



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
Campus de Bauru

RAUL KATAYAMA MANSANO

**Controle Adaptativo Multi-rate para Eficiência Energética  
em Sistemas de Controle via Redes Sem Fio**

Bauru

2016

RAUL KATAYAMA MANSANO

CONTROLE ADAPTATIVO MULTI-RATE PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM  
SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDE SEM FIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração:** Automação

**Linha de Pesquisa:** Mecatrônica

**Orientador:** Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy

**Coorientador:** Prof. Dr. Diego Colón

Bauru – SP

2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Unesp  
Instituto de Ciência e Tecnologia – Câmpus de Sorocaba

Mansano, Raul Katayama.

Controle adaptativo multi-rate para eficiência energética em sistemas de controle via redes sem fio / Raul Katayama Mansano, 2016.

70 f.: il.

Orientador: Eduardo Paciência Godoy.

Coorientador: Diego Colón

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de Engenharia (Câmpus de Bauru), 2016.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Sistemas de controle ajustável. 3. Energia. I. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de Engenharia (Câmpus de Bauru). II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE RAUL KATAYAMA MANSANO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.**

Aos 09 dias do mês de setembro do ano de 2016, às 09:00 horas, no(a) UNESP - Sorocaba, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY - Orientador(a) do(a) Engenharia de Controle e Automação / UNESP Sorocaba, Prof. Dr. EVERSON MARTINS do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia/UNESP, Prof. Dr. BRUNO AUGUSTO ANGÉLICO do(a) Depto. de Eng. de Telecomunicações e Controle / Escola Politécnica da USP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RAUL KATAYAMA MANSANO, intitulada **CONTROLE ADAPTATIVO MULTI-RATE PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDES SEM FIO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: \_\_\_ APROVADO \_\_\_. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY



Prof. Dr. EVERSON MARTINS



Prof. Dr. BRUNO AUGUSTO ANGÉLICO



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Naomi e Eliseu, por todo amor e carinho incondicionais ao longo de toda a minha vida, por nunca deixarem que algo me faltasse, por me educarem e por me ensinarem a ser uma pessoa persistente, gentil e humilde. À minha irmã, Natália, por ser minha melhor amiga e nunca deixar de me apoiar. Aos meus familiares pelos bons momentos e pelo incentivo, que me ajudaram a crescer como pessoa e como profissional.

À minha esposa, amada e companheira, Eliane, que esteve ao meu lado ao longo dos últimos oito anos, que me apoiou, que me fez crescer e ser uma pessoa melhor, que me amou mesmo nos momentos mais difíceis e que fez com que minha vida pudesse ser mais feliz a cada dia.

Aos meus sogros e segunda família, Roseli e Levi, por toda ajuda, carinho e apoio, que tornaram esta jornada muito mais leve.

Aos meus padrinhos, Cauê, Lígia, Gabriel, Marina, Francis, Fernanda, Luís e Andrea, e aos amigos Aruã, Luísa, Gabriela, Luís Fernando e Konrad pela grande amizade e pelos bons (e maus) momentos que passamos juntos.

À Brengatech, pelo crescimento profissional e pelas boas risadas.

Aos Professores Eduardo Godoy e Diego Colón pela ajuda e pelos trabalhos que me incentivaram e me ajudaram a crescer como pesquisador.

“O homem é do tamanho dos seus sonhos.”

Fernando Pessoa

## RESUMO

Com os recentes avanços das tecnologias sem fio e a proliferação de sensores sem fio, há um crescente interesse na implementação de Sistemas Controle via Redes Sem Fio (WNCSs), que fornecem vantagens em relação às arquiteturas tradicionais ponto-a-ponto e às arquiteturas de redes cabeadas. Apesar das vantagens, a inserção de redes industriais na malha de controle impõe não-linearidades e restrições que afetam o desempenho e a estabilidade do WNCS. Além disto, uma questão fundamental para aplicações de WNCS é a vida útil da bateria de alimentação dos sensores sem fio, uma vez que é uma fonte limitada de energia. Como a transmissão da informação na rede sem fio requer um alto gasto energético pelo dispositivo, deve-se restringir a quantidade de comunicações para poupar bateria. Esta restrição inviabiliza o uso de sensores sem fio em diversas aplicações de WNCS. Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um controlador adaptativo *multi-rate* para eficiência energética em aplicações industriais de WNCSs, através da diminuição da frequência de transmissão de dados na rede e, portanto, redução do consumo energético dos dispositivos sem fio. Um controlador adaptativo auto-ajustável foi implementado para identificar o modelo do WNCS, simular tal modelo e sintonizar os parâmetros do controlador a cada passo de controle, fornecendo robustez contra distúrbios e não-linearidades inerentes ao WNCS. O diferencial do controlador adaptativo é a incorporação das técnicas de identificação por pacote e de controle *multi-rate*. A técnica de identificação por pacote consiste em transmitir mensagens com vários dados (não somente o mais atual) coletados durante o período de amostragem do sensor sem fio, melhorando a identificação do modelo do WNCS e, conseqüentemente, o desempenho do controlador adaptativo. A técnica de controle *multi-rate* consiste em usar dados virtuais de realimentação, provenientes do modelo simulado do WNCS, para possibilitar uma atuação sobre o processo a uma frequência mais rápida que a amostragem dos sensores sem fio, permitindo a redução das transmissões sem fio do WNCS. Resultados experimentais mostram que o controlador adaptativo *multi-rate* é robusto e efetivo para aplicações de WNCS, permitindo poupar energia das baterias dos sensores sem fio sem prejudicar significativamente o desempenho de controle do WNCS. As análises do impacto do período de amostragem e do parâmetro  $\Gamma$  do controlador permitiram a obtenção de valores ótimos para a melhoria da eficiência energética do WNCS.

**Palavras-chave:** Sistemas de Controle Via Redes Sem Fio, Eficiência Energética, Controle Adaptativo Auto-ajustável, Controle *Multi-rate*.

## ABSTRACT

Recent advances in wireless technologies and the proliferation of wireless sensors led to an increasing interest in the implementation of Wireless Networked Control Systems (WNCS), which provide advantages over traditional peer-to-peer and cabled networks architectures. Despite these advantages, inserting a communication network in the control loop impose nonlinearities and constraints which affect stability and performance of the system. Furthermore, a major issue in wireless applications is the lifetime of the sensors batteries, which are a limited source of power. As transmitting data over the network requires high-energy expenditure, it is imperative to reduce the number of communications, in order to save battery. This constraint makes it unfeasible to use wireless sensors in most WNCS applications. In this context, this work aims to develop a multi-rate adaptive controller to enhance energy efficiency in industrial WNCS applications, by reducing frequency of data transmission over the network, thus reducing power expenditure of the wireless devices. A self-tuning adaptive controller is implemented, which can identify the WNCS model, simulate such model and tune the controller parameters at each control step, then providing robustness to disturbance and inherent nonlinearities of the WNCS. The adaptive controller is augmented with a multi-rate control technique and packet-based identification. The packet-based identification consists in transmitting messages with a pack of data (instead of only transmitting the most recent one) sampled during the inter-samples period, thus improving identification of the WNCS model and, consequently, improving control performance. The multi-rate control technique consists in using virtual feedback data, provided by the simulated model of the WNCS, then enabling actuation faster than wireless sampling, allowing the reduction of wireless transmissions in the WNCS. Experimental results show that the implemented multi-rate adaptive controller is robust and effective to WNCS and improve battery lifetime without decreasing control performance of the WNCS significantly. By investigating the impacts of sampling period and of controller parameter  $\Gamma$  determined optimized values to improve energy efficiency of the WNCS.

**Keywords:** *Wireless Networked Control Systems, Energy Efficiency, Self-tuning Adaptive Control, Multi-rate Control*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos de um Sistema de Controle Via Rede. ....	4
Figura 2 – Modificação do controlador PI para lidar com transmissão de dados sem fio.....	7
Figura 3 – Filtro de Kalman com controlador PID em uma rede cabeada. ....	8
Figura 4 – Filtro de Kalman com controlador PID em uma rede sem fio. A estrutura foi modificada para compensar a redução na taxa de amostragem do sensor sem fio.....	10
Figura 5 – Preditor de Smith e controlador PID em uma rede cabeada. ....	10
Figura 6 – Preditor de Smith e controlador PID em uma rede sem fio. A estrutura foi modificada para compensar a redução na taxa de amostragem do sensor sem fio.....	11
Figura 7 – Estrutura básica de um controlador MPC. ....	12
Figura 8 – Operação de um controlador MPC.....	12
Figura 9 – Comparação para amostragens em abordagens de controle baseado em tempo discreto e baseado em eventos.....	16
Figura 10 – Controle baseado em modelo com <i>multi-rate</i> . ....	18
Figura 11 – Diagrama de blocos de um sistema adaptativo com escalonamento de ganhos ...	20
Figura 12 – Diagrama de blocos de um sistema adaptativo por modelo de referência. ....	21
Figura 13 – Diagrama de blocos de um sistema adaptativo auto-ajustável.....	22
Figura 14 – Protocolo de comunicação para controle baseado em pacote. ....	33
Figura 15 – Planta DTS200 da Amira. ....	35
Figura 16 – Diagrama do sistema de três tanques acoplados DTS200.....	36
Figura 17 – sbRIO-9636, da National Instruments. ....	38
Figura 18 – Estrutura do WNCS proposto. ....	40
Figura 19 – Esquemático de funcionamento do Controlador Adaptativo Auto-ajustável <i>Multi-rate</i> para WNCS. ....	40
Figura 20 – Fluxograma do funcionamento da estratégia de controle adaptativo <i>multi-rate</i> ...	41
Figura 21 – Laço de Simulação dos modelos ARX de primeira ordem para cada tanque do WNCS.....	44
Figura 22 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 1. Período de amostragem de 4s. ....	46
Figura 23 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 2. Período de amostragem de 4s. ....	46
Figura 24 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 1. Período de amostragem de 8s. ....	47

Figura 25 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 2. Período de amostragem de 8s. ....	48
Figura 26 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 1. Período de amostragem de 10s. ....	49
Figura 27 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 2. Período de amostragem de 10s. ....	49
Figura 28 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 1. Período de amostragem de 12s. ....	50
Figura 29 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 2. Período de amostragem de 12s. ....	50
Figura 30 – Comparação das Respostas Real e Simulada do WNCS para o Tanque 1. Controlador Adaptativo Operando com estratégia de <i>Multi-Rate</i> com Período de 1s e Identificação de Modelo sem Pacotes de Dados. Período de Amostragem do Sensor sem Fio de 12s.....	52
Figura 31 – Comparação das Respostas Real e Simulada do WNCS para o Tanque 2. Controlador Adaptativo Operando com estratégia de <i>Multi-Rate</i> com Período de 1s e Identificação de Modelo com Pacotes de Dados. Período de Amostragem do Sensor sem Fio de 12s.....	53
Figura 32 – Sinal de controle para o controlador do Tanque 1 com período de amostragem de 8 segundos. Comparativo entre as estratégias de controle adaptativo multi-rate com relação ao método de identificação dos parâmetros. ....	54
Figura 33 – Sinal de controle para o controlador do Tanque 1 com período de amostragem de 12 segundos. Comparativo entre as estratégias de controle adaptativo multi-rate com relação ao método de identificação dos parâmetros.....	54
Figura 34 – Resposta do WNCS com Distúrbios para o Controlador Adaptativo do Tanque 1. Estratégia de <i>Multi-Rate</i> Operando com Período de 1s.....	55
Figura 35 – Resposta do WNCS com Distúrbios para o Controlador Adaptativo do Tanque 2. Estratégia de <i>Multi-Rate</i> Operando com Período de 1s.....	56
Figura 36 – Resposta do WNCS para os Controladores Adaptativos. Estratégia de <i>Multi-Rate</i> Operando com Período de 1s e Identificação por Pacotes de Dados. Sinal de Referência do Tanque 2 é mantida constante após a primeira rampa.....	57
Figura 37 – Comparação da resposta do WNCS para o controlador do Tanque 1 com altos períodos de amostragem. ....	59

Figura 38 – Comparação de desempenho do controlador do Tanque 1. Índices de desempenho $Err_{RMS}$ e $ITAE_{Norm}$ em função do período de amostragem do sensor sem fio. ....	60
Figura 39 - Comparação da resposta do WNCS para o controlador do Tanque 1 para diferentes valores do parâmetro $\Gamma$ . Período de amostragem de 8s. ....	61
Figura 40 – Variação dos índices de desempenho $Err_{RMS}$ e $ITAE_{Norm}$ em função do parâmetro $\Gamma$ .....	62
Figura 41 – Comparação de desempenho em função do período de amostragem do sensor sem fio e o do parâmetro $\Gamma$ do controlador adaptativo. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores nominais de tensão do sinal para medição do nível do tanque.....	37
Tabela 2 – Valores nominais de tensão do sinal para fluxo de saída da bomba d’água.....	37
Tabela 3 – Especificações da bomba de diafragma Shurflo 2095-224-212 .....	38
Tabela 4 – Índices de desempenho dos controladores dos tanques 1 e 2 para os experimentos realizados com período de amostragem de 4s. ....	47
Tabela 5 – Índices de desempenho dos controladores dos tanques 1 e 2 para os experimentos realizados com período de amostragem de 8s. ....	49
Tabela 6 – Índices de desempenho dos controladores dos tanques 1 e 2 para os experimentos realizados com período de amostragem de 10s. ....	51
Tabela 7 – Índices de desempenho dos controladores dos tanques 1 e 2 para os experimentos realizados com período de amostragem de 12s. ....	51
Tabela 8 – Tempo de Convergência do Modelo Simulado. Período de amostragem dos sensores sem fio de 12s. ....	53
Tabela 9 – Comparativo de índices de desempenho para experimentos em condições ideais e em condições com distúrbios. Controlador Adaptativo <i>Multi-Rate</i> com Identificação Baseada em Pacotes. ....	56
Tabela 10 – Estimativa da vida útil da bateria de sensores industriais sem fio para diferentes períodos de amostragem. ....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>AR</b>	<i>Auto-Regressive</i> (Modelo autorregressivo)
<b>ARMAX</b>	<i>Auto-Regressive Moving Average with eXogenous input</i> (Modelo Autorregressivo de Média Móvel com Entrada Externa)
<b>ARX</b>	<i>Auto-Regressive with eXogenous inputs</i> (Modelo Autorregressivo com Entrada Externa)
<b>CARIMA</b>	<i>Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average</i> (Modelo Autorregressivo Controlado com Média Móvel Integrada)
<b>EBC</b>	<i>Event-Based Control</i> (Controle Baseado em Evento)
<b>ITAE</b>	<i>Integral Time-weighted Absolute Error</i> (Integral do Erro Absoluto Ponderado pelo Tempo)
<b>MAC</b>	<i>Medium Access Control</i> (Controle de Acesso ao Meio)
<b>MBC</b>	<i>Model-Based Control</i> (Controle Baseado em Modelo)
<b>MIMO</b>	<i>Multiple Input Multiple Output</i> (Entradas Múltiplas Saídas Múltiplas)
<b>MPC</b>	<i>Model-Based Predictive Control</i> (Controle Preditivo Baseado em Modelo)
<b>MSE</b>	<i>Mean Squared Error</i> (Erro Quadrático Médio)
<b>NCS</b>	<i>Networked Control System</i> (Sistema de Controle via Rede)
<b>PBC</b>	<i>Packet-Based Control</i> (Controle Baseado em Pacote)
<b>PI</b>	<i>Proportional e Integral</i>
<b>PID</b>	<i>Proporcional, Integral e Derivativo</i>
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i> (Qualidade de Serviço)
<b>RLS</b>	<i>Recursive Least Square</i> (Mínimos Quadrados Recursivo)
<b>SISO</b>	<i>Single Input Single Output</i> (Entrada Única Saída Única)
<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo)
<b>WNCS</b>	<i>Wireless Networked Control System</i> (Sistema de Controle via Rede sem Fio)
<b>WSN</b>	<i>Wireless Sensors Network</i> (Rede de Sensor sem Fio)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	<i>Polinômio de saída do modelo linear discreto</i>
$B$	<i>Polinômio de entrada do modelo linear discreto</i>
$K_C$	<i>Ganho proporcional</i>
$r(t), r(k)$	<i>Sinal de referência em tempo contínuo e discreto, respectivamente</i>
$T_i$	<i>Tempo integral</i>
$T_s$	<i>Período de Amostragem</i>
$u(t), u(k)$	<i>Sinal de entrada em tempo contínuo e discreto, respectivamente</i>
$U(S)$	<i>Transformada de Laplace de <math>u(t)</math></i>
$x(t)$	<i>Vetor de estados</i>
$y(t), y(k)$	<i>Sinal de saída em tempo contínuo e discreto, respectivamente</i>
$Y(S)$	<i>Transformada de Laplace de <math>y(t)</math></i>
$\hat{y}$	<i>Sinal de saída estimado</i>
$X_j$	<i>Estado do processo no tempo <math>j</math></i>
$\hat{X}_{j-1}$	<i>Estimativa a posteriori do estado do processo no tempo <math>j</math></i>
$\hat{X}_j$	<i>Estimativa a priori do estado do processo no tempo <math>j</math></i>
$U_j$	<i>Entrada do processo no tempo <math>j</math></i>
$W_j$	<i>Ruído do processo, normalmente definido como um ruído branco</i>
$V_j$	<i>Ruído de medição</i>
$\hat{Z}_j$	<i>Saída estimada</i>
$K_j$	<i>Ganho de Kalman</i>
$\Gamma$	<i>Parâmetro de projeto do controlador PI-Adaptativo</i>
$\epsilon$	<i>Erro de referência</i>
$\lambda$	<i>Fator de esquecimento</i>
$\theta, \hat{\theta}$	<i>Vetor de parâmetros da planta real e estimado, respectivamente</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVO .....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITUAL .....</b>	<b>4</b>
2.1	SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDE SEM FIO .....	4
2.1.1	Estratégias de Controle para WNCS .....	6
2.2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM WNCS .....	13
<b>3</b>	<b>TEORIA DE CONTROLE E IDENTIFICAÇÃO .....</b>	<b>19</b>
3.1	CONTROLE ADAPTATIVO .....	19
3.1.1	Escalonamento de Ganhos.....	20
3.1.2	Controle Adaptativo por Modelo de Referência .....	20
3.1.3	Reguladores Auto-Ajustáveis .....	21
3.1.4	Controle PI Adaptativo.....	22
3.2	IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS .....	24
3.2.1	Algoritmo dos Mínimos Quadrados Recursivo .....	27
3.3	CONTROLE BASEADO EM PACOTE.....	33
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>35</b>
4.1	PLANTA DTS200 .....	35
4.2	INTERFACE PROGRAMÁVEL SBRIO .....	38
4.3	ESTRATÉGIA DE CONTROLE E IDENTIFICAÇÃO.....	39
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>45</b>
5.1	ANÁLISE DE VIABILIDADE.....	45
5.2	ANÁLISE DE OPERAÇÃO COM DISTÚRBIOS.....	55
5.3	RELAÇÃO ENTRE PERÍODO DE AMOSTRAGEM E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	58
5.4	RELAÇÃO ENTRE DESEMPENHO DE CONTROLE E PARÂMETRO $\Gamma$ DO CONTROLADOR.....	61
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>

## 1 JUSTIFICATIVA

No cenário industrial moderno, os processos de produção estão sujeitos a diversas restrições, que englobam aumento da rentabilidade, melhor aproveitamento dos recursos (e.g. matéria-prima, suprimento de energia), exigências de segurança e o comprometimento com as regulamentações socioambientais. Tais restrições implicam na necessidade de conhecimento qualitativo e quantitativo do processo e de seus parâmetros. Portanto, os sensores são claramente importantes, uma vez que permitem observar e identificar o estado atual de um processo, a fim de fornecer as informações necessárias para o controle e monitoramento do sistema (LOTUFO; GARCIA, 2008).

As arquiteturas tradicionais de comunicação e controle ponto-a-ponto são compostas por cabeamento conectando o computador ou dispositivo central de controle a cada sensor e atuador do sistema (SAUTER *et al.*, 2011). Embora tenham sido largamente empregadas nos sistemas de automação nas últimas décadas, estas arquiteturas tradicionais de controle centralizado não tem a capacidade de se adequar aos novos requisitos de desenvolvimento de sistemas de controle como modularidade, controle descentralizado, facilidade de diagnóstico e baixo custo (GUPTA; MO-YUEN, 2010). Nos sistemas de automação atuais, a introdução de arquiteturas de controle baseadas em redes industriais pode melhorar a eficiência, a flexibilidade e a confiabilidade do sistema, reduzindo o tempo e os custos de instalação e manutenção (SAUTER, 2010). Devido às suas vantagens, as tecnologias de redes industriais foram rapidamente absorvidas para satisfazer as necessidades de comunicação entre sistemas e equipamentos aplicados em automação e controle (GALLOWAY; HANCKE, 2013).

Aplicações recentes de sistemas de controle distribuído demonstram o surgimento de uma nova abordagem para a utilização de redes fieldbus. Nessa abordagem, o controlador e a planta ficam fisicamente separados e são conectados por uma rede de comunicação. Este tipo de implementação em sistemas industriais, onde as malhas de controle são fechadas sob uma rede de comunicação tem sido denominada de Sistema de Controle via Redes (NCS – do inglês *Networked Control System*) (GUPTA; MO-YUEN, 2010). Com os avanços nas tecnologias sem fio, uma evolução nas arquiteturas de NCS é obtida, com a inserção de redes sem fio, interoperando com redes cabeadas já existentes, dando origem a um Sistema de Controle via Redes Sem Fio (WNCS – do inglês *Wireless Networked Control System*).

A tecnologia sem fio é de grande interesse devido à sua contribuição com a redução de custo com cabeamento e com o aumento da flexibilidade e escalabilidade, além de facilitar a

distribuição dos sensores e reduzir a quantidade de conexões físicas, que poderiam porventura apresentar falhas e, portanto, gerar problemas de confiabilidade. Apesar das vantagens, as tecnologias sem fio apresentam atualmente requerimentos que podem não ser atingidos de maneira satisfatória ou, simplesmente, podem não ser atingidos.

Em WNCS, um quesito fundamental está no gasto energético dos dispositivos sem fio, uma vez que sua fonte de alimentação se dá, normalmente, através de baterias, ou seja, é limitada. Assim, o fluxo constante de informações na rede pode esgotar rapidamente as fontes energéticas de sensores sem fio (ARAÚJO *et al.*, 2014), pois o maior responsável pelo gasto energético destes sensores é o rádio, que apresenta um consumo elevado, mesmo que ocioso (ANASTASI; CONTI; DI FRANCESCO, 2009). Portanto, para evitar o consumo excessivo de bateria, sensores sem fio não devem operar com períodos de transmissão muito curtos.

Segundo Emerson (2015), alguns dispositivos permitem amostragem máxima de apenas 1s e, desta forma, sua utilização em WNCSs é comprometida, uma vez que, em sistemas de controle, a leitura e transmissão de informações precisam ocorrer a taxas definidas, para que a atuação sobre o sistema seja suficientemente rápida para alcançar os requisitos de controle de maneira efetiva. Portanto, para que sejam competitivas e viáveis economicamente, estas tecnologias têm que atacar os problemas diretamente e atingir os requisitos de controle que sistemas de comunicação cabeados são capazes de atingir.

Portanto, a pesquisa acerca de estratégias que viabilizem a utilização de sensores industriais sem fio em aplicações de controle e que melhorem a eficiência energética do WNCS é claramente importante e essencial para o desenvolvimento deste tipo de sistema. Eficiência energética pode ser definida como a possibilidade de melhorar o aproveitamento no consumo de energia associada a uma atividade, contribuindo assim para a redução dos gastos com este insumo. De forma simplificada, isso significa realizar a mesma atividade consumindo menos energia. Do ponto de vista do WNCS, a eficiência energética busca reduzir o consumo de energia dos sensores sem fio, de forma que a vida útil das baterias de alimentação seja estendida sem que o desempenho de controle do WNCS seja significativamente prejudicado.

## 1.1 OBJETIVO

Desenvolver uma estratégia de controle adaptativo *multi-rate* para eficiência energética em aplicações de WNCSs, objetivando minimizar o consumo de energia e o uso de banda da rede sem fio, no entanto, garantindo requisitos de desempenho de controle e estabilidade. Essa

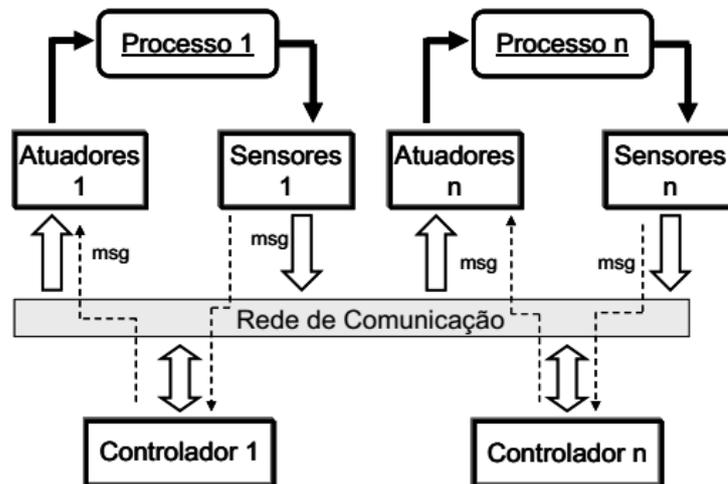
eficiência energética está focada na redução do gasto de energia dos sensores sem fio do WNCS, obtida através da redução da transmissão de dados na rede sem fio e, conseqüentemente, aumento da vida útil da bateria dos dispositivos do WNCS.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITUAL

### 2.1 SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDE SEM FIO

A denominação de Sistema de Controle via Rede é dada à arquitetura de controle distribuído em que as trocas de dados entre sensores, controladores e atuadores ocorrem através de uma rede de comunicação (GUPTA; MO-YUEN, 2010), como mostrado na Figura 1. Quando existe compartilhamento de dados entre os dispositivos através de uma rede sem fio, esta arquitetura é denominada de Sistema de Controle via Rede sem Fio.

