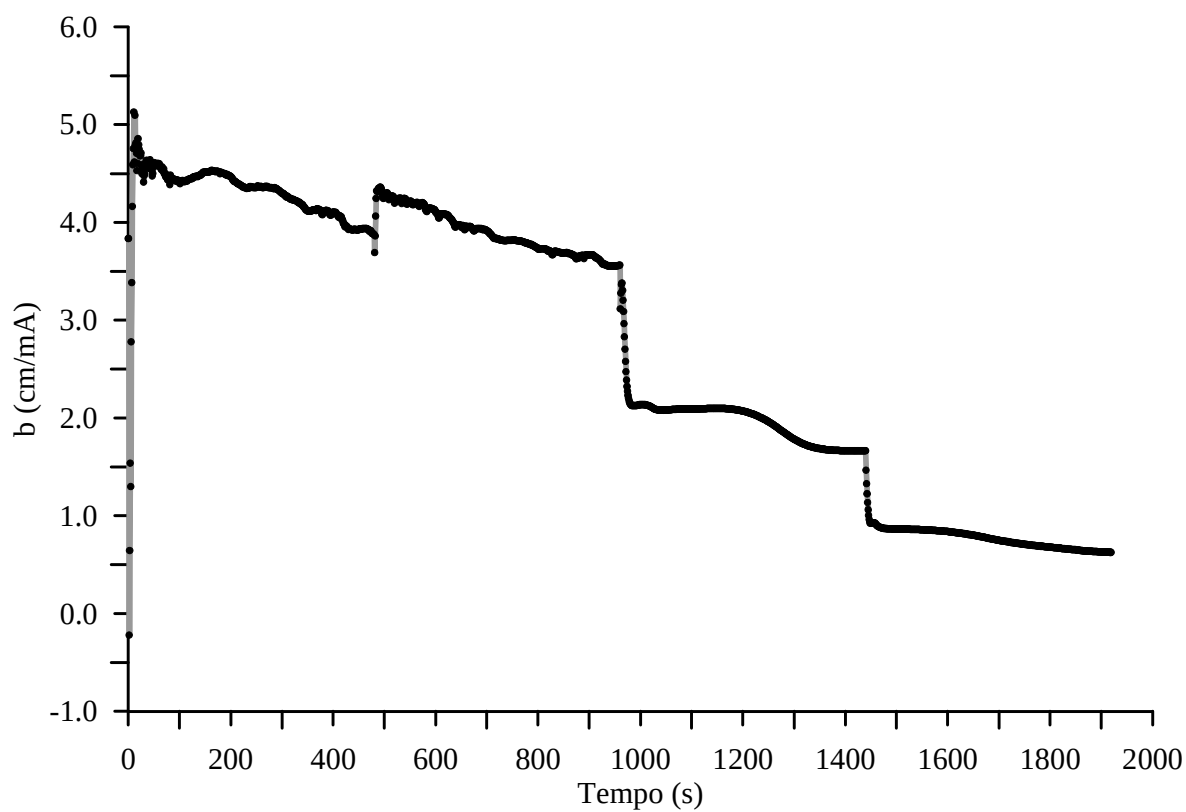


Figura 7.67: Variações das ações de controle do CSDA (CSDA-TAV-E)

Figura 7.68: Parâmetro a estimado (CSDA-TAV-E)Figura 7.69: Parâmetro b estimado (CSDA-TAV-E)

A utilização da adaptação melhorou o desempenho do CSD. Na Figura 7.65 pode ser notado que na partida do algoritmo ocorreu um *overshoot*, isto era de se esperar, pois o algoritmo ainda está se adaptando ao sistema. Assim que os parâmetros estimados se estabilizam o controlador começa a operar normalmente. Como o sistema real é muito ruidoso, os parâmetros utilizados no estimador foram maiores dos que os utilizados na simulação.

7.3.2.c MPC com parâmetros constantes e restrições (MPCPCR-TAV-E)

Foram realizados dois experimentos: no primeiro foram aplicados os parâmetros do tanque com menor diâmetro e no segundo os parâmetros do tanque de maior diâmetro.

- Primeiro experimento:

Os parâmetros utilizados são os mesmos da Tabela 7.8

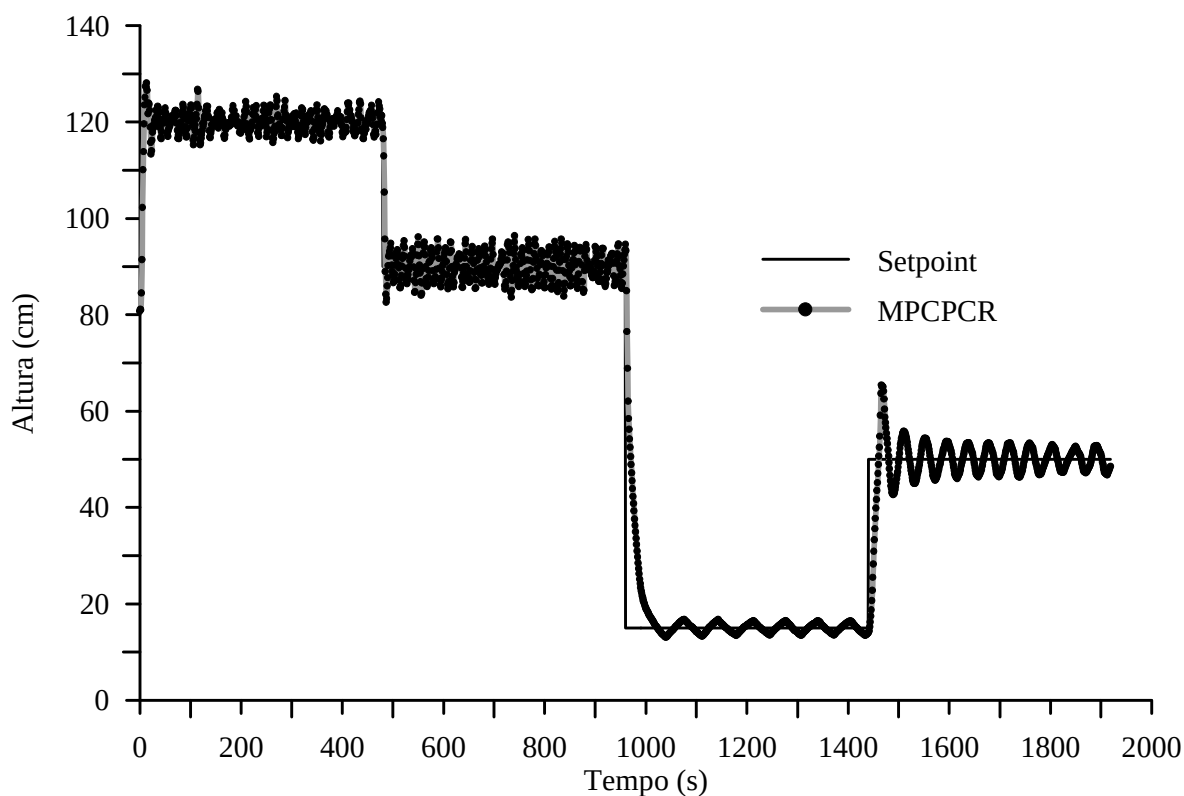


Figura 7.70: Desempenho do MPCPCR no primeiro experimento (MPCPCR-TAV-E)

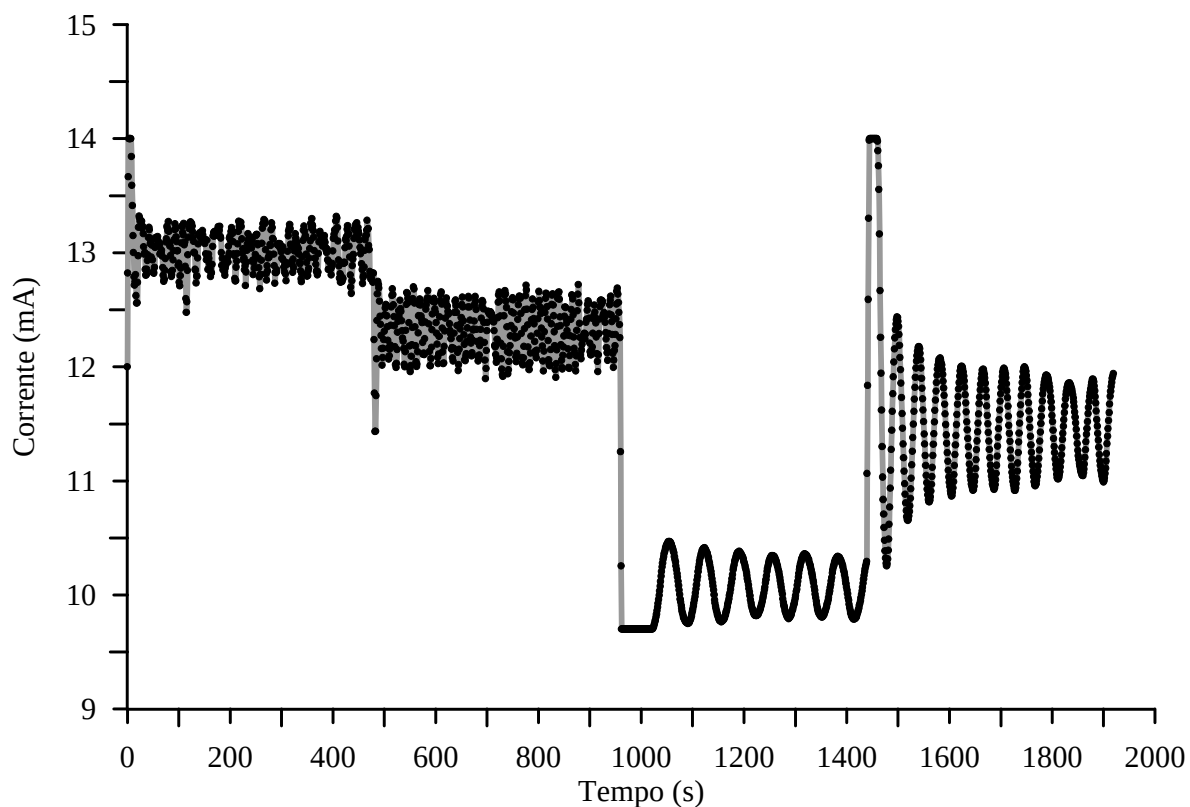


Figura 7.71: Ações de controle do MPCPCR no primeiro experimento (MPCPCR-TAV-E)

