

Chapter 1

Introduction

The use of feedback control in mechanisms developed by humans is marked by the 1769 James Watt's invention, known as the Watt regulator and developed to regulate steam machines spin velocities. From this time until the beginning of the 20th century, control designs were based on trial and error methods. With the emergence of theoretical publications on the subject, such as that of (Tolle, 1921), mathematical models were increasingly used in the design of controllers, mainly in the form of differential equations (Takahashi et al., 1972).

1.1 Motivation and Justification

1.2 Brief History

1.3 Objectives

O principal objetivo desta tese...

1.4 Text Structure

Na década de 60 surge uma nova abordagem na teoria de controle, fundamentada no uso de modelos paramétricos em espaço de estados, juntamente com o controle ótimo, dando origem a chamada Teoria de Controle moderno e seus principais ramos, como identificação de sistemas, controle adaptativo, controle robusto, controle ótimo e controle estocástico, os quais têm sido amplamente estudados e desenvolvidos até os dias de hoje, mas ainda com muitos tópicos desafiadores, tanto em aspectos teóricos como práticos (Hou, Wang, 2013).

Tanto na abordagem da teoria de controle clássica, baseada principalmente no uso de funções de transferência e sistemas lineares, quanto na teoria de controle moderna, baseada principalmente em representações em espaço de estados de sistemas lineares e não lineares, um modelo matemático da planta a ser controlada é necessário*. Esse modelo pode ser obtido via modelagem fenomenológica, ou via métodos identificação

*uma exceção talvez sejam os casos em que o controlador é projetado diretamente da resposta em frequência obtidos experimentalmente.

de sistemas. No primeiro caso o modelo é obtido com o uso de leis conhecidas de campos específicos da ciência resultando em equações que o representam. No segundo caso, a partir de dados dos sinais de entrada-saída colhidos da planta e com o uso de técnicas de identificação de sistemas, é possível identificar modelos que representam a planta com um certo grau de confiabilidade. Diversas metodologias para identificações de modelos lineares e não lineares estão disponíveis na literatura ([Aguirre, 2015](#); [Ljung, 1999](#)). Modelos obtidos utilizando primeiros princípios ou mesmo por identificação de sistemas podem resultar em modelos de ordem elevada, de alto grau de não linearidade o que dificulta ou até mesmo impede sua aplicação para fins de controle. Para casos em que a ordem do modelo é elevada, muitas vezes uma etapa de redução de ordem deve ser incluída no projeto de controle ([Skogestad, 1997](#)).

Modelar processos pode ser uma tarefa árdua e às vezes até impraticável podendo exigir etapas de validação e determinação de estrutura do modelo. Por esta razão os métodos tradicionais de controle baseados em modelo (MBC, do inglês *model based control*) são pouco práticos em alguns casos. Além do mais, vários processos da atualidade geram e armazenam grandes quantidades de dados e o uso desses dados para projeto de controladores seria muito conveniente ([Hou, Wang, 2013](#)). Uma vez que os dados de entrada e saída de uma planta contêm informações sobre sua dinâmica, desde que excitada apropriadamente, pode parecer desnecessário aplicar a teoria de identificação para se obter um modelo matemático da planta para projeto do controlador ([Ikeda et al., 2001](#)). Além disso, tendo obtido um modelo fiel à planta pode ser necessário reduzir sua ordem no projeto do controlador. Neste sentido, em vários casos práticos de controle em que um modelo matemático que descreve a planta não está disponível, ou é complexo demais ou a incerteza no modelo é grande demais para o uso de estratégias MBC, é muito conveniente obter o controlador a partir de medidas obtidas diretamente da planta.

