



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

FELIPE FAKIR

**Controle Preditivo Multi-Rate para Eficiência Energética
em Sistema de Controle via Rede sem Fio**

Bauru

2017

FELIPE FAKIR

CONTROLE PREDITIVO 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

Bauru – SP

2017

Fakir, Felipe.

Controle Preditivo Multi-Rate para Eficiência Energética em Sistema de Controle via Rede sem Fio / Felipe Fakir, 2017
108 f.

Orientador: Eduardo Paciência Godoy

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

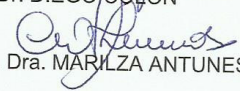
1. Controle Preditivo Baseado em Modelo. 2. Controle Multivariável. 3. TrueTime. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE FELIPE FAKIR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 01 dias do mês de junho do ano de 2017, às 10:00 horas, no(a) Instituto de Ciência e Tecnologia/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 / Instituto de Ciência e Tecnologia/UNESP/Sorocaba, Prof. Dr. DIEGO COLON do(a) Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle / Universidade de São Paulo/Poli, Profa. Dra. MARILZA ANTUNES DE LEMOS do(a) Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia/UNESP/Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de FELIPE FAKIR, intitulada **CONTROLE PREDITIVO MULTI-RATE PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMA 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. DIEGO COLON


Profa. Dra. MARILZA ANTUNES DE LEMOS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa, Emi, que sempre me apoiou em todos os momentos e em todas as decisões, que me fez tornar-se uma pessoa mais responsável e melhor, que me faz ver a beleza das coisas em cada etapa da vida, que está sempre ao meu lado dia após dia, nos bons e maus momentos, sempre me incentivando e mostrando que os sonhos podem ser alcançados, obrigado por me mostrar o lado bom da vida.

Aos meus pais, Isabel e Roberto pelo amor e carinho durante todo o meu trajeto, por me dar educação e ensinar o certo e o errado, por sempre estarem presentes nos piores e melhores momentos, nas vitórias e nos aprendizados. A minha irmã Juliana e a todos os meus familiares e amigos pelos bons anos de convivência.

A minha segunda família, Grécia, Roberto e Fanny, por todo o carinho e apoio, ao longo dos anos.

Ao Prof. Eduardo Godoy, que além de um grande pesquisador e orientador, é uma grande pessoa, quando iniciei o mestrado estava em busca de um orientador quando terminei ganhei um novo amigo, a Prof. Marilza Lemos que me iniciou no universo da pesquisa com a iniciação científica e ao Prof. Diego Cólón pela sabedoria e admiração que tenho pelo seu lado profissional que me fez mergulhar no universo do controle automático.

“Uma longa viagem começa com um único
passo”

Lao-Tsé

RESUMO

A tecnologia de comunicação *wireless* vem se tornando parte fundamental do cotidiano das indústrias de processos, onde o uso de transmissores *wireless* aplicados à monitoração e controle já é uma realidade. A arquitetura de Sistema de Controle via Rede Sem Fio (WNCS) possui vantagens em relação às arquiteturas tradicionais ponto-a-ponto e às arquiteturas de redes cabeadas devido à facilidade de instalação, configuração e manutenção. No entanto, a evolução desta tecnologia introduziu novos desafios para a implementação da malha de controle fechada por um instrumento *wireless* como as não linearidades, perda de pacote de dados e restrições da comunicação de dados nas redes sem fio. Outro fator crítico relacionado à implementação de WNCSs é a fonte de energia limitada destes transmissores, que possuem vida útil dependente da quantidade de acessos e dados transmitidos. Este trabalho apresenta o estudo e o desenvolvimento de um controlador preditivo *multi-rate* como alternativa para melhorar a eficiência energética em aplicações industriais de WNCSs. A estratégia proposta não necessita receber constantemente os valores reais das variáveis do processo transmitidos pelos transmissores *wireless*, pois o controlador preditivo baseado em modelo (MPC) se utiliza do submodelo interno das variáveis de processo para estimar os valores das variáveis quando estas não são transmitidas. Dessa forma, uma diminuição da frequência de transmissão de dados na rede sem fio pode ser obtida e, conseqüentemente uma redução do consumo energético dos dispositivos sem fio. Resultados de simulações em diferentes condições de operação de um WNCS multivariável de controle de tanques acoplados demonstram que o MPC *multi-rate* possui características de robustez e é efetivo para aplicações de WNCS, garantindo requisitos de controle e estabilidade mesmo com a diminuição da frequência de transmissão de dados de realimentação na rede sem fio. Adicionalmente, resultados do consumo energético dos dispositivos do WNCS mostraram que o MPC *multi-rate* proporciona uma economia de energia de até 20% das baterias dos transmissores *wireless*. Uma análise da eficiência energética do WNCS é apresentada através do estudo dos limites operacionais do controlador MPC *multi-rate* considerando a relação de compromisso entre o período de amostragem dos dispositivos sem fio e o desempenho de controle do WNCS.

Palavras-chave: Sistemas de Controle Via Redes Sem Fio, Otimização Energética, *Model Predictive Controller*, Controle *Multi-rate*.

ABSTRACT

Wireless communication technology has become a fundamental part of the everyday life of process industries, where the use of wireless transmitters for monitoring and control is already a reality. The architecture of Wireless Networked Control Systems (WNCSs) has advantages over point-to-point and wired networks architectures due to the ease of installation, configuration and maintenance. However, the evolution of this technology has introduced new challenges to the implementation of the closed loop control with a wireless instrument as nonlinearities, packet losses and data communication constraints in the wireless networks. Another critical factor related to implementation of WNCSs is the energy source of these transmitters, which have limited lifetime dependent on the amount of access and data transmitted. This work presents the study and the development of a multi-rate predictive controller as an alternative to improve energy efficiency in industrial applications of WNCSs. The proposed strategy does not need to frequently receive updated process variables transmitted by wireless transmitters, because the model predictive controller (MPC) uses the internal submodel of the process variables to estimate the variables values when they are not transmitted. Thus, a decrease in the frequency of data transmission on the wireless network can be obtained and consequently a reduction of energy consumption of wireless devices. Simulation results for different operating conditions of a multivariable WNCS of coupled tanks shows that the multi-rate MPC provides robustness and it is effective for WNCS applications, ensuring control and stability requirements even with the reduction of the transmission frequency of the feedback data in the wireless network. In addition, energy consumption results from the WNCS devices showed that MPC multi-rate provides 20% of energy economy as it is effective in saving the energy expenditure of the wireless transmitter's battery. An energy efficiency analysis of the WNCS is presented by studying the operating limits of the multi-rate MPC controller considering the compromise relationship between the sampling period of the wireless devices and the control performance of the WNCS.

Keywords: *Wireless Networked Control Systems, Power Optimization, Model Predictive Controller, Multi-rate Control*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos de um Sistema de Controle Via Rede.	18
Figura 2 – Modos de transmissão baseado em tempo e eventos (Contínuo e Janela).	22
Figura 3 – Esquemático do Controle Baseado em Evento	23
Figura 4 – Esquemático do Controle Auto Disparado.....	24
Figura 5 – PIDPlus – Modificações na estrutura convencional do controlador PID.....	25
Figura 6 – Controle baseado em modelo com multi-rate.	27
Figura 7 – Filtro de Kalman em combinação a um controlador PID em uma rede sem fio.	29
Figura 8 – Preditor de Smith em combinação a um controlador PID em uma rede sem fio. ...	30
Figura 9 – Estrutura básica de um controlador MPC.	32
Figura 10 – Operação de um controlador MPC.....	32
Figura 11 – MPC convencional.....	33
Figura 12 – MPC multi-rate.	34
Figura 13 – Estrutura básica de um controlador MPC wireless.	35
Figura 14 – Diagrama de blocos do modelo MPC no Matlab.	40
Figura 15 – Parâmetros de interface do bloco MPC controller do Matlab.....	41
Figura 16 – Linearização do modelo da planta utilizando o bloco MPC controller do Matlab.	42
Figura 17 – Blocos da biblioteca TrueTime.	44
Figura 18 – Bloco TrueTime Wireless Network.	45
Figura 19 – Bloco TrueTime Kernel.	46
Figura 20 – Bloco TrueTime Battery.	47
Figura 21 – Diagrama geral da arquitetura do controlador MPC multi-rate para WNCS.....	48
Figura 22 – Estrutura da planta de três tanques AMIRA DTS200.....	49
Figura 23 – Esquemático da planta de três tanques AMIRA DTS200.....	50
Figura 24 – Bloco do modelo da planta de três tanques acoplados para ambiente Matlab/Simulink.	53
Figura 25 – Modelo detalhado da planta de três tanques acoplados para ambiente Matlab/Simulink.	55
Figura 26 – Modelo detalhado dos tanques.	56
Figura 27 – Modelo detalhado das válvulas V1 e V2.....	57
Figura 28 – Modelo detalhado das válvulas V3, V4, V5 e V6.....	58
Figura 29 – MPC multi-rate para WNCS.	59

Figura 30 – Operação do MPC multi-rate para WNCS.....	60
Figura 31 – Diagrama de blocos do controle MPC multi-rate para WNCS.....	60
Figura 32 – Modelo da planta, sensores e atuadores.	62
Figura 33 – Controlador MPC multi-rate.	63
Figura 34 – Definição das posições dos nós do sistema de controle.....	65
Figura 35 – Diagrama geral do WNCS.	66
Figura 36 – Dados de h1 coletados no Experimento 1.....	71
Figura 37 – Dados de h2 coletados no Experimento 1.....	71
Figura 38 – Dados de h1 coletados no Experimento 2.....	73
Figura 39 – Dados de h2 coletados no Experimento 2.....	74
Figura 40 – Dados de h1 coletados no Experimento 3.....	75
Figura 41 – Dados de h2 coletados no Experimento 3.....	76
Figura 42 – Dados de h1 coletados no Experimento 4.....	76
Figura 43 – Dados de h2 coletados no Experimento 4.....	77
Figura 44 – Dados de h1 coletados no Experimento 5.....	77
Figura 45 – Dados de h2 coletados no Experimento 5.....	78
Figura 46 – Dados de h1 coletados no Experimento com distúrbio senoidal no qual T_{S2} é 1s.....	79
Figura 47 – Dados de h1 coletados no Experimento com distúrbio senoidal no qual T_{S2} é 4s.....	80
Figura 48 – Dados de h2 coletados no Experimento com distúrbio senoidal no qual T_{S2} é 1s.....	80
Figura 49 – Dados de h2 coletados no Experimento com distúrbio senoidal no qual T_{S2} é 4s.....	81
Figura 50 – Dados de h1 coletados no Experimento com distúrbios alterando as posições das válvulas de acoplamento e dreno do tanque no qual T_{S2} é 1s.....	82
Figura 51 – Dados de h1 coletados no Experimento com distúrbios alterando as posições das válvulas de acoplamento e dreno do tanque 1 no qual T_{S2} é 4s.....	82
Figura 52 – Dados de h2 coletados no Experimento com distúrbios alterando as posições das válvulas de acoplamento e dreno do tanque 1 no qual T_{S2} é 1s.....	83
Figura 53 – Dados de h2 coletados no Experimento com distúrbios alterando as posições das válvulas de acoplamento e dreno do tanque 1 no qual T_{S2} é 4s.....	83
Figura 54 – Tendência 2D dos índices do $error_{RMS}$ e ITAE normalizado para h1 em função de T_{S1}	87
Figura 55 – Tendência 3D dos índices do $error_{RMS}$ para h1 em função de T_{S1} e T_{S2}	88
Figura 56 – Tendência 3D dos índices do ITAE normalizado para h1 em função de T_{S1} e T_{S2}	89
Figura 57 – Tendência 2D com nível dos índices do $error_{RMS}$ para h1 em função de T_{S1} e T_{S2}	90