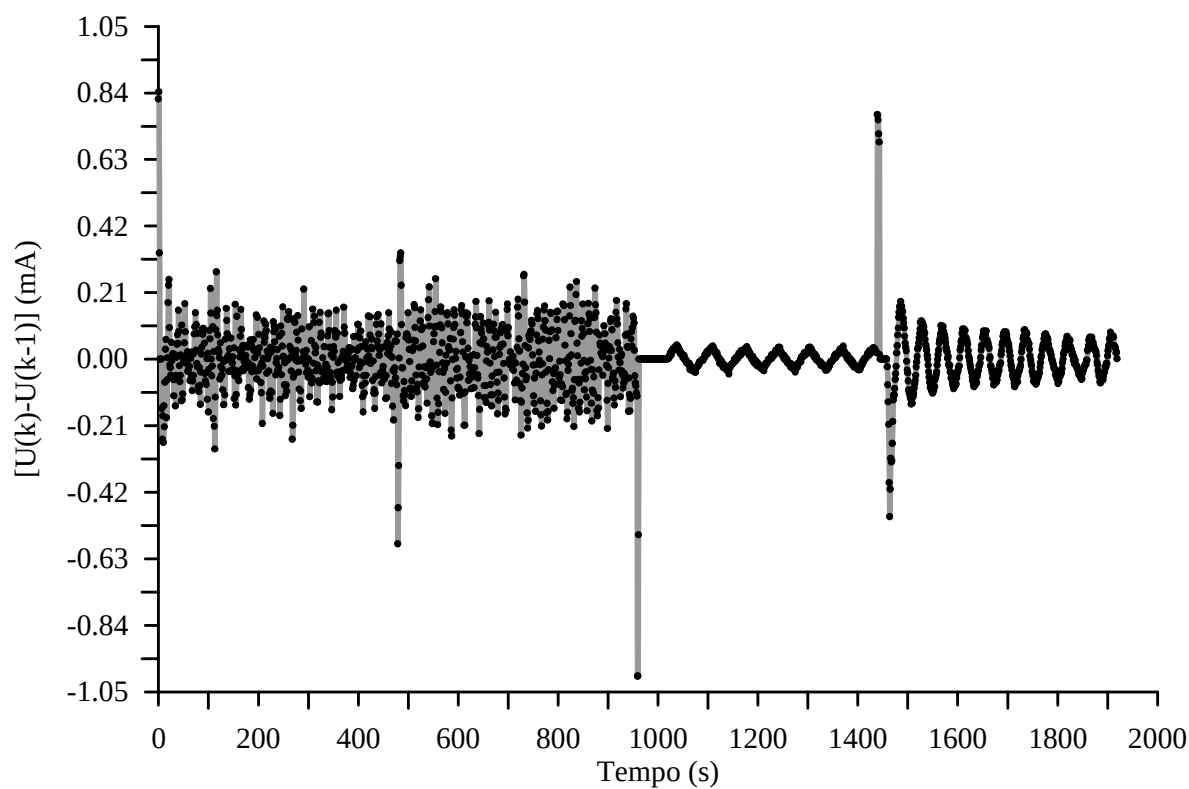


Figura 7.72: Variações das ações de controle do MPCPCR no primeiro experimento (MPCPCR-TAV-E)

- Segundo experimento:

Foram utilizados os mesmos parâmetros da Tabela 7.9

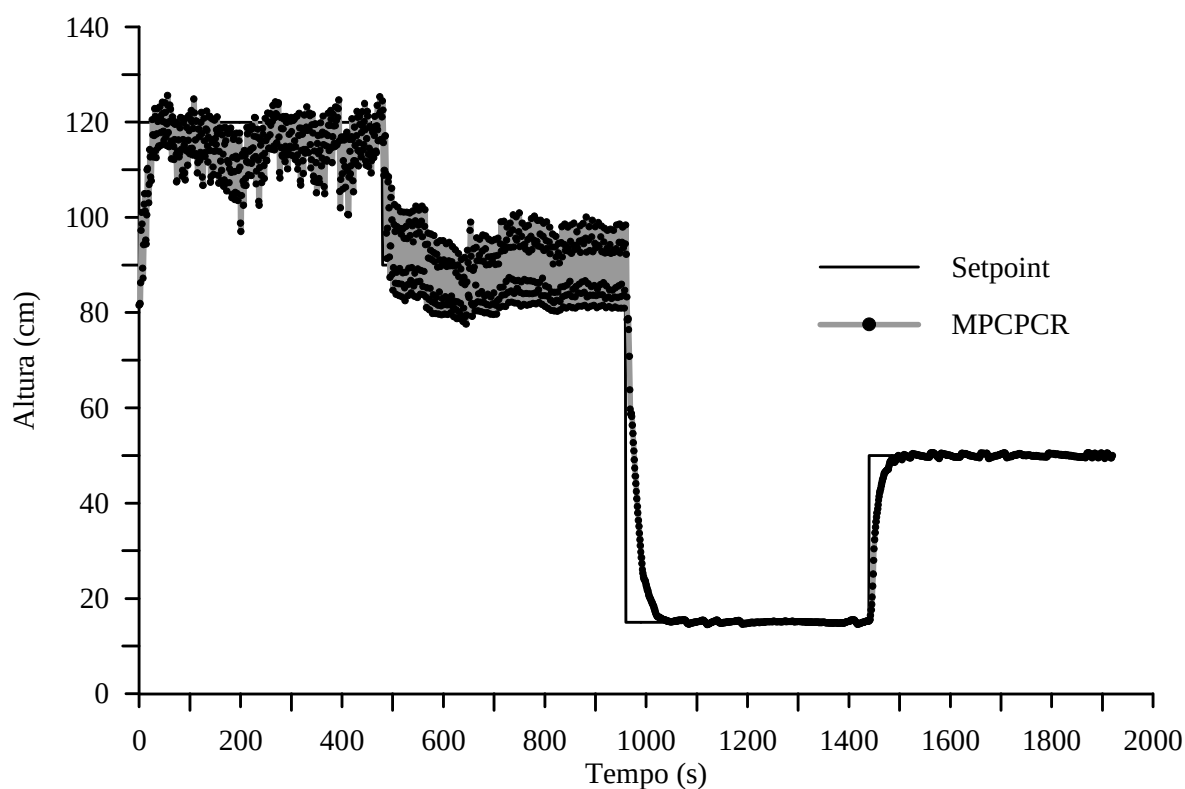


Figura 7.73: Desempenho do MPCPCR no segundo experimento (MPCPCR-TAV-E)

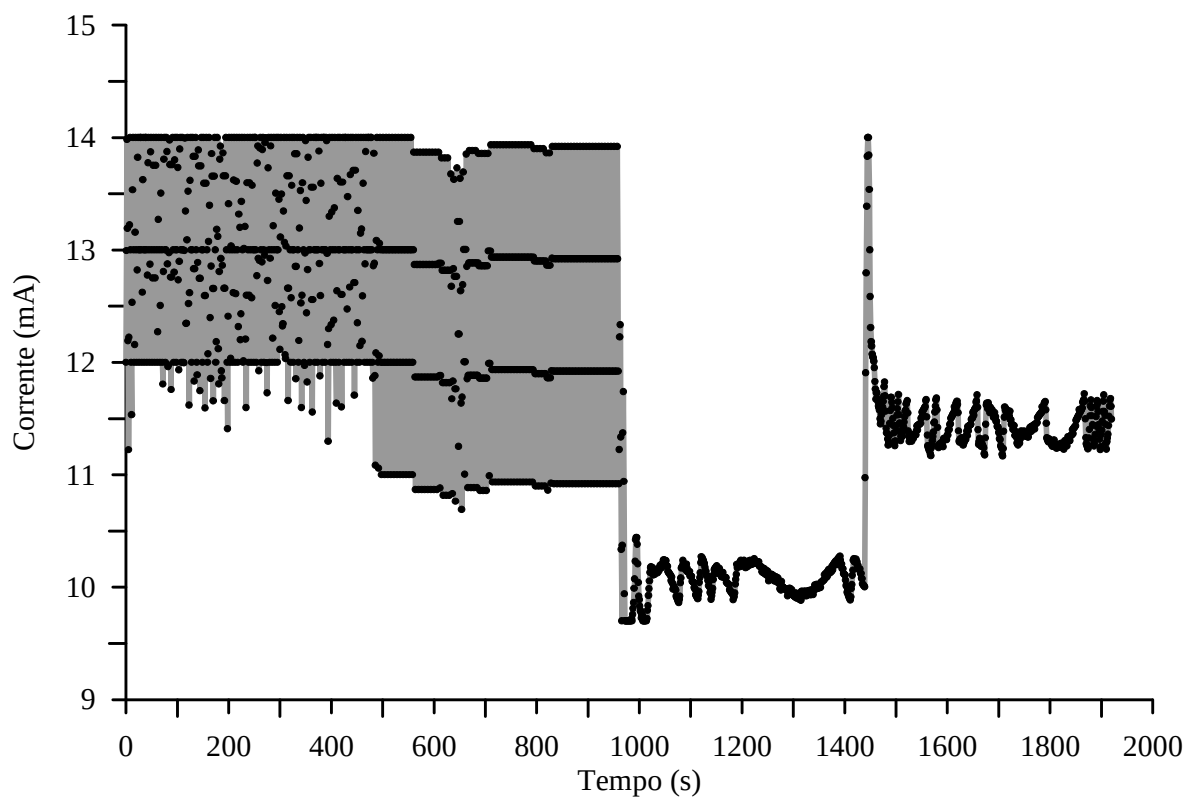


Figura 7.74: Ações de controle do MPCPCR no segundo experimento (MPCPCR-TAV-E)