Figura 1 – Diagrama de blocos de um Sistema de Controle Via Rede.



Fonte: (GODOY, 2011).

A pesquisa em NCS cresceu nas últimas décadas devido, principalmente, à necessidade de desenvolvimento de arquiteturas digitais em que o controle seja realizado remotamente, ou seja, sem a necessidade de o controlador estar alocado próximo à planta (DE CASTRO, 2012). Como substitutas de arquiteturas tradicionais ponto-a-ponto, as redes de comunicação oferecem um meio de comunicação compartilhado para a troca de informações relevantes, tanto para a realização do controle quanto para o monitoramento do processo e, assim, provêm vantagens de custo, flexibilidade e confiabilidade que alavancaram o seu uso em processos industriais. Muitas características interessantes inerentes às redes sem fio, quando comparadas aos sistemas com rede cabeada, motivam o desenvolvimento de WNCS (NAGHSHTABRIZI; HESPANHA, 2011), pela capacidade de operar em uma ampla gama de ambientes, permitindo a interoperabilidade entre sistemas e, também, fornecendo vantagens

em termos de potência, mobilidade e flexibilidade (FISCHIONE *et al.*, 2011). O interesse em WNCS vem crescendo nas últimas décadas devido principalmente a:

- Baixo custo: do ponto de vista de produção, avanços das tecnologias de redes levaram ao desenvolvimento de dispositivos multifuncionais e, como passaram a ser produzidos em série, o seu custo de produção foi bastante reduzido. Do ponto de vista da instalação, a comunicação via rede oferece um meio compartilhado para troca de informações entre os dispositivos, reduzindo a quantidade de cabos necessários em relação aos sistemas tradicionais ponto-a-ponto, conseqüentemente, reduzindo o custo de cabeamento da instalação. No caso de redes sem fio, a ausência de cabos de comunicação em rede contribui ainda mais para a redução deste custo.
- Instalação: além da redução do número de cabos, a padronização destes facilita a instalação dos nós e no reposicionamento deles na planta, caso seja necessário e possível, de acordo com a topologia da rede. No caso de redes sem fio, geralmente os dispositivos são alimentados por baterias e, por isto, podem ser alocados em praticamente qualquer lugar, principalmente em locais onde os custos de cabeamento não são justificáveis, ou locais de segurança intrínseca (JOHANSSON, 2011).
- Manutenção: como são constituídas de dispositivos multifuncionais, as próprias redes de comunicação apresentam capacidade de diagnóstico de problemas em dispositivos de conexão (como roteadores), em nós ou na ligação entre dispositivos e, portanto, facilita a detecção e a localização de falhas.
- Flexibilidade: o uso de redes aumenta a flexibilidade de um sistema, uma vez que proporciona maior facilidade para mudar a quantidade e a posição dos nós em comparação com os sistemas tradicionais, em que os cabos são dedicados. As redes ainda possuem a capacidade de se reconfigurar em caso de falha de algum nó para manter a integridade da comunicação entre os demais nós.

Sistemas de controle automático têm sido muito estudados para mitigar efeitos negativos da implementação digital como atraso, distúrbios, ruídos, saturações e problemas de quantização e, assim, melhorar a qualidade de controle destes sistemas. Entretanto, se antes efeitos inerentes às redes como atrasos de comunicação, perdas de dados, *jitter* (variabilidade do atraso) e efeitos de quantização eram geralmente omitidos das teorias tradicionais de controle, com a inserção das redes de comunicação nas malhas de controle, agora estes efeitos são fatores que influenciam diretamente no desempenho de controle e na estabilidade do WNCS. Desta forma, para que o WNCS opere adequadamente, estes fatores devem ser

devidamente considerados no projeto do sistema de controle (BAILLIEUL; ANTSAKLIS, 2007).

Estes efeitos ocorrem naturalmente em uma rede, uma vez que o sinal deve ser amostrado, convertido para um formato digital, transmitido pela rede de comunicação e deve ser reconvertido quando recebido no nó de destino, onde será processado (NAGHSHTABRIZI; HESPANHA, 2011). Para que todo este processo seja realizado, é necessário um tempo não desprezível e, em determinados casos, altamente variável, pois tanto o acesso à rede quanto o tempo de transmissão do dado dependem diretamente das condições da rede, como congestionamento e qualidade do sinal. Atrasos de comunicação podem reduzir a qualidade do controle e até desestabilizar completamente um NCS (MAHMOUD, 2014).

Além do atraso de comunicação, WNCSs estão sujeitos a perdas de mensagens, geralmente decorrentes de erros de transmissão nos canais de comunicação, erros devidos à sobreposição e ao estouro de mensagens nos *buffers* de transmissão e recepção, e erros relacionados a falhas de acesso à rede (GODOY, 2011). Quando ocorre perda de pacotes ou quando o atraso na comunicação é muito longo, a retransmissão do pacote pode ser desnecessária, uma vez que o dado não é atual e pode não ser útil, além de contribuir para o aumento de tráfego na rede. Nestes casos, descartar este pacote pode ser uma solução mais interessante. Esses efeitos afetam de forma diferente cada tipo de NCS, dependendo das características e particularidades de cada tipo de rede e protocolo de comunicação utilizado no NCS (FENG-LI; MOYNE; TILBURY, 2002).

Uma questão importante em aplicações de WNCS, em comparação com aplicações tradicionais de sistemas para monitoramento e análise, é o *jitter*. Enquanto para o monitoramento é importante que as mensagens sejam entregues com sucesso (confiabilidade), para WNCS é necessário garantir que a entrega das mensagens seja realizada com sucesso dentro de um intervalo permitido, sem que haja grande variação deste intervalo (*jitter*) (DE CASTRO, 2012). Portanto, os dispositivos conectados na rede devem compartilhar o meio disponível para a troca de informações da melhor maneira possível, para que seja possível cumprir com requisitos temporais de transmissão de dados (HESPANHA; NAGHSHTABRIZI; XU, 2007).

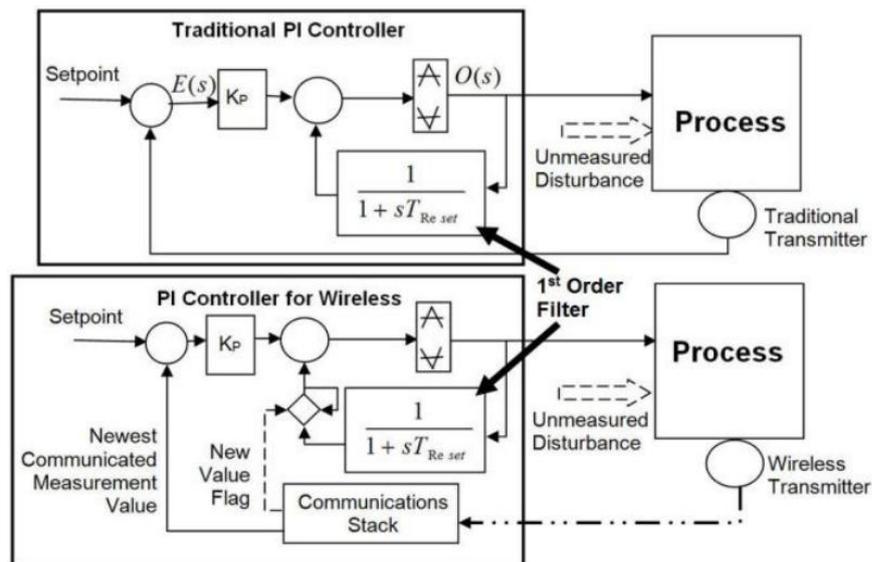
### 2.1.1 Estratégias de Controle para WNCS

Dados alguns dos principais aspectos dos sistemas de controle em rede, o grande desafio na implementação destes sistemas é entender como estes efeitos afetam o seu desempenho e a

sua estabilidade, preferencialmente de maneira quantitativa, e evidenciar os fatores mais importantes para cada tipo de WNCS (HEEMELS *et al.*, 2010), para que seja possível o desenvolvimento de uma estratégia de controle capaz de mitigar esses efeitos e garantir os requisitos de controle e estabilidade (GODOY *et al.*, 2011).

Comumente em WNCS, os valores das medições não são atualizados periodicamente, o que pode provocar erros no cálculo das ações e taxa de reset de um controlador PID padrão (BLEVINS; NIXON; WOJSZNIS, 2014). Assim, se as ações de controle são calculadas apenas quando uma nova medição é recebida, a resposta de controle a mudanças do valor de referência e as ações de compensação de distúrbios entre amostras podem ser atrasadas. O algoritmo PIDPlus é uma modificação no algoritmo PID padrão para compensar estes efeitos e permitir a aplicação de um algoritmo PID em WNCS de maneira mais confiável. A Figura 2 mostra a estrutura do PIDPlus utilizada por Blevins, Nixon e Wojsznis (2014).

Figura 2 – Modificação do controlador PI para lidar com transmissão de dados sem fio.



Fonte: (BLEVINS; NIXON; WOJSZNIS, 2014).

Esta estrutura de PIDPlus modifica o algoritmo padrão realizando o reset do PID através de uma rede de realimentação positiva, um filtro, cuja constante de tempo é um reflexo direto da resposta dinâmica do processo. A realimentação (*newest communicated measurement value*) e o filtro de primeira ordem são modificados para criar a contribuição de reposição com o seguinte comportamento:



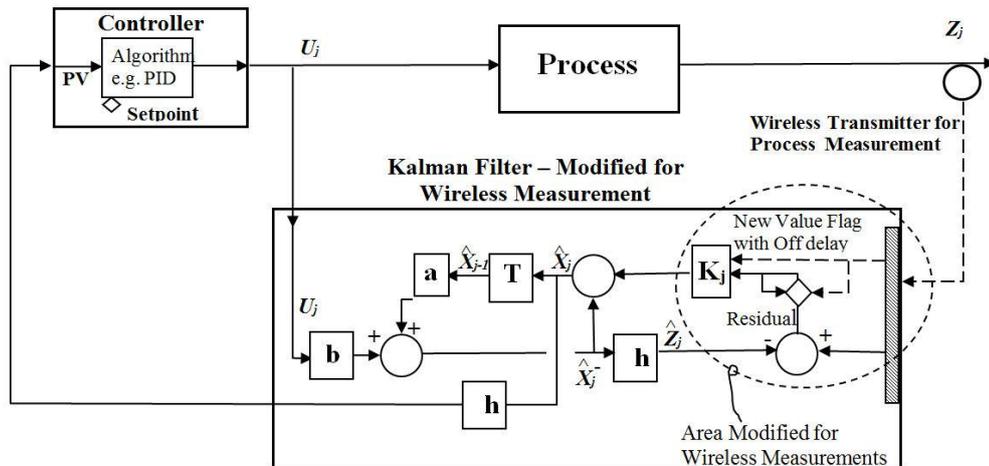
Em que:

- $a$  e  $b$  são constantes que definem o ganho do processo e a resposta dinâmica;
- $h$  é um ganho associado com conversões de unidade;
- $T$  é uma unidade de atraso;
- $X_j$  é o estado do processo no tempo  $j$ ;
- $\hat{X}_{j-1}$  é a estimativa *a posteriori* do estado do processo no tempo  $j$ ;
- $\hat{X}_j$  é a estimativa *a priori* do estado do processo no tempo  $j$ ;
- $U_j$  é a entrada do processo no tempo  $j$ ;
- $W_j$  é o ruído do processo, normalmente definido como um ruído branco;
- $V_j$  é o ruído de medição, normalmente definido como um ruído branco;
- $\hat{Z}_j$  é a saída estimada;
- $K_j$  é o ganho de Kalman.

Segundo a estrutura da Figura 3, o filtro de Kalman utiliza um modelo do processo sem ruído de medição ou de processo. Adicionalmente, o algoritmo utiliza o resíduo, definido pela diferença entre as saídas estimada e real, juntamente com o ganho Kalman para compensar efeitos das imprecisões em ‘ $a$ ’, ‘ $b$ ’ ou ‘ $h$ ’ e dos ruídos de medição ou de processo. Para que o filtro de Kalman seja considerado um estimador linear ótimo, o ganho Kalman pode ser calculado de forma recursiva.

Esta estrutura, entretanto, não é viável para aplicações de controle em rede sem fio, pois depende que uma nova medição da saída da planta esteja disponível a cada execução do algoritmo. É necessário, então, adaptar a estrutura para lidar com a baixa velocidade de atualização da saída da planta. Como mostrado na Figura 4, a modificação proposta em (BLEVINS *et al.*, 2015a) consiste em manter o último valor do ganho Kalman e do resíduo até que uma nova medida seja recebida pelo controlador, quando estes parâmetros são atualizados, de forma que o ganho de Kalman pode, então, ser implementado como um parâmetro sintonizável.

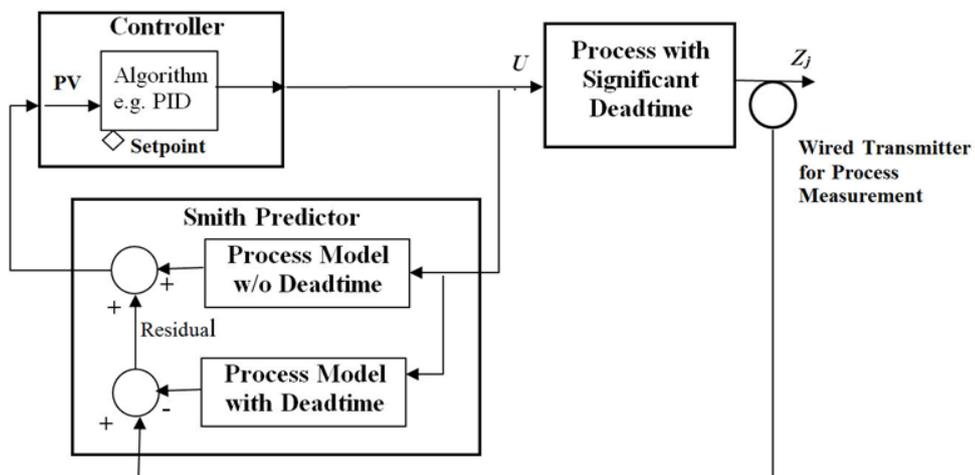
Figura 4 – Filtro de Kalman com controlador PID em uma rede sem fio. A estrutura foi modificada para compensar a redução na taxa de amostragem do sensor sem fio.



Fonte: (BLEVINS *et al.*, 2015a).

Outro algoritmo utilizado em aplicações industriais de WNCS é o Preditor de Smith. Este algoritmo pode ser aplicado quando a planta apresenta características significantes de tempo morto, compensando este efeito através de estimativas da saída da planta sem tempo morto utilizando o erro do modelo em relação à saída real da planta, que apresenta tempo morto. Assim, ao utilizar a saída estimada da planta, os efeitos negativos podem ser compensados para o controlador. Esta estrutura pode ser vista na Figura 5.

Figura 5 – Preditor de Smith e controlador PID em uma rede cabeada.

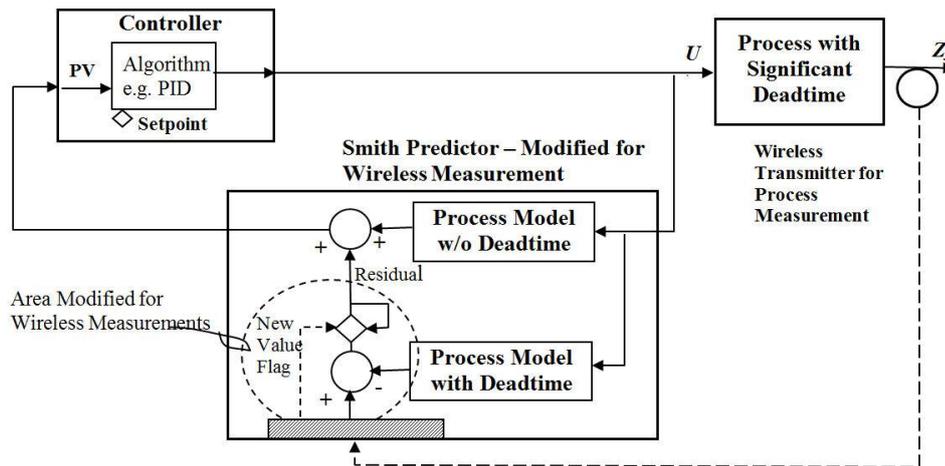


Fonte: (BLEVINS *et al.*, 2015a).

Assim como ocorre com o Filtro de Kalman, esta estrutura não é viável para aplicações com rede sem fio e, portanto deve ser modificada para operar adequadamente. Analogamente às modificações propostas para o Filtro de Kalman, (BLEVINS *et al.*, 2015a) propuseram mudanças na estrutura do Preditor de Smith que consistem em manter o último valor medido

da saída da planta, para que o valor de resíduo fosse atualizado apenas com uma nova medição, e o valor da saída estimada é utilizada pelo controlador para gerar o sinal de entrada da planta, conforme pode ser observado na Figura 6.

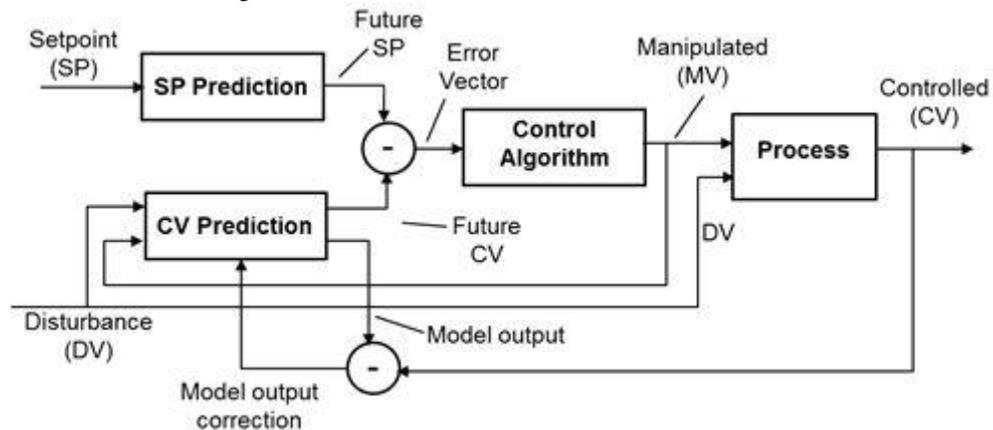
Figura 6 – Preditor de Smith e controlador PID em uma rede sem fio. A estrutura foi modificada para compensar a redução na taxa de amostragem do sensor sem fio.



Fonte: (BLEVINS *et al.*, 2015b).

Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC, do inglês *Model Predictive Control*) é uma abordagem da teoria de controle que vem sendo muito utilizada em processos industriais para o controle de sistemas multivariáveis, com restrições e dinâmicas complexas. De forma geral, MPC pode ser definido como um algoritmo de controle que utiliza um modelo explícito (linear ou não linear) do processo para prever a resposta futura do processo e calcular, através da minimização de uma função custo, o sinal de controle apropriado (DARBY; NIKOLAOU, 2012). Uma característica interessante que difere o MPC dos demais controladores clássicos é o seu comportamento antecipativo, resultado da inclusão de informações futuras sobre o estado da planta no algoritmo de controle (SANTANA, 2007). Além disto, estes controladores apresentam a capacidade de lidar de forma explícita com restrições, de forma que a minimização da função custo seja realizada de acordo com estas limitações. A Figura 7 mostra a estrutura básica de um controlador MPC com duas entradas, sendo uma variável do processo e um distúrbio, e uma saída, que é o sinal de controle.

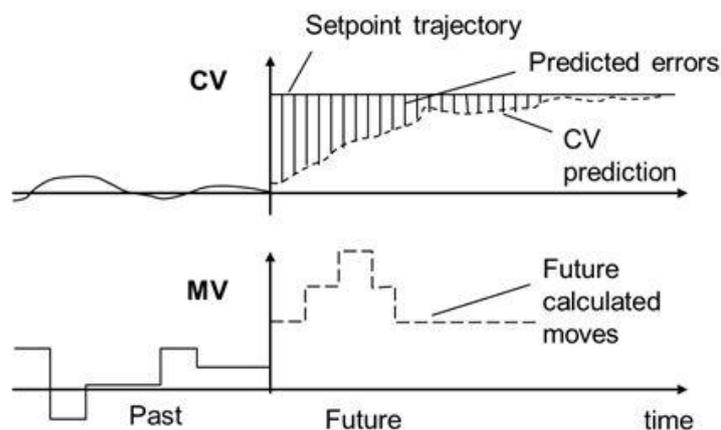
Figura 7 – Estrutura básica de um controlador MPC.



Fonte: (BLEVINS *et al.*, 2015b).

A operação deste controlador pode ser exemplificada pelas curvas mostradas na Figura 8. Diferentemente de controladores tradicionais, que utilizam o erro entre o valor de referência e o valor da variável de processo medida, controladores MPC utilizam um vetor de dados do erro entre a trajetória do sinal de referência e a trajetória predita da variável controlada (calculada a cada atualização da variável medida), por um intervalo de tempo definido. Cada elemento deste vetor de erro é multiplicado por um ganho adequado e todos os termos são somados para calcular um incremento no sinal de saída do controlador. Desta forma, apenas o primeiro passo futuro é implementado, uma vez que no próximo instante de amostragem, a trajetória predita será recalculada (BLEVINS *et al.*, 2015b).

Figura 8 – Operação de um controlador MPC.



Fonte: (BLEVINS *et al.*, 2015b).

Com esta estrutura, distúrbios com uma dinâmica apropriada baseada nos modelos identificados de respostas ao degrau são incluídos no vetor de predição da saída do processo.

Um controlador MPC com um modelo preciso apresenta respostas melhores se comparadas às de um controlador PID padrão para processos com longo tempo morto e dinâmicas de ordem superior. Entretanto, é importante salientar que o desempenho de um controlador MPC é altamente dependente da precisão do modelo do processo (BLEVINS *et al.*, 2015b). Ainda que as equações que descrevem os fenômenos físicos do processo sejam precisas, outros fatores influenciam diretamente na forma mais adequada para modelar a planta, como a quantidade de variáveis, a possibilidade de se medir ou estimar as variáveis de estado e o custo computacional do algoritmo de predição utilizando tal modelo.

Com a inserção de uma rede de comunicação sem fio, a estrutura do controlador MPC deve ser alterada para lidar com as mudanças na amostragem de dados. Basicamente, o vetor de predição da saída do processo não é alterado até que uma nova transmissão de dados amostrados seja realizada.

Blevins, Nixon e Wojsznis (2014) apresentam um caso de estudo sobre o desempenho das estratégias de PIDPlus, PID padrão com Filtro de Kalman, e PID padrão com Preditor de Smith, todas operando com transmissão sem fio, comparando com uma estratégia padrão de controlador PID com transmissão com fio. Os resultados deste trabalho mostram que é possível aumentar a eficiência energética do WNCS, reduzindo o número de comunicações, sem que o desempenho de controle seja significativamente prejudicado.

## 2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM WNCS

Melhorar o uso dos recursos energéticos disponíveis é de grande interesse para as indústrias. Eficiência energética pode ser definida como a possibilidade de otimização no consumo de energia associada a uma atividade, contribuindo assim para a redução dos gastos com este insumo. De forma simplificada, isso significa realizar a mesma atividade consumindo menos energia. Um desafio tecnológico em WNCS, e o foco deste trabalho, diz respeito à eficiência energética do WNCS (SADI; ERGEN; PANGUN, 2014). Uma vez que os dispositivos são alimentados por baterias, espera-se o menor consumo possível para estender a vida útil da mesma, no entanto, sem comprometer o cumprimento dos requisitos de controle definidos. Devido à igualdade de tecnologia entre os fabricantes de sensores sem fio industrial, a vida útil da bateria tornou-se um recurso para distinguir produtos e soluções. No entanto, a redução do consumo de energia em WNCS pode ser desafiador devido às exigências de atualizações mais rápidas impostas pelos atuais sistemas de controle digital. Portanto, a pesquisa sobre estratégias de controle para WNCS que permitam o uso eficiente

do recurso energético disponível (bateria) vem ganhando importância (ARAÚJO *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2014; SADI; ERGEN; PANGUN, 2014).