Figura 58 – Tendência 2D com nível dos índices do ITAE normalizado para h1 em função de T_{S1} e T_{S2}	90
Figura 59 – Consumo de energia utilizando o block TrueTime Battery.	93
Figura 60 – Tendência 3D da eficiência energética em função de T_{S1} e T_{S2}	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis de processo e constantes.....	54
Tabela 2 – Limites dos sinais de referência.....	64
Tabela 3 – Limites da variável manipulada (Sinal de controle).....	64
Tabela 4 – Limites da variável de controle (Saída da planta).	64
Tabela 5 – Posição dos nós de rede wireless.	65
Tabela 6 – Estimativa da autonomia de sensores industriais sem fio para diferentes períodos de amostragem.....	69
Tabela 7 – Parâmetros dos Experimentos para Análise de Viabilidade do Controle MPC Multi-rate para WNCS.	70
Tabela 8 – Síntese de Resultados do WNCS com MPC-multi-rate para o Experimento 1.....	72
Tabela 9 – Síntese de Resultados do WNCS com MPC-multi-rate para o Experimento 2.....	74
Tabela 10 – Síntese de Resultados do WNCS com MPC-multi-rate para os Experimento 3,4 e 5.....	78
Tabela 11 – Síntese de Resultados do WNCS com MPC-multi-rate na presença de distúrbios.	84
Tabela 12 – Síntese dos Resultados dos Experimentos do WNCS com MPC multi-rate.	85
Tabela 13 – Análise dos índices de desempenho com base em T_{S1}	87
Tabela 14 – Consumo teórico dos elementos de controle em um WNCS.....	91
Tabela 15 – Consumo do sensor com base no módulo XBee dividido por função.....	92
Tabela 16 – Consumo do controlador com base no módulo XBee dividido por função.....	92
Tabela 17 – Síntese dos resultados do consumo do WNCS com filtro nos limites dos índices de desempenho.	94
Tabela 18 – Resultado do consumo do WNCS alterando a função sleep pela idle nos sensores.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AI, EA	<i>Analog Input</i> (Entrada Analógica)
AUTO	<i>Automatic</i> (Automático)
CV	<i>Control Variable</i> (Variável de Controle)
DV	<i>Disturbance Variable</i> (Variável de Distúrbio)
EBC	<i>Event-Based Control</i> (Controle Baseado em Evento)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
ITAE	<i>Integral Time-weighted Absolute Error</i> (Integral do Erro Absoluto Ponderado pelo Tempo)
I/O	<i>Input / Output</i> (Entrada / Saída)
MAN	<i>Manual</i> (Manual)
MBC	<i>Model-Based Control</i> (Controle Baseado em Modelo)
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> (Entradas Múltiplas Saídas Múltiplas)
MPC	<i>Model-Based Predictive Control</i> (Controle Preditivo Baseado em Modelo)
MV	<i>Manipulated Variable</i> (Variável Manipulada)
NCS	<i>Networked Control System</i> (Sistema de Controle via Rede)
Ph	<i>Potencial Hidrogeniônico</i>
PID	<i>Proportional, Integral e Derivativo</i>
PV	<i>Process Variable</i> (Variável de Processo)
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Raíz do Valor Quadrático Médio)
SP	<i>Setpoint</i> (Valor alvo)
STC	<i>Self-Triggered Control</i> (Controle Auto Disparado)
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> (Rede de Área Local sem-fio)
WNCS	<i>Wireless Networked Control System</i> (Sistema de Controle via Rede sem Fio)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	<i>Matriz A do modelo de espaço de estados</i>
B	<i>Matriz B do modelo de espaço de estados</i>
C	<i>Matriz C do modelo de espaço de estados</i>
D	<i>Matriz D do modelo de espaço de estados</i>
d(k)	<i>Vetor de entrada em tempo discreto, distúrbio não mensurável</i>
e	<i>Erro</i>
K_P	<i>Ganho proporcional</i>
N	<i>Razão multi-rate</i>
r(k)	<i>Vetor de entrada em tempo discreto, referência</i>
T_{RESET}	<i>Tempo integral</i>
T, T_s	<i>Período de Amostragem</i>
u(k)	<i>Vetor de entrada em tempo discreto, variável manipulada</i>
v(k)	<i>Vetor de entrada em tempo discreto, distúrbio mensurável</i>
x(k)	<i>Vetor de estados em tempo discreto</i>
y(k)	<i>Vetor de saída em tempo discreto, variável de controle</i>
w	<i>Valor real da variável de processo</i>
w'	<i>Valor virtual da variável de processo, valor estimado</i>

NOTAÇÕES

b	<i>Negrito com letra minúscula representa um vetor de números reais</i>
M	<i>Negrito com letra maiúscula representa uma matriz de números reais</i>

SUMÁRIO

1	JUSTIFICATIVA	14
1.1	OBJETIVO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITUAL	17
2.1	SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDE SEM FIO	17
2.2	ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM WNCS	20
2.3	CONTROLE NÃO PERIÓDICO	21
2.4	ESTRATÉGIA DE CONTROLE PIDPLUS.....	24
2.5	CONTROLE BASEADO EM MODELO E CONTROLE MULTI-RATE.....	26
2.6	FILTRO DE KALMAN COMBINADO À ESTRATÉGIA DE CONTROLE PID	28
2.7	PREDITOR DE SMITH COMBINADO À ESTRATÉGIA DE CONTROLE PID....	29
3	CONTROLE MPC MULTI-RATE	31
3.1	TEORIA DE CONTROLE MPC CONVENCIONAL.....	35
3.2	LINEARIZAÇÃO DO MODELO PELO BLOCO MPC.....	39
3.3	MODELO DE PREDIÇÃO	42
4	REAL TIME SIMULATOR.....	44
4.1	TRUETIME SIMULATOR.....	44
5	DESENVOLVIMENTO	48
5.1	PROPOSTA DO TRABALHO	48
5.2	PLANTA DTS200	50
5.3	MODELAGEM MATEMÁTICA	51
5.4	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO EM MATLAB/SIMULINK	53
5.5	MODELO DOS TANQUES.....	56
5.6	MODELO DAS VAZÕES NAS VÁLVULAS.....	57
5.7	DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR MPC MULTIRATE PARA WNCS	58
5.8	ESTRUTURA DO WNCS	60
5.9	CONFIGURAÇÃO DE REDE DO WNCS	64
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
6.1	ANÁLISE DE VIABILIDADE.....	67
6.2	ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS 1 E 2	70
6.3	ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS 3, 4 E 5	75
6.4	ANÁLISE NA PRESENÇA DE DISTÚRBIOS	78
6.5	DISCUSSÃO DOS EXPERIMENTOS DE 1 A 5 E COM DISTÚRBIOS	84
6.6	ANÁLISE DOS LIMITES OPERACIONAIS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	86

6.7	DISCUSSÃO DOS LIMITES OPERACIONAIS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ...	96
7	CONCLUSÕES.....	97
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

1 JUSTIFICATIVA

A tecnologia de comunicação *wireless* vem se tornando parte fundamental do nosso cotidiano facilitando o acesso aos serviços comuns como: acesso à internet, recebimento e transmissão de dados como fotos, vídeos e voz, em locais onde a infraestrutura de rede cabeada é inexistente. Facilidades similares também podem ser encontradas nas indústrias de processo onde o uso de transmissores *wireless* aplicados à monitoração e controle já é uma realidade.

Diversos ganhos são observados na aplicação da tecnologia *wireless* quando comparado aos tradicionais sistemas de controle de processos que utilizam instrumentos cabeados. Como exemplo de suas vantagens, é citado o aumento da mobilidade, flexibilidade e facilidade na instalação, ausência de conectores específicos, redução dos custos do projeto na fase de implantação e juntamente pode-se evitar imprevistos como o rompimento de cabos (SONG *et al.*, 2008; WILLIG, 2008). Como resultado destes benefícios a tecnologia *wireless* é apresentada como uma opção atrativa para as indústrias de processo quando utilizada em conjunto com sistemas de controle distribuídos (WILLIG *et al.*, 2005; MOYNE & TILBURY, 2007).

Com a padronização e normatização do protocolo industrial *WirelessHART* em 2010 pela IEC 62591 (BLEVINS *et al.*, 2015), as indústrias de processo encontram-se em recente modernização com a finalidade de se adequar à nova era destes dispositivos eletrônicos. Dessa maneira, diversas aplicações e estudos têm sido desenvolvidos. Uma das áreas com grande potencial de desenvolvimento é a de controle em rede *wireless*, também conhecida como WNCS (*Wireless Networked Control System*) (FISCHIONE *et al.*, 2011).

Novas técnicas de controle aplicadas a rede *wireless* estão sendo desenvolvidas e exploradas com o intuito de viabilizar a operação e o controle em malha fechada de processos industriais nos quais os instrumentos *wireless* possuem o papel chave na medição da variável de controle (WILLIG, 2008). Um dos grandes desafios da utilização dos instrumentos *wireless* em aplicações de controle em malha fechada tem sua base proveniente no período de atualização da variável de processo em relação ao consumo de bateria do transmissor *wireless* (ÅKERBERG *et al.*, 2011).

Os transmissores *wireless* possuem grande limitação referente à autonomia do nível de bateria, conseqüentemente a eficiência energética dos sensores deve ser levada em consideração. Normalmente, estes transmissores, na maior parte do tempo, devem permanecer no estado *sleep mode*, no qual não é permitido transmitir ou receber dados durante o estado de

hibernação, ou seja, estas propriedades não favorecem o uso desta tecnologia aplicado a malhas de controle fechadas, dado que os requisitos regulatórios podem exigir alta demanda na taxa de transmissão da informação utilizando-se estes transmissores (WILLIG, 2008). A relação entre a taxa de atualização da variável de processo de um transmissor *wireless* é inversamente proporcional à autonomia do nível de bateria. Assim, quanto mais rápido o dado do transmissor for amostrado e transmitido, menor a autonomia da bateria (WEN *et al.*, 2007).

Atualmente, nas indústrias de processo, a aplicação de malhas de controle fechadas utilizando-se transmissores *wireless* é praticamente inexistente quando comparada as estratégias de controle convencionais, no qual transmissores cabeados são utilizados. Isto se deve a alguns desafios encontrados na indústria como os severos ambientes operacionais e a presença de ruídos (HAN *et al.*, 2011). Além destes, quando aplicado o WNCS, podem ser observados os seguintes pontos que contribuem para a falta de confiabilidade no setor industrial (BAILLIEUL & ANTSAKLIS, 2007; ARAÚJO *et al.*, 2014):

- Perda de pacotes na transmissão dos dados;
- Atrasos na transmissão dos dados na rede de controle;
- Baixo nível de autonomia da bateria dos elementos de rede operando com rápidas taxas de amostragem;

A baixa demanda deste tipo de aplicação é também relacionada à natureza conservadora da indústria de processo. Hoje, esses transmissores *wireless* são, em sua grande maioria, aplicados no campo de supervisão das variáveis de processo, porém ao longo dos anos é notado o crescente interesse pelo setor industrial em se utilizar estes instrumentos para controle em malha fechada (BLEVINS *et al.*, 2015).

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 dispositivos 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 (MANSANO, 2016).

Com a finalidade de melhorar a eficiência energética do WNCS e contornar os diversos desafios encontrados no uso de transmissores *wireless* aplicados no campo de controle de processos industriais, propõe-se o desenvolvimento e o estudo de uma estratégia de controle preditivo baseado em modelo (MPC) *multi-rate*. Ademais, é de interesse nesta pesquisa

apresentar, contribuir e reforçar a aplicabilidade dos transmissores *wireless* em malha de controle fechada nas indústrias de processo.

1.1 OBJETIVO

Esta dissertação visa o estudo e o desenvolvimento de um controlador preditivo *multi-rate* para eficiência energética em aplicações de sistema de controle via rede sem fio (WNCS). A 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. O controlador preditivo baseado em modelo (MPC) realiza o controle *multi-rate* utilizando os estados da planta e sinais de controle preditos para viabilizar a redução da transmissão dos dados na rede sem fio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITUAL

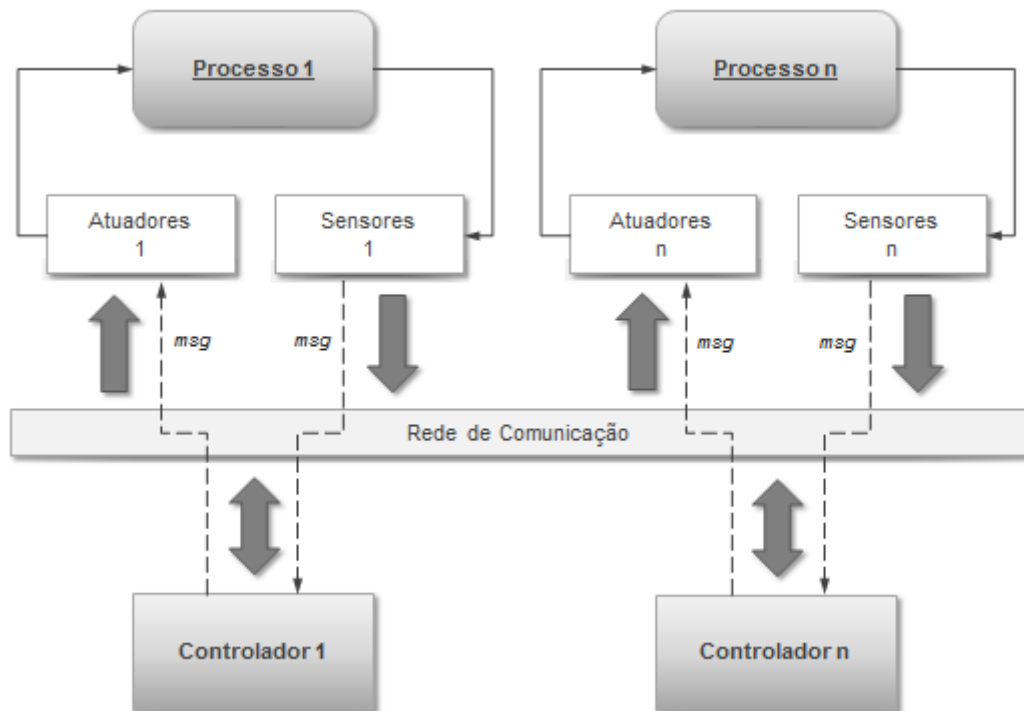
Os novos requisitos e premissas no desenvolvimento de arquiteturas de sistemas de controle são a modularidade, descentralização, baixo custo e rápido acesso a diagnósticos (GUPTA; MO-YUEN, 2010). Considerando esses novos requisitos, as arquiteturas tradicionais de comunicação e controle ponto-a-ponto, ao qual um computador ou um sistema de controle centralizado é interligado aos sensores e atuadores de todo o sistema (SAUTER *et al.*, 2011), dão espaço para a introdução de arquiteturas de controle baseadas em redes industriais que buscam melhorar a eficiência, a flexibilidade e a confiabilidade do sistema, reduzindo o tempo e os custos de instalação e manutenção (SAUTER *et al.*, 2010). Dentre estas e outras vantagens, as tecnologias de redes industriais foram rapidamente absorvidas para satisfazer as necessidades de comunicação entre sistemas e equipamentos aplicados nas áreas de controle e automação (GALLOWAY; HANCKE, 2013) viabilizando remotamente a execução da estratégia de controle em malha fechada, ou seja, sem a necessidade de alocar o controlador próximo à planta (DE CASTRO, 2012).