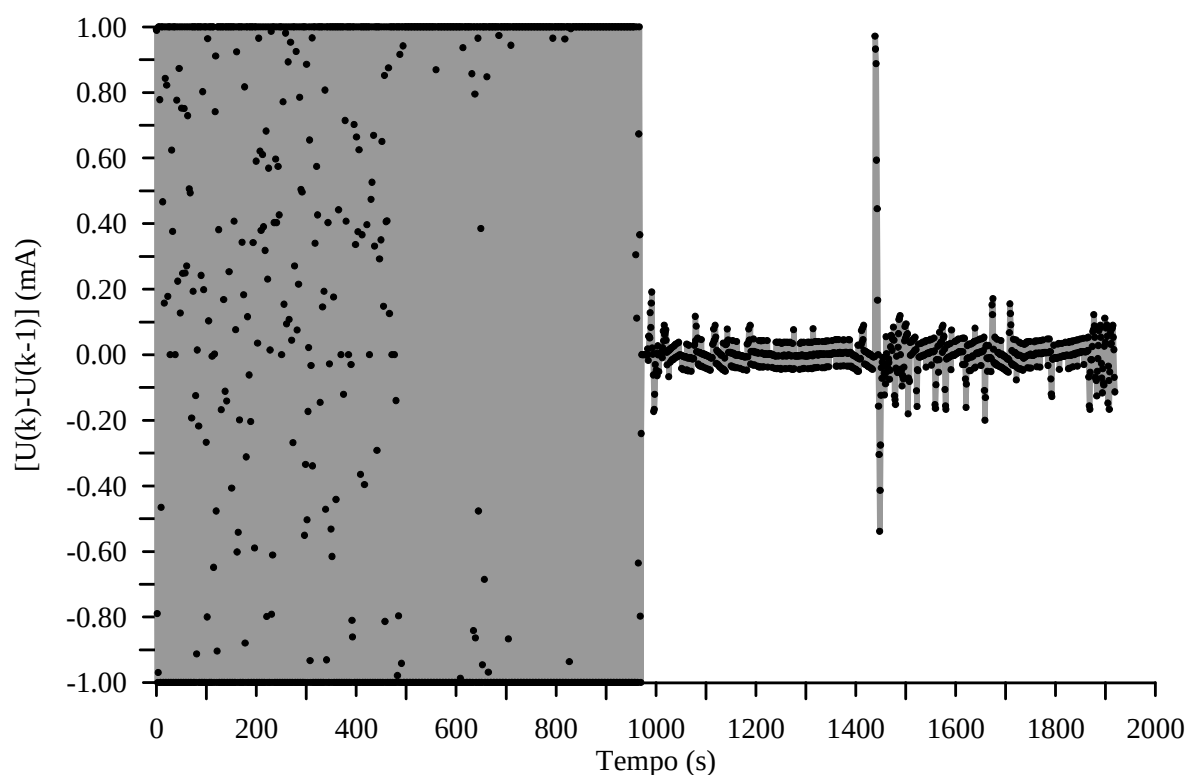


Figura 7.75: Variações das ações de controle do MPCPCR no segundo experimento (MPCPCR-TAV-E)

Mais uma vez percebe-se que quando o controlador é ajustado para uma determinada seção, o seu desempenho fica prejudicado se tiver de operar em outra. É observado na Figura 7.71 como o controlador é sensível ao erro na parte superior que é muito ruidosa e na parte inferior o controlador se tornou instável. Na Figura 7.73 e 7.74 o controlador na parte superior é instável mas apresenta bom desempenho nas seções inferiores.

7.3.2.d MPC com adaptação e restrições (MPCAR-TAV-E)

Foram utilizados os seguintes parâmetros:

Tabela 7.12: Parâmetros utilizados no MPCAR (MPCAR-TAV-E)

Parâmetro	Valor
Σ_0	50
ξ	5
α	10000
M	5
P	30
Q	1
R	1500
$\Delta U_{\max}$	1
$U_{\min}$	9,7 mA
$U_{\max}$	14 mA
Δt	1 s

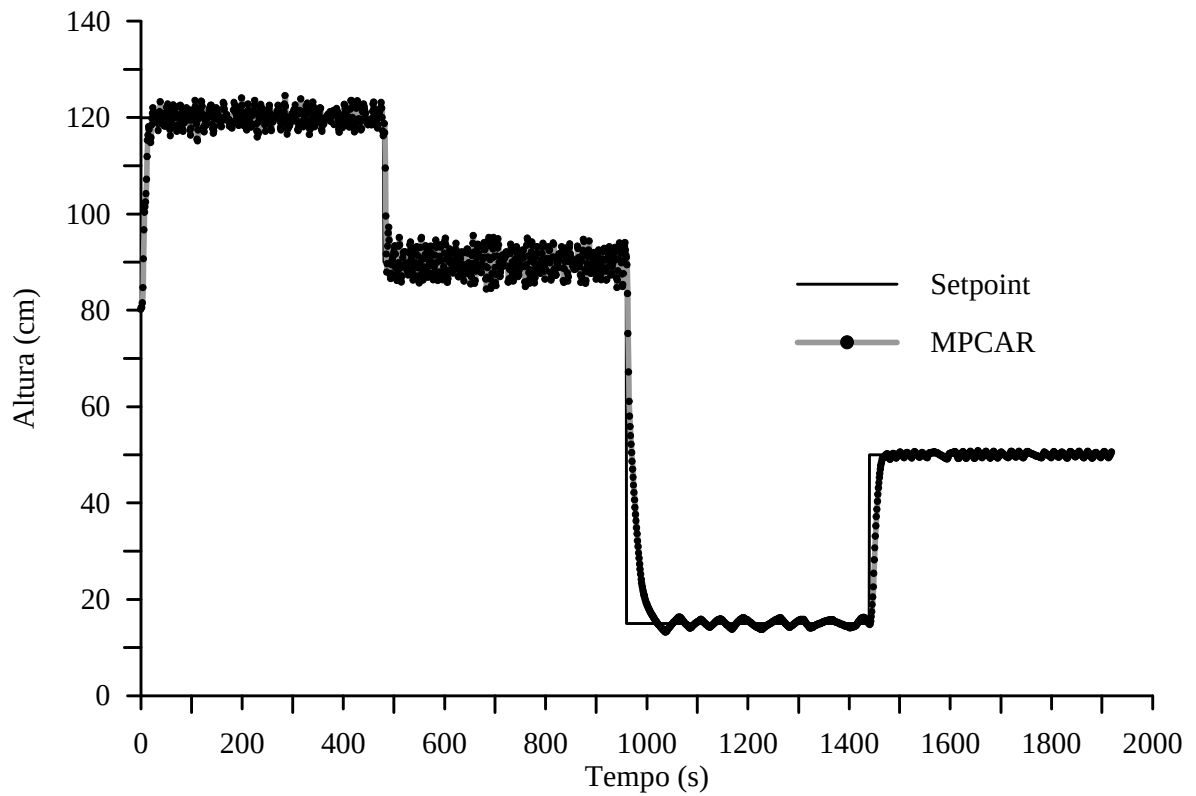


Figura 7.76: Desempenho do MPCAR (MPCAR-TAV-E)