De acordo com [Campi, Weyer \(2002\)](#), este problema tem atraído atenção de engenheiros de controle desde o trabalho publicado por [Ziegler, Nichols \(1942\)](#) e diversas extensões têm sido propostas desde então. Porém, por volta da década de 90 começam a surgir na literatura novas abordagens para projeto de controladores sem o uso de modelos para as plantas, as quais mais tarde vêm a receber denominação de controle baseado em dados (DDC - do inglês, *data-driven control*). [Hou, Wang \(2013\)](#) afirmam que o termo *data-driven* foi primeiramente proposto na ciência da computação e somente recentemente entrou no vocabulário da comunidade de controle sendo que, até o momento, existem alguns métodos DDC, porém são caracterizados por diferentes nomes, como "*data-driven control*", "*data-based control*", "*modelless control*", dentre outros. [Hou, Wang \(2013\)](#) propõem a seguinte definição para DDC, a partir de 3 outras definições encontradas na Internet:

"O controle baseado em dados inclui todas as teorias e métodos de controle nos quais o controlador é projetado usando diretamente dados de E/S *on-line* ou *off-line* do sistema controlado ou conhecimento do processamento de dados, mas nenhuma informação explícita do modelo matemático do processo controlado, e cuja estabilidade, convergência e robustez podem ser garantidas por rigorosa análise matemática sob certas suposições razoáveis." ([Hou, Wang, 2013](#), p. 6, tradução livre).

Portanto, o DDC é diferente do MBC em essência, uma vez que o projeto do contro-

lador não faz uso direta o indiretamente do modelo do processo . Apesar de, em um primeiro momento, parecerem com métodos de controle adaptativos, métodos DDC diferem destes pelo fato de, a princípio, não precisam de nenhuma informação do modelo, e os ajustes dos parâmetros dependem de grandes lotes de dados, ao invés de uma única o poucas amostras do sinais de entrada-saída (Bazanella et al., 2012).

Uma perspectiva do desenvolvimento do assunto na comunidade acadêmica pode ser obtida por uma busca[†] pelo número de publicações na base de dados do ?, utilizando o termo “*data-driven control*” e pela combinação de termos “*data-driven or data-based control or modelless control or model-less control*”, e seu resultado é apresentado na Figura ?? . Percebe-se um crescente aumento no número de publicações e citações ao longo dos anos.

Algumas abordagens conceitualmente distintas utilizando DDC aparecem na literatura, dentre elas[‡], citam-se[§]: *Virtual Reference Feedback Tuning* (VRFT), *Iterative Feedback Tuning* (IFT), *Frequency Domain Tuning* (FDT), *Correlation Based Tuning* (CbT), apresentadas originalmente por Campi, Weyer (2002), Hjalmarsson et al. (1994), Kammer et al. (2000) e Karimi et al. (2002), respectivamente.

A maioria destas metodologias utilizam o conceito de otimização a partir da minimização de um funcional de custo, em geral medido em termos da norma H_2 de um sinal da malha. Vários métodos DDC disponíveis na literatura fazem esta otimização de maneira iterativa, dentre eles, o IFT, CbT, ILC, ADP. Outros, o fazem em batelada, como o caso dos métodos VRFT e *Noniterative data-driven model reference control*.

Nos casos iterativos, a minimização do funcional de custo é feita, tipicamente, pelo método do gradiente , a partir de dados de entrada-saída coletados em batelada (?). Um problema na aplicação destes métodos é a falta de condições que garantem convergência para um mínimo global para o índice de desempenho ao se usar estes algoritmos. Afim de resolver o problema da convergência para um mínimo global de um critério de desempenho H_2 , ? focam em fazer com que a função de custo a ser otimizada seja suficientemente “bem comportada” fazendo com que qualquer algoritmo (correto) de otimização convirja propriamente. Outro trabalho neste sentido é o de Huusom et al. (2009) que estendem o método IFT afim melhorar as propriedades de convergência e reduzir o número de experimentos requeridos com a planta.

A princípio, considerando condições ideais, a convergência para o mínimo global não é problema quando se utiliza o método VRFT, por se tratar de um método a batelada. Além do mais, este método não apresenta problemas de inicialização e não acessa a planta várias vezes para experimento, ao contrário de métodos iterativos, mantendo sua operação normal. O método VRFT em suas primeiras versões apresentadas por ?Campi, Weyer (2002), lida com o projeto de sistemas SISO e resulta em um controlador linear. Extensões para o caso de controladores não lineares têm sido propostas desde então (???).

[†]os resultados obtidos foram refinados pelas seguintes categorias do Web of Science: “*automation control systems*” e “*engineering electrical electronic*”, que se mostraram as mais significativas.

[‡]os nomes dos métodos, em geral batizados por seus autores, foram mantidos na linguagem original por muitas vezes não terem uma tradução ainda difundida na literatura brasileira.