2.1 SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDE SEM FIO

A arquitetura de sistema de controle no qual os elementos de rede como os sensores, atuadores e controladores transmitem seus dados utilizando uma rede de comunicação é chamada de arquitetura de Sistema de Controle via Redes (NCS – do inglês *Networked Control System*) (GUPTA; MO-YUEN, 2010). A principal característica desta arquitetura se deve a separação física entre o controlador e a planta, tendo entre estes a rede de comunicação como a protagonista e responsável por fechar a malha de controle. A Figura 1 apresenta um diagrama da arquitetura de um Sistema de Controle via Rede.

Uma forma mais evoluída do NCS é apresentada quando as redes sem fio são indicadas como substitutas às redes cabeadas. Sistemas de controle que utilizam esta arquitetura são denominados Sistema de Controle via Redes Sem Fio (WNCS – do inglês *Wireless Networked Control System*). Um sistema de controle via rede sem fio tem sua arquitetura baseada em elementos de rede (nós de rede) que transmitem e recebem os sinais de controle e medição através de um protocolo de comunicação sem fio, como, por exemplo, o protocolo de comunicação industrial *WirelessHART*.

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



Fonte: Adaptado de (GODOY, 2011).

Diversas vantagens são encontradas quando a tecnologia *wireless* é aplicada na arquitetura de sistemas de controle, entre as principais vantagens podemos citar: redução de custo, aumento na confiabilidade e flexibilidade, além de facilitar a instalação e manutenção (SAUTER *et al.*, 2010).

- Redução de custo: Como toda a transmissão de dados entre os sensores, atuadores e controladores são realizados através da rede *wireless*, não há o custo relacionado a cabeamento e projetos de infraestrutura.
- Confiabilidade: Computadores ou controladores e atuadores *wireless* são instalados sem a necessidade de utilização de cabos para interface de sinais de I/O. Cabos, conexões e terminais dos sensores são completamente eliminados, reduzindo as possíveis falhas nestes elementos devidos à má instalação, ausência de manutenção ou intempéries.
- Flexibilidade: Facilita a modificação no *setup* da rede, permite mudar a quantidade e a posição dos nós sem a necessidade de movimentação e realocação de cabos. Além desta, as redes possuem a capacidade de se auto ajustar em caso de falha de algum nó para manter a integridade da comunicação entre os demais elementos de rede.
- Instalação: Devido à ausência de cabos em sua instalação, os nós de rede podem ser instalados em lugares de difícil acesso, como no rotor de uma máquina rotativa.

- Manutenção: Esta tecnologia traz a capacidade de diagnóstico de conexão (como roteadores) para cada elemento de rede (nós), portanto, facilita a detecção e a localização de falhas em seus componentes.

Apesar das vantagens, o uso da tecnologia *wireless* traz também alguns desafios que devem ser levados em consideração quando utilizadas em aplicações de malhas de controle fechadas. Podem ser citados como estes desafios: os atrasos variantes no tempo no meio de comunicação, perda de dados transmitidos, *Jitter* (variabilidade do atraso), efeitos de quantização, ruídos, distúrbios e por fim as saturações. Estas características são inerentes a este tipo de tecnologia devido as diversas transformações do formato dos sinais como, amostragem, transmissão do pacote de comunicação via rede e processamento da informação (NAGHSHTABRIZI; HESPANHA, 2011) influenciando diretamente no desempenho de controle e na estabilidade do WNCS.

Sendo assim, para a eficiente implantação de um WNCS a superação destes fatores é essencial (BAILLIEUL; ANTSAKLIS, 2007), pois atrasos de comunicação podem reduzir a qualidade do controle e até desestabilizar completamente um NCS (MAHMOUD, 2014). Perdas de mensagens causadas por erros de transmissão utilizando os canais de comunicação, atrasos, erros relacionados à sobreposição e ao estouro de mensagens nos *buffers* de transmissão e recepção e, por fim, erros relacionados a falhas de acesso à rede também fazem parte do contexto do WNCS (GODOY, 2011) e devem ser considerados.

O tempo de transmissão e recepção dos sinais via a rede considerando todos estes fatores não é desprezível e, dependendo de sua aplicação, podem sofrer variações, pois são dependentes de condições como acesso à rede, qualidade do sinal e congestionamento. Além destes há também a influência devido às particularidades e características inerentes ao protocolo de comunicação e tipo de rede utilizado no NCS (FENG-LI; MOYNE; TILBURY, 2002).

Para o sucesso da aplicação de um WNCS os nós de rede devem compartilhar o meio disponível para a troca de informações de forma eficiente para que seja possível cumprir com requisitos temporais de transmissão de dados (HESPANHA; NAGHSHTABRIZI; XU, 2007). É necessário garantir que a entrega das mensagens seja realizada com sucesso dentro de um intervalo de tempo permitido, sem que haja grande variação (DE CASTRO, 2012).

2.2 ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM WNCS

Uma importante questão inicial para o desenvolvimento de um WNCS é a restrição ou limitação do período de amostragem de sensores sem fio industriais, que ocorre devido a impraticabilidade de se transmitir os dados do sensor em frequências muito rápidas (ÅKERBERG et al., 2011). Isso acontece porque o consumo de energia do dispositivo sem fio está diretamente relacionado com a transmissão de dados na rede sem fio. Atualmente, a frequência mais rápida (ou menor período de amostragem) disponível num transmissor industrial *wireless* é de 1s (EMERSON, 2015). Como resultado, há um compromisso entre o período de amostragem do sensor e a vida útil da bateria e pode haver aplicações de controle tais como WNCSs, na qual os dispositivos sem fio industriais não poderiam ser usados.

A autonomia da bateria é um quesito fundamental em WNCS, visto que os transmissores sem fio são alimentados por baterias e estas possuem energia limitada, ou seja, o gasto energético é considerado como fator determinante para uma apropriada aplicação de controle em malha fechada. Em se tratando de redução do gasto energético, é conhecido que a transmissão de dados na rede sem fio consome uma importante quantidade de energia num dispositivo sem fio e é o principal consumidor de energia em uma grande classe de aplicações (ANASTASI, CONTI E DI FRANCESCO, 2009). O desafio, portanto, é estender ao máximo a vida útil das baterias que alimentam estes dispositivos sem fio sem degradar o desempenho de controle e estabilidade do WNCS.

Dessa forma, uma abordagem comum para economia de energia em WNCS tem sido a redução das transmissões via rede sem fio (DE CASTRO et al., 2012, ARAÚJO et al., 2014). Estratégias de controle desenvolvidas com o objetivo de melhorar a eficiência energética de um sistema têm como base realizar a mesma atividade consumindo menos energia. O aumento da autonomia energética, ou melhoria da eficiência energética, nada mais é que aperfeiçoar o aproveitamento do consumo de energia associada a uma atividade, contribuindo para a redução do consumo de energia. Em suma, na grande maioria das aplicações não há um limite tecnológico para transmissão de dados via rede sem fio, porém existe a inviabilidade de transmitir os sinais via a rede *wireless* com rápida taxa de transmissão devido à necessidade de manutenções periódicas nos sistemas para substituir a bateria dos transmissores.

As estratégias de controle apresentadas nesta seção expandem o universo das aplicações de instrumentos *wireless* em malhas de controle fechadas. Os resultados encontrados direcionam a possibilidade de ampliar a eficiência energética de um WNCS utilizando-se estratégias de controle que reduzem a necessidade do acesso constante à informação

disponibilizada pelos transmissores *wireless*, contribuindo para o aumento da vida útil da bateria do transmissor, sem que o desempenho de controle seja significativamente prejudicado.

Estas estratégias de controle são apresentadas nas seções a seguir:

- Controle Não Periódico;
- Controle PIDPlus;
- Controle Baseado em Modelo e Controle Multi-rate
- Filtro de Kalman combinado à estratégia de controle PID;
- Preditor de Smith combinado à estratégia de controle PID;
- Controle Preditivo Multi-rate baseado em Modelo (MPC multi-rate).

2.3 CONTROLE NÃO PERIÓDICO

Dois modos de transmissão dos valores das variáveis de processo podem ser utilizados por transmissores industriais sem fio, segundo a norma internacional IEC 62591 Ed. 1.0:

- Contínuo: O dispositivo sai de *sleep mode* a cada intervalo de tempo pré-determinado e mede o valor da variável do processo. Após a medição, o transmissor envia o dado para o controlador, de forma que a transmissão acontece periodicamente (ou a cada intervalo de tempo pré-determinado).

- Janela: O dispositivo sai de *sleep mode* a cada intervalo de tempo pré-determinado, mede o valor da variável do processo e avalia se um determinado limiar configurado foi ultrapassado. Quando o limiar é excedido, o transmissor envia o dado para o controlador, de forma que a transmissão não acontece periodicamente.

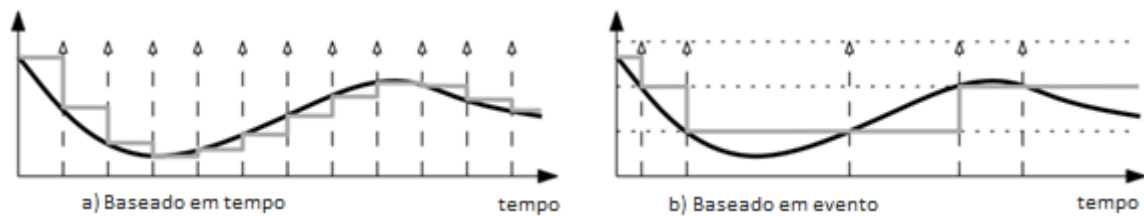
Controle não periódico consiste na implementação de sistemas de controle que não requerem a transmissão periódica das medições da variável do processo e sinais de controle calculados. Assim, as comunicações na rede ocorrem somente quando um evento acontece como o cruzamento de um limiar definido (YOOK et al., 2002), como um requisito de desempenho de estabilidade ou controle perdido (DE CASTRO et al., 2012) ou quando o tempo máximo sem transmissão da variável é excedido (ANDRADE et al., 2016). Basicamente, as principais técnicas de controle não periódico fornecem intervalos de tempo entre atualizações do controlador que não são constantes, cujos valores dependem do estado do sistema (TABUADA et al., 2012).

Araújo et al (2014) apresenta uma comparação do desempenho de um WNCS de dois tanques acoplados usando técnicas de controle não periódico. Neste trabalho são

implementadas e discutidas três técnicas diferentes de controle não periódico: controle baseado em evento, controle auto disparado e método híbrido. Os resultados deste trabalho mostram que todas as técnicas obtêm rastreamento de referência, com desempenho semelhante aos obtidos com um paradigma tradicional de controle periódico. Além disso, através da utilização do controle não periódico foi possível reduzir o consumo de energia do WNCS (ARAÚJO et al., 2014).

A Figura 2 apresenta de forma gráfica a diferença entre as duas estratégias para transmissão dos valores das variáveis através dos transmissores *wireless*, sendo que o modo contínuo e janela são substituídos pelos modos baseado em tempo (periódico) e evento (não periódico), respectivamente.

Figura 2 – Modos de transmissão baseado em tempo e eventos (Contínuo e Janela).



Fonte: (DE CASTRO, 2012).

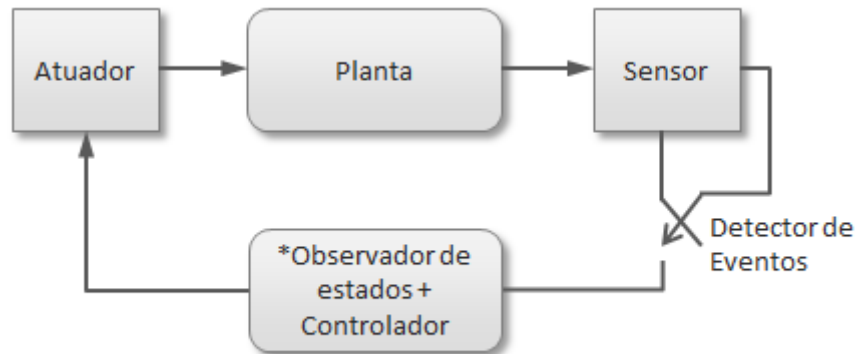
Quando a estratégia de transmissão selecionada é baseada em tempo, a máxima taxa de amostragem do transmissor *wireless* deve ser ao máximo equivalente a $\frac{1}{4}$ da constante de tempo do processo a ser controlado, sendo assim, é possível alcançar melhores desempenhos para a malha de controle fechada (BLEVINS *et al.*, 2015).

Controle Baseado em Evento

Um sistema de controle com amostragem periódica pode utilizar uma estratégia de controle denominada Controle Baseado em Evento (EBC, do inglês *Event Based Control*). A utilização deste método em um WNCS resulta em menor tráfego de informações na rede *wireless* aumentando a autonomia das baterias dos transmissores. Na estratégia EBC, o sensor deve continuamente ler o estado da planta. A lógica que determina os momentos de transmissão (entre o sensor e o controlador) deve estar embutida em um hardware que tem acesso constante às informações do sensor. Quando o estado da planta atinge um limiar, o controlador é atualizado em relação a esse estado. Em seguida, um novo sinal de controle é calculado e aplicado ao atuador. O limiar mencionado acima é dependente da estratégia

adotada. O diagrama esquemático padrão do controle não periódico EBC é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Esquemático do Controle Baseado em Evento



* Em algumas estratégias o estimador de estados não é utilizado.