Como o gasto de energia do sensor sem fio está diretamente relacionado com a transmissão da informação na rede sem fio, é impraticável transmitir a informação do sensor a taxas muito rápidas (AKERBERG; GIDLUND; BJORKMAN, 2011). Neste sentido, devido à necessidade de se reduzir a quantidade de transmissões da rede, um problema gerado em WNCS é a restrição ou limitação do período de amostragem<sup>1</sup> dos sensores industriais sem fio. Atualmente, o menor período de amostragem disponível num sensor sem fio industrial é de 1s (EMERSON, 2015). Como consequência, deve haver um compromisso entre o período de amostragem do sensor e a vida útil da bateria e, por isto, pode haver aplicações de controle com rede sem fio, na qual os sensores sem fio industriais não poderiam ser usados. Portanto, o primeiro desafio para viabilizar o uso destes sensores sem fio em WNCSs é superar essa restrição de amostragem e desenvolver estratégias de controle para eficiência energética nestes sistemas.

Um sensor sem fio é composto por uma unidade de sensoriamento, uma unidade de processamento, uma unidade de comunicação e uma unidade de alimentação. A unidade de sensoriamento consiste em um elemento sensor e um estágio de conversão analógico-digital. A unidade de processamento é composta de microprocessador e memória, e é responsável por processar o sinal digital da unidade de sensoriamento e controlar a unidade de comunicação que, por sua vez, é responsável pela troca (recepção e transmissão) de informações com o resto da rede. A unidade de alimentação é composta por bateria e, em alguns casos, por um dispositivo gerador de energia (como uma célula fotovoltaica), sendo responsável por fornecer energia para todos os componentes.

Estudos indicam que a unidade de comunicação (rádio) é mais dispendiosa que a unidade de processamento (ANASTASI *et al.*, 2009), sendo que a transmissão de um bit na rede sem fio corresponde à execução de alguns milhares de instruções. Portanto, o processamento dos dados deve ser preferido ao invés da comunicação. Além disto, a magnitude do consumo do rádio para transmissão e recepção é significativamente maior, se comparada com o estado sono. Do ponto de vista do sensoriamento, o consumo depende do tipo do sensor e, em geral, também é muito menor se comparado ao rádio. Assim, a redução do consumo de energia de um nó sem fio pode ser analisada por diversos pontos de vista.

---

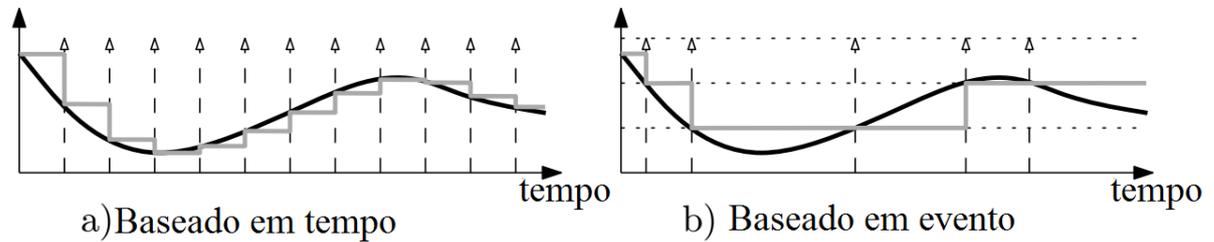
<sup>1</sup> Neste trabalho, o termo ‘período de amostragem’ se refere ao período de transmissão de dados pelo sensor sem fio.

Diversos trabalhos apresentam soluções para reduzir o gasto de energia na amostragem (PLOENNIGS; VASYUTYNSKY; KABITZSCH, 2010), na transmissão de dados (QUEVEDO; AHLEN, 2008), além de técnicas que possibilitam maximizar a vida útil da rede como um todo (AL-KARAKI; KAMAL, 2004).

Neste trabalho, o foco são estratégias de controle para WNCS que, além de controlar o sistema diante de requisitos especificados, possuem potencial para melhorar a eficiência energética dos dispositivos. Nesse contexto, uma abordagem comum para economia de energia tem sido a redução das transmissões sem fio (DE CASTRO; DE WIT; GARIN, 2012; ARAUJO *et al.*, 2014). Estas estratégias partem do princípio que se nenhuma ação rápida de controle é necessária, o dispositivo não consome excessivamente bateria. Assim, como o núcleo de processamento não apresenta consumo elevado de energia, torna-se interessante processar localmente a informação para poupar, sempre que possível, o uso do núcleo de comunicação (ANASTASI; CONTI; DI FRANCESCO, 2009). No entanto, essa abordagem não é simples considerando o desenvolvimento de WNCS, onde existem questões adicionais a considerar como uma maior probabilidade de perdas de informações transmitidas e a robustez do sistema aos distúrbios no processo.

Uma estratégia que tem sido usada em aplicações de WNCS e que consegue proporcionar uma redução das transmissões sem fio é o Controle Baseado em Evento (EBC, do inglês *Event Based Control*). EBC consiste basicamente em agregar um detector de eventos, um observador e um algoritmo para calcular o sinal de controle (BLEVINS *et al.*, 2015a), sendo uma alternativa a sistemas de controle com amostragem periódica. Os sinais são amostrados apenas quando um evento significativo ocorre. EBC é uma abordagem da teoria de controle que tem sido utilizada para compensar os efeitos decorrentes do recebimento de mensagens de medições de forma assíncrona. Estes efeitos prejudicam o desempenho de sistemas de controle de tempo discreto, que, em geral, requerem sincronização entre sensor e controlador, o que dificilmente se obtém em WNCS (DE CASTRO, 2012). A Figura 9 mostra uma comparação entre abordagens de controle baseadas em tempo e abordagens baseadas em eventos.

Figura 9 – Comparação para amostragens em abordagens de controle baseado em tempo discreto e baseado em eventos.



Fonte: (DE CASTRO, 2012).

Abordagens baseadas em eventos são interessantes para sistemas em que o sensoriamento e o controle são executados em nós diferentes. Nestes casos, o nó sensor é responsável pelas medições e pelo processamento dos dados que serão enviados ao controlador, que é responsável pelo cálculo dos sinais de controle. Este tipo de esquema fornece ganho na vida útil dos sensores, uma vez que são implementadas em nós sensores estratégias que lhes proporcionem a capacidade de decidir em que instantes novas informações devem ser enviadas para garantir estabilidade em malha fechada e determinado nível de desempenho de controle (DE CASTRO, 2012). Desta forma, o ganho energético é obtido através da limitação da quantidade de comunicações. Do ponto de vista de controle, estratégias baseadas em eventos apresentam robustez contra distúrbios, uma vez que o estado da planta é monitorado constantemente (DE CASTRO *et al.*, 2012).

Estas estratégias de EBC requerem, no entanto, que o sensoriamento e o processamento de dados se mantenham ativos o tempo todo, para realizar o devido monitoramento das condições de estabilidade do sistema, i.e., da ocorrência de eventos. Alternativamente a este modo de operação, estratégias de Controle Auto Disparado (STC, do inglês *Self-Triggered Control*) permitem maior economia de energia ao desligar completamente o nó sensor no intervalo entre duas amostras, (ARAUJO *et al.*, 2014). Nestes casos, quanto o nó está ativo, ele realiza a amostragem, transmite a informação ao controlador e calcula o próximo instante em que deve enviar nova informação ao controlador. A partir deste instante, o nó desliga completamente até o instante calculado. Para determinar o instante de ativação do dispositivo, é necessário prever um evento futuro, dado por um instante em que a resposta predita coincide com um ponto de um conjunto admissível de trajetórias. Este conjunto é definido como uma região do horizonte de predição em que se tenha uma condição de estabilidade que possa ser recuperada em tempo finito com o vetor de estados dentro de um conjunto alvo especificado (IINO; HATANAKA; FUJITA, 2009). Esta implementação apresenta aspectos

de controle preditivo e, por isto, tem a capacidade de prevenir atrasos de acesso ao canal e, portanto, reduzir a latência da rede (ARAUJO *et al.*, 2014). Apesar das vantagens relacionadas à economia de energia e à latência, uma vez que o sensor não realiza monitoramento constante do estado da planta, o controlador perde desempenho com relação à robustez a distúrbios (ARAUJO *et al.*, 2014).

Outra estratégia de controle para WNCS com potencial para redução do consumo energético é o controle baseado em modelo (MBC – do inglês *Model Based Control*). Técnicas de MBC utilizam um modelo da planta controlada e o agregam ao controlador para que o sinal de controle seja calculado com base no sinal de saída do modelo, ao invés do sinal de saída da planta. Segundo Mansano, Godoy e Porto (2014), técnicas de MBC permitem que o período de amostragem dos sensores sem fio do WNCS seja aumentado, para aumentar a vida útil de suas baterias, uma vez que o controlador é capaz de compensar a falta de informações recebidas conforme o período de amostragem aumenta. Isto pode ser obtido com a inclusão de uma técnica de controle *multi-rate* ao controlador.

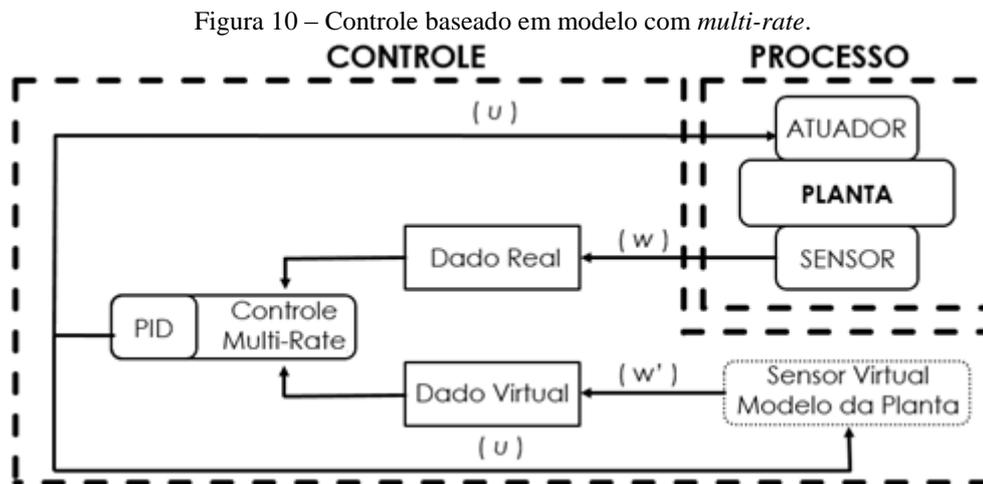
A maioria das pesquisas em sistemas de controle via rede considera uma única taxa de operação para todo o sistema, ou seja, sensores, controladores e atuadores operando com o mesmo período de amostragem (ZHU; XIE, 2012). Com isto, define-se um sistema com taxa (ou período) única, ou sistema *single-rate*. Esta consideração é bastante conveniente para a pesquisa teórica acerca de NCS. Entretanto, não se pode assumir que todos os nós da rede operam à mesma taxa, pois, na prática, efeitos como atrasos na transmissão de dados e a distribuição dos nós na rede afetam diretamente a comunicação (ZOU; CHEN; LI, 2010). Neste sentido, também não é possível usar o mesmo período de amostragem para controlar todos os atuadores.

De forma geral, sistemas de controle *multi-rate* apresentam atuação mais rápida que a amostragem dos sensores. Uma estratégia de controle *multi-rate* pode ser definida de forma que o período de amostragem do controlador  $T_A$  (e, portanto a atuação sobre o sistema) seja  $N$  vezes mais rápido que a amostragem do sensor  $T_S$ , então  $N=T_A/T_S$ . Para permitir este tipo de operação *multi-rate*, é necessário fornecer ao controlador, informações adicionais sobre o estado do processo durante o período entre amostras do sensor. Estes dados virtuais, desde que sejam confiáveis, podem ser utilizados pelo controlador para calcular sinais de controle adicionais ou mesmo na ausência de dados dos sensores.

Para obtenção dessas informações adicionais, alguns trabalhos utilizam controle preditivo baseado em modelo (ZOU; CHEN; LI, 2010; JIANG; ZOU; NIU, 2011; ZHU; XIE,

2012), abordagem baseada no modelo de espaço de estados (HATTORI *et al.*, 2010) ou filtro de Kalman como algoritmo de predição (ROSHANY-YAMCHI *et al.*, 2013).

A Figura 10 apresenta o diagrama do controle *multi-rate* baseado em modelo desenvolvido em (MANSANO; GODOY; PORTO, 2014).



De acordo com a Figura 10, o controlador utiliza dados reais, provenientes do sensor, e dados virtuais, gerados pelo modelo da planta do WNCS. Neste esquema, os dados reais são utilizados sempre que o sensor sem fio realiza uma amostragem, enquanto os dados virtuais são utilizados na ausência de informações reais (MANSANO; GODOY; PORTO, 2014). Além do controle baseado em modelo, foi incorporada ao controlador uma técnica de controle *multi-rate*, em que a geração de dados virtuais (e, portanto, a atuação sobre o sistema) ocorre a uma taxa  $N$  vezes maior que a amostragem real. Desta forma, tem-se a estimação do estado atual do sistema e um controlador que utiliza estas informações virtuais para calcular sinais de controle adequados quando uma informação real não pode ser obtida. Com isto, permite-se aumentar o período de amostragem (aumentar a vida útil das baterias) dos sensores sem fio, mantendo bom desempenho de controle (MANSANO; GODOY; PORTO, 2014). Um problema dessa estratégia é que o modelo usado para gerar os dados adicionais não é atualizado, de forma que o controlador perde desempenho quando o WNCS opera com distúrbios. Isto significa que, quando a saída do modelo,  $w'$ , diverge da saída real do WNCS,  $w$ , o cálculo do sinal de controle é realizado com respeito a uma informação errada, logo, o erro de referência não pode ser compensado.

### 3 TEORIA DE CONTROLE E IDENTIFICAÇÃO

#### 3.1 CONTROLE ADAPTATIVO

Diversas técnicas para projetos de controle são baseadas em um bom entendimento do processo estudado e seu ambiente. Entretanto, há casos em que o processo controlado é muito complexo e os processos físicos básicos não são completamente compreendidos. Neste sentido, as técnicas de controle precisam ser aumentadas com uma técnica de identificação, visando obter progressivamente melhor entendimento da planta. Se o processo de identificação é recursivo, i.e., o modelo da planta é atualizado periodicamente com base em dados previamente obtidos e em novos dados, então identificação e controle podem ser realizados de forma concorrente. Desta forma, torna-se interessante utilizar um sistema adaptativo, uma vez que é uma abordagem para o controle de sistemas dinâmicos com parâmetros incertos constantes ou que variam lentamente.

De forma geral, um sistema adaptativo é composto por duas malhas de realimentação: uma malha de controle – que realiza a leitura da saída da planta e realimenta este sinal em um regulador com parâmetros variáveis –, e uma malha de adaptação – que realiza a variação dos parâmetros do controlador, com o objetivo de manter o sistema estável (COLÓN, 2003). Em geral, a adaptação é mais lenta que o controle.

É possível classificar os sistemas de controle adaptativo em duas categorias: direto, em que os parâmetros do controlador são ajustados sem que haja uma etapa intermediária de identificação dos parâmetros da planta; e indireto, em que se dispõe de um algoritmo de identificação para estimar os parâmetros da planta, que são utilizados para o ajuste dos parâmetros do controlador. Sistemas de controle adaptativos também podem ser classificados como de tempo discreto, representados por equações algébricas e equações de diferenças; ou de tempo contínuo, representados por equações algébricas e equações diferenciais.

Um tipo de aplicação tradicional de controle adaptativo é a sintonia automática de controladores, ou seja, os parâmetros de um controlador padrão (como um PID) são sintonizados automaticamente de acordo com a demanda do operador e, uma vez sintonizados, podem ser mantidos até que a demanda seja alterada novamente. A maior vantagem no uso de sistemas adaptativos para sintonia automática é a simplificação do uso do controlador, além de contribuir com a melhoria do desempenho.

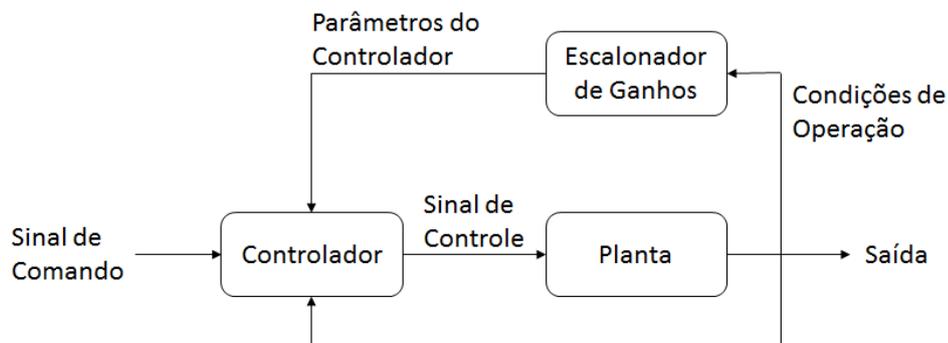
Alguns tipos tradicionais de sistemas de controle adaptativo são: escalonamento de ganhos, controle adaptativo por modelo de referência, reguladores auto-ajustáveis.

### 3.1.1 Escalonamento de Ganhos

Há casos em que variáveis mensuráveis se correlacionam com as mudanças na dinâmica do processo. Estas variáveis podem ser utilizadas para realizar variações nos parâmetros do controlador. Então, o escalonamento de ganhos pode ser considerado como um mapeamento dos parâmetros do processo para os parâmetros do controlador. Desta forma, o método consiste em utilizar uma lógica adequada para encontrar o ponto de operação e atualizar os parâmetros do controlador de acordo com uma tabela previamente calculada. A Figura 11 mostra o diagrama de blocos de um sistema adaptativo com escalonamento de ganhos.

A principal vantagem deste método é a rapidez com que os parâmetros do controlador podem ser alterados, de acordo com o monitoramento do ponto de operação, que é função das entradas, saídas e outras medidas auxiliares. Entretanto, mudanças rápidas e frequentes nos ganhos do controlador podem causar instabilidade no sistema. Outra desvantagem é que o mecanismo de ajuste é definido off-line, isto é, não é capaz de compensar escalonamentos incorretos ou mudanças grandes não previstas nos parâmetros da planta (em caso de falhas, por exemplo). Isto pode levar à deterioração do desempenho e até à falha completa.

Figura 11 – Diagrama de blocos de um sistema adaptativo com escalonamento de ganhos

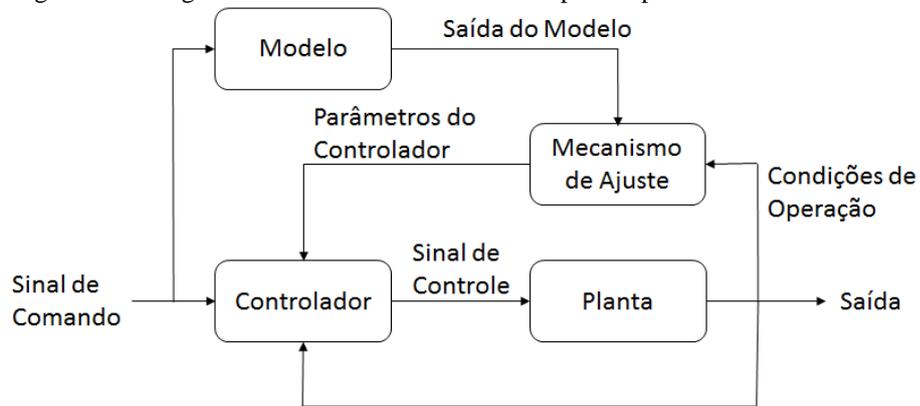


Fonte: Adaptado de (ASTRÖM; WITTENMARK, 2008).

### 3.1.2 Controle Adaptativo por Modelo de Referência

Nesta abordagem, o comportamento desejado da planta (especificações de desempenho) é descrito por um modelo de referência, que descreve como a saída do processo idealmente deveria responder ao estímulo do sinal de controle. A Figura 12 mostra o diagrama de blocos de um sistema adaptativo por modelo de referência.

Figura 12 – Diagrama de blocos de um sistema adaptativo por modelo de referência.



Fonte: Adaptado de (ASTRÖM; WITTENMARK, 2008).

O principal desafio deste tipo de sistema é determinar o mecanismo de ajuste que possibilite obter um sistema estável e que não apresente erro.

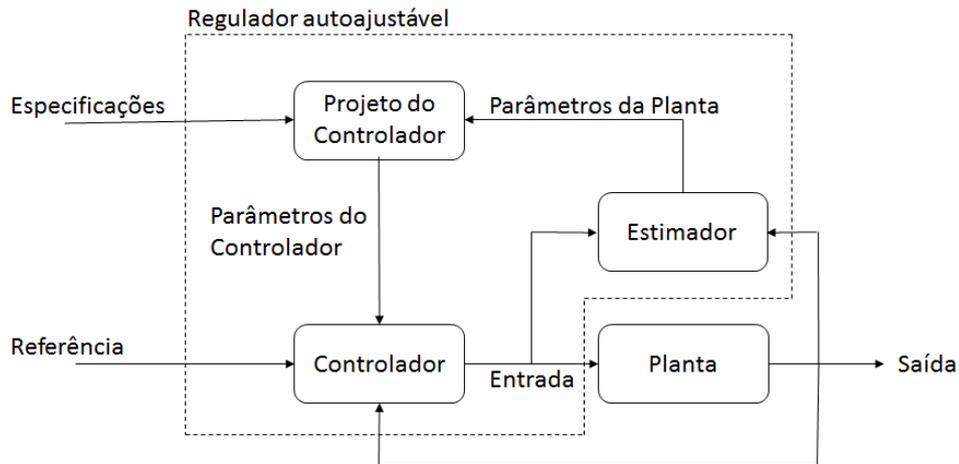
### 3.1.3 Reguladores Auto-Ajustáveis

Este método consiste em atualizar um modelo com estimativas dos parâmetros do processo e obter os parâmetros do controlador através da solução de um problema de projeto utilizando os parâmetros estimados. O controlador adaptativo pode ser visto como uma composição de duas malhas de controle. A malha interna é composta pelo processo e um controlador por realimentação ordinário. Os parâmetros do controlador são ajustados pela malha externa, composta por um estimador recursivo de parâmetros e um bloco de projeto. A Figura 13 mostra o diagrama de blocos de um sistema com regulador auto-ajustável.

Um controlador com esta construção é denominado auto-ajustável para enfatizar que o controlador ajusta automaticamente seus parâmetros para obter as propriedades desejadas para o sistema em malha fechada. Assume-se que há algum procedimento de projeto que torne possível determinar um controlador que satisfaça algum critério de projeto se o processo e seu ambiente são conhecidos. Este procedimento é denominado de problema fundamental de projeto, representado na Figura 13 pelo bloco “Projeto do Controlador”. Este problema pode ser associado com a maioria dos esquemas de controle adaptativo, sendo que nas abordagens de controle adaptativo direto, os parâmetros do controlador são alterados diretamente, sem que as características do processo e seus distúrbios sejam determinados *a priori*. Frequentemente, este projeto é dado indiretamente e, assim, o modelo do processo e,

possivelmente, as características dos distúrbios são previamente determinadas e consideradas no projeto. Para avaliar os esquemas de controle adaptativo, geralmente é útil encontrar o problema fundamental do projeto, pois este dará as características do sistema sob condições ideais quando os parâmetros são conhecidos exatamente.

Figura 13 – Diagrama de blocos de um sistema adaptativo auto-ajustável.



Fonte: Adaptado de (ASTRÖM; WITTENMARK, 2008).

Nos reguladores auto-ajustáveis, os parâmetros do processo são estimados em tempo real e as estimativas são utilizadas como se fossem exatamente iguais aos valores reais (i.e. as incertezas das estimativas não são consideradas). Este é o chamado Princípio de Equivalência à Certeza. Deve-se salientar, entretanto, que as incertezas podem ser consideradas no projeto do controlador, quando for possível medir a qualidade das estimativas.

De forma geral, o esquema do regulador auto-ajustável é muito flexível com respeito à escolha do projeto fundamental e os métodos de estimativa, sendo possível associar diversos métodos para obter um sistema auto-ajustável.

### 3.1.4 Controle PI Adaptativo

É conhecido que o controlador PID é amplamente empregado em projetos industriais, principalmente devido à sua simplicidade e pelo fato que permite controlar um processo com condições estáveis, desde que sintonizado adequadamente. Esta sintonia, entretanto, depende das condições de operação, do funcionamento adequado dos equipamentos e outros fatores que possam alterar significativamente o processo. Nestes casos, o controlador PID deve

passar por um novo processo de sintonia. Neste sentido, é desejável aplicar um controlador robusto a estas mudanças e uma solução possível é o controle PI Adaptativo.