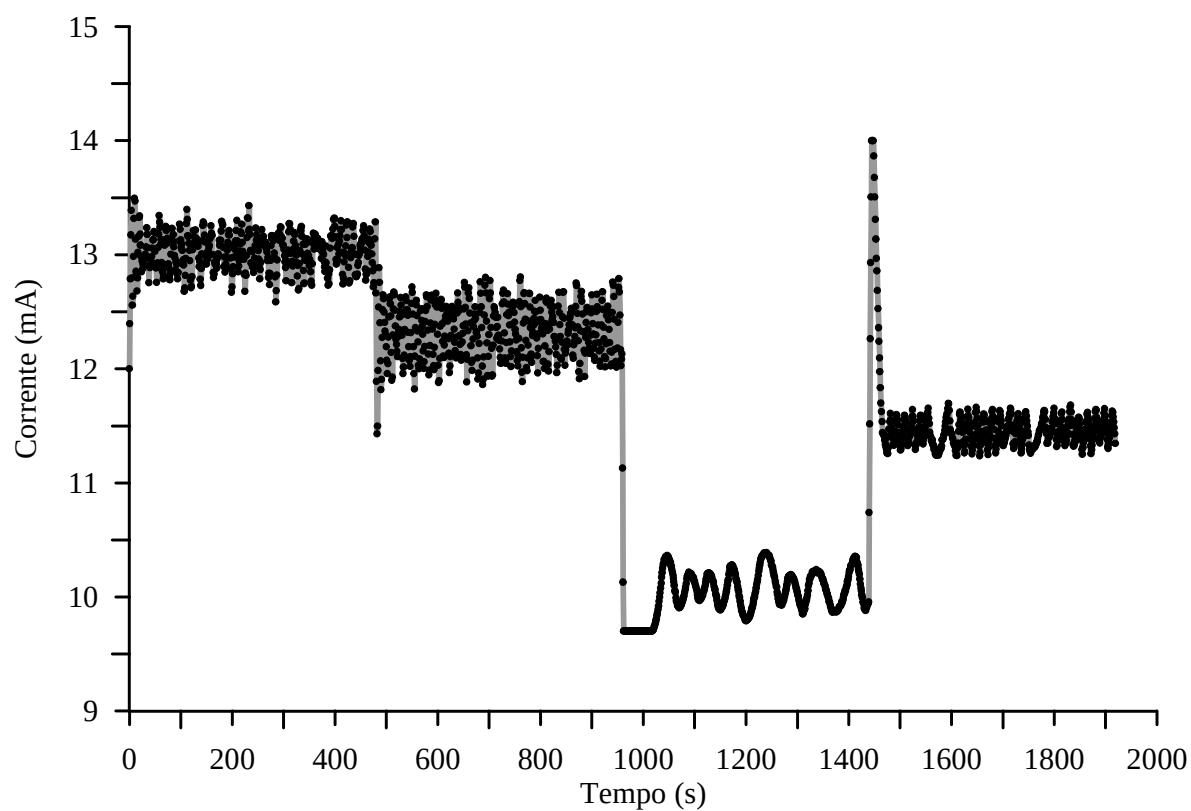


Figura 7.77: Ações de controle do MPCAR (MPCAR-TAV-E)

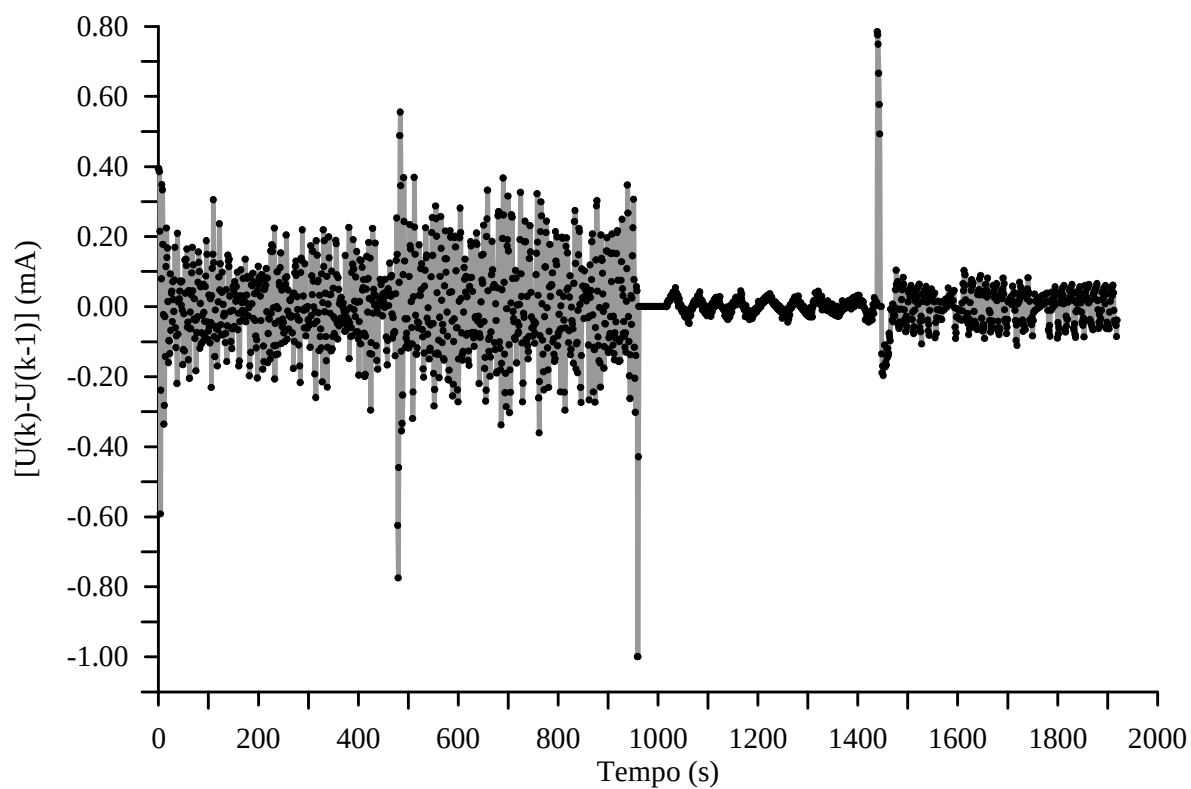
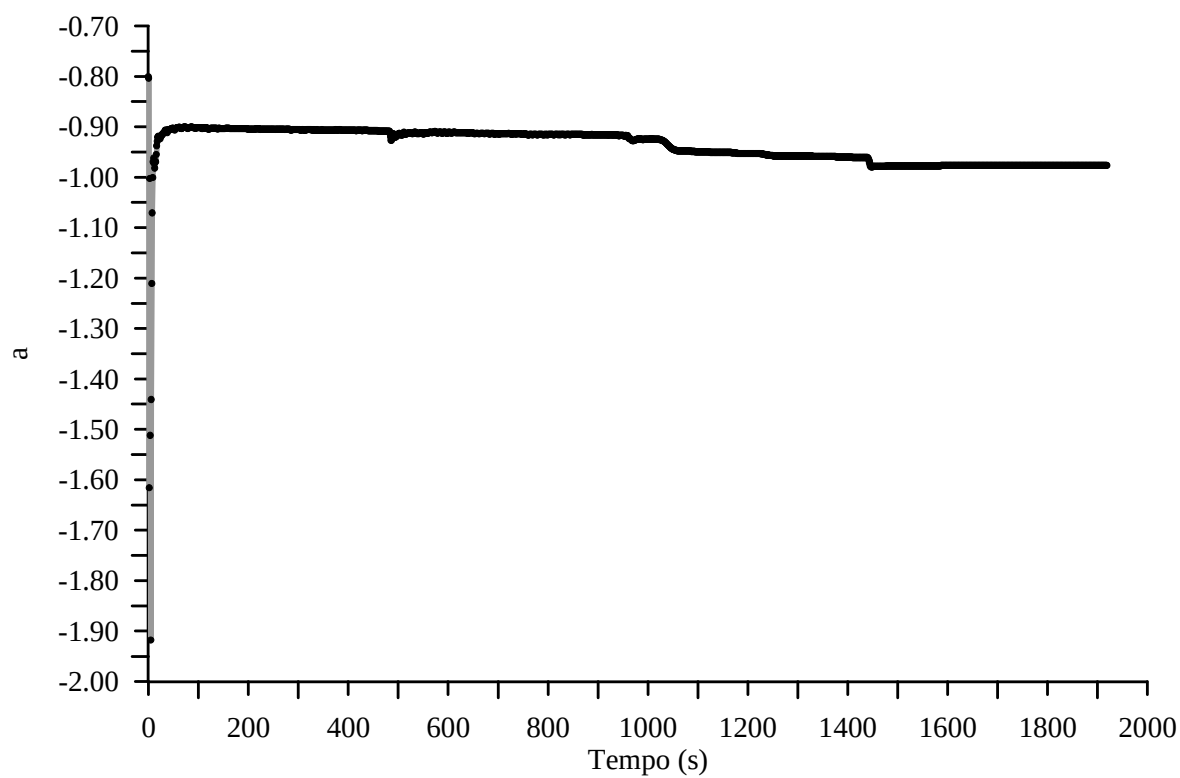
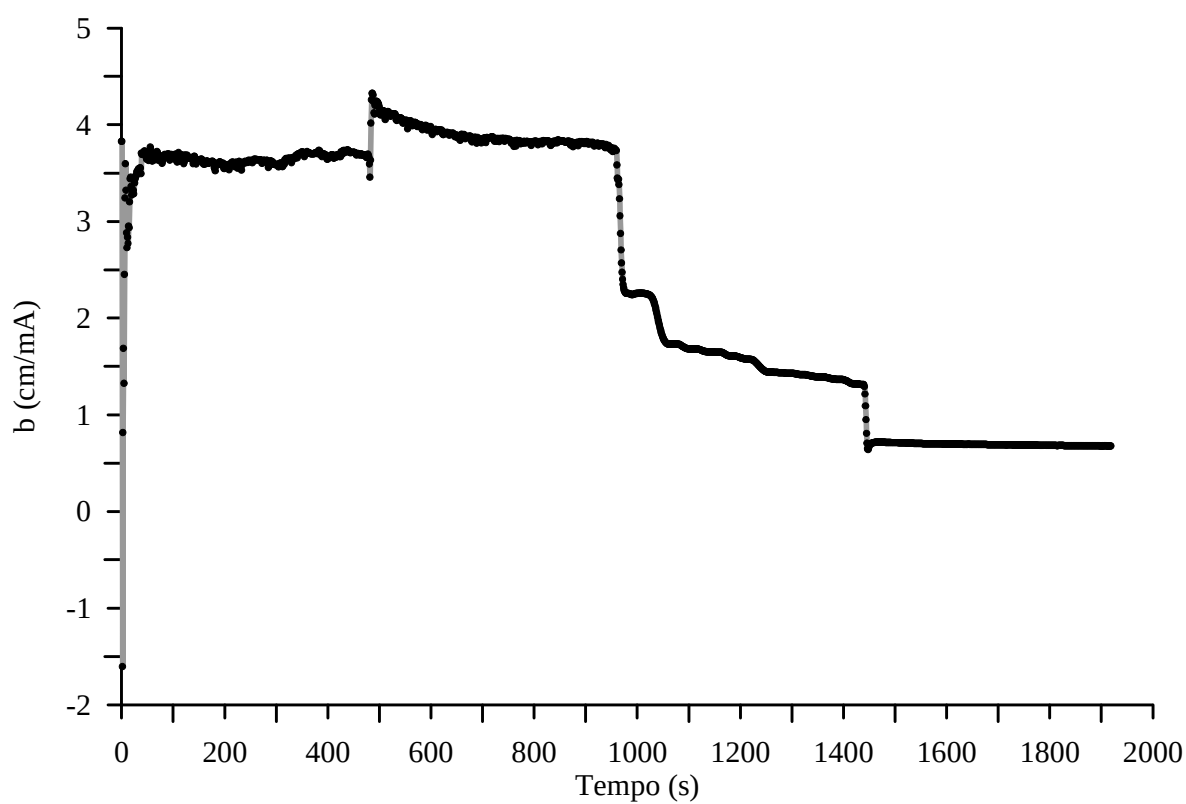