Fonte: (TABUADA *et al.*, 2012)

O EBC é geralmente composto por um observador de estados combinado a um controlador e um detector de eventos (BLEVINS *et al.*, 2015). Em WNCS a transmissão de mensagem pode ocorrer de forma assíncrona prejudicando o desempenho do sistema de controle, pois esse requer a sincronização entre os elementos de medição, controladores e atuadores (DE CASTRO, 2012). O EBC entra em cena com o objetivo de minimizar os efeitos da falta de sincronia entre os sinais disponíveis no WNCS. De Castro *et al.*, (2012) apresentam conclusões no qual a estratégia de controle baseada em eventos, EBC, aumenta a robustez do sistema contra os distúrbios, visto que o observador de estados da planta é monitorado continuamente.

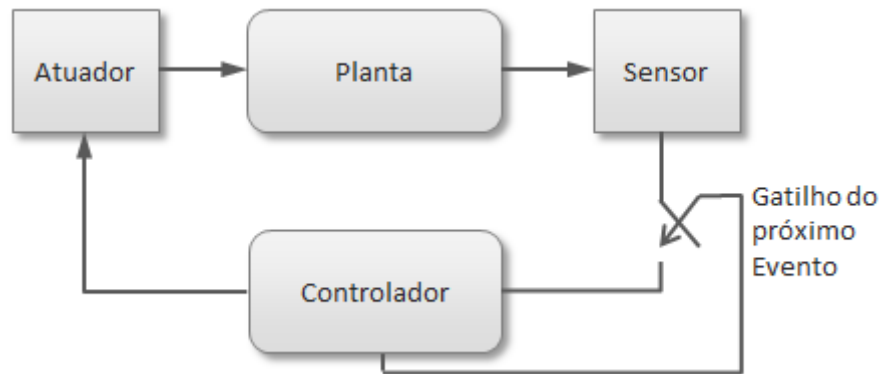
Controle Auto Disparado

Diferentemente do EBC, no qual o nó de sensoriamento está sempre ativo para detectar os eventos limiares para transmitir os valores medidos ao sistema de controle, a estratégia de controle auto disparado (STC, do inglês *Self-Triggered Control*) permite que os nós de sensoriamento sejam completamente desligados no intervalo entre duas amostras, resultando em maior eficiência energética (ARAUJO *et al.*, 2014). Nessa estratégia, a lógica que determina os momentos de transmissão entre o sensor e o controlador está contida em um hardware associado ao controlador. Quando o controlador recebe o estado da planta, além de calcular o sinal de controle, ele calcula o próximo instante de amostragem baseado na sua lógica de controle. Alternativamente, o sensor pode prever o próximo instante ao qual novos

dados devem ser disponibilizados à rede de controle, ou seja, o sensor estima quando será o próximo evento que resultará na transmissão do dado também com base na estratégia lógica de controle adotada (IINO; HATANAKA; FUJITA, 2009).

O diagrama esquemático padrão do controle não periódico auto disparado é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Esquemático do Controle Auto Disparado



Fonte: (TABUADA *et al.*, 2012)

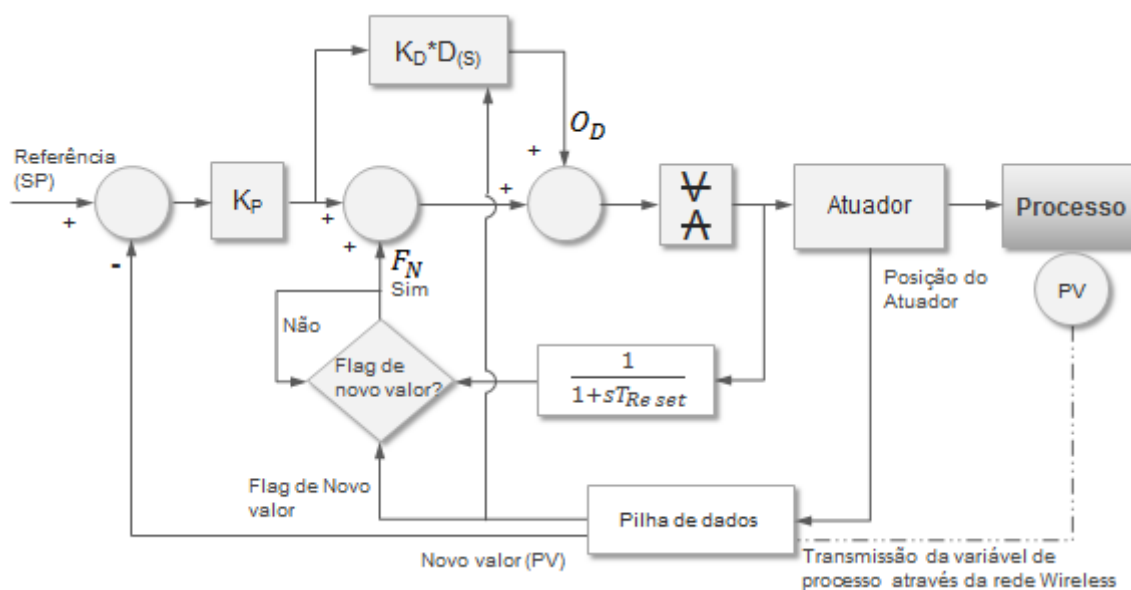
O efeito negativo deste método é o fato do sensor não realizar o monitoramento constante do estado da planta, resultando na degradação do desempenho da malha de controle referente ao critério de robustez contra distúrbios (ARAUJO *et al.*, 2014).

2.4 ESTRATÉGIA DE CONTROLE PIDPLUS

Quando um WNCS é utilizado, diversos fatores podem interferir no desempenho da malha de controle podendo levar o sistema a uma condição de instabilidade. Quando um PID convencional é utilizado para controlar um processo industrial onde as variáveis medidas são transmitidas via rede *wireless*, erros no cálculo dos termos integral e derivativo são inseridos e devem ser compensados (BLEVINS; NIXON; WOJSNIZ, 2014).

O PIDPlus, mostrado na Figura 5, apresentado por Blevins *et al.*, (2015) entra em cena para compensar estes erros. Como as ações de controle são calculadas apenas quando uma nova medição é recebida, existe um atraso considerável quando há alteração no valor da referência ou quando um distúrbio é adicionado ao sistema.

Figura 5 – PIDPlus – Modificações na estrutura convencional do controlador PID.



Fonte: Adaptado de (BLEVINS *et al.*, 2015).

O diagrama de blocos apresenta as modificações dos termos integral e derivativo. Esses termos foram modificados com a finalidade de compensar os erros gerados devido a não periodicidade dos sinais transmitidos via rede *wireless*. O termo integral opera como uma rede de alimentação positiva com capacidade de acomodar medições não periódicas, por ser constantemente atualizada é possível acomodar também o requisito de mudança de referência que pode ocorrer entre as medições dos valores enviados pelos transmissores. O cálculo do valor de saída no termo integral segue as seguintes regras:

- O valor da saída do termo integral é atualizado somente quando um novo dado é transmitido para o controlador (*Flag* de novo valor ativo) e é utilizado como uma realimentação positiva.
- O valor da saída do termo integral se mantém quando não há a transmissão de novos dados (*Flag* de novo valor não está ativo).

O cálculo do valor da saída do termo integral utiliza as seguintes variáveis e é representado pela Equação (1):

- ΔT : Período de tempo decorrente entre a última transmissão do dado e o dado atual.
- F_{N-1} : Último valor calculado da saída do termo integral.
- O_{N-1} : Último valor do sinal de controle calculado.
- F_N : Cálculo do valor de saída do termo integral.

$$F_N = F_{N-1} + (O_{N-1} - F_{N-1}) * (1 - e^{\frac{-\Delta T}{T_{Reset}}}) \quad (1)$$

Para processos que dependem do termo derivativo esse também pode ser integrado ao PIDPlus. O cálculo do valor de saída do termo derivativo utiliza as seguintes variáveis e é apresentado pela Equação (2):

- e_n : Valor atual do erro.
- e_{n-1} : Valor do erro no exato momento do último dado transmitido para o controlador.
- O_D : Cálculo do valor de saída do termo derivativo.

$$O_D = K_P K_D * \left(\frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta T} \right) \quad (2)$$

Como o ΔT é utilizado, o controlador não realiza a compensação do erro calculando novos valores de saída para os termos integral e derivativo no intervalo de tempo entre as amostragens dos dados, as saídas desses termos são mantidos nos últimos valores. Portanto esta adaptação do PID convencional consegue tratar a falta e os atrasos de dados do processo enviados pelos transmissores *wireless*, possibilitando incrementar o intervalo de tempo entre as amostragens e contribuindo para a eficiência energética do sistema.

2.5 CONTROLE BASEADO EM MODELO E CONTROLE MULTI-RATE

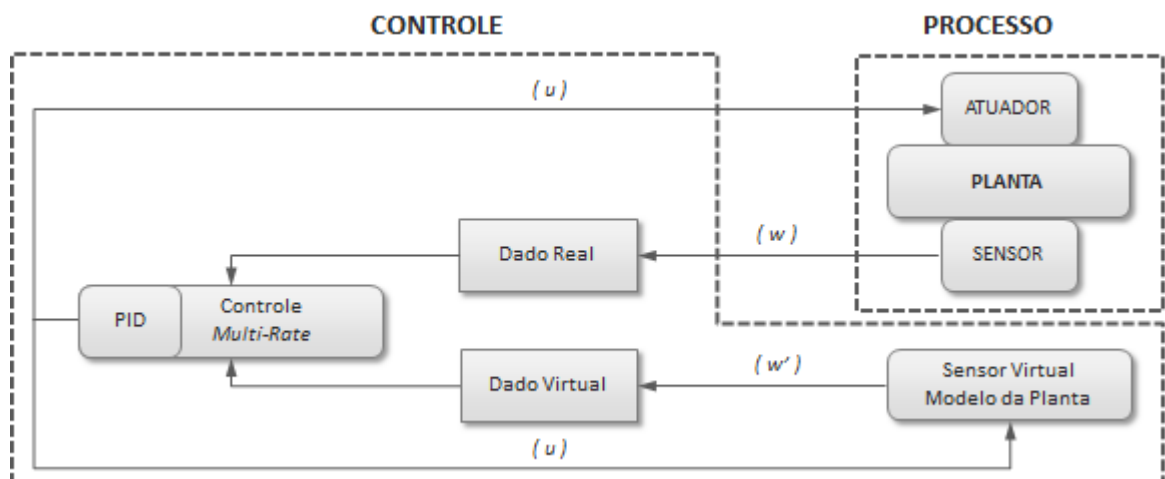
Estratégias de controle baseado em modelo aplicados a WNCS são ótimas alternativas para a redução do consumo energético do sistema de controle como um todo. O MBC (MBC, do inglês *Model Based Control*) combina a estratégia de controle e a base de conhecimento do modelo da planta a ser controlada. O principal foco desta abordagem é utilizar o modelo aproximado da planta para estimar a medição das variáveis de processo e utilizá-las no cálculo da saída do controlador nos períodos de execução em que os dados não estão sendo amostrados e transmitidos ao controlador. No ciclo de execução em que os dados são transmitidos ao controlador, estes são utilizados também para calcular o sinal de controle e dependendo da estratégia de controle empregada, podem ser levados em conta no cálculo de ajuste do modelo interno 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. Pesquisas em NCS normalmente consideram uma única taxa de operação para todo o sistema, sendo assim, os sensores, controladores e atuadores devem operar com o mesmo período de amostragem (ZHU; XIE, 2012), ou seja, operam em modo *single-rate*. Na prática, segundo Zou, Chen e Li (2010), é improvável que todos os elementos na rede de controle operem com o mesmo período de amostragem, o que resulta dos efeitos de atraso de transmissão dos dados e distribuição dos nós da rede. A estratégia de controle *multi-rate* é utilizada quando o período de atualização dos sinais de controle é N vezes mais rápido que o da amostragem dos sensores T_s . Por exemplo, um controlador pode ser executado a cada T_A segundos e os sensores amostrados a cada T_s segundos, resultando em $T_s = T_A * N$ (Sendo $N = 1, 2, 3$ e etc.).

O MBC aplicado em combinação à coleta de dados e atuação do sistema de controle em modo *multi-rate* resulta na estratégia MBC *multi-rate*. Neste tipo de operação, o controlador deve utilizar dados virtuais fornecidos pela estimativa do estado da planta no período de execução do controlador nos quais os dados dos sensores não estão disponíveis para realização do cálculo do sinal de controle. A Figura 6 apresenta o diagrama do controle *multi-rate* baseado em modelo desenvolvido em Mansano, Godoy e Porto (2014).

Figura 6 – Controle baseado em modelo com multi-rate.



Fonte: Adaptado de (MANSANO; GODOY; PORTO, 2014).