O controlador PI Adaptativo implementado neste trabalho utiliza uma estrutura (LUIZ *et al.*, 1997), na qual se considera o modelo do processo do tipo CARIMA (do inglês, *Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average*), cujo desenvolvimento é descrito na Equação (1):

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t) + \frac{\xi(t)}{\Delta} \quad (1)$$

Minimizando-se a função custo dada pela Equação (2):

$$\min_{u(t)} J = E[\hat{y}(t+k) + \Gamma\Delta u(t)]^2 \quad (2)$$

Dada a Equação (3):

$$\hat{\phi}(t+k) = \hat{y}(t+k) + \Gamma\Delta u(t) = A(z^{-1})y(t) + [B(z^{-1}) + \Gamma]\Delta u(t) \quad (3)$$

Pode-se obter a lei de controle dada pela Equação (4):

$$\Delta u(t) = \frac{A(z^{-1})}{B(z^{-1}) + \Gamma} y(t) \quad (4)$$

$\Gamma$  é um parâmetro de projeto a ser especificado. Este parâmetro tem a ação de reduzir o esforço de controle, também fornecendo certo nível de estabilidade ao sistema em malha fechada. Para o controle PI auto-ajustável, deve-se generalizar esta estrutura da equação, reescrevendo-a na forma da Equação (5):

$$\hat{\phi}(k+i) = \hat{a}_0 y(k) + \hat{a}_1 y(k-1) + \dots + \hat{b}_0 \Delta u(k) + \dots + \hat{b}_1 \Delta u(k-l) \quad (5)$$

Em que  $l = n_b + i - 1$ , sendo  $n_b$  a ordem do polinômio B.

Assim, a lei de controle pode ser escrita segundo a Equação (6):

$$(\beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_l z^{-l}) \Delta u(t) = (a_0 + \dots + a_m z^{-m}) [r(t) - y(t)] \quad (6)$$

Em que os sinais  $r(k)$  e  $y(k)$  são, respectivamente, o sinal de referência e a saída medida da planta e os parâmetros  $\beta_i$  são dados por  $b_i + \Gamma$ . Para um sistema de primeira ordem, esta lei de controle pode ser escrita na forma da Equação (7):

$$\Delta u(k) = \frac{[a_0 \epsilon(k) + a_1 \epsilon(k-1)]}{b_0 + \Gamma} \quad (7)$$

Em que  $\epsilon(k) = r(k) - y(k)$ .

Seja o algoritmo para um controlador PI discreto dado pela Equação (8):

$$\Delta u(k) = K_c \left[ \epsilon(k) - \epsilon(k-1) + \frac{T_s}{T_i} \epsilon(k) \right] \quad (8)$$

Comparando as equações (7) e (8), podem-se obter as constantes do controlador, como no conjunto de equações (9):

$$\begin{cases} K_c = -\frac{a_1}{b_0 + \Gamma} \\ T_i = -\frac{a_1 T_s}{a_0 + a_1} \end{cases} \quad (9)$$

Para obter os valores dos parâmetros  $a_0$ ,  $a_1$  e  $b_0$ , pode-se utilizar um estimador recursivo e, neste trabalho, foi utilizado o estimador recursivo por mínimos quadrados (RLS, do inglês *Recursive Least Square*), com representação em tempo discreto usando modelo autorregressivo com entrada externa (ARX, do inglês *Auto-Regressive with eXogenous inputs*).

### 3.2 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

O grande desafio da técnica de estimação é gerar uma informação confiável sobre o processo para ser utilizada pelo controlador do WNCS (MANSANO; GODOY; PORTO, 2014), para possibilitar uma atuação sobre o sistema mais rápida que a amostragem. Para que seja possível prever dados, é preciso se obter um modelo do sistema que se deseja controlar.

O modelo pode ser obtido de forma teórica, a partir de equacionamento matemático dos fenômenos físicos que ocorrem no sistema, permitindo a obtenção de modelos matemáticos que tem significado físico. Esse método é conhecido como “caixa branca”. Esse método não é muito utilizado na maior parte das aplicações reais, pois nem sempre é possível obter equações que descrevam satisfatoriamente o sistema e, mesmo quando se tenha as equações necessárias, esse procedimento é muito trabalhoso e demanda muito tempo. Além disso, em situações práticas nem sempre se tem o conhecimento e o tempo necessário para efetuar esse processo (AGUIRRE, 2015).

Outra opção seria a obtenção experimental do modelo, processo conhecido como Identificação do Sistema, ou como método da caixa preta. Esse processo nada mais é do que a coleta de dados que possam “descrever” o comportamento do sistema, sem a necessidade de conhecimentos prévios sobre o mesmo. Isso é feito aplicando-se entradas escolhidas na entrada do sistema e medindo-se as respostas correspondentes. A partir desse conjunto de informações obtidas experimentalmente, podem ser utilizadas várias técnicas para obter um modelo desta planta. Alguns exemplos são o método dos mínimos quadrados, o método do filtro de Kalman, entre outros. Um ponto a ser considerado nesse caso, é que o modelo obtido não é um modelo físico do sistema, como no caso da obtenção teórica. Ou seja, esse modelo não representa os processos que estão ocorrendo na planta, ele representa a relação existente entre entrada e saída do ponto de vista dos dados, qualquer que seja o sistema sendo identificado. O modelo obtido nesse procedimento pode ser representado de diversas formas, como: modelos autoregressivos (AR, ARX, ARMAX), modelo Box-Jenkins, funções de transferência e representações no Espaço de Estados, por exemplo (AGUIRRE, 2015).

A identificação do modelo de um sistema pode ser feita em tempo real ou previamente. No caso prévio é feita a identificação do modelo separadamente e, posteriormente, o modelo é utilizado no controle e simulação da planta. Esse procedimento é satisfatório para modelos onde a dinâmica do processo praticamente não se altera, ao menos durante o intervalo de tempo o modelo está sendo empregado.

Porém, muitas vezes isso não se aplica, sendo necessária então a identificação do modelo em tempo real. Neste caso, o modelo é identificado simultaneamente à execução do controle, sendo que os dados gerados (estímulo) e medidos (resposta) são adicionados ao conjunto de informações utilizadas para a estimação do modelo conforme o processo de identificação é executado. Em geral, adota-se uma janela de dados ou um coeficiente de

esquecimento, que possibilita utilizar apenas os dados mais recentes e mais significativos para a descrição do comportamento atual do sistema.

Métodos de identificação tradicionais podem ser empregados nesse caso, sendo gerado um novo modelo a cada iteração do loop de controle, porém é mais comum a utilização de métodos recursivos. Esses métodos trabalham com um erro de sistema, e tem como objetivo minimizar esse erro (se o erro for nulo, a saída do modelo é idêntica à do sistema, sendo, portanto, uma representação muito boa do mesmo). Esses métodos também são conhecidos como adaptativos, pois adaptam o modelo à situação atual do sistema. Devido a esse comportamento, esse tipo de técnica pode requerer que o controle opere inicialmente sem a utilização do modelo, até que ele atinja um erro pequeno o suficiente para a aplicação desejada. Isso não ocorre com a identificação prévia, já que nesse caso o erro do modelo já terá sido minimizado antes de sua aplicação.

A escolha do método a ser utilizado para obter o modelo e da forma de representação do mesmo que será adotada depende de diversos fatores, sendo que não há um padrão garantido que funcione para todos os casos. Por isso, após a obtenção do modelo do sistema, tem-se uma etapa de fundamental importância, a validação do modelo. A validação pode ser feita de diversas maneiras, como a comparação direta da resposta do modelo com a resposta real da planta, a predição de valores futuros a partir de valores anteriores obtidos e o uso de índices de erro como o erro médio quadrático (MSE, do inglês *Mean Squared Error*).

O método de mínimos quadrados é amplamente empregado nas áreas de engenharia para obter estimativas e realizar o rastreamento de parâmetros variantes no tempo. Este método consiste em obter parâmetros desconhecidos de um modelo linear, de modo que a soma dos quadrados da diferença entre o valor realmente observado e o valor calculado seja mínimo. Quando se deseja obter estas estimativas em tempo real, é interessante realizar este algoritmo na sua forma recursiva conforme novos dados estão disponíveis. Desta forma, obtém-se um algoritmo computacionalmente menos custoso. Esse método permite a obtenção dos parâmetros de um modelo ARX. Este modelo utiliza os valores anteriores da variável desejada e dos sinais de estímulo respectivos para obter um modelo que forneça os valores futuros dessa variável. Ele também pode levar em consideração o ruído existente no sistema, porém por simplicidade e, devido à planta empregada neste trabalho não ter ruídos que impactem fortemente o controle, o ruído foi desconsiderado.

### 3.2.1 Algoritmo dos Mínimos Quadrados Recursivo

O método de mínimos quadrados é amplamente empregado nas áreas de engenharia para obter estimativas e realizar o rastreamento de parâmetros variantes no tempo. Este método consiste em obter parâmetros desconhecidos de um modelo linear, de modo que a soma dos quadrados da diferença entre o valor realmente observado e o valor calculado seja mínimo. Quando se deseja obter estas estimativas em tempo real, é interessante realizar este algoritmo na sua forma recursiva conforme novos dados estão disponíveis. Desta forma, obtém-se um algoritmo computacionalmente menos custoso.

#### 3.2.1.1 Em Tempo Contínuo

Em (COLÓN, 2003), o autor demonstra o algoritmo de mínimos quadrados recursivo com uma planta SISO (uma entrada e uma saída) de primeira ordem. Considerando-se, então, uma planta de primeira ordem dada pela Equação (10):

$$\dot{y} = a_*y + b_*u \quad (10)$$

em que  $a_*$  e  $b_*$  são desconhecidos e o estado da planta é dado por  $y(t)$ . Utilizando a notação de função de transferência, o modelo da planta é dado pela Equação (11):

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b}{s + a} \quad (11)$$

Para deduzir o algoritmo, é interessante que a planta e o identificador estejam escritos em uma forma que seja linear nos parâmetros. Então, assume-se que os sinais  $y$  e  $u$  passam por um filtro estável, gerando os sinais segundo as Equações (12) e (13)

$$X^{(1)}(s) = \frac{1}{s + \beta} U(s) \quad (12)$$

$$X^{(2)}(s) = \frac{1}{s + \beta} Y(s) \quad (13)$$

em que  $\beta > 0$  e  $Y(s)$  e  $U(s)$  são as transformadas de Laplace de  $y(t)$  e  $u(t)$ , respectivamente. Com estas equações, pode-se reescrever o modelo da planta na notação de função de transferência com os sinais filtrados, conforme Equação (14):

$$Y(s) = \frac{\beta - a}{s + \beta} Y(s) + \frac{b}{s + \beta} U(s) \quad (14)$$

Reescrevendo a saída do sistema no domínio do tempo em função dos novos sinais, obtém-se a Equação (15):

$$y(t) = bx^{(1)}(t) + (\beta - a)x^{(2)}(t) = \theta^T x(t) \quad (15)$$

em que  $\theta$  e  $x(t)$  são definidos segundo a Equação (16):

$$\begin{cases} \theta = \begin{bmatrix} b \\ \beta - a \end{bmatrix} \\ x(t) = \begin{bmatrix} x^{(1)}(t) \\ x^{(2)}(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

Este novo modelo obtido é linear nos parâmetros. Para realizar a identificação, é interessante que o erro entre a saída estimada  $\hat{y}$  e a saída real  $y$  seja o menor possível. O erro de identificação é dado conforme a Equação (17):

$$e_i = \hat{\theta}^T(t)x(t) - y(t) = (\hat{\theta}^T - \theta_*^T)x(t) \quad (17)$$

O algoritmo de mínimos quadrados encontra a estimativa dos parâmetros no instante atual  $t$  que melhor se ajusta aos dados coletados entre os instantes  $0$  a  $t$ . Esta é, portanto, a melhor estimativa que minimiza, a todo instante, a integral do erro de identificação ao quadrado, conforme a Equação (18):

$$\begin{aligned} \text{grad } E_i &= \text{grad} \int_0^t e_i^2(\tau) d\tau = \text{grad} \int_0^t xx^T(\tau)(\hat{\theta}(t) - \theta_*) d\tau \\ &= \text{grad} \int_0^t x(x^T \hat{\theta} - y) d\tau = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Então, é válido afirmar, conforme a Equação (19), que:

$$\left[ \int_0^t xx^T d\tau \right] \hat{\theta} = \int_0^t xy d\tau \quad (19)$$

Se a integral matricial  $\int_0^t xx^T d\tau$  for inversível, a Equação (20) mostra que:

$$\hat{\theta} = \left[ \int_0^t xx^T d\tau \right]^{-1} \int_0^t xy d\tau \quad (20)$$

O que significa que  $\hat{\theta}$  é único.

Para implementar o algoritmo de mínimos quadrados recursivo, é necessário colocá-lo na forma recursiva, pois, caso contrário, seria necessário calcular as integrais no tempo a cada passo de integração, o que requer armazenamento de muitos dados e, portanto, é computacionalmente custoso. Dessa forma, a Equação (21) define que:

$$M^{-1}(t) = \int_0^t x(\tau)x^T(\tau)d\tau \quad (21)$$

Derivando com respeito a  $t$ , obtém-se a Equação (22):

$$\dot{M}^{-1} = x(t)x^T(t) \quad (22)$$

E dada a Equação (23), em que:

$$\frac{d}{dt}I = \frac{d}{dt}(M^{-1}M) = \dot{M}^{-1}M + \dot{M}M^{-1} = 0 \rightarrow \dot{M} = -M\dot{M}^{-1}M \quad (23)$$

Tem-se, então, segundo a Equação (24), que:

$$\dot{M} = -M\dot{M}^{-1}M = -Mxx^TM \quad (24)$$

Desta forma, o vetor de parâmetros pode ser escrito conforme a Equação (25):

$$\theta(t) = M(t) \int_0^t x(\tau)y(\tau)d\tau \quad (25)$$

Derivando com respeito a  $t$ , e em seguida substituindo a Equação (24) tem-se, como resultado, a Equação (26):

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \dot{M} \int_0^t x(\tau)y(\tau)d\tau + Mx(t)y(t) = \dot{M}\theta M^{-1} + xyM = -Mxx^T M\theta M^{-1} + Mxy \\ \dot{\theta} &= Mx(x^T\theta - y) \end{aligned} \quad (26)$$

Portanto, a Equação (26) pode ser escrita como a Equação (27):

$$\dot{\theta} = -Mxe_i \quad (27)$$

Logo, as equações básicas que compõem o algoritmo de mínimos quadrados recursivos são dadas pelo conjunto de equações (28).

$$\begin{cases} \dot{\theta} = -Mxe_i \\ \dot{M} = -Mxx^T M \end{cases} \quad (28)$$

### 3.2.1.2 Em Tempo Discreto

Em Aström, Wittenmark (2008), o autor afirma que, em controladores adaptativos, observações são realizadas sequencialmente em tempo real e, por isto, deseja-se poupar o tempo necessário para computação. Assim, os cálculos devem ser recursivos e, utilizando o algoritmo de mínimos quadrados, podem-se obter estimativas de um instante de tempo  $k$  com base em dados obtidos no instante  $k-1$ . Então, como apresentadas pelo autor em Aström, Wittenmark (2008), seguem as deduções do algoritmo de mínimos quadrados recursivo para sistemas de tempo discreto.

Seja  $\hat{\theta}(k-1)$  a estimativa de mínimos quadrados baseadas nas medições em  $t-1$  e, assumindo que a matriz  $x^T x$  seja não singular para todo  $k$ , tem-se a Equação (29):

$$\begin{aligned}
M^{-1}(k) &= \mathbf{x}^T(k)\mathbf{x}(k) = \sum_{i=1}^k \mathbf{x}(i)\mathbf{x}^T(i) = \sum_{i=1}^{k-1} \mathbf{x}(i)\mathbf{x}^T(i) + \mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k) \\
M^{-1}(k) &= M^{-1}(k-1) + \mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)
\end{aligned} \tag{29}$$

Sabendo que a estimativa de mínimos quadrados  $\hat{\theta}(k)$  é dada pela Equação (30):

$$\hat{\theta}(k) = M(k) \left( \sum_{i=1}^k \mathbf{x}(i)y(i) \right) = M(k) \left( \sum_{i=1}^{k-1} \mathbf{x}(i)y(i) + \mathbf{x}(k)y(k) \right) \tag{30}$$

Então, pode-se reescrever a Equação (30) para os termos no instante  $k-1$ , conforme a Equação (31):

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^{k-1} \mathbf{x}(i)y(i) &= M^{-1}(k-1)\hat{\theta}(k-1) = (M^{-1}(k) - \mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k))\hat{\theta}(k-1) \\
\therefore \sum_{i=1}^{k-1} \mathbf{x}(i)y(i) &= M^{-1}(k)\hat{\theta}(k-1) - \mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)\hat{\theta}(k-1)
\end{aligned} \tag{31}$$

Substituindo-se estes termos na equação da estimativa de mínimos quadrados, obtém-se a Equação (32):

$$\begin{aligned}
\hat{\theta}(k) &= M(k) M^{-1}(k)\hat{\theta}(k-1) - M(k)\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)\hat{\theta}(k-1) + M(k)\mathbf{x}(k)y(k) \\
\hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + M(k)\mathbf{x}(k) \left( y(k) - \mathbf{x}^T(k)\hat{\theta}(k-1) \right) \\
\hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + K(k)\epsilon(k)
\end{aligned} \tag{32}$$

$K(k)$  é um vetor de ponderação que diz como a correção das estimativas anteriores devem ser combinadas. Os termos  $K(k)$  e  $\epsilon(k)$  são dados pela Equação (33):

$$\begin{cases} K(k) = M(k)\mathbf{x}(k) \\ \epsilon(k) = y(k) - \mathbf{x}^T(k)\hat{\theta}(k-1) \end{cases} \tag{33}$$

É importante notar que  $\epsilon(t)$  pode ser interpretado como o erro ao prever o sinal  $y(t)$  um passo à frente baseado na estimativa anterior  $\hat{\theta}(k-1)$ .

Para continuar com a dedução do algoritmo, é necessário obter uma expressão recursiva para  $M(k)$  ao invés de  $M^{-1}(k)$ . Para isto, usa-se o lema de inversão de matrizes dado pela Equação (34):

$$(A + BCD)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B(C^{-1} + DA^{-1}B)^{-1}DA^{-1} \quad (34)$$

Assim, aplicando o lema, obtém-se a Equação (35):

$$\begin{aligned} M(k) &= (x^T(k)Ix(k))^{-1} = (x^T(k-1)x(k-1) + x(k)Ix^T(k))^{-1} \\ M(k) &= (M(k-1)^{-1} + x(k)Ix^T(k))^{-1} \\ M(k) &= M(k-1) - M(k-1)x(k)(I + x^T(k)M(k-1)x(k))^{-1}x^T(k)M(k-1) \end{aligned} \quad (35)$$

É importante salientar que é necessário realizar inversão de matriz para calcular a matriz  $M(k)$ . Mas, como a matriz a ser invertida tem dimensão igual ao número de medidas, para um sistema com única saída,  $M(k)$  é um escalar.

Finalmente, as equações que definem o algoritmo de mínimos quadrados recursivo são dadas pelo conjunto de equações (36):

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)(y(k) - x^T(k)\hat{\theta}(k-1)) \\ K(k) = M(k)x(k) \\ M(k) = (I - K(k)x^T(k))M(k-1) \end{cases} \quad (36)$$

No modelo de mínimos quadrados, os parâmetros da planta são considerados constantes. Em aplicações de controle adaptativo, em geral, esses parâmetros são variáveis. Quando a variação destes parâmetros ocorre lentamente, uma forma convencional de alterar o modelo de mínimos quadrados é inserindo uma ponderação conhecida como *fator de esquecimento*. Este fator introduz a ponderação dos dados de forma que dados mais recentes recebam maior peso em comparação com dados antigos, que recebem pesos menores a cada instante. Com isto, as equações do algoritmo de mínimos quadrados recursivo são alteradas para ficar na forma do conjunto de equações (37):

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k) \left( y(k) - x^T(k) \hat{\theta}(k-1) \right) \\ K(k) = M(k) x(k) \\ M(k) = \frac{(I - K(k) x^T(k)) M(k-1)}{\lambda} \end{cases} \quad (37)$$

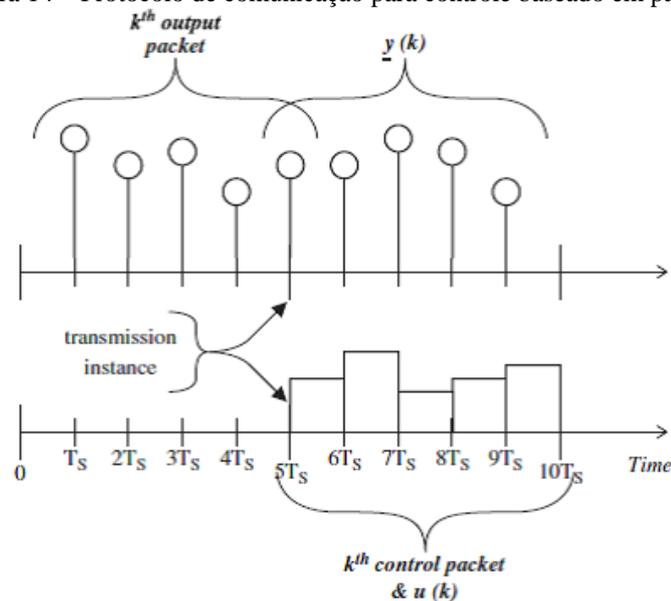
Em que  $\lambda$  é o fator de esquecimento. Este método é utilizado neste trabalho para realizar a identificação da planta, através dos dados de entrada e saída.

### 3.3 CONTROLE BASEADO EM PACOTE

A abordagem conhecida como Controle Baseado em Pacote (PBC, do inglês *Packet Based Control*) tem sido utilizada para compensar as restrições na comunicação em NCS, aproveitando-se do fato que, na maioria das redes industriais, enviar um único bit ou algumas centenas de bits requerem praticamente a mesma quantidade de recursos da rede de comunicação (ZHAO; LIU; REES, 2009). Desta forma, a abordagem de PBC consiste, basicamente, em armazenar uma sequência de dados amostrados e enviá-los em um único pacote de dados para o controlador, que utiliza os dados da forma mais conveniente e toma as decisões de controle adequadas de acordo com a estratégia desenvolvida.

Georgiev e Tilbury (2006) utilizam a estratégia de controle baseado em pacote apresentada na sequência da Figura 14.

Figura 14 – Protocolo de comunicação para controle baseado em pacote.



Fonte: (GEORGIEV; TILBURY, 2006)

O período de transmissão da mensagem do sensor (transmissão do pacote) é cinco vezes maior que o período de aquisição<sup>2</sup> de dado (A/D) do sensor. Dessa forma, um conjunto finito de amostras ( $k^{\text{th}}$ ) da saída da planta, consistindo de todos os dados amostrados pelo sensor desde a última instância de transmissão, é armazenado e transmitido em uma única mensagem do sensor, denominado pacote de saída (*output packet*). O controlador, ao receber a mensagem do sensor com o pacote de dados, ao invés de calcular uma única ação de controle para ser aplicada durante o próximo intervalo de controle, calcula um vetor de sinais de controle (*control packet*). Esses sinais de controle serão aplicados consecutivamente durante o intervalo de controle, de forma que cada sinal seja aplicado durante um subintervalo, como pode ser observado na Figura 14.

Os resultados obtidos em Georgiev e Tilbury (2006) mostram que o problema de controle baseado em pacote é equivalente a um problema de controle *multi-rate*. Neste artigo, a estratégia de controle baseado em pacote resultou em melhoria no desempenho de controle do NCS analisado. Os autores afirmam ainda que para NCSs operando com períodos de amostragem pequenos ( $t=10\text{ms}$ ), o uso da estratégia PBC permitiria o aumento do período de amostragem em um fator de 3 vezes e, portanto, a redução do tráfego de dados na rede, mantendo o mesmo nível de desempenho obtido.

Uma desvantagem da estratégia PBC é o atraso imposto aos dados amostrados, ou seja, a defasagem entre a aquisição dos dados e o seu emprego no controle. Como os dados só são enviados quando o pacote é completado, um dado só é usado para o controle após certo intervalo de sua aquisição. Por exemplo, se um pacote contém dez dados, é imposto à primeira amostra um atraso correspondente a nove amostras no instante em que o pacote é recebido. Isso significa que o sistema já não está na situação que o controlador está “enxergando”, o que pode levar a um erro do controle, principalmente se a estratégia for aplicada para WNCS (RODRIGUES, 2016) onde geralmente o período de amostragem tende a ser maior (ordem de segundos), devida a relação de compromisso entre amostragem e vida útil da bateria dos sensores.

---

<sup>2</sup> O termo ‘período de aquisição’ se refere ao processo de medição de um fenômeno e sua conversão em um dado digital.

## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 PLANTA DTS200

A Figura 15 mostra a planta DTS200, desenvolvida pela empresa alemã Amira GmbH e utilizada neste trabalho. A parte principal da planta consiste em três tanques cilíndricos interconectados serialmente, três sensores de pressão para medição de nível, duas bombas, seis válvulas e um reservatório de água embaixo dos demais componentes.

Figura 15 – Planta DTS200 da Amira.