Figura 7.78: Variações das ações de controle do MPCAR (MPCAR-TAV-E)

Figura 7.79: Parâmetro a estimado (MPCAR-TAV-E)Figura 7.80: Parâmetro b estimado (MPCAR-TAV-E)

Pode ser constatado que o MPC que utiliza adaptação obteve desempenho superior ao MPC sem adaptação ajustado ou à seção com menor diâmetro ou à com maior diâmetro. As oscilações que ocorreram nos MPC's aplicados ao tanque de área constante também foram observadas no tanque de área variável, só que as mesmas foram menos pronunciadas devido ao tempo de amostragem ser menor. A razão para estas oscilações é a histerese da válvula de controle. Portanto pode-se concluir que a utilização da adaptação nos algoritmos de controle estudados melhora o desempenho dos mesmos, sendo o controlador obtido via síntese direta menos sensível ao erro que o MPC. Na seção 7.3 pode-se notar como na 7.2 que os CSD's são mais agressivos em relação aos MPC's. As simulações fizeram uma boa previsão do comportamento do processo.

7.3.2.e Comportamento do CSDA e do MPCAR frente a perturbações não medidas

Para testar o comportamento dos controladores adaptativos frente a perturbações não medidas foram realizadas perturbações na vazão de entrada do processo. Os parâmetros utilizados são os apresentados nas Tabelas 7.11 e 7.12. Os resultados encontram-se a seguir:

Para o CSDA:

A perturbação foi aplicada no tempo 180 s. Pode ser observado que o CSDA foi capaz de lidar bem com a perturbação não medida.

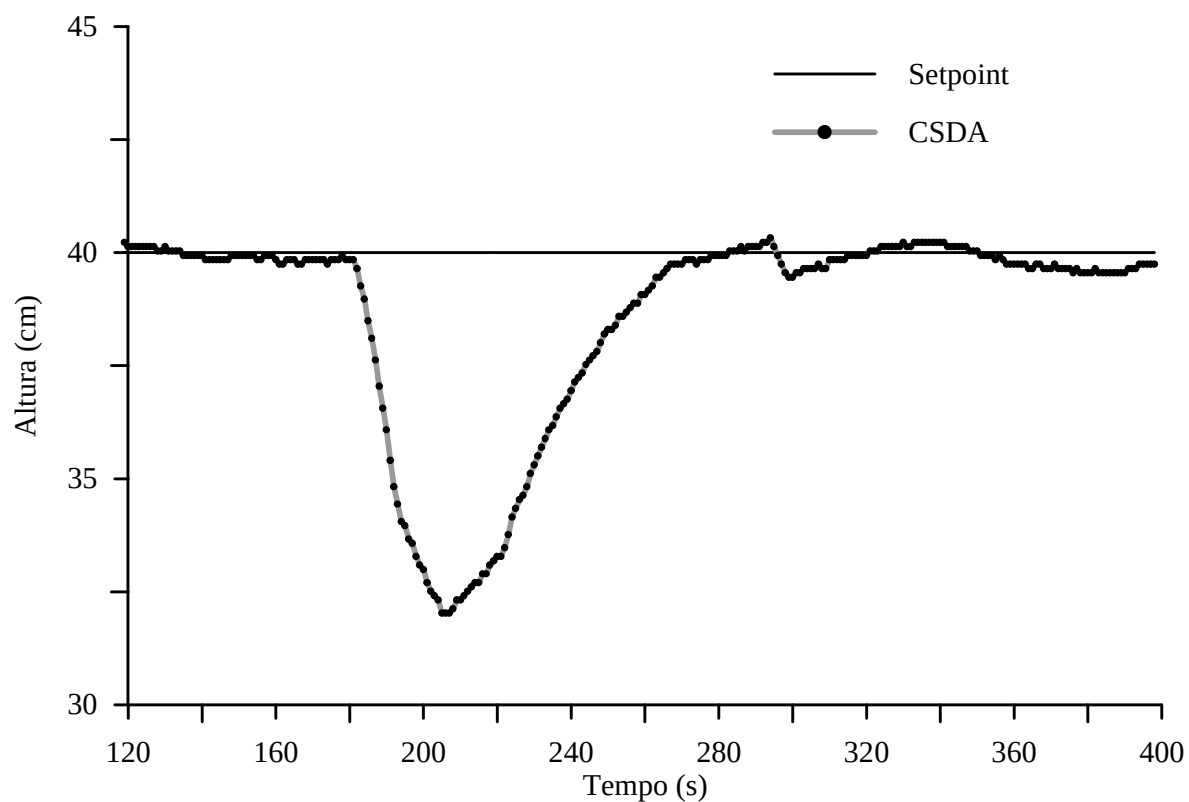


Figura 7.81: Desempenho do CSDA frente a uma perturbação não medida (CSDA-TAV-E)

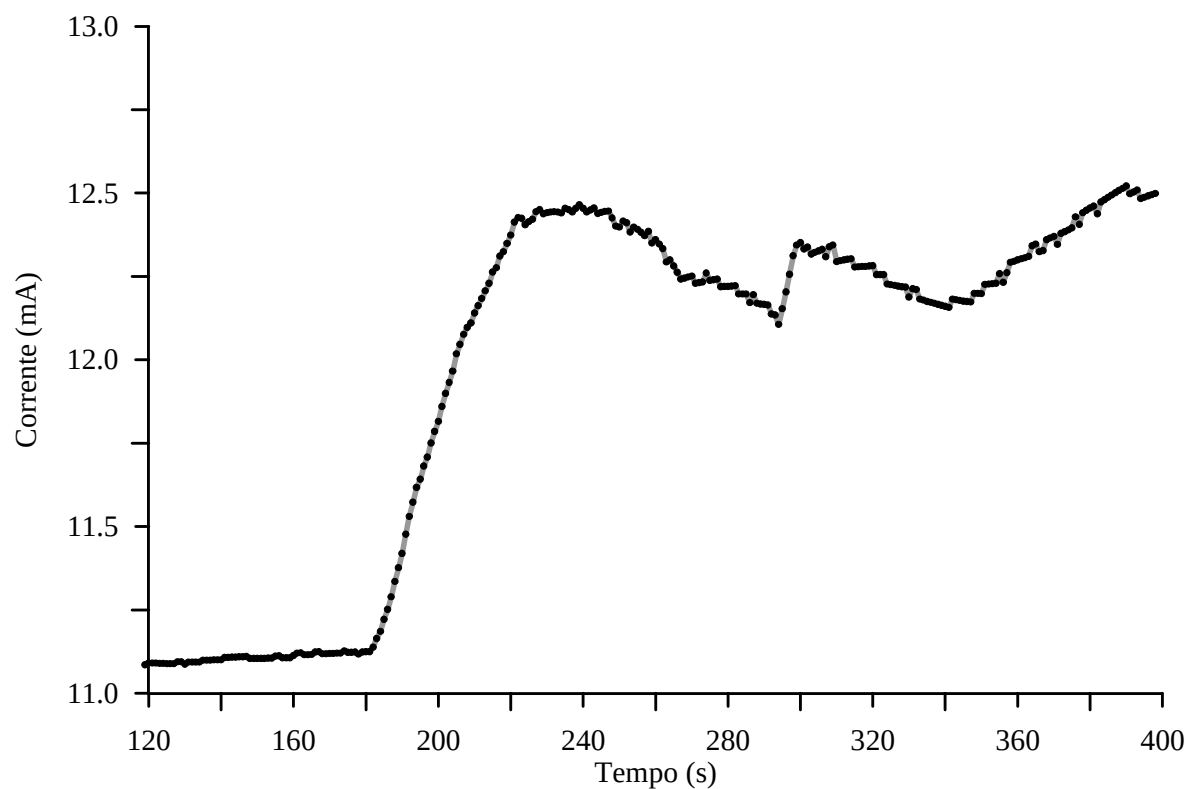


Figura 7.82: Ação de controle do CSDA frente a uma perturbação não medida (CSDA-TAV-E)