De acordo com a Figura 6, dois blocos são propostos, de processo e controle, sendo o primeiro representado pelo conjunto sensor, planta e atuador e o segundo o controlador PID com multi-rate baseado em modelo. Os dados reais (w) são utilizados sempre que o sensor

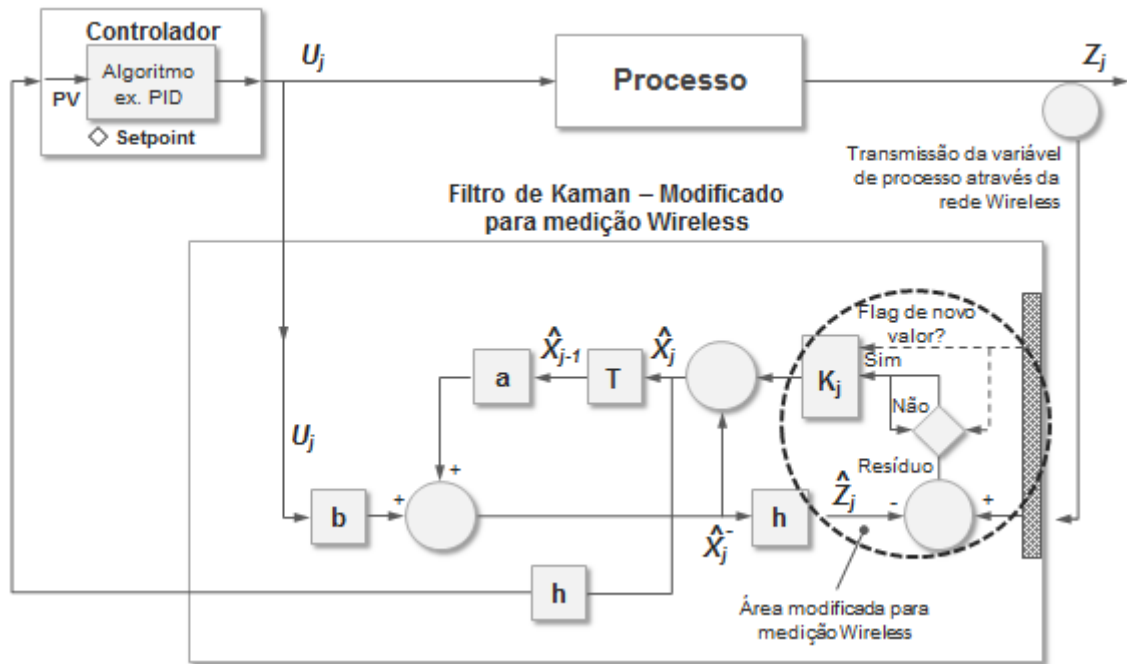
sem fio transmite o valor da variável de processo, enquanto os dados virtuais (w') são utilizados na ausência de informações reais. O controlador PID multi-rate utiliza dados reais, provenientes do sensor quando estes podem ser acessados, e dados virtuais, gerados pelo modelo da planta do WNCS quando o sensor não transmite o valor da variável de processo. Além do controle baseado em modelo, a técnica de controle multi-rate foi incorporada, ao passo que a geração de dados virtuais (e, portanto, a atuação sobre o sistema) ocorre a uma taxa N vezes maior que a taxa de transmissão real dos dados pelo sensor. Com isto é possível prever o estado atual do sistema disponibilizando dados para um controlador que utiliza estas informações virtuais para calcular sinais de controle (u) adequados quando uma informação real não pode ser obtida. Desta forma, 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). Como o modelo usado para gerar os dados adicionais não é atualizado, o controlador pode ter seu desempenho degradado quando o WNCS opera com distúrbios, sendo esta uma desvantagem nesta aplicação (saída do modelo diverge da saída real do WNCS).

2.6 FILTRO DE KALMAN COMBINADO À ESTRATÉGIA DE CONTROLE PID

Um dos métodos para obter-se o modelo estimado da planta numa aplicação de controle MBC é usando o filtro de Kalman. O filtro de Kalman nesta aplicação é utilizado como um observador de estados que pode estimar a saída da planta com base em seu modelo dinâmico, variáveis de processo e sinais de controle. A Figura 7 apresenta o Filtro de Kalman modificado para aplicações em WNCS associado a um controlador PID convencional.

Para aplicações em WNCS, o filtro de Kalman é adaptado com o objetivo de suprir ao controlador PID os valores virtuais das variáveis de processo. Devido à lenta taxa de transmissão das variáveis de processo caracterizadas pelo grande valor do período de amostragem encontrado nos transmissores *wireless*, este algoritmo possibilita que o controle esteja ativo quando não há medições reais dos valores de processo disponíveis para executar algoritmo de controle.

Figura 7 – Filtro de Kalman em combinação a um controlador PID em uma rede sem fio.



Fonte: Adaptado de (BLEVINS *et al.*, 2014).

O algoritmo utiliza o resíduo, definido pela diferença entre as saídas estimadas e reais, juntamente com o ganho de Kalman para compensar os efeitos dos ruídos de medição ou de processo e também das imprecisões encontrados nos blocos a , b e h . Para que o filtro de Kalman seja considerado um estimador linear ótimo, o ganho Kalman deve ser calculado de forma recursiva.

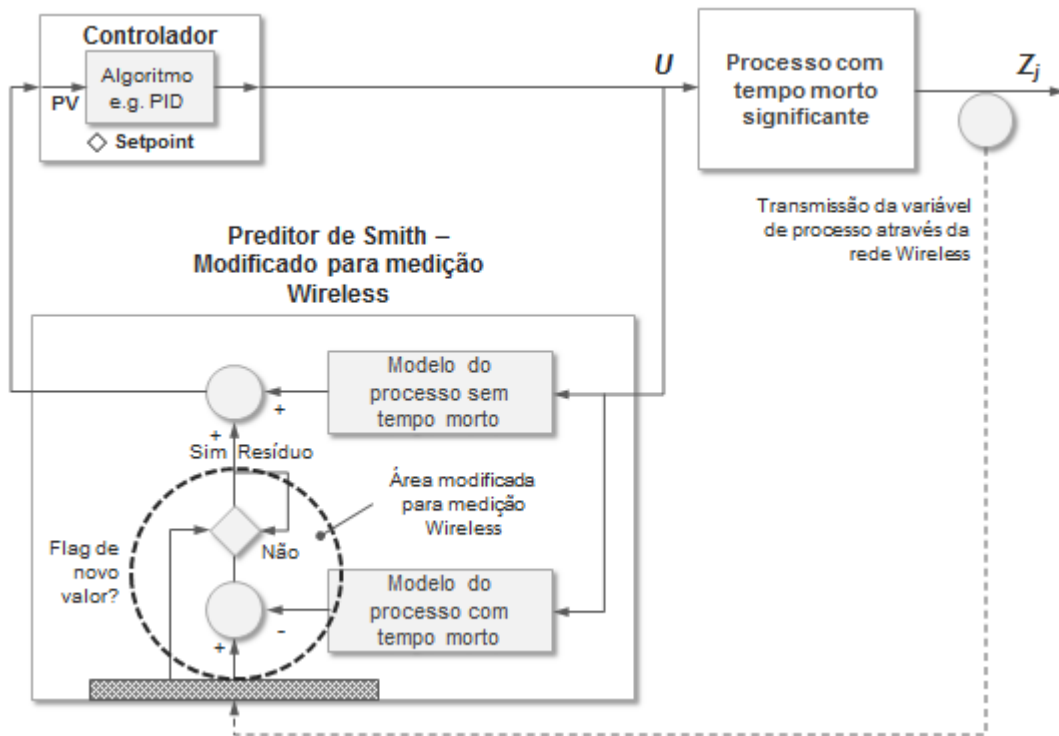
Como mostrado na Figura 7, a modificação proposta em Blevins *et al.*, (2015) consiste em manter o último valor do ganho de Kalman e do valor do resíduo até que uma nova medição seja transmitida e recebida pelo controlador.

2.7 PREDITOR DE SMITH COMBINADO À ESTRATÉGIA DE CONTROLE PID

Da mesma forma que o filtro de Kalman é utilizado combinado à estratégia de controle PID aplicado a WNCS, o Preditor de Smith pode ser adaptado para se beneficiar do mesmo conceito. A Figura 8 apresenta o Preditor de Smith modificado para aplicações em WNCS associado a um controlador PID convencional.

O Preditor de Smith é uma estratégia de controle comumente utilizada quando o processo a ser controlado apresenta tempo morto significativo, um exemplo de processo com esta característica é encontrado quando uma das variáveis de controle em questão é o Ph .

Figura 8 – Preditor de Smith em combinação a um controlador PID em uma rede sem fio.



Fonte: Adaptado de (BLEVINS *et al.*, 2014).

A forma utilizada para compensar o tempo morto do processo é realizada através das estimativas da saída da planta sem considerar o tempo morto, somente 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 pelo controlador.

Mudanças na estrutura original do Preditor de Smith consistem em manter o último valor medido da saída da planta, para que o valor de resíduo seja 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 8.

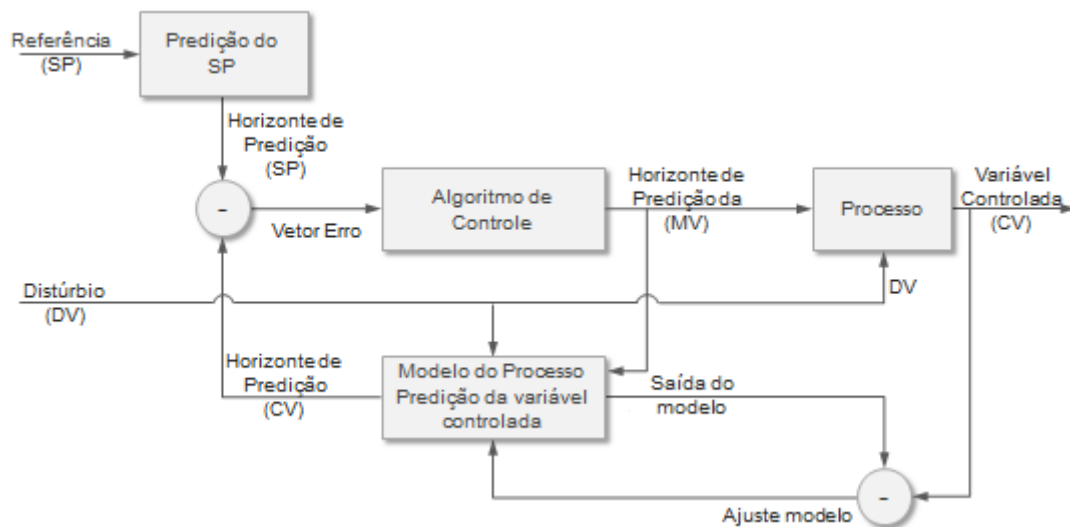
3 CONTROLE MPC MULTI-RATE

O controle PID é o mais utilizado na indústria de processo, porém, quando a dinâmica do sistema a ser controlado é complexa e possui algumas características como não linearidades, dinâmicas acopladas entre outras, diferentes estratégias de controle devem ser consideradas para se obter melhores desempenhos de controle. O Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC, do inglês *Model Predictive Control*) pode substituir as estratégias de controle convencionais e solucionar os problemas de controle resultando em melhor desempenho. Além disso, o controle MPC pode abranger sistemas com mais de uma variável, respeitando-se as restrições e limites do processo, além também de poder operar como um otimizador, minimizando as funções custo associadas ao problema de controle.

O controle MPC utiliza um algoritmo no qual o modelo do processo é utilizado para prever o estado futuro do sistema e com isso prever a resposta futura do sistema e as ações de controle necessárias para minimizar a função custo desejada (DARBY; NIKOLAOU, 2012). Estas características proporcionam ao controle MPC o caráter antecipatório, isso deve-se principalmente ao fato do mesmo utilizar as estimativas futuras para calcular o sinal de controle atual (SANTANA, 2007). Logicamente o controle MPC também pode ser chamado de controle ótimo, pois há a possibilidade de levar em consideração uma função custo desejada para se obter uma otimização, respeitando os limites e restrição da malha de controle.

A Figura 9 apresenta um controlador MPC, através de um diagrama de controle, exemplificando sua forma de operação. Neste diagrama há somente um sinal de referência, uma variável manipulada, uma variável de controle e um sinal de distúrbio. No entanto, o controlador MPC também possui a capacidade de operar controlando sistemas multivariáveis. De acordo com a Figura 9, o vetor erro é o resultado da diferença entre os valores de trajetórias futuras (Horizonte de Predição SP), saída do bloco predição do SP, e os valores das variáveis de processo preditas, (Horizonte de Predição CV), saída do bloco predição da variável controlada, ao qual têm como entradas o distúrbio, o vetor referente ao sinal de controle (MV) e o ajuste para corrigir o modelo da planta. O bloco de algoritmo de controle aplica um valor adequado de ganho para cada elemento do vetor erro resultando no vetor referente ao sinal de controle aplicado ao processo.

Figura 9 – Estrutura básica de um controlador MPC.

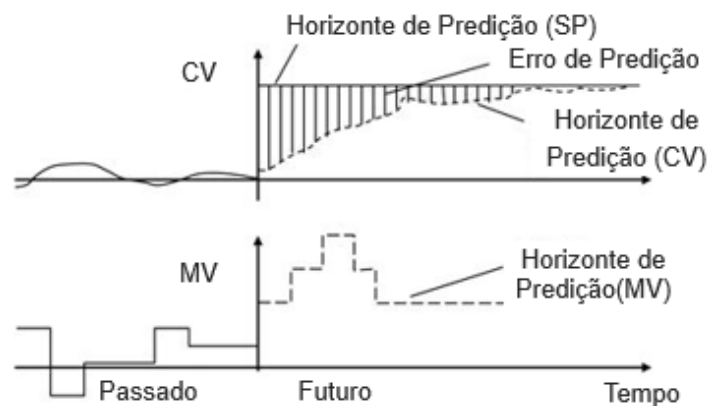


Fonte: Adaptado de (BLEVINS *et al.*, 2015).