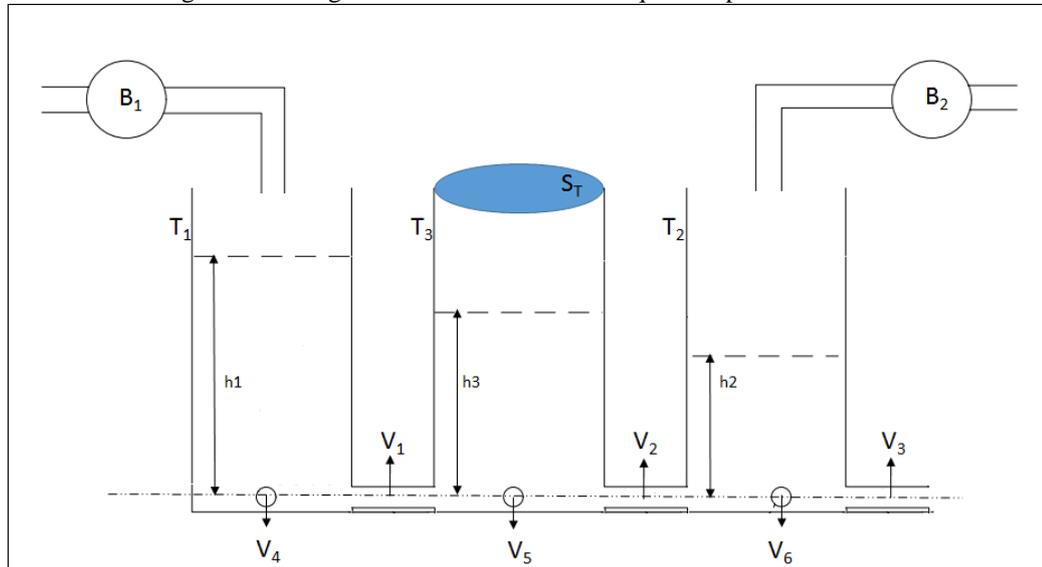


Fonte: (CHALUPA; NOVÁK; BOBÁL, 2011).

Como mostra a Figura 16, os tanques 1 e 2 estão posicionados nas laterais, enquanto o tanque 3 está posicionado entre os outros dois. A válvula  $V_1$  conecta os tanques 1 e 3, e a válvula  $V_2$  conecta os tanques 3 e 2. É importante notar que as válvulas 1 e 2 são responsáveis pelo acoplamento dos tanques, ou seja, são elas que tornam as dinâmicas interdependentes. As demais válvulas realizam o escoamento do líquido para o reservatório. Em geral, a válvula  $V_3$  é denominada como válvula de saída, ao passo que as válvulas numeradas de 4 a 6 são utilizadas para simulação de vazamentos nos tanques. A forma como as válvulas estão alocadas permite que sejam abertas ou fechadas para simular variação na dinâmica da planta

como um todo. Isto permite verificar a eficiência da estratégia de controle estudada com respeito a estas variações.

Figura 16 – Diagrama do sistema de três tanques acoplados DTS200.



Fonte: Autoria Própria

Em Chalupa, Novák e Bobál (2011), foi determinado o modelo ideal da planta, que pode ser representado através do conjunto de equações diferenciais apresentado na Equação (38):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dh_1}{dt} = \frac{q_1}{S_T} - k_1\sqrt{|h_1 - h_3|} \cdot \text{sign}(h_1 - h_3) - k_4\sqrt{h_1} \\ \frac{dh_3}{dt} = \frac{q_3}{S_T} - k_1\sqrt{|h_1 - h_3|} \cdot \text{sign}(h_1 - h_3) + k_2\sqrt{|h_2 - h_3|} \cdot \text{sign}(h_2 - h_3) - k_5\sqrt{h_3} \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{q_2}{S_T} - k_2\sqrt{|h_2 - h_3|} \cdot \text{sign}(h_2 - h_3) - k_3\sqrt{h_2} - k_6\sqrt{h_2} \end{array} \right. \quad (38)$$

Em que os parâmetros  $h_1$ ,  $h_2$  e  $h_3$  representam a altura da coluna de líquido nos tanques 1, 2 e 3, respectivamente. O parâmetro  $S_T$  é a área da seção transversal dos tanques, e  $q_1$  e  $q_2$  são a vazão volumétrica das bombas 1 e 2, respectivamente. Os parâmetros  $k_i$  representam a abertura de cada uma das seis válvulas e são dados pela Equação (39):

$$k_i = v_i S_V \sqrt{2g} \quad (39)$$

Em que os parâmetros  $v_i$  e  $S_V$  representam o coeficiente de vazão da válvula  $i$  e a área da seção transversal da válvula, respectivamente.

As equações apresentadas mostram que o comportamento da planta é não-linear e acoplado, ou seja, a variação do nível de um tanque depende do nível deste e do tanque adjacente. Ainda, o modelo pode ser alterado através da simples mudança na abertura das válvulas. Então, embora o processo seja descrito por equações simples, a solução analítica das saídas de acordo com os sinais de entrada não é trivial.

Nesta planta são utilizadas válvulas modelo L20 da J+J Automation (JJAUTOMATION, 2002), que têm capacidade de operar com diferentes tensões, tanto em corrente contínua quanto alternada. Estes atuadores elétricos apresentam limitador eletrônico de torque, que cortam o acionamento quando a válvula está no estado totalmente aberto ou totalmente fechado.

O controle dos sinais dos sensores e atuadores é realizado por um módulo denominado “Power Servo”. Este módulo dispõe de seis bornes para conexão dos sinais para controle externo e potenciômetros para controle manual da planta, além de uma chave seletora para alternar entre os modos de controle.

Três bornes são utilizados para os sinais dos sensores, que são disponibilizados pelo módulo na faixa de  $-10V$  a  $+10V$ . Os valores nominais da tensão para a medição do nível são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores nominais de tensão do sinal para medição do nível do tanque.

Tensão (V)	Nível (mm)
- 9	600
+ 9	0

Fonte: (AMIRA, 2002)

Dois bornes são utilizados para receber um sinal de tensão externo, também na faixa de  $-10V$  a  $+10V$ . Estes sinais são convertidos pelo módulo e utilizados para acionar as bombas. Os valores nominais de tensão para o acionamento das bombas são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores nominais de tensão do sinal para fluxo de saída da bomba d’água.

Tensão (V)	Fluxo (l/min)
- 10	0
+ 10	6

Fonte: (AMIRA, 2002)

Para o sensoriamento da planta, são utilizados dispositivos Vegabar 14, da Vega, transmissores de pressão para medição de pressão manométrica, pressão absoluta ou de vácuo. Este dispositivo apresenta como elemento sensor uma célula de medição com diafragma cerâmico, que responde a variações de pressão causando variações na capacitância da célula de medição. Esta mudança é devidamente convertida em um sinal elétrico 4-20mA, que é convertido para a faixa de tensão disponível nos bornes do módulo de controle.

Os atuadores da planta são duas bombas de diafragma Shurflo modelo 2095, cujas especificações são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações da bomba de diafragma Shurflo 2095-224-212

Variável	Valor
Tensão	12 VDC
Corrente máxima	4,5 A
Fluxo nominal máximo	7 l/min

Fonte: (AMIRA, 2002)

#### 4.2 INTERFACE PROGRAMÁVEL SBRIO

Neste trabalho foi utilizada a interface programável *Single Board* RIO-9636 (NATIONAL, 2016), da National Instruments, mostrada na Figura 17.

Figura 17 – sbRIO-9636, da National Instruments.



Fonte: (NATIONAL, 2016).

O sbRIO é um dispositivo com controle e aquisição de dados embarcados, composto por:

- Processador de tempo real de 400MHz, 512MB de memória não volátil e 256MB de memória DRAM para análise e controle determinísticos;
- FPGA reconfigurável Xilinx Spartan-6 LX45;
- 16 entradas analógicas de 16 bits, 4 saídas analógicas de 16 bits;
- 28 entradas/saídas digitais 3,3V;
- Comunicação através de portas Ethernet com velocidade 10/100 Mb/s, Serial RS232, Serial RS485, USB, CAN e SDHC;

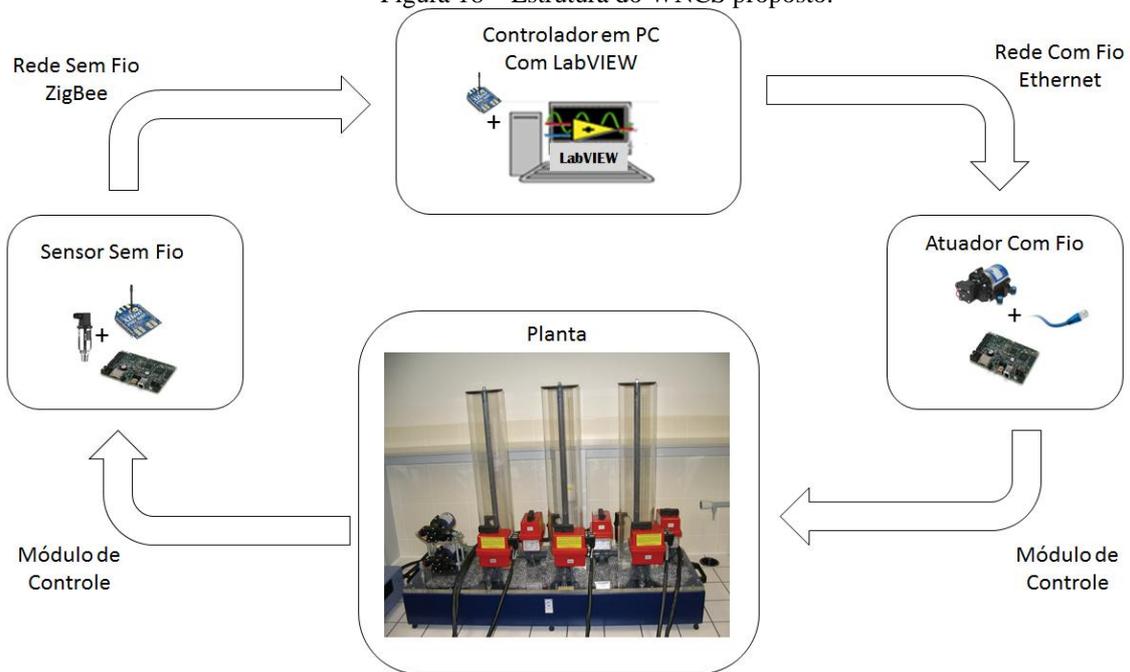
Um aspecto interessante deste dispositivo é que os canais de entradas e saídas analógicas operam na faixa de tensão de  $-10V$  a  $+10V$ , que é uma faixa de operação conveniente por ser a faixa utilizada pelo módulo de controle da planta, de onde são amostrados os sinais dos sensores de nível e para onde são direcionados os sinais de controle para acionamento das bombas. São, portanto, utilizadas três entradas (três níveis de tanque) e duas saídas analógicas (duas bombas), além de um canal de terra.

#### 4.3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE E IDENTIFICAÇÃO

Este projeto está baseado no estudo e desenvolvimento de uma estratégia de controle para eficiência energética (redução do consumo energético dos sensores sem fio) em WNCS utilizando um controlador adaptativo auto-ajustável (ASTRÖM; WITTENMARK, 2008). Como diferencial, o controlador adaptativo também inclui um recurso de *multi-rate* (BERG; AMIT; POWELL, 1988) para permitir a economia de energia através da redução na transmissão de dados na rede sem fio, e um recurso de identificação do modelo do WNCS através de uma estratégia de transmissão de pacotes de dados.

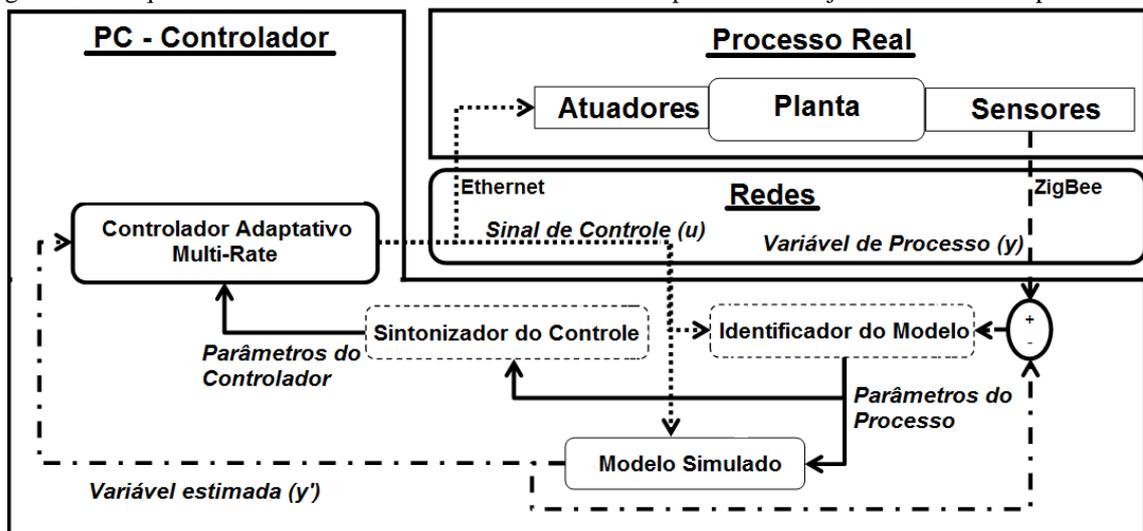
Este WNCS é composto pela planta de três tanques acoplados, cujos níveis são amostrados pelos sensores. Estes valores são processados pelo processador embarcado no sbRIO e enviados, via rede sem fio ZigBee, para um controlador programado no computador. As programações do sbRIO e do computador foram desenvolvidas no software LabVIEW, através do qual também é realizada a comunicação via rede Ethernet cabeada com o módulo sbRIO, para fazer o tratamento do sinal de controle e o acionamento das bombas d'água para enchimento dos tanques. A Figura 18 mostra o diagrama do WNCS proposto.

Figura 18 – Estrutura do WNCS proposto.



Fonte: Autoria própria.

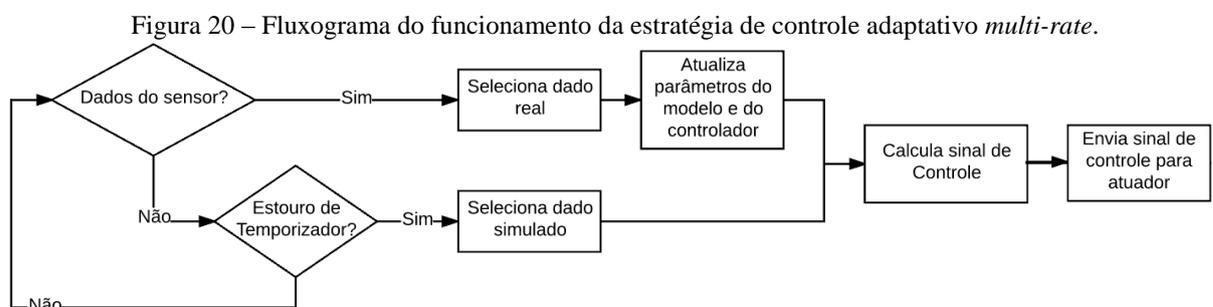
O controlador programado no computador foi desenvolvido com base na estrutura proposta para o controlador adaptativo *multi-rate* mostrado na Figura 19. É importante salientar que esta estrutura é aplicada duas vezes, sendo uma para o controlador de cada tanque. Logo, o sistema não-linear, multivariável e com dinâmicas acopladas é controlado por dois controladores SISO lineares, que utilizam um modelo de primeira ordem identificado.

Figura 19 – Esquemático de funcionamento do Controlador Adaptativo Auto-ajustável *Multi-rate* para WNCS.

Fonte: Autoria própria

O controlador adaptativo auto-ajustável é composto pelo ‘Identificador do Modelo’, ‘Sintonizador do Controle’ e o ‘Modelo Simulado’. O bloco ‘Identificador do Modelo’ é responsável por estimar os parâmetros do processo do WNCS a cada ciclo de controle. Os parâmetros do controlador são então calculados pelo bloco ‘Sintonizador do Controle’ através dos parâmetros estimados. Então, a cada ciclo, o modelo do processo do WNCS e os parâmetros do controlador são atualizados automaticamente, a fim de obter os requisitos de controle desejados. Controladores auto-ajustáveis permitem a combinação de vários métodos de controle e identificação (ASTRÖM; WITTENMARK, 2008). As escolhas dependem, normalmente, da ordem do sistema, do número de entradas e saídas, da dinâmica do processo e não linearidades, entre outros fatores. Uma vantagem de usar essa estrutura é que qualquer perturbação ou não-linearidade do processo pode ser identificada e incluída no modelo estimado e, portanto, compensada pelo controlador adaptativo do WNCS, o que representa uma vantagem diante dos controles MBC e MPC e da estratégia desenvolvida anteriormente (MANSANO; GODOY; PORTO, 2014).

Além da estrutura tradicional do controlador adaptativo, que fornece robustez contra os distúrbios e não-linearidades, a principal melhoria do controlador é o controle *multi-rate* adicionado para robustez contra perdas de pacotes e otimização energética. Neste projeto, o controlador *multi-rate* adaptativo para WNCS conta com um modelo discreto ARX de primeira ordem simulado em tempo real, paralelamente à operação do WNCS. Este modelo fornece dados virtuais (variável estimada) para calcular as ações de controle adicionais a serem enviadas para o atuador durante o período entre amostras, em que há carência de dados para o controle. Para que isto funcione, utiliza-se o processo resumido no fluxograma mostrado na Figura 20.



Fonte: Autoria própria

Segundo a Figura 20, o controlador utiliza um temporizador para contar um intervalo determinado (tempo de *multi-rate*), durante o qual o controlador espera por dados do sensor.

Caso este tempo seja excedido, o controlador utiliza um dado atualizado do modelo simulado como variável do processo e, com isto, calcular o sinal de controle.

Utilizando a técnica de *multi-rate* descrita, é possível determinar quantas amostras de dados virtuais adicionais serão utilizadas e, portanto, determinar quanto mais rápida a atuação sobre o processo será do que o período de amostragem mínimo do sensor sem fio real. Com o uso desta técnica, portanto, tem-se uma solução para o problema da restrição de amostragem de sensores sem fio industriais (MANSANO *et al.*, 2014).

Neste projeto, a técnica de *multi-rate* também foi usada para reduzir a transmissão na rede sem fio (usando dados virtuais em vez de transmissões sem fio do sensor), permitindo o aumento do período de amostragem do sensor sem fio e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de energia (MANSANO; GODOY; PORTO, 2014). Como vantagem, é conhecido que a adição da técnica de *multi-rate* também pode fornecer robustez contra perda de pacotes no WNCS (GODOY *et al.*, 2013), a partir do uso de dados virtuais nessas ocasiões.

Além da técnica de controle *multi-rate*, o controlador adaptativo desenvolvido também utilizou a ideia de transmissão de pacotes da técnica de controle baseado em pacotes (PBC). No entanto, devido ao problema do período de amostragem elevado para uso da técnica PBC em WNCS (RODRIGUES, 2016), neste trabalho a transmissão de pacote de dados foi utilizada somente para a melhoria da identificação do modelo do WNCS (e não diretamente para o controle). Como este modelo é identificado a partir de pacotes de dados enviados pelo sensor sem fio, a qualidade da identificação depende da quantidade de dados do pacote.

O controlador adaptativo e o modelo do WNCS simulado na Figura 19 são atualizados em tempo real através da rede, usando o mesmo sinal de controle transmitido para os atuadores. A vantagem é que o modelo gerado corresponde à dinâmica do WNCS em operação e não apenas da planta controlada, pois os efeitos dos atrasos da rede e a discretização do processo real são considerados no modelo matemático simulado, proporcionando maior confiabilidade aos dados virtuais. O dado obtido da simulação é comparado ao dado real e com isso é possível calcular um índice de qualidade do modelo identificado.

Para que a identificação e simulação do modelo ocorram de forma adequada, ambas são realizadas paralelamente no programa desenvolvido (LabVIEW). Dessa forma, o laço de simulação opera em paralelo com o laço de controle (e identificação). No laço de simulação está implementado o diagrama de blocos equivalente à função de transferência de um modelo

ARX de ordem 1, obtido pela identificação do sistema usando o algoritmo RLS. A equação geral do modelo ARX é mostrada na Equação (41) (AGUIRRE, 2015).

$$A(z) \cdot y(k) = B(z) \cdot u(k) + e(k) \quad (41)$$

Sendo  $e(k)$  o erro,  $u(k)$  a entrada e  $y(k)$  a saída.  $A(z)$  e  $B(z)$  são os coeficientes do modelo, sendo polinômios em função de  $z$  e definidos pelas Equações (42) e (43) respectivamente.

$$A(z) = 1 - a_1 z^{-1} - \dots - a_{n_y} z^{-n_y} \quad (42)$$

$$B(z) = b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_u} z^{-n_u} \quad (43)$$

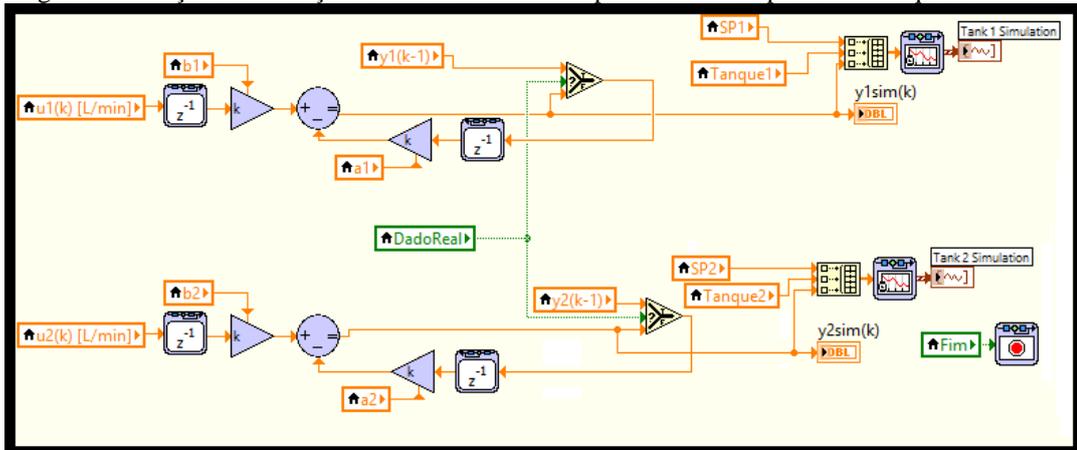
Devido à estrutura do controlador adaptativo desenvolvido, cada um dos dois tanques laterais do sistema multivariável (MIMO) de três tanques acoplados, é controlado separadamente como sendo um sistema SISO de ordem 1. Considerando um sistema ARX de primeira ordem e, por simplicidade, desprezando o erro e o acoplamento, obtêm-se as Equações (44) e (45).

$$(1 - a_1 z^{-1}) \cdot y(k) = (b_1 z^{-1}) \cdot u(k) \quad (44)$$

$$y(k) = (b_1 z^{-1}) \cdot u(k) + (a_1 z^{-1}) \cdot y(k) + 1 \quad (45)$$

A partir da Equação (45) foi montado o diagrama de blocos da simulação mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Laço de Simulação dos modelos ARX de primeira ordem para cada tanque do WNCS.



Fonte: Autoria própria

O laço de simulação da Figura 21 foi implementado usando o *Simulation Loop* do *Control Design and Simulation toolkit* do LabVIEW. Os parâmetros  $a_1$  e  $b_1$  são provenientes do modelo ARX identificado. A entrada do sistema é o sinal de controle proveniente do laço de controle e identificação. A *flag* 'DadoReal' é ativada quando ocorre o recebimento de um dado amostrado e transmitido pelo sensor sem fio. Quando isto ocorre, o dado real é inserido na realimentação do laço de simulação de modo a reduzir o erro e melhorar o resultado da mesma. Por fim o resultado da simulação é plotado em um gráfico juntamente com o sinal de referência 'Setpoint'. Toda a troca de informações entre o laço de simulação e o laço de controle/identificação é realizada com variáveis locais.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE

Os primeiros experimentos realizados neste projeto têm como objetivo verificar a viabilidade de aplicação das técnicas propostas para o WNCS desenvolvido, comparando as curvas de resposta e os valores dos índices de desempenho obtidos em cada situação. Estes experimentos consistiam em observar a resposta do sistema com diferentes taxas de amostragem, para o controlador adaptativo puro ou com a adição da técnica de controle *multi-rate*, com este último permitindo variação na taxa de *multi-rate* de cada experimento.

Para os experimentos de validação da estratégia, a planta foi configurada com as válvulas 1 e 2 totalmente abertas, para que houvesse acoplamento máximo entre os tanques; as demais válvulas foram deixadas abertas aproximadamente em 50%. Neste caso, como o tanque dois apresenta duas válvulas de saída, o escoamento dos tanques 1 e 2 são diferentes. Esta configuração foi utilizada em todos os experimentos para que os resultados pudessem ser comparados.