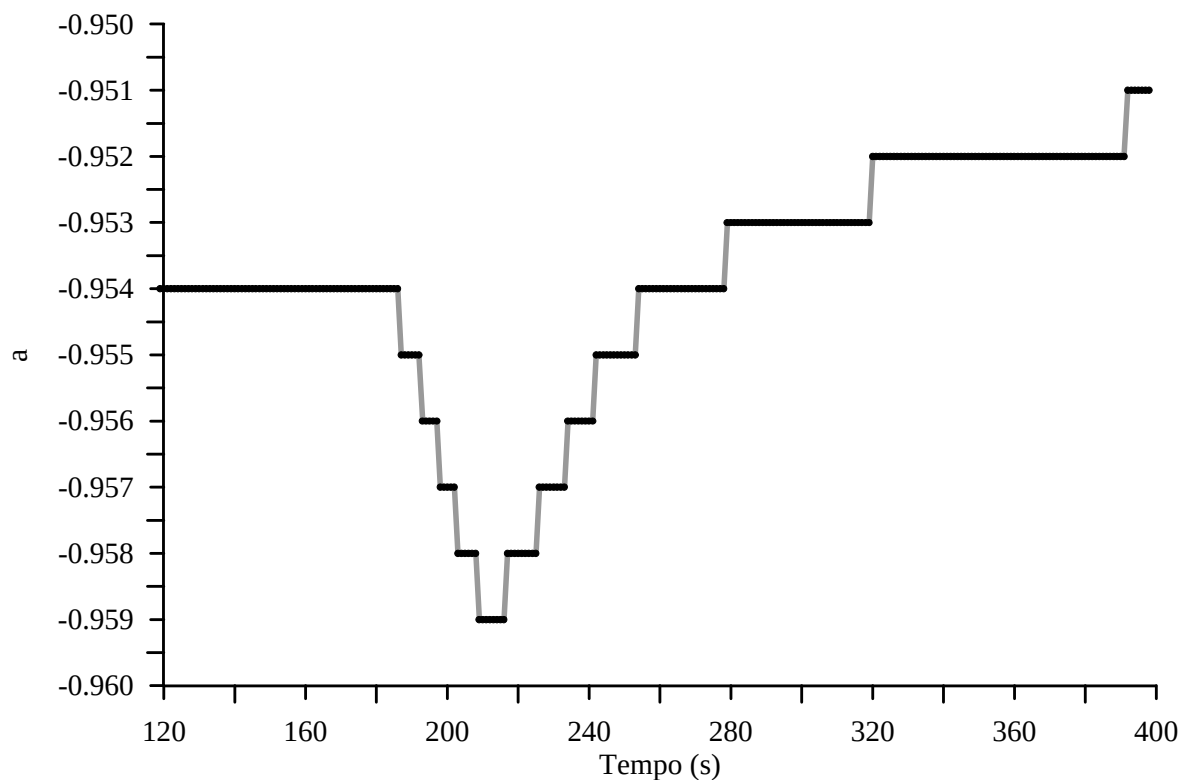


Figura 7.83: Parâmetro a estimado quando é aplicada uma perturbação não medida (CSDA-TAV-E)

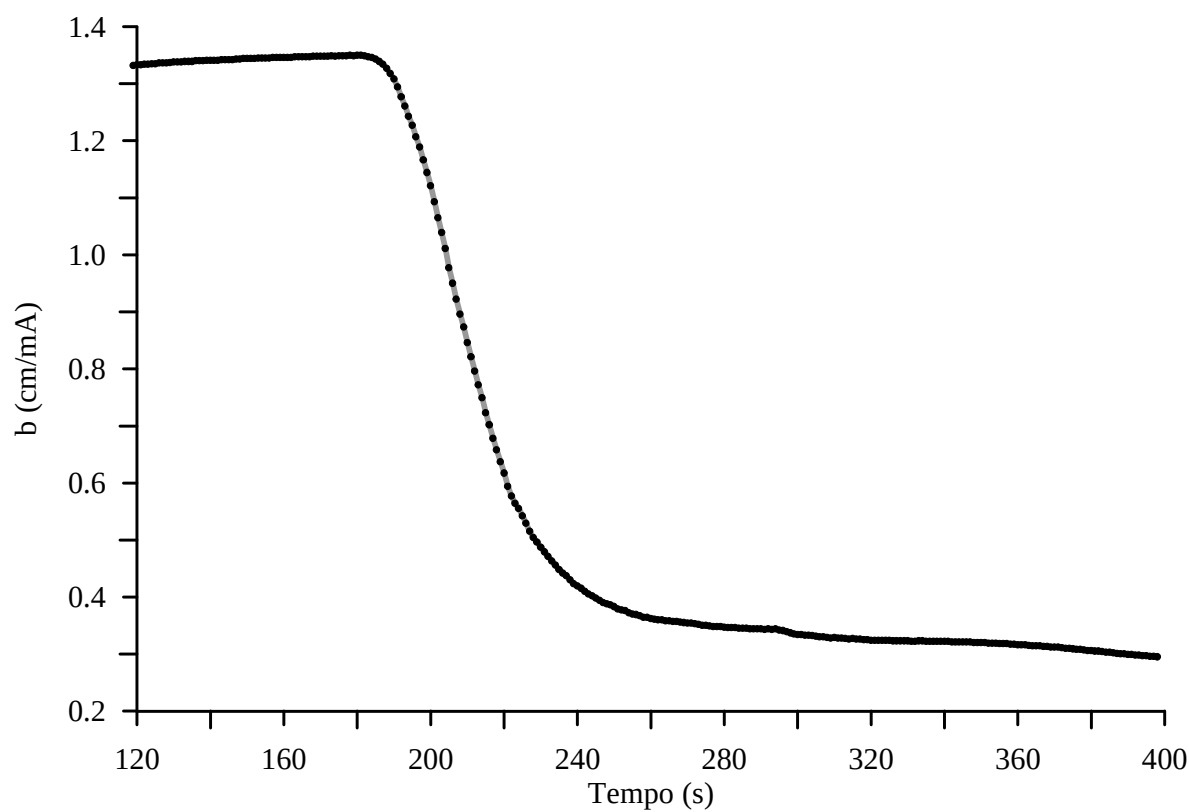


Figura 7.84: Parâmetro b estimado quando é aplicada uma perturbação não medida (CSDA-TAV-E)

Para o MPCAR:

A perturbação foi aplicada no tempo 180 s.

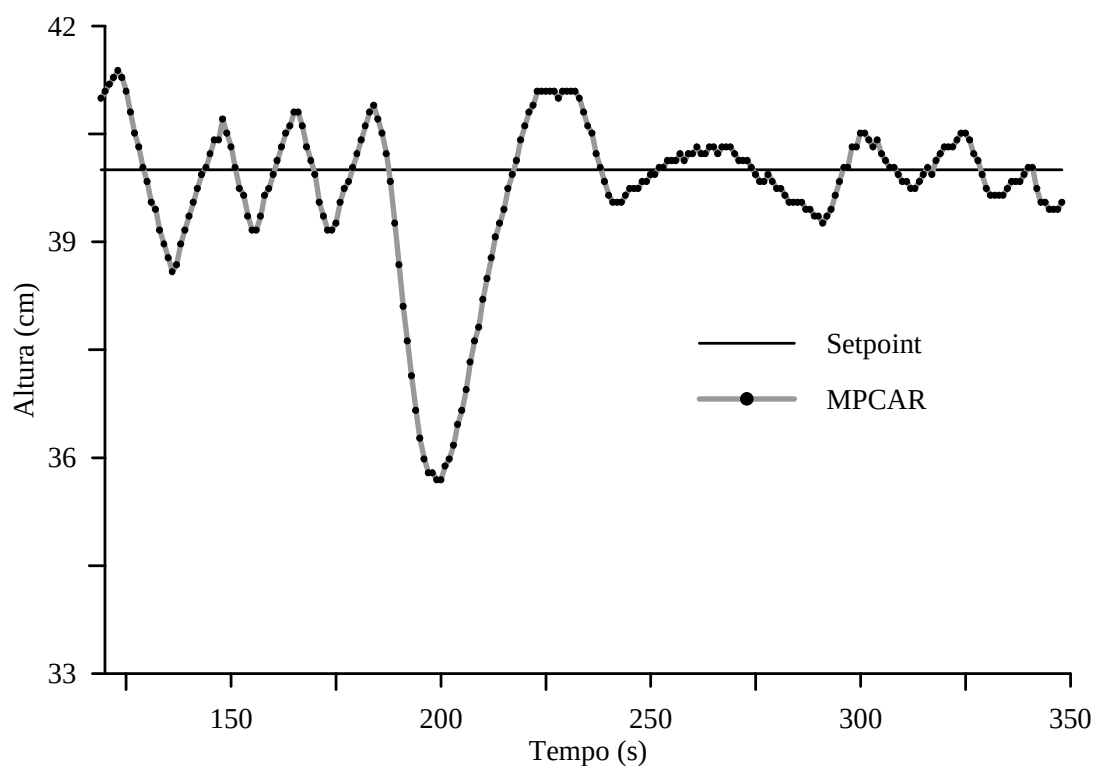


Figura 7.85: Desempenho do MPCAR frente a uma perturbação não medida (MPCAR-TAV-E)