[§]optou-se aqui por citar algumas técnicas que o autor achou mais relevantes para esta proposta, porém outras podem ser encontradas na literatura (?Safonov, Tsao, 1995; Karimi et al., 2007; Huang, Kadali, 2008; Schaal, Atkeson, 1994; Shi, Skelton, 2000)

Devido a suas características atrativas pretende-se, neste trabalho, pelo menos a princípio, utilizar a abordagem VRFT. Esta abordagem formula o problema de sintonia do controlador como um problema de identificação via a introdução de um sinal virtual de referência (Hou, Wang, 2013). O objetivo de controle é minimizar um funcional de custo dado pela norma H_2 da diferença entre função de transferência em malha fechada e um modelo de referência, ambos multiplicados pelo sinal de referência r . O problema em achar o mínimo é que não há modelo disponível, impedindo o cálculo do modelo em malha fechada. Visando contornar este problema, o conceito de sinais virtuais é usado. Estes sinais, dados por e^{vir} (erro virtual) e u^{vir} (sinal de controle virtual), são criados a partir do sinal de saída da planta e do modelo de referência inverso, possibilitando o uso de um novo funcional de custo dado por $J_{vir} = \|C(\theta, z^{-1})e^{vir} - u^{vir}\|$, em que $C(\theta, z^{-1})$ representa o modelo do controlador cujos parâmetros θ devem ser identificados por otimização. Campi, Weyer (2002) mostram que ao minimizar J_{vir} , minimiza-se o primeiro critério sob certas condições. A minimização do novo funcional pode ser feita por técnicas de estimadores de mínimos quadrados (MQ), variáveis instrumentais (VI), dentre outras (Aguirre, 2015). Bazanella et al. (2012) mostram exemplos do uso de variáveis instrumentais para resolver o problema de polarização dos parâmetros identificados para casos de sinais ruidosos.

Até o momento, com base na literatura, encontrou-se técnicas que estendem a abordagem VRFT para casos não lineares (?????). Mas de acordo com ?, diferentemente do VRFT linear, estas versões estendidas para sistemas não lineares ou não são em batelada, ou suas soluções não podem ser determinadas por métodos MQ, perdendo uma vantagem considerável do VRFT. Porém ? mostram que o VRFT pode ser estendido para o controle de sistemas não lineares do tipo Hammerstein e Wiener de forma que é mantido a característica não iterativa do VRFT. Três anos depois, ? apresentam um método onde somente a não linearidade estática (ou sua inversa), representada por séries *B-spline*, é estimada simultaneamente com o controlador sem a necessidade de otimização não linear ou procedimentos iterativos.

Uma pergunta que surge é: seria possível o uso de técnicas de estimação do tipo MQ com restrições para modelos não lineares NARX (do inglês *Nonlinear model with eXogenous inputs*) ou MQ estendido para modelos NARMAX (do inglês *Nonlinear AutoRegressive Moving Average model with eXogenous inputs*) neste tipo de abordagem? Apesar de já terem sido desenvolvidas técnicas para incorporar informação auxiliar no processo de identificação, por exemplo via restrições e otimização multiobjetivo (Barroso, 2006), todas estas restrições dizem respeito à planta. Neste sentido surgem questões como: de que forma estas técnicas podem ser usadas na abordagem DDC? Seria possível encontrar um análogo da informação auxiliar, usada em métodos tradicionais, para estratégias DDC, em que não há informação da planta? Poderia esta ser definida, por exemplo, a partir restrições que garantam aspectos relevantes ao controle, como limitações de ganho devido a saturação de atuadores, ou até mesmo relativos a robustez?

Ainda, segundo Hou, Wang (2013): (a) o procedimento de sintonia VRFT é *off-line*, portanto se a estrutura da planta muda, os parâmetros devem ser re-sintonizados; (b) a seleção do conjunto de controladores a serem sintonizados determina o efeito da sintonia do controlador e não existe metodologias para esta seleção; (c) nem todos os

conjuntos de dados contêm informação dinâmica suficiente.