A cada amostragem da variável de controle, o algoritmo atualiza os vetores do horizonte de predição podendo também utilizar os valores de processo medidos para atualizar o modelo interno da planta com o objetivo de captar as alterações na dinâmica do processo e melhorar as futuras atuações. O modelo interno utilizado no controle MPC deve ter alto grau de fidelidade quando comparado ao modelo real da planta a ser controlada, a qualidade de controle é diretamente relacionada ao grau de precisão do modelo utilizado.

A Figura 10 apresenta de forma gráfica através de suas curvas o comportamento do controlador MPC ao longo do tempo. As curvas apresentam os valores da variável de controle atuais, passados e também os valores futuros, que são preditos. Além destas é possível também visualizar os sinais de controle atuais, passados e os valores futuros, que também são preditos pelo algoritmo de controle MPC.

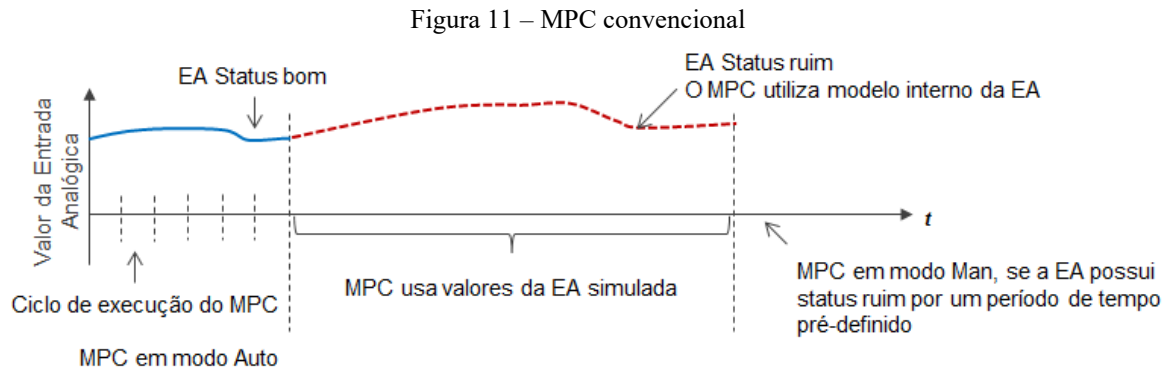
Figura 10 – Operação de um controlador MPC.



Fonte: Adaptado de (BLEVINS *et al.*, 2015)

A operação do MPC convencional depende da estimativa do modelo do processo, que também pode ser convenientemente utilizado na operação do controle MPC com rede sem fio (BLEVINS *et al.*, 2015). O modelo do processo é utilizado para estimar os parâmetros de controle no período entre a taxa de amostragem das medições providas pelos transmissores *wireless*. Adicionalmente, estes valores estimados podem ser utilizados na operação do controlador MPC multi-rate, como nos casos citados de controladores MBC multi-rate.

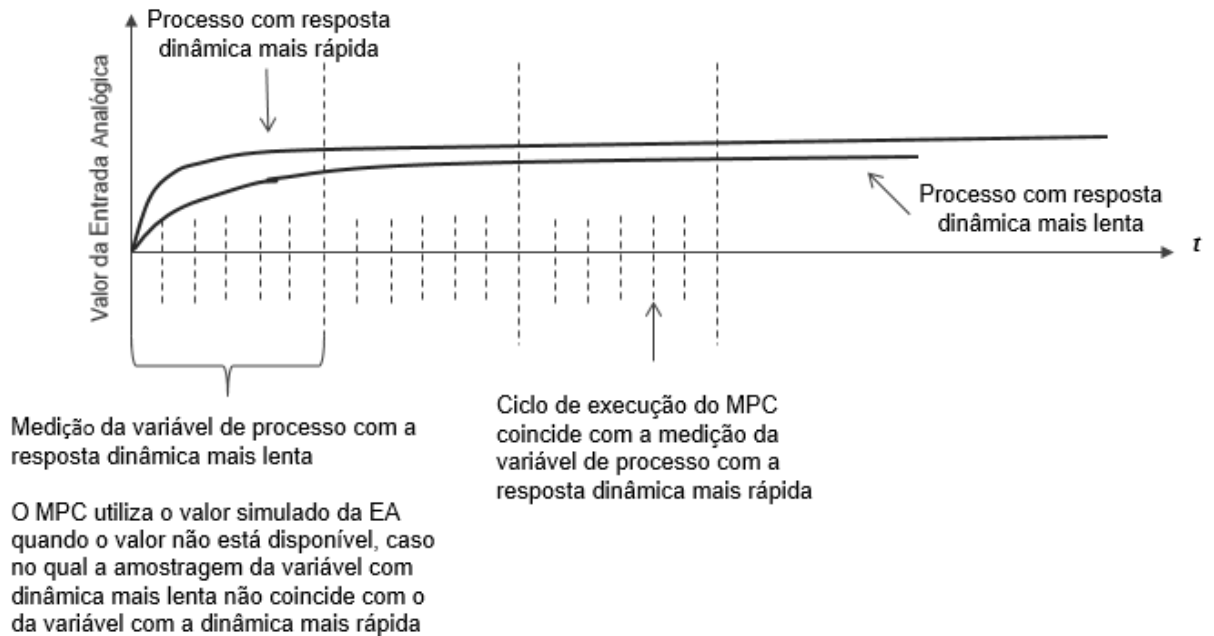
A Figura 11 apresenta o MPC convencional em operação. Neste cenário, quando o controlador MPC recebe o sinal da variável de controle com *status* ruim, este utiliza o modelo interno da variável de processo para continuar atuando na malha de controle. O controle MPC *wireless* utiliza-se do mesmo conceito, porém ao invés de utilizar o sinal de *status* ruim como no exemplo anterior, este utiliza o modelo interno da variável de processo no intervalo de tempo ao qual o controlador MPC é executado e não há nova medição do valor da variável de controle. Portanto, esta estratégia é utilizada quando o algoritmo de controle é executado sem acessar o sinal real da variável de controle.



Fonte: Adaptado de (BLEVINS *et al.*, 2015)

A Figura 12 apresenta o MPC *multi-rate* em operação. O MPC *multi-rate* utiliza-se do modelo de processo que pode ser composto por diversos submodelos com dinâmicas de processos e/ou períodos de amostragem diferentes.

Figura 12 – MPC multi-rate.



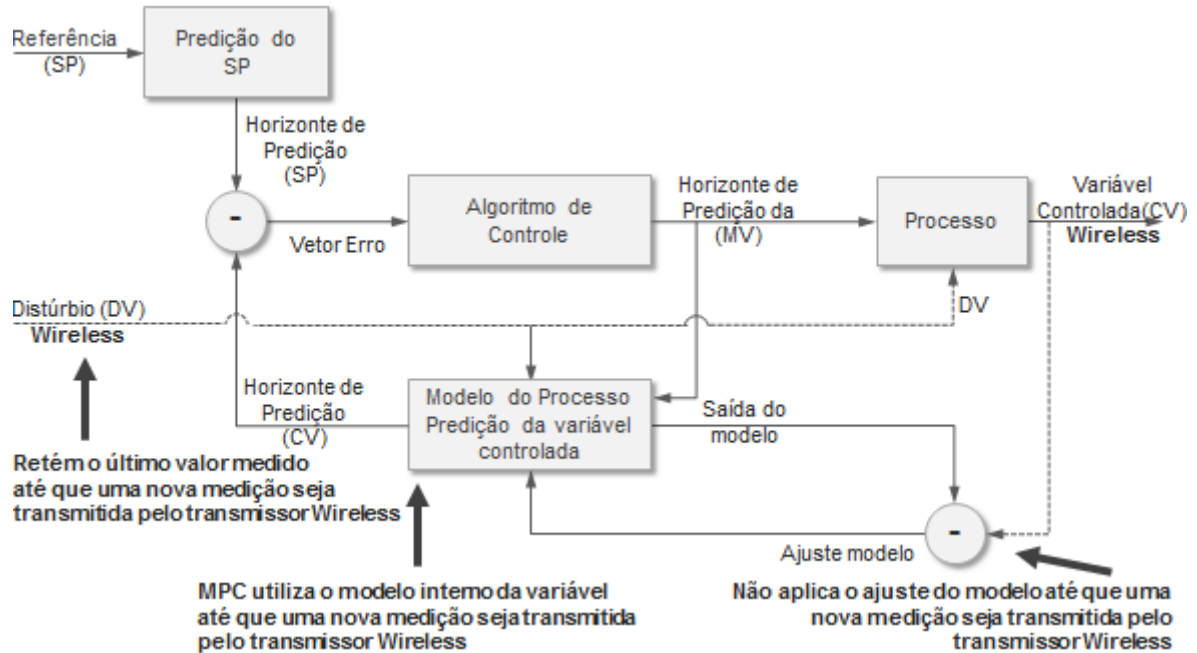
Fonte: Adaptado de (BLEVINS *et al.*, 2015)

Durante a operação do MPC *multi-rate*, o submodelo com a dinâmica de processo mais rápida tem sua medição real utilizada a cada ciclo de execução do MPC *multi-rate*. Os submodelos com dinâmicas de processos mais lentas devem ter seus valores reais utilizados no MPC *multi-rate* somente no momento em que a sua medição coincide com o ciclo de execução do MPC *multi-rate*.

Quando o MPC *multi-rate* encontra-se em execução e não há medição das variáveis de processo mais lentas, o mesmo utiliza-se do submodelo interno da variável para estimar o seu valor. Quando o ciclo de leitura da variável com a dinâmica mais rápida coincide com o da variável de dinâmica mais lenta, os valores reais de medição podem ser utilizados para atualizar os modelos internos do MPC *multi-rate*, caso ao qual a otimização do modelo com a malha em operação esteja habilitada (BLEVINS *et al.*, 2015).

Em WNCSSs, a estratégia de controle MPC *multi-rate* pode ser utilizada na otimização energética do sistema através da predição dos estados futuros e da utilização destes como entradas do algoritmo de controle não havendo a necessidade de o controlador acessar os dados reais atuais através da rede sem fio (LI & SHI, 2013). A estrutura básica de um controlador MPC para WNCSS é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Estrutura básica de um controlador MPC wireless.



Fonte: Adaptado de (BLEVINS *et al.*, 2015)

Mudanças na estrutura original do controlador MPC consistem em não corrigir o modelo interno do processo utilizado pelo controlador se os dados reais não estiverem disponíveis, utilizar o dado real para controle e somente atualizar o modelo interno, caso a chave de otimização esteja habilitada e quando os dados reais estiverem disponíveis, e por fim, utilizar o modelo interno para calcular medições virtuais do processo a ser utilizado pelo algoritmo de controle e calcular o valor da saída estimada, conforme pode ser observado na Figura 13.

3.1 TEORIA DE CONTROLE MPC CONVENCIONAL

Segundo Carlos (2011), é apresentado que um controlador MPC convencional possui uma função objetivo usual representada pela Equação (3), no qual \mathbf{Q} é a matriz peso para as variáveis controladas e \mathbf{R} é a matriz de supressão de movimentos para as variáveis manipuladas, sendo ambas positivas.

$$J_k = \sum_{j=0}^p e^T(k+j)\mathbf{Q}e(k+j) + \sum_{j=0}^{m-1} \Delta u^T(k+j)\mathbf{R}\Delta u(k+j) \quad (3)$$

No qual:

$$\mathbf{e}(k+j) = \mathbf{y}(k+j) - \mathbf{y}^{sp} \quad (4)$$

$$\Delta \mathbf{u}(k+j) = \mathbf{u}(k+j) - \mathbf{u}(k+j-1) \quad (5)$$

A variável \mathbf{y}^{sp} representa o setpoint das variáveis controladas, $\mathbf{y}(k+j)$ é a predição das saídas controladas no instante de amostragem $k+j$, p é o horizonte de predição e m é o horizonte de controle. A Equação (3) pode ser explícita na forma de variáveis de decisão do problema de controle $\mathbf{u}(k), \mathbf{u}(k+1), \dots, \mathbf{u}(k+m-1)$, que são as entradas do sistema, para isso é necessário levar em consideração o modelo dinâmico do processo.