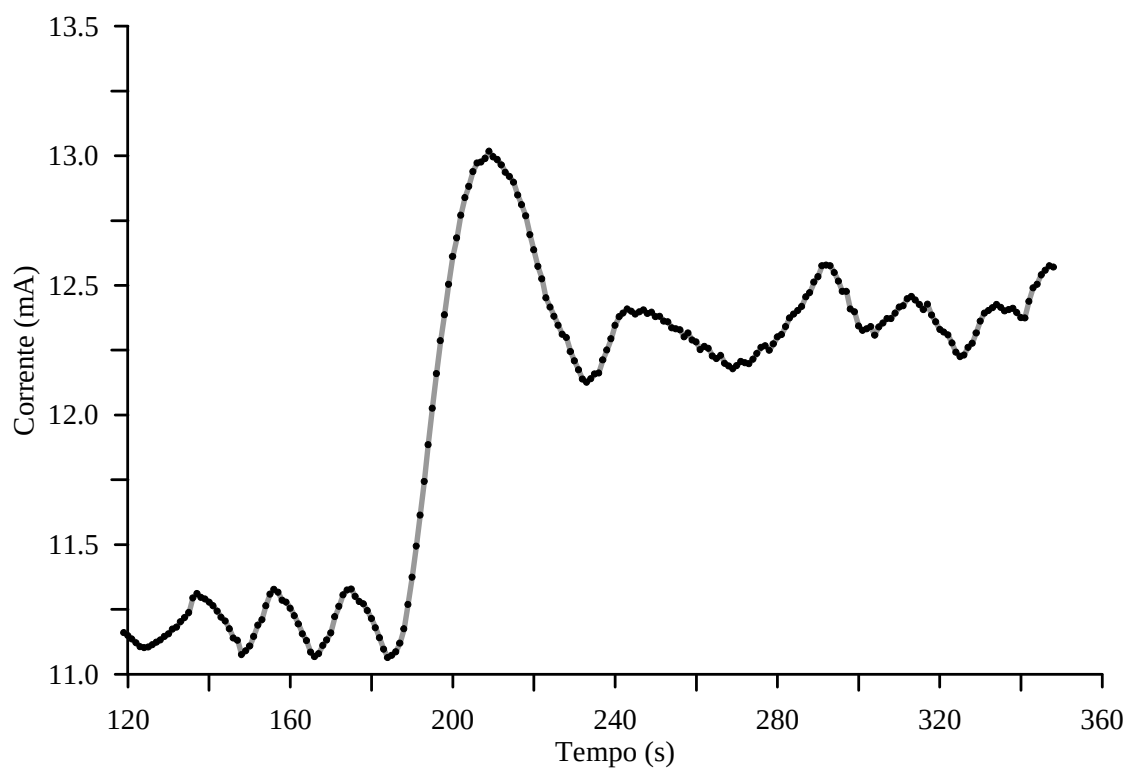


Figura 7.86: Ações de controle do MPCAR frente a uma perturbação não medida (MPCAR-TAV-E)

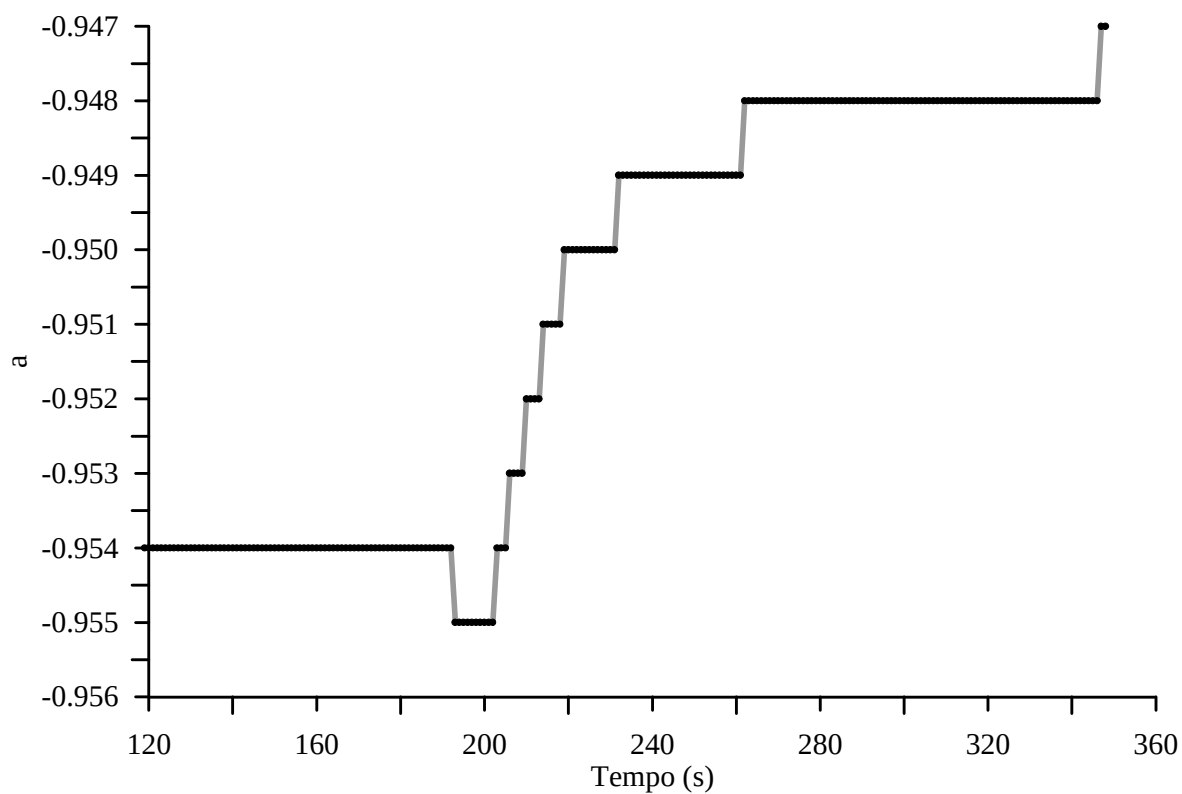


Figura 7.87: Parâmetro a estimado quando é aplicada uma perturbação não medida (MPCAR-TAV-E)

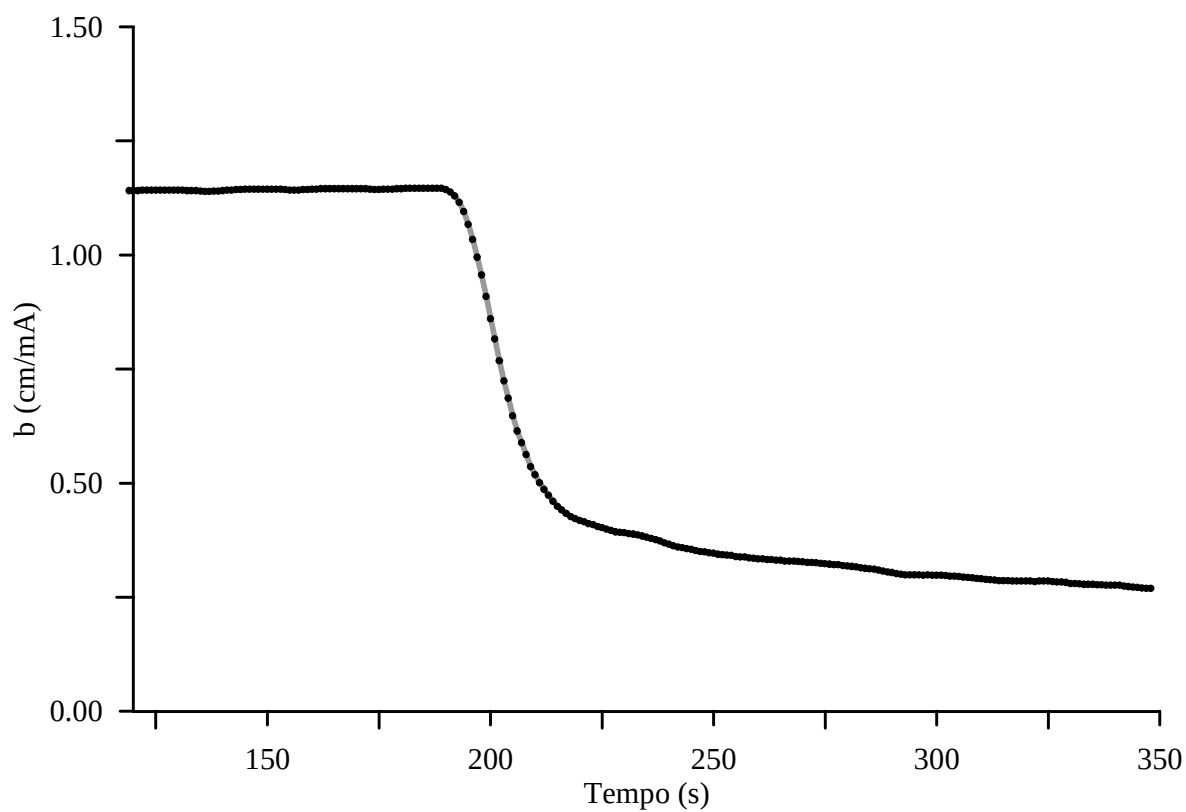


Figura 7.88: Parâmetro b estimado quando é aplicada uma perturbação não medida (MPCAR-TAV-E)

Observando as Figuras 7.81 e 7.85 nota-se que o MPCAR é mais eficaz na rejeição da perturbação, ou seja, o MPCAR é mais sensível ao erro que o CSDA. Os parâmetros estimados nos dois controladores foram atualizados de acordo com as mudanças no processo.