Com estas observações em mente, surgem mais perguntas como: (a) será que a questão da adaptação a variações paramétricas da planta poderia ser tratada com o uso de técnicas MQ recursivas? (b) seria possível utilizar conhecimentos já desenvolvidos na identificação de sistemas ([Aguirre, 1994](#)) para escolha de regressores em metodologias DDC no sentido de auxiliar na escolha de uma estrutura adequada para o conjunto de controladores a serem identificados? (c) o que se poderia dizer acerca da estabilidade e robustez do sistema final ao se empregar estas mudanças?

Portanto o trabalho terá seus esforços voltados para adaptar ou expandir abordagens clássicas DDC, principalmente a VRFT, de forma a acomodar técnicas de identificação de sistemas não lineares com o uso de restrições, dando contribuições também acerca de metodologias para a escolha da estrutura dos controladores, assim como na análise de estabilidade e robustez final do sistema.

Chapter 2

Virtual Reference Feedback Tuning

2.1 Introdução

Bibliography

Aguirre Luis Antonio. Some Remarks on Structure Selection for Nonlinear Models // International Journal of Bifurcation and Chaos. XII 1994. 04, 06. 1707–1714.

Aguirre Luis Antonio. Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não Lineares: Teoria e Aplicação. Belo Horizonte, 2015. Fourth.

Barroso Mário F. Santos. Otimização Bi-Objetivo Aplicada à Estimação de Parâmetros de Modelos Não-Lineares: Caracterização e Tomada de Decisão. 2006. 134.

Bazanella Alexandre Sanfelice, Campestrini Lucíola, Eckhard Diego. Data-Driven Controller Design. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. 208. (Communications and Control Engineering).

Campi Marco C., Weyer Erik. Finite Sample Properties of System Identification Methods // IEEE Transactions on Automatic Control. 2002. 47, 8. 1329–1334.

Hjalmarsson H., Gunnarsson S., Gevers M. A Convergent Iterative Restricted Complexity Control Design Scheme // Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control. 1994. 2, December. 1735–1740.

Hou Zhong Sheng, Wang Zhuo. From Model-Based Control to Data-Driven Control: Survey, Classification and Perspective // Information Sciences. 2013. 235. 3–35.

Huang Biao, Kadali Ramesh. Dynamic Modeling, Predictive Control and Performance Monitoring // Lecture Notes in Control and Information Sciences. 2008. 249.

Huusom Jakob Kjøbsted, Poulsen Niels Kjølstad, Jørgensen Sten Bay. Improving Convergence of Iterative Feedback Tuning // Journal of Process Control. IV 2009. 19, 4. 570–578.

Ikeda Masao, Fujisaki Yasumasa, Hayashi Naoki. A Model-Less Algorithm for Tracking Control Based on Input-Output Data // Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications. 47. 2001. 1953–1960.

Kammer L.C., Bitmead R.R., Bartlett P.L. Direct Iterative Tuning via Spectral Analysis // Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.98CH36171). 3. 2000. 2874–2879.

- Karimi A., Mišković L., Bonvin D.* Convergence Analysis of an Iterative Correlation-Based Controller Tuning Method // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2002. 35, 1. 413–418.
- Karimi Alireza, van Heusden Klaske, Bonvin Dominique.* Non-Iterative Data-Driven Controller Tuning Using the Correlation Approach // 2007 European Control Conference (ECC). 3536. VII 2007. 5189–5195.
- Ljung Lennart.* System Identification: Theory for the User. New Jersey, US: Prentice Hall, 1999. 609.
- Safonov Michael G., Tsao Tung-Ching.* The Unfalsified Control Concept: A Direct Path from Experiment to Controller // Feedback Control, Nonlinear Systems, and Complexity. 1995. 196–214.
- Schaal Stefan, Atkeson Christopher G.* Robot Juggling: Implementation of Memory-Based Learning // IEEE Control Systems. II 1994. 14, 1. 57–71.
- Shi Guojun, Skelton Robert E.* Markov Data-Based LQG Control // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2000. 122, 3. 551.
1. Strength of Earth's Materials. // . 1997. 13. 3–8.
- Takahashi Yasundo, Rabins Michael J, Auslander David M.* Control and Dynamic Systems. California: Addison-Wesley, 1972.
- Tolle Max.* Regelung Der Kraftmaschinen. Berlin: Springer, 1921.
- Ziegler J G, Nichols N B.* Optimum Settings for Automatic Controllers // Transactions of ASME. 1942. 64. 759–768.