Com a planta configurada, foi definida uma curva padrão de referência a ser seguida em todos os experimentos, totalizando em 860s de duração para cada experimento. Para evitar saturação dos atuadores, o perfil de referência foi definido para seguir rampas de subida e descida e sinais de referência constante.

Com relação ao controlador adaptativo, pode-se alterar o fator de esquecimento do identificador de mínimos quadrados e o coeficiente regulador  $\Gamma$ . Como estes experimentos consistiam em verificar apenas a viabilidade da aplicação da estrutura de controle desenvolvida, os fatores de esquecimento foram mantidos constantes, sendo  $\lambda_{T_1} = \lambda_{T_2} = 0,8$ . Quanto ao coeficiente  $\Gamma$  do controlador adaptativo, estes foram mantidos constantes, com valores  $\Gamma_{T_1} = \Gamma_{T_2} = 2$ .

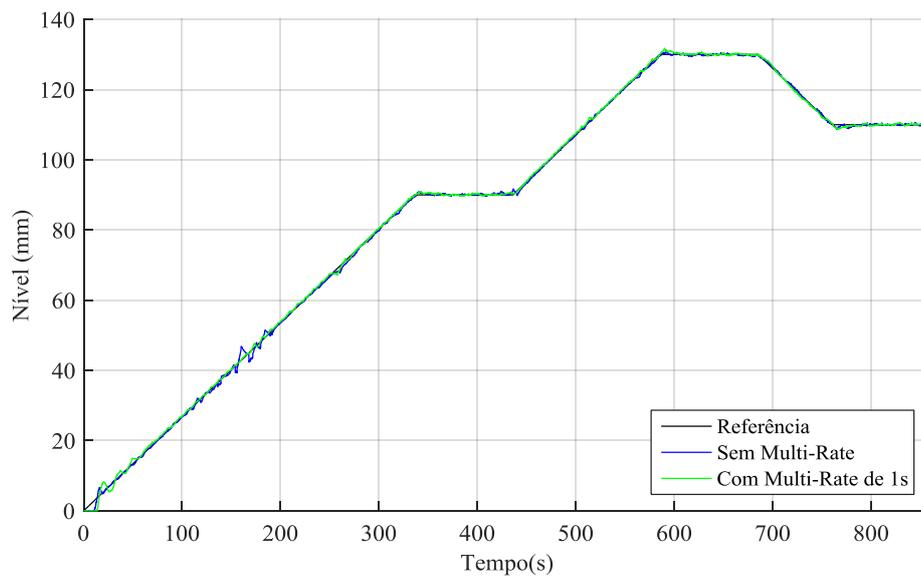
Os resultados foram analisados numericamente através do cálculo do valor RMS do erro, apresentado em valor bruto, e do índice ITAE, normalizado através da divisão do valor bruto do índice pelo maior valor obtido do índice em todos os experimentos referentes àquele tanque, de forma que o pior desempenho é representado pelo valor unitário do índice normalizado e o melhor desempenho é aquele que mais se aproxima de zero.

Antes de analisar as curvas de resposta, é importante salientar que a convergência dos parâmetros do controlador e, portanto, o desempenho do controlador, depende da convergência da identificação dos parâmetros da planta. Como isto requer um tempo não

desprezível, é esperado que o aumento no período de amostragem acarretasse em perda de desempenho do controlador durante o período inicial da identificação.

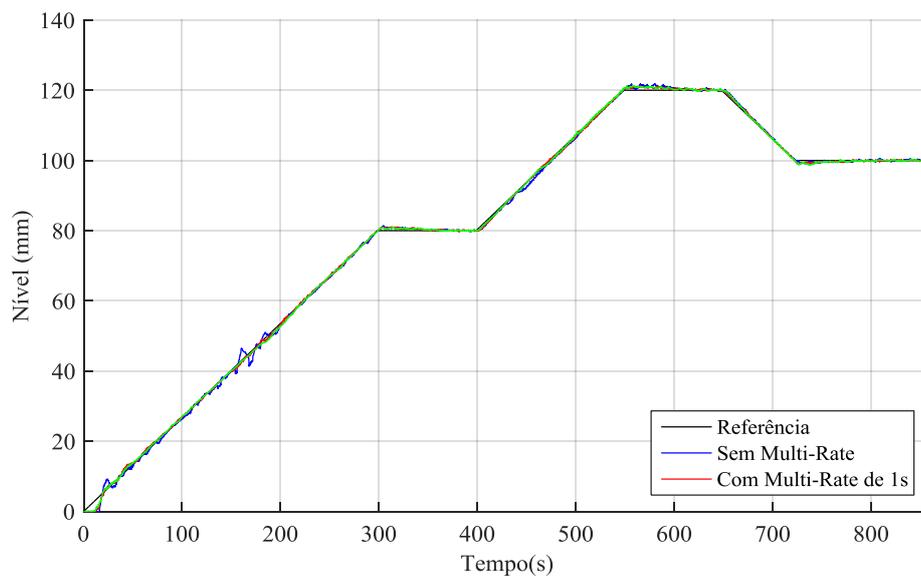
A Figura 22 e a Figura 23 mostram, respectivamente, as respostas do WNCS referentes aos tanques 1 e 2 para os experimentos realizados simultaneamente para ambos os tanques e com período de amostragem (período de transmissão dos sensores sem fio) de 4s.

Figura 22 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 1. Período de amostragem de 4s.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 2. Período de amostragem de 4s.



Fonte: Autoria própria.

As respostas mostram que há pouca diferença de desempenho entre o controlador adaptativo sem a técnica de *multi-rate* e com a técnica operando com período de 1s. Isto pode ser evidenciado através dos índices de desempenho mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Índices de desempenho dos controladores dos tanques 1 e 2 para os experimentos realizados com período de amostragem de 4s.

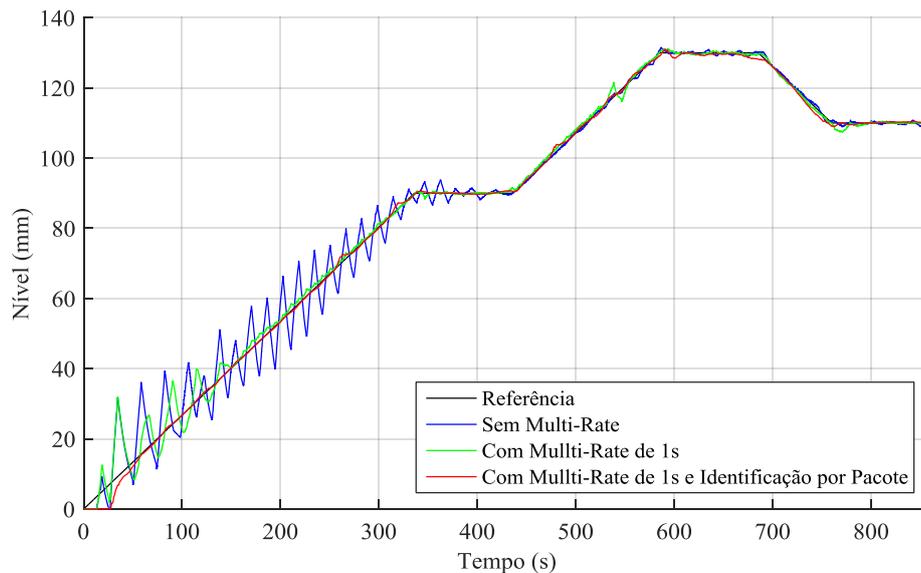
Estratégia do Controlador Adaptativo	Erro <sub>RMS</sub>		ITAE normalizado	
	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 1	Tanque 2
<b>Sem <i>multi-rate</i></b>	0,534	0,764	0,030	0,059
<b>Com <i>Multi-rate</i></b>	0,537	0,517	0,034	0,045

Fonte: Autoria própria.

Estes resultados indicam que o sensor sem fio operando com período de amostragem de 4s é capaz de fornecer ao controlador adaptativo uma quantidade suficiente de informações sobre o estado do processo, de forma que a técnica de *multi-rate* não adiciona ganho ao desempenho de controle. Espera-se, no entanto, que esta técnica melhore este desempenho conforme o período de amostragem dos sensores sem fio aumente, para fins de eficiência energética.

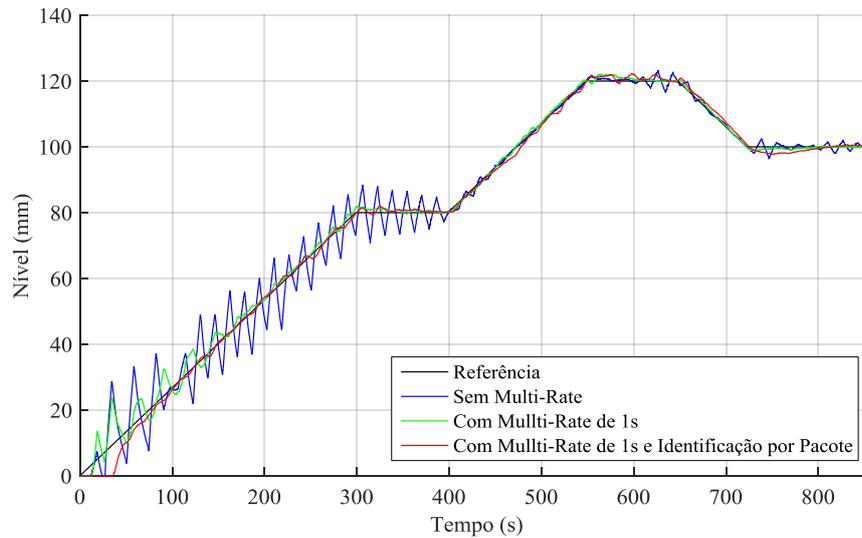
A Figura 24 e a Figura 25 mostram, respectivamente, as respostas do WNCS referentes aos tanques 1 e 2 para os experimentos realizados com período de amostragem de 8s.

Figura 24 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 1. Período de amostragem de 8s.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 2. Período de amostragem de 8s.



Fonte: Autoria própria.

As respostas obtidas para ambos os tanques mostram que o controlador adaptativo sem *multi-rate* apresenta oscilações na resposta durante os primeiros 400s do experimento, mas foi capaz de seguir a referência com pequenos erros de referência após este tempo. Habilitando a técnica de *multi-rate* para o controlador, nota-se que as oscilações iniciais foram reduzidas, seguindo a referência de forma estável. Desta forma, a adição da técnica de *multi-rate* melhorou o desempenho do controlador adaptativo, uma vez que fornece a ele dados simulados adicionais aos dados amostrados pelo sensor sem fio, permitindo atuação mais rápida que a amostragem.

Com o objetivo de melhorar a identificação do WNCS e, portanto, do controlador adaptativo, para este experimento foi utilizada a comunicação baseada em pacotes para os dados amostrados e a técnica de *multi-rate* habilitada para o controlador. A Figura 24 e a Figura 25 mostram em linhas vermelhas as respostas obtidas para esta configuração. Este último caso apresenta a melhor curva de reposta para os controladores, visto que eliminou as oscilações iniciais e as respostas convergiram para o valor da referência em um tempo significativamente menor.

Comparando os resultados dos experimentos com período de amostragem de 4s e 8s, fica claro que o aumento do período de amostragem dos sensores, provocou perda de desempenho de controle, conforme esperado. Isto fica evidenciado, também, nos índices de desempenhos apresentados na Tabela 5. Estes índices apresentam valores significativamente maiores que os apresentados para os experimentos com período de amostragem de 4s.

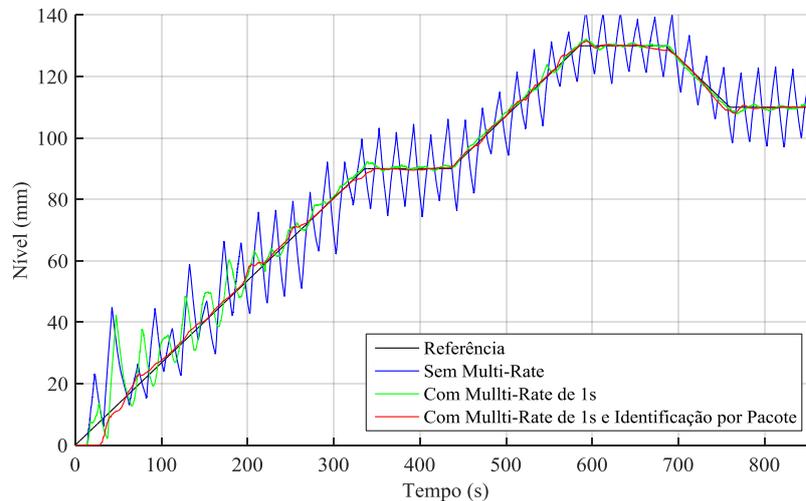
Tabela 5 – Índices de desempenho dos controladores dos tanques 1 e 2 para os experimentos realizados com período de amostragem de 8s.

Estratégia do Controlador Adaptativo	Erro <sub>RMS</sub>		ITAE normalizado	
	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 1	Tanque 2
<b>Sem multi-rate</b>	5,133	3,310	0,139	0,118
<b>Com Multi-rate</b>	2,782	2,643	0,081	0,071
<b>Com Multi-rate e Identificação Baseada em Pacote</b>	1,073	1,702	0,011	0,026

Fonte: Autoria própria.

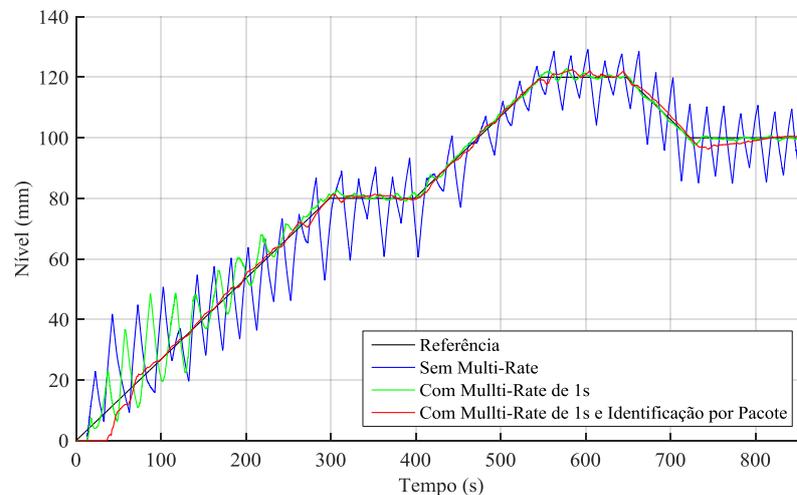
A Figura 26 e Figura 27 mostram as curvas de respostas para os experimentos com período de amostragem de 10s.

Figura 26 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 1. Período de amostragem de 10s.



Fonte: Autoria própria.

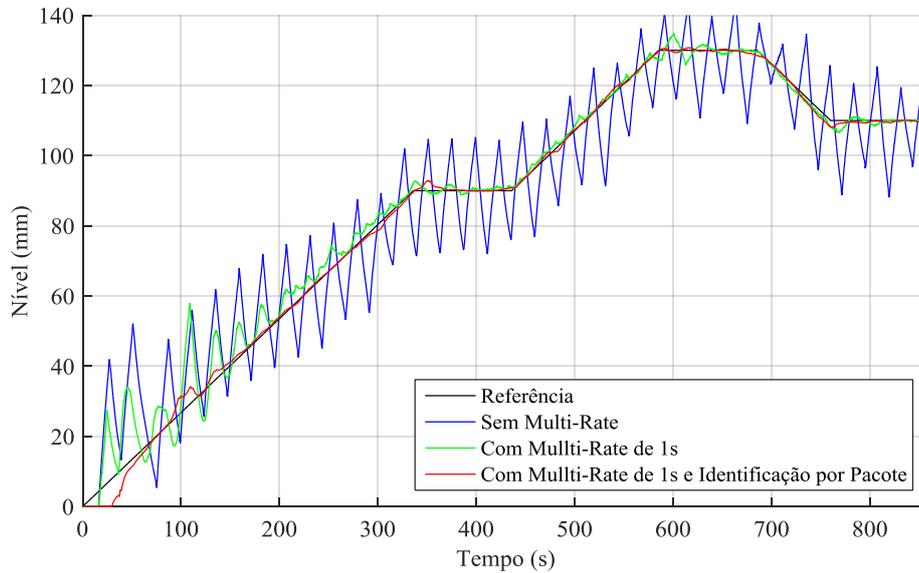
Figura 27 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 2. Período de amostragem de 10s.



Fonte: Autoria própria.

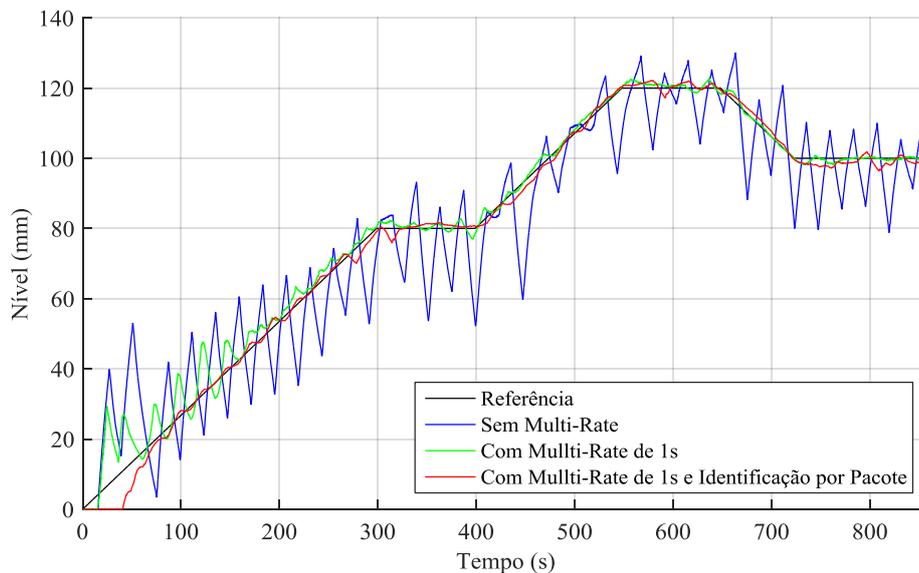
A Figura 28 e Figura 29 mostram as curvas de respostas para os experimentos com período de amostragem de 12s.

Figura 28 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 1. Período de amostragem de 12s.



Fonte: Autoria própria.

Figura 29 – Resposta do WNCS para o Controlador Adaptativo do Tanque 2. Período de amostragem de 12s.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 6 e a Tabela 7 mostram, respectivamente, os índices de desempenho para os experimentos com período de amostragem de 10s e 12s.

Tabela 6 – Índices de desempenho dos controladores dos tanques 1 e 2 para os experimentos realizados com período de amostragem de 10s.

Estratégia do Controlador Adaptativo	Erro <sub>RMS</sub>		ITAE normalizado	
	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 1	Tanque 2
<i>Sem multi-rate</i>	8,470	6,119	0,746	0,562
<i>Com Multi-rate</i>	4,633	3,920	0,195	0,166
<b>Com <i>Multi-rate</i> e Identificação Baseada em Pacote</b>	1,398	1,891	0,014	0,028

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Índices de desempenho dos controladores dos tanques 1 e 2 para os experimentos realizados com período de amostragem de 12s.

Estratégia do Controlador Adaptativo	Erro <sub>RMS</sub>		ITAE normalizado	
	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 1	Tanque 2
<i>Sem multi-rate</i>	11,201	9,921	1,000	1,000
<i>Com Multi-rate</i>	5,250	4,267	0,218	0,221
<b>Com <i>Multi-rate</i> e Identificação Baseada em Pacote</b>	1,514	2,155	0,013	0,034

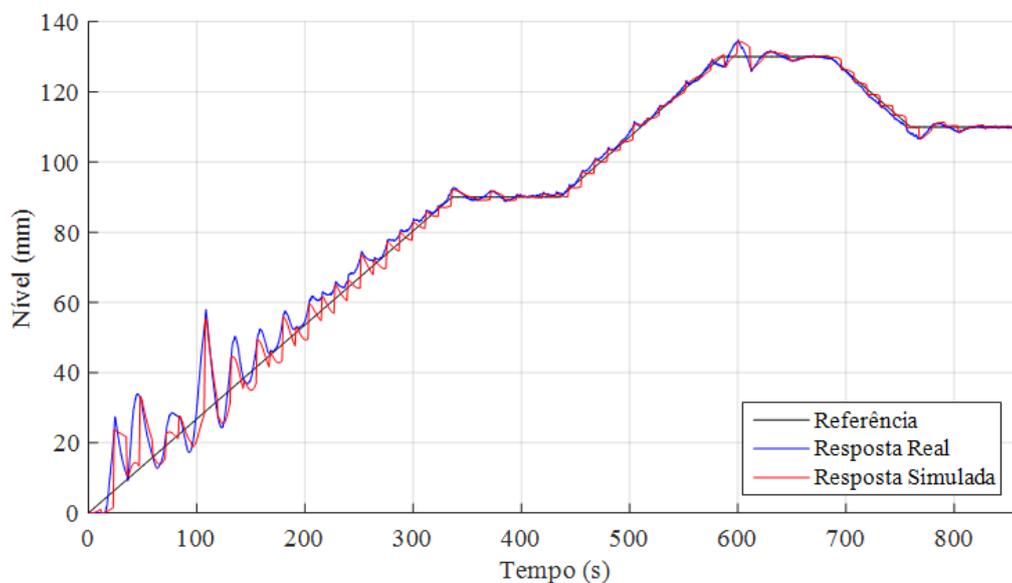
Fonte: Autoria própria.

Estes resultados mostram que, para períodos de amostragem superiores (10s e 12s), a perda de desempenho é ainda maior, sendo que o controlador adaptativo sem a adição de outra estratégia sequer foi capaz de reduzir o erro de referência, embora a resposta oscilasse em torno do valor do sinal de referência. O controlador adaptativo com *multi-rate*, apesar de conseguir estabilizar o sistema, é notável que a resposta do WNCS exibe um comportamento de resposta de segunda ordem subamortecido após as rampas de subida e descida, com tempo de estabilização maior que 100s. Isto é notável, pois as respostas ainda apresentam pequenas oscilações ao final dos intervalos em que a referência é constante. Os índices de desempenho indicam que, mesmo com amostragem de 12s, utilizando o *multi-rate* houve melhoria de aproximadamente 55% no desempenho comparado ao controlador sem o *multi-rate*. Finalmente, ao adicionar a comunicação em pacotes de dados, observou-se melhora significativa das curvas de resposta do WNCS, sem grandes oscilações no início do experimento. Os índices de desempenho, neste caso, indicam melhora de aproximadamente 80% em relação ao caso sem *multi-rate* e de aproximadamente 50% em relação ao caso com *multi-rate*, mas sem identificação por pacotes de dados.

As análises qualitativas, dadas pelas curvas de resposta, e as análises quantitativas, dadas pelos índices de desempenho relativos aos experimentos já citados mostram que o desempenho de controle é prejudicado pelo aumento do período de amostragem dos sensores sem fio. Isto ocorre, pois o aumento do período de amostragem acarreta na redução da

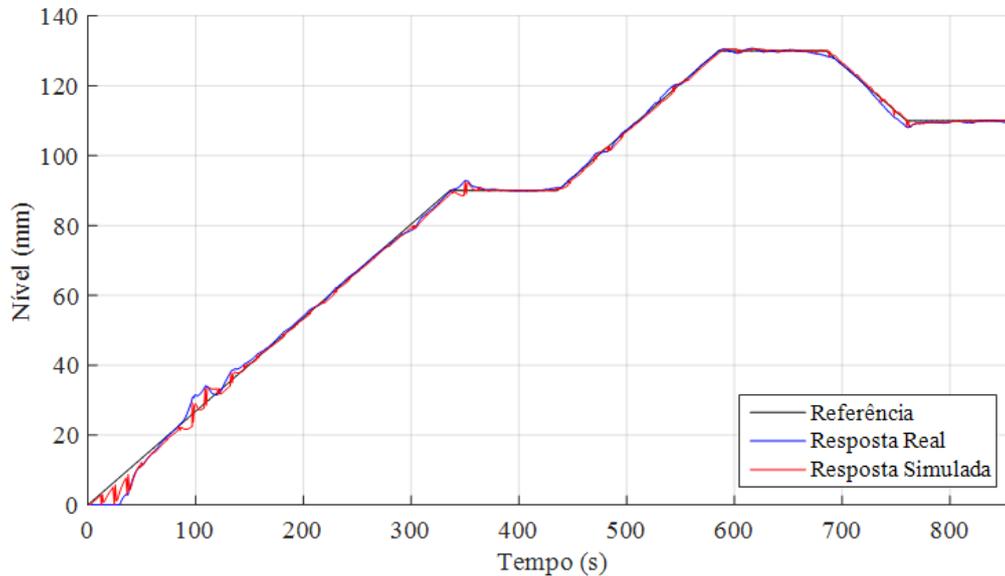
quantidade de informação disponível para o controlador adaptativo auto-ajustável e, portanto, este requer um tempo maior para realizar a identificação do modelo do WNCS. Os resultados mostram, ainda, que o melhor desempenho é garantido quando o controlador adaptativo dispõe da técnica de *multi-rate* e da estratégia de identificação por pacotes de dados. Portanto, a atuação a uma taxa mais rápida que a amostragem é mais vantajosa quando há mais quantidade de dados disponíveis ao controlador. Isto pode ser observado através da comparação das respostas apresentadas na Figura 30 e na Figura 31, que mostram que a estratégia de identificação do modelo utilizando pacotes de dados amostrados melhora significativamente o tempo de convergência da identificação e, desta forma, os dados virtuais, provenientes do modelo simulado, convergem mais rapidamente para o valor real.