Capítulo 8 - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

8.1 Conclusões

Este trabalho se propôs a mostrar um estudo sobre estimação de parâmetros e controle adaptativo. O método recursivo de mínimos quadrados mostra-se muito eficiente para propósitos de controle. Para sistemas variantes no tempo a utilização do fator de esquecimento variável faz com que o estimador seja mais rápido e evite a “explosão” da matriz de covariância.

Maior ênfase foi dada ao controle adaptativo com a implementação dos algoritmos para controle em tempo real.

Os controladores adaptativos mostraram desempenho satisfatório no controle das plantas de controle de nível, mesmo o sendo o tanque com área variável fortemente variante no tempo.

O controlador baseado no método da síntese direta é de fácil projeto e sintonia. Porém, promove ações de controle muito agressivas. A utilização do esquema de adaptação dos parâmetros melhorou o desempenho deste tipo de controlador no sistema variante no tempo.

O MPC é um controlador de projeto mais complicado que o da síntese direta, mas em compensação, traz as vantagens de promover o controle ótimo e de incorporar restrições à sua lei de controle. A incorporação de restrições é importante, pois limita as ações de controle, o que evita agressões ao elemento final de controle. Neste trabalho a utilização da adaptação melhorou o desempenho deste controlador.

Para o sistema invariante no tempo (tanque de área constante) os controladores testados (com e sem adaptação) apresentaram desempenho semelhante. A vantagem da utilização da adaptação neste caso, seria a da identificação de mudanças que podem ocorrer no processo.

Para o sistema variante no tempo ficou clara a vantagem da utilização da estimação *online* mesmo com o alto nível de ruído. Não foi utilizado um filtro digital para minimizar a ação do ruído, pois este inseriria mais uma dinâmica ao processo, e portanto o deixaria mais lento.

8.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Aplicação dos controladores estudados a outros sistemas experimentais;
- Utilização da estimação recursiva via variáveis instrumentais ;
- Realização de estudos sobre redes neurais adaptativas;
- Estudo dos tanques com interação;
- Estudo da estabilidade dos controladores.

Referências Bibliográficas

- ÅSTRÖM, K. J. e WITTENMARK, B., *On self-tuning regulators*, Automatica, 1973, v. 9, p. 185-199.
- ÅSTRÖM, K. J., *Theory and applications of adaptive control a survey*, Automatica, 1983, v. 19, p. 471-486.
- ÅSTRÖM, K. J. e WITTENMARK, B., *Practical Issues in the Implementation of Self-tuning Control*, Automatica, 1984, v. 20, p. 595-605.
- ÅSTRÖM, K. J. e WITTENMARK, B., *Adaptive Control*, Addison-Wesley Publishing Company, Lund, Sweden 1989.
- CLARKE, D.W. e GAWTHROP, P. J., *Self-tuning control*, Proc. IEE, 1975, v. 122, p. 929-934.
- CLARKE, D. W., MOHTAD, C. e TUFFS, P. S., *Generalized Predictive Control – Part I. The Basic Algorithm*, Automatica, 1987a, v. 23, p. 137-148.
- CLARKE, D. W., MOHTAD, C. e TUFFS, P. S., *Generalized Predictive Control – Part II. Extensions and Interpretations*, Automatica, 1987b, v. 23, p. 149-160.
- CUTLER, C. R. e RAMAKER, B. L., *Dynamic Matrix Control – A Computer Control Algorithm*, Proc. A. Control Conf., 1980, San Francisco, CA.
- ECONOMOU, C. G., ET AL., *Internal Model Control 5: Extension to Nonlinear Systems*, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 1986, v. 25, p. 403-411.
- FORTESCUE, T. R., KERSHENBAUM, L. S. e YDSTIE, B. E., *Implementation of self-tuning regulators with variable forgetting factor*, Automatica, 1981, v.17, p. 831-5
- GARCIA, C. E. e MORSHEDI, A. M., *Quadratic programming solution of dynamic matrix control (QDMC)*, Chem. Eng. Commum, 1986, v. 46, p. 73-87.
- GARCIA, C. E., PRETT, D. M. e MORARI, M., *Model predictive control: theory and practice – a survey*, Automatica, 1989, v. 25(3), p. 335-348.
- GENCELI, H. e NIKOLAOU, M., *A new approach to constrained predictive control with simultaneous model identification*. American Institute of Chemical Engineering Journal, 42(10), 2857–2869.
- GUSTAVSSON, I., LJUNG, L. e SÖDERSTRÖM, T., *Identification of process en closed loop – identifiability and accuracy aspects*, Automatica, 1977, v. 13, p. 59-75.
- HUNT, K. J. e SBARBARO, D., *Neural Networks for Nonlinear Internal Model Control*, EE Proceedings-D, v. 138, p. 431-438.

- ISERMANN, R., KURZ, H. e SCHUMANN, R., *Experimental Comparison and Application of Various Parameter-Adaptive Control Algorithms*, Automatica, 1980, v. 16, p. 117-133.
- ISERMANN, R., *Parameter-adaptive control algorithms – a tutorial*, Automatica, 1982, v. 18, p. 513-528.
- ISERMANN, R. e RADKE, F., *A parameter-adaptive PID-controller with Stepwise Parameter Optimization*, Automatica, 1987, v. 23, p. 449-457.
- ISERMANN, R., LACHMANN, K. e MATKO, D., *Adaptive Control Systems*, Prentice Hall, UK, 1992.
- LJUNG, L., *System Identification. Theory for the user*, 2^a edition, Prentice-Hall Inc. New Jersey, 1999.
- MAURATH, P. R., MELLICHAMP, D. A. e SEBORG, D. E., *Predictive controller design for single-input/single-output (SISO) systems*, Ind. Eng. Chem. Research, 1988, v. 27, p956-963.
- MILLS, P. M., ZOMAYA, A. Y. e TADÉ, M. O., *Adaptive model-based control using neural network*, Int. J. Control, 1994, v. 60(6), p. 1163-1192.
- MILLS, P. M., ZOMAYA, A. Y. e TADÉ, M. O., *Neuro-adaptive Process Control. A Practical Approach.*, John Wiley & Sons, England, 1996.
- NAHAS, E. P., HENSON, M. A. e SEBORG, D. E., *Nonlinear Internal Model Control Strategy for Neural Network Models*, Computers Chem. Eng. V. 16, p. 1039-1057.
- NIKOLAOU, M., SHOUC, M., GENCELI, H. e VUTHANDAM, P., *Simultaneous Constrained Model Predictive Control and Identification of DARX Process*, Automatica, 1998, v. 34 (12), p. 1521-1530.
- NIKOLAOU, M., GENCELI, H. e CHOUCHE, M. S., *Effect of on-line optimization techniques on model predictive control and identification (MPCI)*, Computers and Chemical Engineering, 2002, v. 26, p. 1241-1252.
- OGATA, K., *Discrete-Time Control Systems*, 2^a edition, Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1995.
- PRETT, D. M. e GARCIA, C. E., *Fundamental Process Control*, Boston, 1988
- RICHALET, J., RAULT, A., TESTUD, J. L. e PAPON, J., *Model Predictive Heuristic Control: Application to Industrial Processes*. Automatica, 1978, v. 14, p. 413-428
- SAINT-DONAT, J., BHAT, N. e MACAVOY, T. J., *Neural Net Based Model predictive Control*, Int. J. Control, v. 54, p. 1453-1468.
- SÁNCHEZ, J. M. M. e RODELLAR, J., *Adaptive Predictive Control: From the concepts to plant optimization*, Prentice Hall International Ltd, UK, 1996.

- SEBORG, D. E., EDGAR, T. F. e SHAH, S. L., *Adaptive control strategies for process control – a survey*, AIChE Journal, 1996, v. 32, p. 881-913.
- SEBORG, D.E., EDGAR, T.F. e MELLICHAMP, D., *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1989.
- SEBORG, D. E, A perspective on advanced strategies for process control, *Modeling, Identification and Control*, 1994, v.15, p.179-189.
- SEBORG, D. E. e FASOLO, P. S., *Monitoring and Fault Detection for an HVAC Control System*, HVAC&R RESEARCH, 1995, v. 1(3), p. 177-193.
- SMITH, C. A. e CORRIPIO, A. B., *Principles and practice of automatic process control*, John Wiley & Sons, USA, 1997.
- VILAÇA, A. C., *Controle Preditivo Baseado em Linearização Entrada/Saída para Sistemas com Restrições*, Dissertação de Mestrado, PPG-EQ/UFU, Uberlândia, 2000.
- YDSTIE, B. E., KERSHENBAUM, L. S. e SARGENT, R. W. H., *Theory and Application of an Extended Horizon Self-Tuning Controller*, AIChE J., 1985, v. 31(11), p. 1771-1780.
- WELLSTEAD, P. E. e ZARROP, M. B., *Self-tuning Systems: Control and Signal Processing*, John Wiley & Sons Ltd. England, 1991.