Tendo o modelo dinâmico do processo composto por ny saídas controladas e nu entradas manipuladas, pode-se considerar o seguinte modelo correspondente a uma função de transferência discreta:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(k+n) + \mathbf{A}_1 \mathbf{y}(k+n-1) + \dots + \mathbf{A}_{n-1} \mathbf{y}(k+1) + \mathbf{A}_n \mathbf{y}(k) = \\ = \mathbf{B}_0 \mathbf{u}(k+n) + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}(k+n-1) + \dots + \mathbf{B}_{n-1} \mathbf{u}(k+1) + \mathbf{B}_n \mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (6)$$

Sendo que:

$$\mathbf{A}_i \in \mathfrak{R}^{ny \times ny} \text{ e } \mathbf{B}_i \in \mathfrak{R}^{ny \times nu} \quad i = 1, \dots, n$$

É demonstrado que o modelo definido pela Equação (6) é equivalente ao seguinte modelo em variáveis de estado (OGATA, 2001):

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B} \mathbf{u}(k-1) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (7)$$

No qual a matriz \mathbf{A} é a matriz dos coeficientes da resposta dinâmica do processo.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I}_{ny} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \mathbf{I}_{ny} \\ -\mathbf{A}_n & -\mathbf{A}_{n-1} & \dots & -\mathbf{A}_2 & -\mathbf{A}_1 \end{bmatrix}$$

E as matrizes \mathbf{B} e \mathbf{C} são definidas como:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_{n-1} \\ \mathbf{H}_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_0 = \mathbf{B}_0$$

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{B}_1 - \mathbf{A}_1 \mathbf{H}_0$$

$$\mathbf{H}_2 = \mathbf{B}_2 - \mathbf{A}_1 \mathbf{H}_1 - \mathbf{A}_2 \mathbf{H}_0$$

...

$$\mathbf{H}_n = \mathbf{B}_n - \mathbf{A}_1 \mathbf{H}_{n-1} - \dots - \mathbf{A}_{n-1} \mathbf{H}_1 - \mathbf{A}_n \mathbf{H}_0$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{I}_{ny} \quad 0 \quad \dots \quad 0]$$

No modelo representado pela Equação (7), o vetor de entradas \mathbf{u} e o vetor de saídas \mathbf{y} são considerados como variáveis de desvio em relação a um estado estacionário conhecido. Para considerar o caso real, no qual o estado estacionário não é conhecido porque uma vez que existem distúrbios não medidos o modelo pode ser descrito na forma incremental como definido a seguir em (MACIEJOWSKI, 2002):

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}(k) &= \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}}(k-1) + \tilde{\mathbf{B}}\Delta\mathbf{u}(k-1) \\ \mathbf{y}(k) &= \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{x}}(k) \end{aligned} \tag{8}$$

Sendo que as matrizes $\tilde{\mathbf{A}}$, $\tilde{\mathbf{B}}$ e $\tilde{\mathbf{C}}$ são definidas como:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ 0 & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{C}} = [\mathbf{C} \quad 0]$$

Usando o modelo definido pela Equação (8), o objetivo de controle representado em (3) pode ser elaborado na forma apresentada na Equação (9).

$$J_k = \{[\bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k) - \bar{\mathbf{y}}^{sp}] + \bar{\mathbf{B}}\Delta\mathbf{u}\}^T \mathbf{Q}_p \{[\bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k) - \bar{\mathbf{y}}^{sp}] + \bar{\mathbf{B}}\Delta\mathbf{u}\} + \Delta\mathbf{u}^T \mathbf{R}_m \Delta\mathbf{u} \quad (9)$$

Sendo que $\bar{\mathbf{A}}$, $\bar{\mathbf{B}}$, $\bar{\mathbf{y}}^{sp}$, $\Delta\mathbf{u}$, \mathbf{Q}_p e \mathbf{R}_m são apresentados a seguir:

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}} \\ \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}} \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}^{np} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{B}} & 0 & \dots & 0 \\ \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{B}} & \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{B}} & \dots & 0 \\ \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}^{p-1}\tilde{\mathbf{B}} & \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}^{p-2}\tilde{\mathbf{B}} & \dots & \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}^{p-m}\tilde{\mathbf{B}} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{y}}^{sp} = \begin{bmatrix} y^{sp} \\ y^{sp} \\ \vdots \\ y^{sp} \end{bmatrix}, \mathbf{y}^{sp} \in \mathfrak{R}^{ny.p}$$

$$\Delta\mathbf{u} = [\Delta\mathbf{u}(k)^T \dots \Delta\mathbf{u}(k+m-1)^T]^T$$

$$\mathbf{Q}_p = \text{diag}(\underbrace{Q \dots Q}_p)$$

$$\mathbf{R}_m = \text{diag}(\underbrace{R \dots R}_m)$$

Podemos também demonstrar que (9) é equivalente a seguinte equação quadrática:

$$J_k = \Delta\mathbf{u}^T \mathbf{H} \Delta\mathbf{u} + \mathbf{C}t \Delta\mathbf{u} + c \quad (10)$$

No qual \mathbf{H} , $\mathbf{C}t$ e c são definidos a seguir:

$$\mathbf{H} = \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{Q}_p \bar{\mathbf{B}} + \mathbf{R}_m$$

$$\mathbf{C}t = 2(\bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k) - \bar{\mathbf{y}}^{sp})^T \mathbf{Q}_p \bar{\mathbf{B}}$$

$$c = [\bar{A}x(k) - \bar{y}^{sp}]^T Q_p [\bar{A}x(k) - \bar{y}^{sp}]$$

Portanto o MPC convencional é baseado na solução da seguinte equação de otimização.

$$\begin{aligned} \min J_k \\ \Delta u \end{aligned} \tag{11}$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} u_{min} \leq u(k+j) \leq u_{max} & \quad j = 0, 1, \dots, m-1 \\ -\Delta u_{max} \leq \Delta u(k+j) \leq \Delta u_{max} & \quad j = 0, 1, \dots, m-1 \end{aligned} \tag{12}$$

Sendo:

Δu_{max} = máxima variação das variáveis manipuladas

u_{min} = valor mínimo das variáveis manipuladas

u_{max} = valor máximo das variáveis manipuladas

O primeiro termo da Equação (3) é a soma ponderada dos erros preditos das variáveis controladas e o segundo refere-se a penalização dos movimentos das variáveis manipuladas.

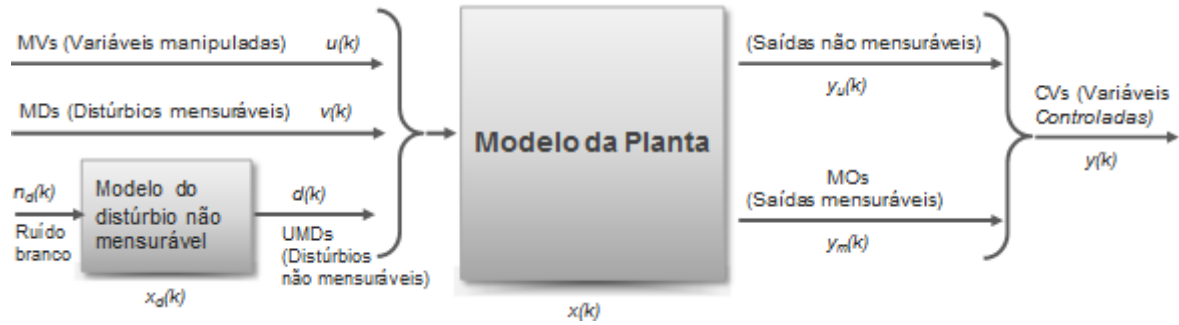
Nas equações (12) estão representadas as restrições nas variáveis manipuladas e nos incrementos das variáveis manipuladas, respectivamente.

Na formulação convencional, admite-se que as necessidades operacionais do processo são traduzidas em um conjunto de setpoints para as variáveis controladas. No entanto, isso nem sempre acontece na prática, pois nem sempre as condições operacionais ótimas podem ser definidas por setpoints apenas nas saídas (controladas).

3.2 LINEARIZAÇÃO DO MODELO PELO BLOCO MPC

A Figura 14 apresenta o diagrama de blocos do modelo linear da planta utilizada para predição e otimização pelo bloco MPC do Matlab/Simulink. O diagrama é constituído pelo modelo da planta a ser controlada, no qual suas entradas são as variáveis manipuladas, distúrbios mensuráveis e distúrbios não mensuráveis, suas saídas são as variáveis controladas compostas por saídas mensuráveis e não mensuráveis.

Figura 14 – Diagrama de blocos do modelo MPC no Matlab.



Fonte: Adaptado de (Matlab/Simulink Model Predictive Control toolbox)

O modelo matemático da planta pode ser representado por um sistema linear e invariante no tempo descrito pelas Equações (13) e (14):

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_u\mathbf{u}(k) + \mathbf{B}_v\mathbf{v}(k) + \mathbf{B}_d\mathbf{d}(k) \quad (13)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}_u\mathbf{u}(k) + \mathbf{D}_v\mathbf{v}(k) + \mathbf{D}_d\mathbf{d}(k) \quad (14)$$

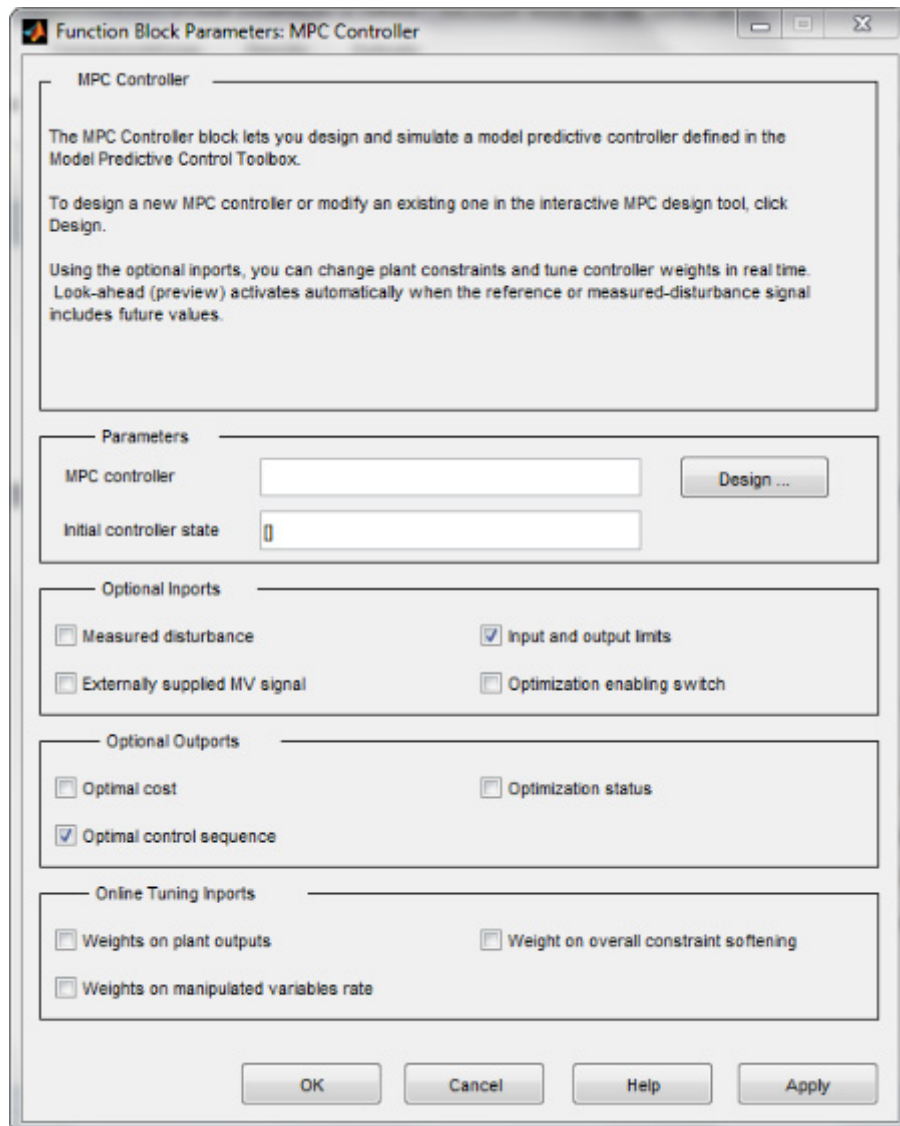
Desconsiderando nesse modelo o distúrbio não mensurável $\mathbf{d}(k)$ e o distúrbio mensurável $\mathbf{v}(k)$, pode-se simplificar o modelo do processo como o apresentado pelas Equações (15) e (16), que representam as equações no formato de variáveis de estados.

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (15)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \quad (16)$$

As matrizes \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{D} , que compõem as equações das variáveis de estado, podem ser obtidas através da linearização do modelo matemático da planta a ser controlada pelo MPC (subseção 5.3) usando-se o bloco de função do controlador MPC com a função *design*. Além da linearização do modelo da planta a ser controlada, esta função também projeta o controlador MPC. Para isso, o campo do *MPC controller* deve estar vazio e as entradas e saídas deste bloco devem estar conectadas a planta. A Figura 15 apresenta a interface de parâmetros do bloco funcional *MPC controller*.

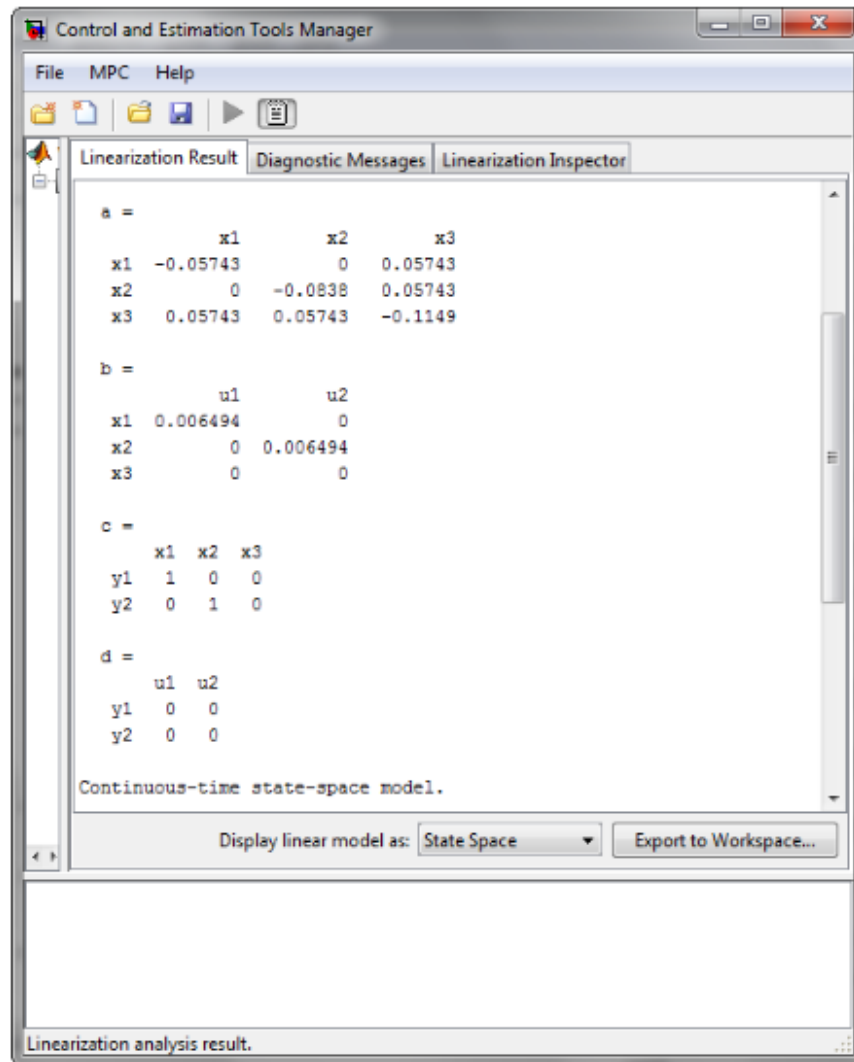
Figura 15 – Parâmetros de interface do bloco MPC *controller* do Matlab.