Figura 30 – Comparação das Respostas Real e Simulada do WNCS para o Tanque 1. Controlador Adaptativo Operando com estratégia de *Multi-Rate* com Período de 1s e Identificação de Modelo sem Pacotes de Dados. Período de Amostragem do Sensor sem Fio de 12s.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Comparação das Respostas Real e Simulada do WNCS para o Tanque 2. Controlador Adaptativo Operando com estratégia de *Multi-Rate* com Período de 1s e Identificação de Modelo com Pacotes de Dados. Período de Amostragem do Sensor sem Fio de 12s.



Fonte: Autoria própria.

Isto também pode ser comprovado com os dados presentes na Tabela 8, que mostra o tempo necessário para os dados virtuais gerados pelo modelo simulado convergirem para o valor real (amostrado) e, portanto, o tempo necessário para produzir dados virtuais confiáveis é menor quando a estratégia de identificação utiliza pacotes de dados.

Tabela 8 – Tempo de Convergência do Modelo Simulado. Período de amostragem dos sensores sem fio de 12s.

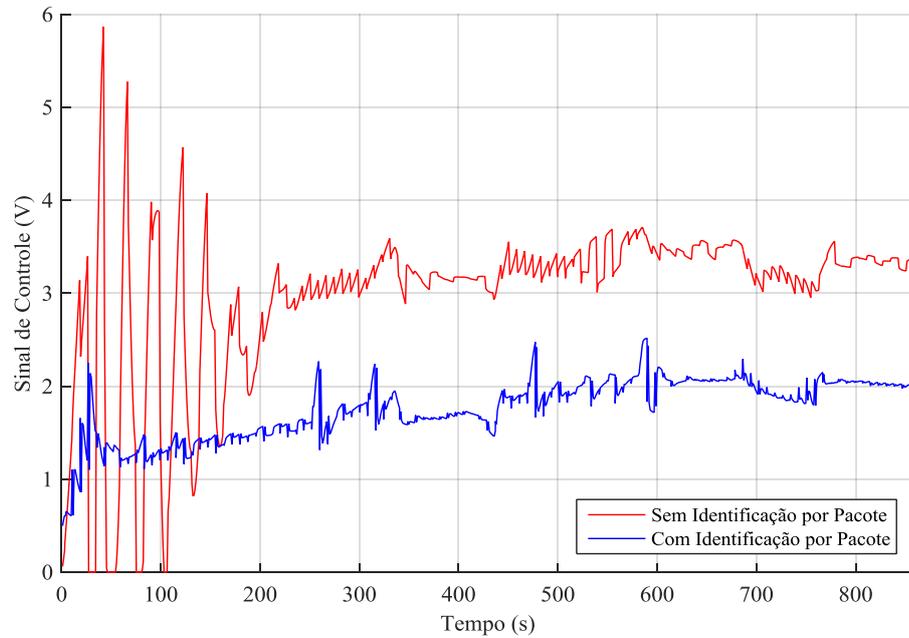
Estratégia de Identificação	Tempo de Convergência do Modelo Simulado (s)	
	Tanque 1	Tanque 2
Um dado por transmissão	408,2	228,2
Baseada em Pacotes	153,5	145,2

Fonte: Autoria própria.

A Figura 32 e a Figura 33 mostram o comportamento do sinal de controle do controlador do Tanque 1 operando com período de amostragem de 8 e 12 segundos, respectivamente. Os gráficos mostram um comparativo deste sinal quando a estratégia de identificação por pacotes de dados está sendo empregada, ou não. A partir destes gráficos, observa-se que, quando há pacotes de dados, o sinal de controle oscila pouco inicialmente e, ao longo do experimento, apresenta valor menor, se comparado ao caso sem a estratégia de pacotes. Isto ocorre, pois o processo de identificação produz valores diferentes para os

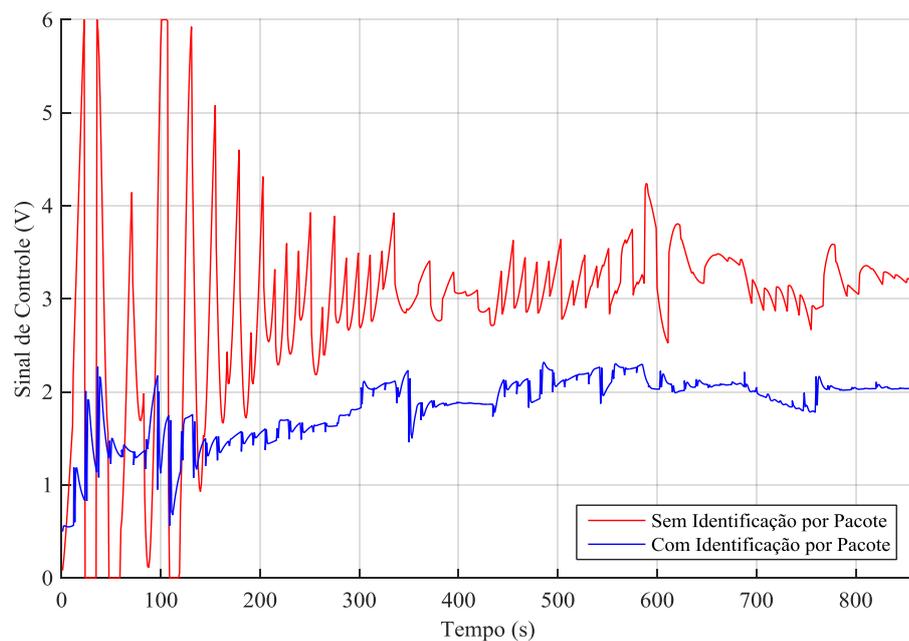
parâmetros ‘a’ e ‘b’ do modelo ARX identificado e, conseqüentemente, no valor do ganho proporcional ‘ $K_C$ ’ do controlador adaptativo.

Figura 32 – Sinal de controle para o controlador do Tanque 1 com período de amostragem de 8 segundos. Comparativo entre as estratégias de controle adaptativo multi-rate com relação ao método de identificação dos parâmetros.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Sinal de controle para o controlador do Tanque 1 com período de amostragem de 12 segundos. Comparativo entre as estratégias de controle adaptativo multi-rate com relação ao método de identificação dos parâmetros.



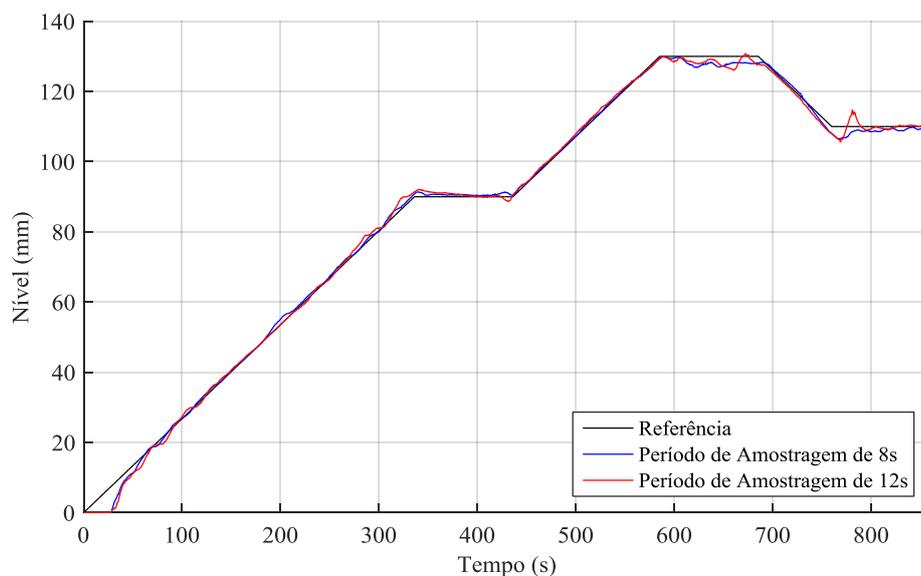
Fonte: Autoria própria.

Visto que a estratégia de comunicação por pacotes de dados proporciona melhoria na identificação do modelo e no desempenho de controle do WNCS, esta estratégia é adotada para as demais análises realizadas neste trabalho.

## 5.2 ANÁLISE DE OPERAÇÃO COM DISTÚRBIOS

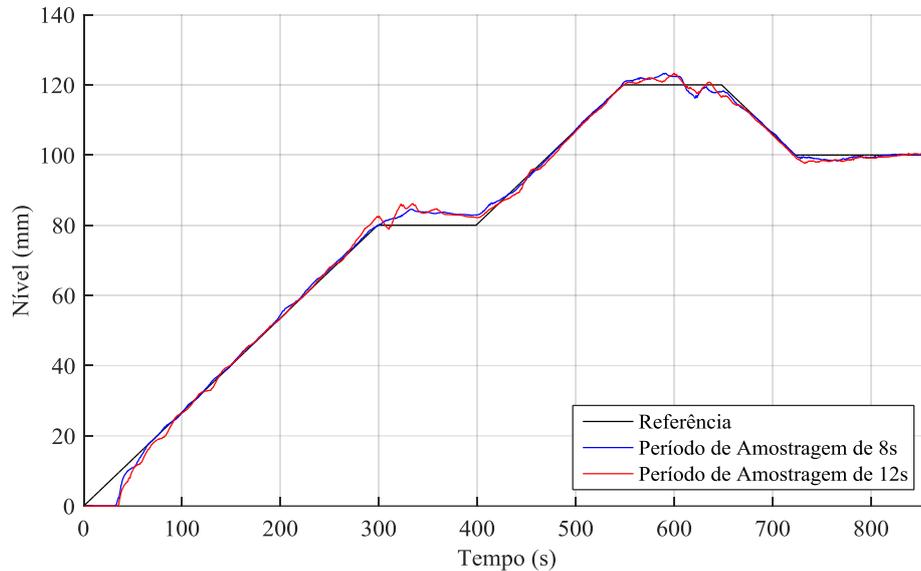
Os resultados apresentados até aqui mostram o desempenho do controlador operando com diferentes estratégias, mas em condições ideais, ou seja, com o WNCS operando sem distúrbios. Com o objetivo de verificar a tolerância do controlador a distúrbios, foram propostas variações nas posições da válvula de escoamento do tanque central (mostrada na Figura 16, como V5). Variando a posição desta válvula, a dinâmica de todo o sistema será alterada significativamente devido ao acoplamento existente entre os tanques. Primeiramente, no instante  $t = 300s$ , a válvula é fechada totalmente, e no instante  $t = 600s$ , a válvula retorna para sua posição original. A Figura 34 e a Figura 35 mostram, respectivamente para os tanques 1 e 2, os resultados para os experimentos realizados com períodos de amostragem de 8s e 12s e operação com os distúrbios descritos.

Figura 34 – Resposta do WNCS com Distúrbios para o Controlador Adaptativo do Tanque 1. Estratégia de *Multi-Rate* Operando com Período de 1s.



Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – Resposta do WNCS com Distúrbios para o Controlador Adaptativo do Tanque 2. Estratégia de *Multi-Rate* Operando com Período de 1s.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 9 mostra os índices de desempenho para os casos com e sem distúrbios.

Tabela 9 – Comparativo de índices de desempenho para experimentos em condições ideais e em condições com distúrbios. Controlador Adaptativo *Multi-Rate* com Identificação Baseada em Pacotes.

Período de amostragem (s)	Tanque	Distúrbios	Erro <sub>RMS</sub>	ITAE Normalizado
8	1	Não	0,096	0,011
		Sim	0,128	0,022
	2	Não	0,172	0,026
		Sim	0,189	0,029
12	1	Não	0,135	0,013
		Sim	0,144	0,024
	2	Não	0,217	0,034
		Sim	0,222	0,036

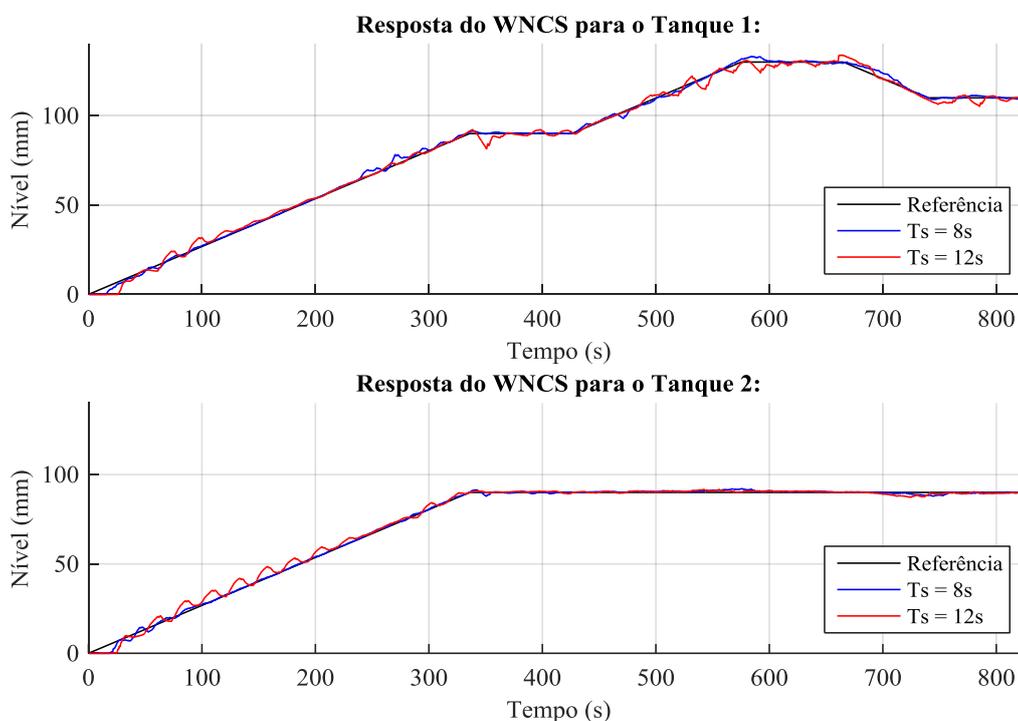
Fonte: Autoria própria.

Estes resultados mostram que após os distúrbios, as respostas apresentam oscilações e os erros de referência levam algum tempo para serem corrigidos e, por isto, há perda de desempenho do controlador nos casos em que o WNCS está sujeito a distúrbios. Entretanto, a resposta passa a seguir corretamente a referência após este tempo. Isto mostra que o controlador adaptativo desenvolvido necessita de um tempo não desprezível para se adaptar às mudanças na dinâmica da planta, uma vez que só pode reagir a estas mudanças após o

recebimento de um novo pacote de dados referentes ao último período de amostragem. Entretanto, o controlador se mostrou capaz de compensar estes distúrbios e manter a resposta estável no valor de referência.

Para verificar a tolerância do controlador ao acoplamento entre os tanques, foram realizados experimentos, em que a referência de nível do Tanque 1 apresenta o mesmo perfil de variação utilizado nos experimentos anteriores, mas a referência do Tanque 2 é mantida constante após a primeira rampa de subida. A Figura 36 mostra a resposta para o controlador do Tanque 1.

Figura 36 – Resposta do WNCS para os Controladores Adaptativos. Estratégia de *Multi-Rate* Operando com Período de 1s e Identificação por Pacotes de Dados. Sinal de Referência do Tanque 2 é mantida constante após a primeira rampa.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 36 mostra que, com período de amostragem maior (12 segundos), a resposta do controlador do Tanque 1 apresenta pequenas oscilações a partir da segunda rampa do sinal de referência, o que mostra que há influência mais significativa do acoplamento quando os níveis nos tanques são muito diferentes. Por sua vez, a resposta do controlador do Tanque 2 não apresentou oscilações. Apesar do efeito do acoplamento, a estratégia de controle mostrou-se robusta, uma vez que apresentou capacidade de manter a resposta estável próxima ao valor de referência e, portanto, adaptar-se ao acoplamento.

### 5.3 RELAÇÃO ENTRE PERÍODO DE AMOSTRAGEM E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A proposta deste projeto inclui um adaptativo auto-ajustável que é capaz de identificar o WNCS que está sendo controlado e controlá-lo usando os parâmetros estimados. Como essas tarefas de identificação e controle são feitas online (com a execução do WNCS), uma questão importante é como o desempenho do controlador adaptativo é afetado se as transmissões sem fio diminuírem devido à técnica de *multi-rate*. Neste caso, a variável estimada é obtida somente a partir de novos sinais de controle, mas considerando o mesmo modelo estimado (sem novos parâmetros fornecidos pelo identificador do modelo). Portanto é importante analisar esta questão e caracterizar a frequência de *multi-rate* (e consequente economia de energia) que pode ser tolerada e ainda garantir um determinado nível de desempenho para o WNCS. Dessa forma, busca-se avaliar a relação de compromisso entre o custo de reduzir as transmissões sem fio (e maximizar a economia de energia) em termos de métricas de desempenho de controle (erro RMS e índice de desempenho ITAE) do WNCS.

Como pode ser verificado na Tabela 10 (EMERSON, 2015), o consumo de energia de um sensor sem fio está diretamente relacionado com a transmissão de dados na rede sem fio. Por exemplo, dobrando o período de amostragem de 8s para 16s, é obtido um aumento muito significativo na vida útil do sensor, de 2,3 para 4,1 anos.

Tabela 10 – Estimativa da vida útil da bateria de sensores industriais sem fio para diferentes períodos de amostragem.

Sensor Industrial Sem Fio - Emerson Process	Período de Amostragem (s)	Expectativa de vida da bateria (anos)
<i>Rosemount 3308A Wireless Guided Wave Radar Level Transmitter</i>	4	1,3
	8	2,3
	16	4,1
	32	6,6
<i>Rosemount 3051S MultivVariable™ Wireless Transmitter</i>	4	1,3
	8	2,2
	16	3,5
	32	5,2

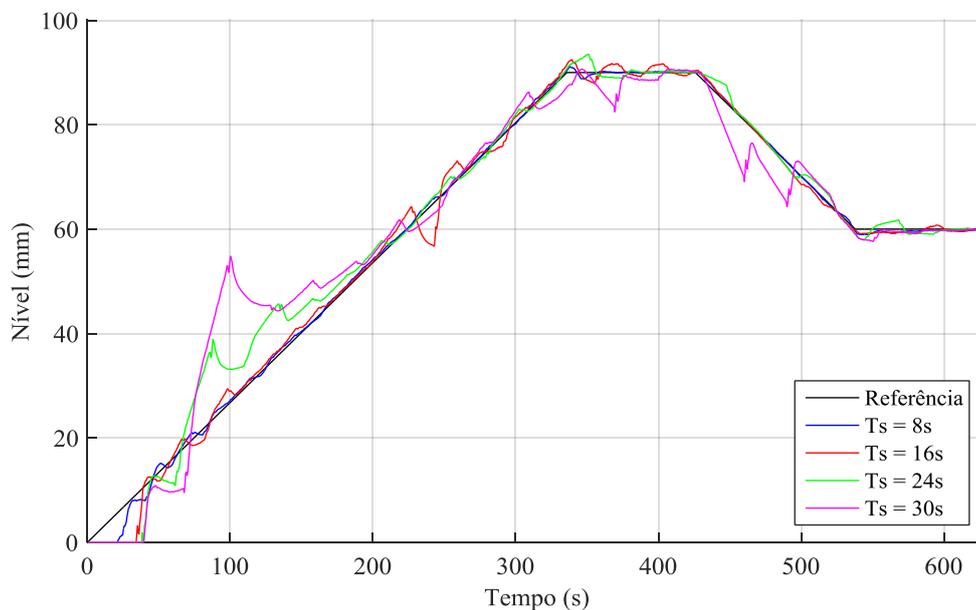
Fonte: (EMERSON, 2015).

Adicionalmente, Mansano, Godoy e Porto (2014) comprovam, através de medições do consumo energético de um WNCS operando com uma estratégia de MBC, que é possível

obter redução significativa do consumo a partir do aumento do período de amostragem do sensor sem fio. Portanto, pode-se afirmar que, ao aumentar o período de amostragem do sensor sem fio, obtém-se um aumento na vida útil da sua bateria de alimentação, melhorando a eficiência energética do WNCS. Baseando-se nestes dados, é possível atestar que o controlador adaptativo *multi-rate* desenvolvido apresenta potencial para eficiência energética em WNCS, pois a aplicação desta estratégia permite reduzir o gasto energético dos sensores sem fio e, assim, poupar a bateria, sem que haja grande prejuízo ao desempenho de controle do WNCS.

Para caracterizar a influência do período de amostragem do sensor sem fio no desempenho do WNCS operando com controlador adaptativo *multi-rate* desenvolvido e demonstrar seu potencial de eficiência energética, foram realizados experimentos adicionais variando o período de amostragem de 8s até 30s, em intervalos de 2s. A Figura 37 mostra um comparativo das respostas do WNCS para o controlador do tanque 1, com o sensor sem fio operando com os períodos de amostragem citados.

Figura 37 – Comparação da resposta do WNCS para o controlador do Tanque 1 com altos períodos de amostragem.



Fonte: Autoria própria.

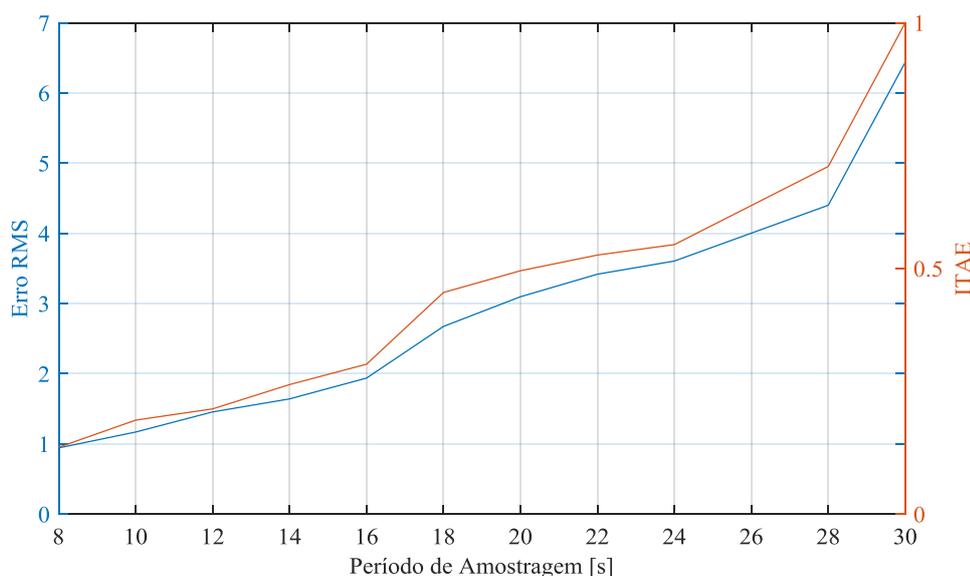
Os resultados da Figura 37 mostram que, para período de amostragem de 8 e 16s, o controlador apresenta bom desempenho, mantendo a resposta em torno do valor de referência durante todo o experimento e garantindo um nível de desempenho adequado mesmo com a

redução da frequência de transmissão sem fio. Para períodos de amostragem maiores (24s e 30s), o controlador requer um tempo alto para estabilizar em torno do valor de referência. Para o experimento com período de amostragem de 30s, a resposta se mostra pouco robusta, uma vez que há oscilações com alto valor do erro de referência em vários instantes durante o experimento.

A Figura 38 mostra um gráfico de variação dos índices de desempenho do controlador do Tanque 1 em função do período de amostragem do sensor sem fio. Estes resultados foram normalizados com respeito ao valor máximo de ITAE, obtido no experimento com período de amostragem de 30s.

Analisando as curvas de variação dos índices de desempenho do Erro RMS e ITAE da Figura 38, é possível identificar dois pontos de interesse. O primeiro ponto, referente ao período de amostragem de 16s, indica que a perda de desempenho é maior a partir deste ponto. Isto mostra que existe uma faixa de períodos de amostragem para que a relação desempenho *versus* eficiência energética do WNCS seja adequada. O segundo ponto, referente ao período de amostragem de 28s, indica que, a partir deste ponto, o desempenho fica comprometido devido ao aumento excessivo no período de amostragem. Isto indica que a estratégia de controle implementada apresenta um limite de operação com relação ao período de amostragem, para que o controlador apresente robustez às não-linearidades inerentes ao WNCS controlado.

Figura 38 – Comparação de desempenho do controlador do Tanque 1. Índices de desempenho  $ERRO_{RMS}$  e  $ITAE_{Norm}$  em função do período de amostragem do sensor sem fio.



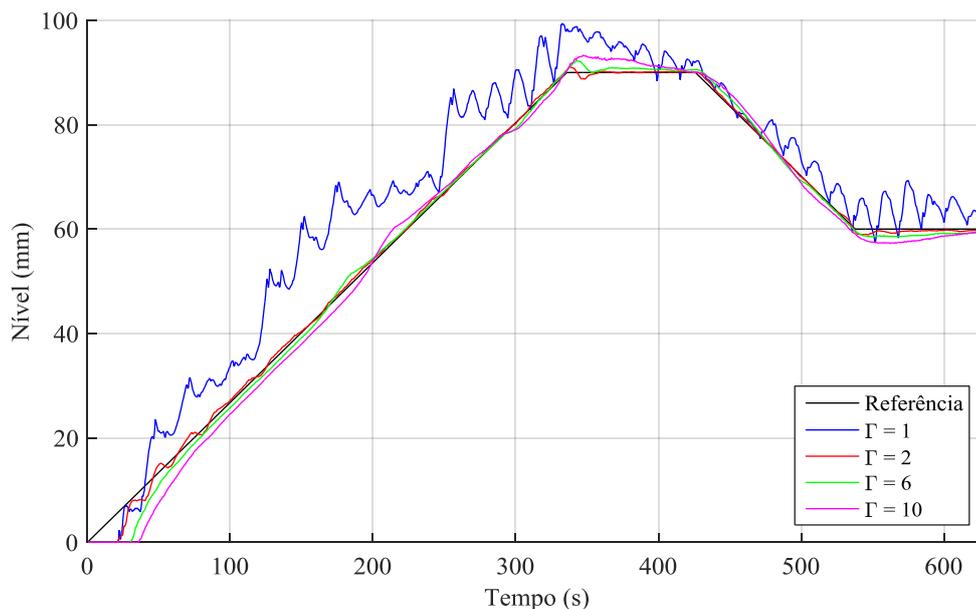
Fonte: Autoria própria.

#### 5.4 RELAÇÃO ENTRE DESEMPENHO DE CONTROLE E PARÂMETRO $\Gamma$ DO CONTROLADOR

Adicionalmente é importante investigar questões técnicas como o impacto dos parâmetros de configuração do controlador adaptativo. Para caracterizar a influência do parâmetro  $\Gamma$ , que se mostrou mais significativo que o fator de esquecimento do identificador de mínimos quadrados, no desempenho do controlador adaptativo desenvolvido, foram realizados experimentos variando o valor deste parâmetro de 1 até 10. A Figura 39 mostra um comparativo das curvas de resposta do WNCS para o controlador do tanque 1 referentes aos experimentos realizados com  $\Gamma = 1$ ,  $\Gamma = 2$ ,  $\Gamma = 6$  e  $\Gamma = 10$ .

Este comparativo da Figura 39 mostra que, para  $\Gamma = 1$ , o controlador adaptativo desenvolvido não tem capacidade de controlar o WNCS, enquanto para os outros casos, a resposta do WNCS é estável. Comparando as respostas nos casos estáveis, observa-se que o aumento no valor do parâmetro  $\Gamma$  provoca maior amortecimento na resposta do WNCS e, portanto, o tempo necessário para a resposta convergir para o valor de referência é maior. Isto ocorre, pois o aumento do valor de  $\Gamma$  provoca a diminuição do valor do ganho proporcional do controlador adaptativo.

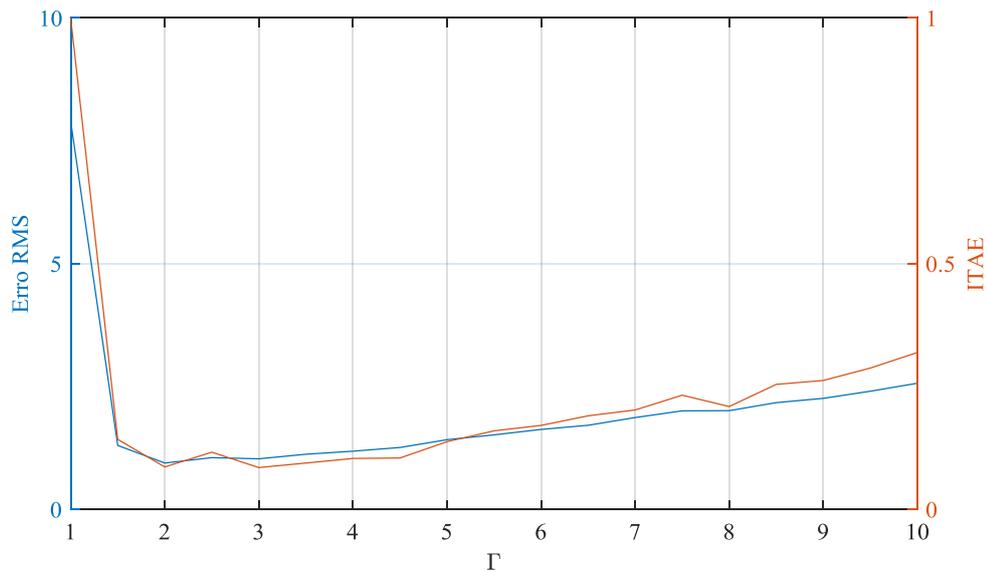
Figura 39 - Comparação da resposta do WNCS para o controlador do Tanque 1 para diferentes valores do parâmetro  $\Gamma$ . Período de amostragem de 8s.



Fonte: Autoria própria.

Para avaliar numericamente o impacto da variação do valor do parâmetro  $\Gamma$ , a Figura 40 mostra um gráfico comparativo da variação dos índices de desempenho do controlador do Tanque 1 em função da variação do parâmetro  $\Gamma$ .

Figura 40 – Variação dos índices de desempenho  $\text{Erro}_{\text{RMS}}$  e  $\text{ITAENorm}$  em função do parâmetro  $\Gamma$

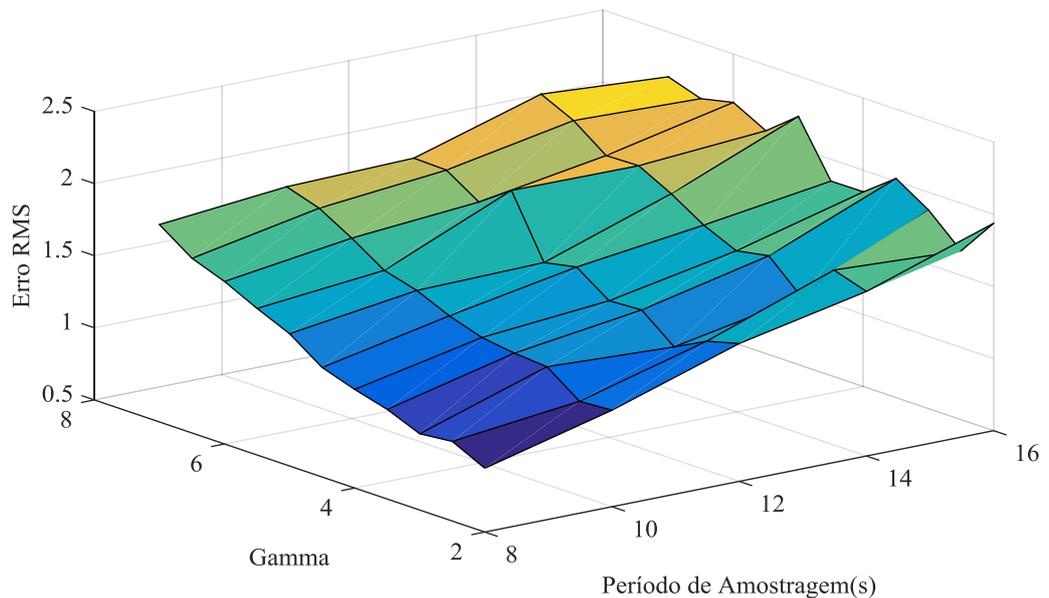


Fonte: Autoria própria.

Analisando a curva de variação do índice  $\text{Erro}_{\text{RMS}}$  para estes experimentos, é possível observar que o desempenho do controlador é ótimo quando  $\Gamma$  é igual a 2. Além disto, o índice ITAE indica que o controlador mantém bom desempenho quando  $\Gamma$  varia de 1,5 até 5. A partir deste ponto, há uma perda significativa no desempenho do controlador. Com estas informações, tem-se o indicativo que parâmetro  $\Gamma$  apresenta uma faixa de operação ideal, em que se obtém o melhor desempenho de controle para o período de amostragem utilizado e, com isto, melhorar a eficiência energética do WNCSS com o melhor desempenho de controle possível.

Considerando a faixa de valores de período de amostragem de 8 a 16s e do parâmetro  $\Gamma$  de 2 a 8, em que o desempenho de controle apresentou melhor relação com a eficiência energética do WNCSS, foram realizado experimentos combinando esses parâmetros, para obter uma curva de superfície do índice  $\text{Erro}_{\text{RMS}}$  e caracterizar qualitativamente a relação entre as duas variáveis. A Figura 41 mostra o gráfico dos índices de desempenho referente a estes experimentos.

Figura 41 – Comparação de desempenho em função do período de amostragem do sensor sem fio e o do parâmetro  $\Gamma$  do controlador adaptativo.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico mostra que o desempenho varia aproximadamente de forma linear se um dos parâmetros for mantido constante, sendo que o aumento do valor em qualquer um dos parâmetros tende a provocar aumento no valor do índice de desempenho, o que significa que há perda de desempenho. Ainda, é possível observar que as relações descritas na Figura 38 e na Figura 40 podem ser mantidas, mostrando que, para um mesmo valor de período de amostragem, valores menores de  $\Gamma$  são mais adequados; e para um mesmo valor de  $\Gamma$ , valores menores de período de amostragem são mais adequados.

A área no gráfico da Figura 41 mostrada em tons mais escuros de azul mostra que existe uma margem para ambos os parâmetros em que o desempenho não é excessivamente prejudicado pela variação do valor de qualquer um dos parâmetros, de forma que existe um conjunto de valores que permite melhorar a eficiência energética do WNCS mantendo bom desempenho de controle.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi desenvolvida uma estratégia de controlador adaptativo auto-ajustável operando com uma técnica de controle *multi-rate* e identificação baseada em pacotes de dados. Este controlador foi aplicado a um sistema de controle via rede sem fio, cuja planta de três tanques acoplados apresenta características de sistema multivariável e não-linear.

Para cada tanque foi implementado um controlador PI-Adaptativo, em que o ganho proporcional e o tempo integral são variáveis e se ajustam de acordo com os parâmetros do modelo identificado do WNCS. O modelo de cada tanque é identificado separadamente, através de uma técnica de transmissão de pacotes de dados pela rede sem fio, que permite melhorar a identificação do WNCS ao fornecer maior quantidade de dados a cada período de transmissão do sensor sem fio. Cada tanque é representado por um modelo ARX de primeira ordem e, portanto, o WNCS é tratado como duas estruturas SISO lineares e desacopladas.

O modelo ARX de cada tanque é simulado para gerar informações virtuais acerca da variável do processo durante o período entre duas amostras do sensor sem fio. Para que estas informações virtuais possam ser utilizadas pela técnica de controle *multi-rate*, o modelo simulado deve fornecer informações precisas, de forma que o sinal de controle calculado seja apropriado para levar o WNCS a uma condição de estabilidade e erro de referência nulo.

Apesar de tratar o WNCS através de um modelo simplificado, os controladores de ambos os tanques mostraram capacidade de manter o WNCS estável e com bom desempenho de controle com altos períodos de amostragem. Estes resultados validaram o uso da estratégia adotada, mostrando que é possível aumentar o período de amostragem e manter o WNCS estável com o uso do controle *multi-rate*.

Os experimentos realizados permitiram analisar o desempenho do controlador desenvolvido com relação à influência do aumento do período de amostragem dos sensores sem fio e com relação ao parâmetro de projeto  $\Gamma$ . Os resultados para os experimentos variando o período de amostragem mostraram dois pontos de interesse que indicam que há uma faixa de valores (de até 16 s) em que a eficiência energética pode ser melhorada sem comprometer o nível de desempenho, e uma faixa em que melhorar a eficiência energética não é recomendada por provocar maior perda de desempenho (a partir de 28 s).

Quanto ao experimento com variação do parâmetro  $\Gamma$  do controlador, os resultados mostraram que este parâmetro pode ser ajustado em um valor ótimo ( $\Gamma=2$ ) para proporcionar o melhor desempenho de controle possível e ainda permite ser variado dentro de uma faixa de valores em que o nível de desempenho é mantido. Portanto, os resultados mostraram

claramente que ambos os parâmetros podem ser ajustados para definir uma faixa adequada de valores permitidos para que o desempenho de controle seja adequado para a finalidade de melhoria na eficiência energética do WNCS.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não Lineares: Teoria e Aplicação**. 4. ed. rev. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2015.

AKERBERG, J.; GIDLUND, M.; BJORKMAN, M. Future research challenges in wireless sensor and actuator networks targeting industrial automation. *Industrial Informatics (INDIN)*, 2011 9th IEEE International Conference on, 2011. 26-29 July 2011. p.410-415.

AL-KARAKI, J. N.; KAMAL, A. E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. **IEEE Wireless Communications**, v. 11, n. 6, p. 6-28, 2004. ISSN 1536-1284.

AMIRA. DTS200 Laboratory Setup Three-Tank-System. Duisburg, 2002. Disponível em: < [http://www.utm.mx/~jvasquez/tanques\\_lab.pdf](http://www.utm.mx/~jvasquez/tanques_lab.pdf) >.

ANASTASI, G.; CONTI, M.; DI FRANCESCO, M. Extending the Lifetime of Wireless Sensor Networks Through Adaptive Sleep. **Industrial Informatics, IEEE Transactions on**, v. 5, n. 3, p. 351-365, 2009. ISSN 1551-3203.

ANASTASI, G.; CONTI, M.; DI FRANCESCO, M.; PASSARELLA, A. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. **Ad Hoc Networks**, v. 7, n. 3, p. 537-568, 5// 2009. ISSN 1570-8705. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870508000954> >.

ARAUJO, J.; MAZO, M.; ANTA, A.; TABUADA, P.; JOHANSSON, K. H. System Architectures, Protocols and Algorithms for Aperiodic Wireless Control Systems. **Industrial Informatics, IEEE Transactions on**, v. 10, n. 1, p. 175-184, 2014. ISSN 1551-3203.

ASTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. **Adaptive Control**. 2nd. New York: Dover Publications, 2008.

BAILLIEUL, J.; ANTSAKLIS, P. J. Control and Communication Challenges in Networked Real-Time Systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 1, p. 9-28, 2007. ISSN 0018-9219.

BERG, M. C.; AMIT, N.; POWELL, J. D. Multirate digital control system design. **Automatic Control, IEEE Transactions on**, v. 33, n. 12, p. 1139-1150, 1988. ISSN 0018-9286.

BLEVINS, T.; CHEN, D.; NIXON, M.; WOJSZNIS, W. Model-Based Control Using Wireless Transmitters. In: (Ed.). **Wireless Control Foundations: Continuous and Discrete Control for the Process Industry**. USA: ISA, 2015a. cap. 8, p.145-170.

\_\_\_\_\_. Wireless Model Predictive Control. In: (Ed.). **Wireless Control Foundations: Continuous and Discrete Control for the Process Industry**. USA: ISA, 2015b. cap. 9, p.171-188.

BLEVINS, T.; NIXON, M.; WOJSZNIS, W. PID control using wireless measurements. 2014 American Control Conference, 2014. 4-6 June 2014. p.790-795.

CHALUPA, P.; NOVÁK, J.; BOBÁL, V. Detailed Simulink Model of Real Time Three Tank System. In: (Ed.). **Recent Researches in Circuits, Systems, Communications and Computers**, 2011. ISBN 978-1-61804-056-5.

COLÓN, D. **Controle Adaptativo e Variedades de Riccati**. 2003. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

DARBY, M. L.; NIKOLAOU, M. MPC: Current practice and challenges. **Control Engineering Practice**, v. 20, n. 4, p. 328-342, 4// 2012. ISSN 0967-0661. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066111002528> >.

DE CASTRO, N. C. **Energy-Aware Control and Communication Co-Design in Wireless Networked Control Systems**. 2012. Université de Grenoble

DE CASTRO, N. C.; DE WIT, C. C.; GARIN, F. Energy-aware wireless networked control using radio-mode management. American Control Conference (ACC), 2012, 2012. 27-29 June 2012. p.2836-2841.

DE CASTRO, N. C.; QUEVEDO, D. E.; GARIN, F.; CANUDAS DE WIT, C. Smart energy-aware sensors for event-based control. Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on, 2012. 10-13 Dec. 2012. p.7224-7229.

EMERSON. Emerson Process Management Power Module Life Estimator. 2015. Disponível em: < <http://www3.emersonprocess.com/rosemount/powermodulelifecalculator/default.aspx> >.

FENG-LI, L.; MOYNE, J.; TILBURY, D. Optimal controller design and evaluation for a class of networked control systems with distributed constant delays. American Control Conference, 2002. Proceedings of the 2002, 2002. 8-10 May 2002. p.3009-3014 vol.4.

FISCHIONE, C.; PARK, P.; DI MARCO, P.; JOHANSSON, K. H. Design Principles of Wireless Sensor Networks Protocols for Control Applications. In: MAZUMDER, S. K. (Ed.). **Wireless Networking Based Control**. New York: Springer New York, 2011. cap. 9, p.203-238. ISBN 978-1-4419-7392-4.

GALLOWAY, B.; HANCKE, G. P. Introduction to Industrial Control Networks. **Communications Surveys & Tutorials, IEEE**, v. 15, n. 2, p. 860-880, 2013. ISSN 1553-877X.

GEORGIEV, D.; TILBURY, D. M. Packet-based control: The -optimal solution. **Automatica**, v. 42, n. 1, p. 137-144, 1// 2006. ISSN 0005-1098. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109805003110> >.

GODOY, E. P. **Desenvolvimento de Sistemas de Controle via Rede (NCS) para Aplicações em Redes com Protocolo CAN**. 2011. (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos.

GODOY, E. P.; SCORZONI, F.; COLÓN, D.; PORTO, A. J. V. **Model-Based Compensation for Burst Message Loss in Wireless Networked Control Systems:**

**Experimental Results.** ASME Dynamical Systems and Control Conference. Palo Alto - USA: 1-9 p. 2013.

GODOY, E. P.; SCORZONI, F.; TANGERINO, G. T.; PORTO, A. J. V.; INAMASU, R. Y. Using serial bluetooth converters as a sensor link in networked control systems. Control and Automation (ICCA), 2011 9th IEEE International Conference on, 2011. 19-21 Dec. 2011. p.461-466.

GUPTA, R. A.; MO-YUEN, C. Networked Control System: Overview and Research Trends. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, v. 57, n. 7, p. 2527-2535, 2010. ISSN 0278-0046.

HATTORI, Y.; SATO, T.; ARAKI, N.; KONISHI, Y. A design method for a multi-rate control system in state-space approach. Modelling, Identification and Control (ICMIC), The 2010 International Conference on, 2010. 17-19 July 2010. p.264-268.

HEEMELS, W. P. M. H.; TEEL, A. R.; VAN DE WOUW, N.; NES; X030C; IC; X; D. Networked Control Systems With Communication Constraints: Tradeoffs Between Transmission Intervals, Delays and Performance. **Automatic Control, IEEE Transactions on**, v. 55, n. 8, p. 1781-1796, 2010. ISSN 0018-9286.

HESPANHA, J. P.; NAGHSHTABRIZI, P.; XU, Y. A Survey of Recent Results in Networked Control Systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 1, p. 138-162, 2007. ISSN 0018-9219.

IINO, Y.; HATANAKA, T.; FUJITA, M. Event-predictive control for energy saving of wireless networked control system. American Control Conference, 2009. ACC '09., 2009. 10-12 June 2009. p.2236-2242.

JIANG, Y.; ZOU, Y.; NIU, Y. Explicit MPC for multi-rate control systems. Modelling, Identification and Control (ICMIC), Proceedings of 2011 International Conference on, 2011. 26-29 June 2011. p.578-581.

JJAUTOMATION. J2-L20 ‘Smart Redbox’ IP65 Weatherproof Electric Actuator 2002. Disponível em: < <http://www.jjautomation.com/documents/J2L20.pdf> >.

JOHANSSON, K. H. Motivations, Challenges And Wireless For Control Of Networked And Large Scale Systems. **Proceedings of the 4th Hycon PhD on Control of Networked and Large Scale Systems**, 2011.

LI, J.; ZENG, P.; ZONG, X.; ZHENG, M.; ZHANG, X. Joint Design of Transmission Rate and Control for Wireless Sensor Networked Control Systems. **Journal of Electrical and Computer Engineering**, v. 2014, p. 8, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1155/2014/158404> >.

LOTUFO, F. A.; GARCIA, C. **Sensores Virtuais ou Soft Sensors: Uma Introdução.** 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications. Presidente Prudente, SP, Brasil 2008.

LUIZ, C. C.; SILVA, A. C.; COELHO, A. A. R.; BRUCIAPAGLIA, A. H. **Controle Adaptativo versus Controle Fuzzy: Um Estudo de Caso em um Processo de Nível.** SBA Controle e Automação, 2 1997.

MAHMOUD, M. S. Wireless networked control system design: An overview. *Industrial Electronics (ISIE)*, 2014 IEEE 23rd International Symposium on, 2014. 1-4 June 2014. p.2335-2340.

MANSANO, R. K.; GODOY, E. P.; PORTO, A. J. V. **The Benefits of Soft Sensor and Multi-rate Control for the Implementation of Wireless Networked Control Systems.** Sensors. Basel 2014.

MANSANO, R. K.; RODRIGUES, E. C.; OLIVEIRA, T. A.; GODOY, E. P. **Sensor Virtual para Viabilizar a Aplicação de Sistemas de Controle via Rede sem Fio.** Congresso Brasileiro de Automática. Belo Horizonte: SBA 2014.

NAGHSHTABRIZI, P.; HESPANHA, J. P. Implementation Considerations For Wireless Networked Control Systems. In: MAZUMDER, S. K. (Ed.). **Wireless Networking Based Control**. New York: Springer New York, 2011. cap. 1, p.1-27. ISBN 978-1-4419-7392-4.

NATIONAL. OEM Operating Instructions And Specifications: NI sbRIO-9605/9606 and NI sbRIO-9623/9626/9633/9636. 2016. Disponível em: <  
<http://www.ni.com/pdf/manuals/373378c.pdf>>.

PLOENNIGS, J.; VASYUTYNSKYY, V.; KABITZSCH, K. Comparative Study of Energy-Efficient Sampling Approaches for Wireless Control Networks. **Industrial Informatics, IEEE Transactions on**, v. 6, n. 3, p. 416-424, 2010. ISSN 1551-3203.

QUEVEDO, D. E.; AHLEN, A. A predictive power control scheme for energy efficient state estimation via wireless sensor networks. *Decision and Control, 2008. CDC 2008. 47th IEEE Conference on*, 2008. 9-11 Dec. 2008. p.1103-1108.

RODRIGUES, R. J. **Estimação de Dados e Controle Multi-Rate para Sistemas de Controle via Redes Sem Fio (WNCS)**. 2016. (Trabalho de Graduação). Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, Brasil.

ROSHANY-YAMCHI, S.; CYCHOWSKI, M.; NEGENBORN, R. R.; SCHUTTER, B. D.; DELANEY, K.; CONNELL, J. Kalman Filter-Based Distributed Predictive Control of Large-Scale Multi-Rate Systems: Application to Power Networks. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 21, n. 1, p. 27-39, 2013. ISSN 1063-6536.

SADI, Y.; ERGEN, S. C.; PANGUN, P. Minimum Energy Data Transmission for Wireless Networked Control Systems. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, v. 13, n. 4, p. 2163-2175, 2014. ISSN 1536-1276.

SANTANA, E. S. D. **Algoritmo Preditivo Baseado em Modelo Aplicado ao Controle de Velocidade do Motor de Indução**. 2007. (Doutorado). Departamento de Sistemas de Controle e Energia, Universidade Estadual de Campinas

SAUTER, T. The Three Generations of Field-Level Networks Evolution and Compatibility Issues. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 11, p. 3585-3595, 2010. ISSN 0278-0046. Disponível em: <  
<http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/41/5599338/05535166.pdf?tp=&arnumber=5535166&isnumber=5599338>>.

SAUTER, T.; SOUCEK, S.; KASTNER, W.; DIETRICH, D. The Evolution of Factory and Building Automation. **Industrial Electronics Magazine, IEEE**, v. 5, n. 3, p. 35-48, 2011. ISSN 1932-4529.

ZHAO, Y. B.; LIU, G. P.; REES, D. Design of a Packet-Based Control Framework for Networked Control Systems. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 17, n. 4, p. 859-865, 2009. ISSN 1063-6536.

ZHU, Q.; XIE, G. Analysis and modeling of multi-rate networked control systems with long time delay. 2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2012. 23-25 May 2012. p.2978-2983.

ZOU, Y.; CHEN, T.; LI, S. Network-based predictive control of multirate systems. **IET Control Theory & Applications**, v. 4, n. 7, p. 1145-1156, 2010. ISSN 1751-8644.