Fonte: (Matlab/Simulink Model Predictive Control toolbox)

Quando a função *design* é utilizada, um controlador MPC padrão é gerado e o modelo da planta conectado ao controlador MPC é linearizado baseado em um ponto de operação definido pelo projetista. A Figura 16 apresenta as matrizes **A**, **B**, **C** e **D** do modelo linearizado num ponto de operação escolhido.

Figura 16 – Linearização do modelo da planta utilizando o bloco MPC *controller* do Matlab.



Fonte: (Matlab/Simulink Model Predictive Control toolbox)

3.3 MODELO DE PREDIÇÃO

Para o modelo de previsão do controlador MPC, tem-se o modelo dinâmico do sistema representado pelas Equações (17) e (18).

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_u\mathbf{u}(k) + \mathbf{B}_v\mathbf{v}(k) + \mathbf{B}_d\mathbf{d}(k) \quad (17)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}_v\mathbf{v}(k) + \mathbf{D}_d\mathbf{d}(k) \quad (18)$$

Em seguida, considere o problema de prever as trajetórias futuras do modelo executado em $k = 0$. Assume-se neste caso que o modelo de distúrbio de entrada é um ganho unitário e

define-se que $\mathbf{d}(i) = \mathbf{0}$ para todos os instantes de predição i , e obtemos a Equação (19) proveniente das Equações (17) e (18).

$$\mathbf{y}(i|0) = \mathbf{C} \left[\mathbf{A}^i \mathbf{x}(0) + \sum_{h=0}^{i-1} \mathbf{A}^{i-1-h} \left(\mathbf{B}_u \mathbf{u}(-1) + \sum_{j=0}^h \Delta \mathbf{u}(j) \right) + \mathbf{B}_v \mathbf{v}(h) \right] + \mathbf{D}_v \mathbf{v}(i) \quad (19)$$

A resolução da Equação (19) resulta na solução representada pela Equação (20).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}(1) \\ \dots \\ \mathbf{y}(p) \end{bmatrix} = \mathbf{S}_x \mathbf{x}(0) + \mathbf{S}_{u1} \mathbf{u}(-1) + \mathbf{S}_u \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u}(0) \\ \dots \\ \Delta \mathbf{u}(p-1) \end{bmatrix} + \mathbf{H}_v \begin{bmatrix} \mathbf{v}(0) \\ \dots \\ \mathbf{v}(p) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Onde \mathbf{S}_x , \mathbf{S}_{u1} , \mathbf{S}_u e \mathbf{H}_v são as matrizes de predição representadas pelas Equações (21), (22), (23) e (24):

$$\mathbf{S}_x = \begin{bmatrix} \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \dots \\ \mathbf{CA}^p \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{pn_y \times n_x} \quad (21)$$

$$\mathbf{S}_{u1} = \begin{bmatrix} \mathbf{CB}_u \\ \mathbf{CB}_u + \mathbf{CAB}_u \\ \dots \\ \sum_{h=0}^{p-1} \mathbf{CA}^h \mathbf{B}_u \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{pn_y \times n_u} \quad (22)$$

$$\mathbf{S}_u = \begin{bmatrix} \mathbf{CB}_u & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{CB}_u + \mathbf{CAB}_u & \mathbf{CB}_u & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{h=0}^{p-1} \mathbf{CA}^h \mathbf{B}_u & \sum_{h=0}^{p-2} \mathbf{CA}^h \mathbf{B}_u & \dots & \mathbf{CB}_u \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{pn_y \times pn_u} \quad (23)$$

$$\mathbf{H}_v = \begin{bmatrix} \mathbf{CB}_v & \mathbf{D}_v & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{CAB}_v & \mathbf{CB}_v & \mathbf{D}_v & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{CA}^{p-1} \mathbf{B}_v & \mathbf{CA}^{p-2} \mathbf{B}_v & \mathbf{CA}^{p-3} \mathbf{B}_v & \dots & \mathbf{D}_v \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{pn_y \times (p+1)n_v} \quad (24)$$

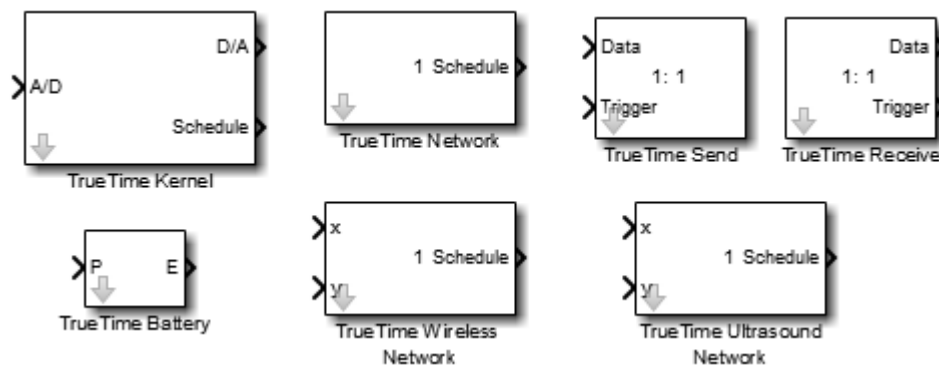
4 REAL TIME SIMULATOR

4.1 TRUETIME SIMULATOR

TrueTime é um *toolbox* para ambiente Matlab/Simulink, desenvolvido pelo Departamento de Controle Automático da Universidade de Lund na Suécia, utilizado para facilitar as simulações de tarefas como controladores, redes de transmissão e sistemas dinâmicos contínuos como WNCS com requisitos em *real-time*. Esta dissertação se limita à introdução dos blocos utilizados nas simulações, porém outros blocos estão disponíveis neste *toolbox* e são detalhados em Cervin, Henriksson, Ohlim (2016).

Essa ferramenta é composta por uma biblioteca contendo blocos de funções, como o bloco de kernel (*TrueTime Kernel*), dois blocos de rede (com fio – *TrueTime Network* e sem fio – *TrueTime Wireless Network*), dois blocos de transmissão de mensagens (envia mensagem – *TrueTime Send* e recebe mensagem *TrueTime Receive*), bloco de bateria (*TrueTime Battery*) e bloco de ultrassom (*TrueTime Ultrasound*), mostrados na Figura 17.

Figura 17 – Blocos da biblioteca TrueTime.



Fonte: (Matlab/Simulink TrueTime toolbox)

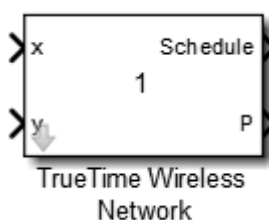
A utilização desses blocos permite simular e analisar a inclusão de uma rede de comunicação e do tráfego de mensagens (blocos de rede e blocos de transmissão de mensagens) num sistema de controle e a operação de um processador em tempo real (bloco kernel) executando tarefas de controle e interface de dados (I/Os). Juntamente com os blocos da biblioteca, a ferramenta possui um conjunto de funções adicionais (fornecidas em arquivos C++ ou Matlab Mex) desenvolvidas para configurar e definir a execução das atividades realizadas pelo bloco kernel. Entre essas funções pode-se citar a conversão AD/DA, envio e recebimento de mensagens, criação e gerenciamento de tarefas, interrupções, temporizadores

e monitoração de eventos. Os blocos de funções da biblioteca da ferramenta TrueTime se conectam diretamente aos blocos já existentes nas bibliotecas disponíveis no Simulink, facilitando sua utilização.

Bloco TrueTime Wireless Network

O bloco *TrueTime Wireless Network* é utilizado para simular uma rede sem fio com suporte a dois tipos de protocolos de rede: IEEE 802.11b/g (WLAN) e IEEE 802.15.4 (ZigBee). Alguns atributos são selecionáveis como: Escolha do protocolo, identificação de rede, quantidade de nós de rede, velocidade da rede (bits/s) entre outros. A Figura 18 apresenta o bloco *TrueTime Wireless Network*.

Figura 18 – Bloco TrueTime Wireless Network.



Fonte: (Matlab/Simulink TrueTime toolbox)

As distâncias entre cada um dos nós em uma rede *wireless* é importante para se determinar a perda de transmissão de dado na rede sem fio. Para o *setup* do simulador devem ser definidos as coordenadas (x,y) que representam a localização dos nós de rede do sistema de controle sem fio com referência em um plano cartesiano, no qual:

- x = Define a posição x no eixo x dos nós da rede sem fio (m).
- y = Define a posição y no eixo y dos nós da rede sem fio (m).

Também podem ser monitorados os seguintes parâmetros:

- Schedule = Ciclo de execução de tarefas da rede sem fio.
- P = Consumo de energia da rede sem fio.

Parâmetros de setup da rede wireless:

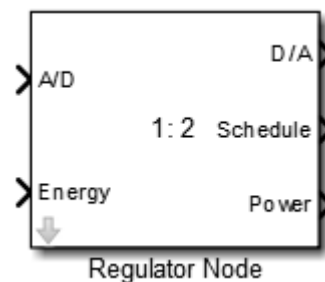
- Network Type = Seleciona o tipo de protocolo de comunicação;
- Network Number = Número, identificador da rede;
- Number of Nodes = Número de nós de rede;

- Data rate (bit/s) = Taxa de transmissão em bit/s;
- Minimum frame size (bits) = Tamanho mínimo do fram em bits;
- Transmit Power (dbm) = Potência de transmissão em dbm;
- Receiver signal threshold (dbm) = Limiar de recebimento de sinal em dbm;
- Pathloss function = Função matemática de perda de dados na transmissão dos sinais;
- Pathloss exponent = Expoente da função de perda de dados na transmissão dos sinais;

Bloco TrueTime Kernel

O bloco *TrueTime Kernel* pode operar como um processador baseado em eventos, podendo ser eventos internos ou externos, os quais determinam a execução destas atividades. Eventos internos são relacionados ao tempo, como por exemplo, o tempo definido terminou, a tarefa foi executada ou a mensagem foi transmitida. Eventos externos são relacionados com interrupções ou fatores externos ao bloco como, por exemplo, uma mensagem foi detectada na rede ou a velocidade do motor ultrapassou o valor de referência. Neste modo de operação, o mesmo opera como um nó regulador, além desta função o mesmo também possui a flexibilidade de realizar tarefas de conversão de dados, como um conversor A/D e/ou D/A, podendo atuar como a interface entre sensores e atuadores. A Figura 19 apresenta o bloco *TrueTime Kernel*.

Figura 19 – Bloco TrueTime Kernel.



Fonte: (Matlab/Simulink TrueTime toolbox)

As conexões de entrada deste bloco são:

- A/D = Conversor analógico digital.
- Energy = Interligado ao parâmetro *E* do bloco TrueTime Battery.

As conexões de saída deste bloco são:

- D/A = Conversor digital analógico.
- Schedule = Período de execução das tarefas executadas.
- Power = Interligado ao parâmetro P do bloco TrueTime Battery.

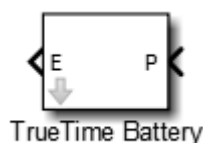
Bloco TrueTime Battery

O bloco *TrueTime Battery*, foi desenvolvido com o intuito de permitir a simulação de sistema de controle via redes em ambientes como robôs móveis, no qual a alimentação dos dispositivos é fornecida por baterias, este bloco disponibiliza a medição real do nível de bateria referente a um bloco TrueTime Kernel.

A configuração do bloco de bateria é realizada através da definição de um parâmetro inicial (*watt seconds*). Para a utilização deste bloco é necessário primeiramente selecionar o bloco de *kernel* e realizar a conexão entre as portas E do bloco de bateria e o bloco *kernel*. Após isso, todas as saídas P dos blocos utilizados no modelo do *TrueTime* (que representarão os dispositivos que consumirão energia) são conectadas a entradas P do bloco de bateria.

A utilização deste bloco é um pré-requisito para a operação da rede sem fio e correto funcionamento do bloco TrueTime Wireless Network. A Figura 20 apresenta o bloco *TrueTime Battery*.

Figura 20 – Bloco TrueTime Battery.



Fonte: (Matlab/Simulink TrueTime toolbox)

A conexão de entrada deste bloco é:

- P = Medição de consumo do bloco TrueTime Kernel.

A conexão de saída deste bloco é:

- E = Medição do nível de bateria para alimentar o bloco TrueTime Kernel.

5 DESENVOLVIMENTO

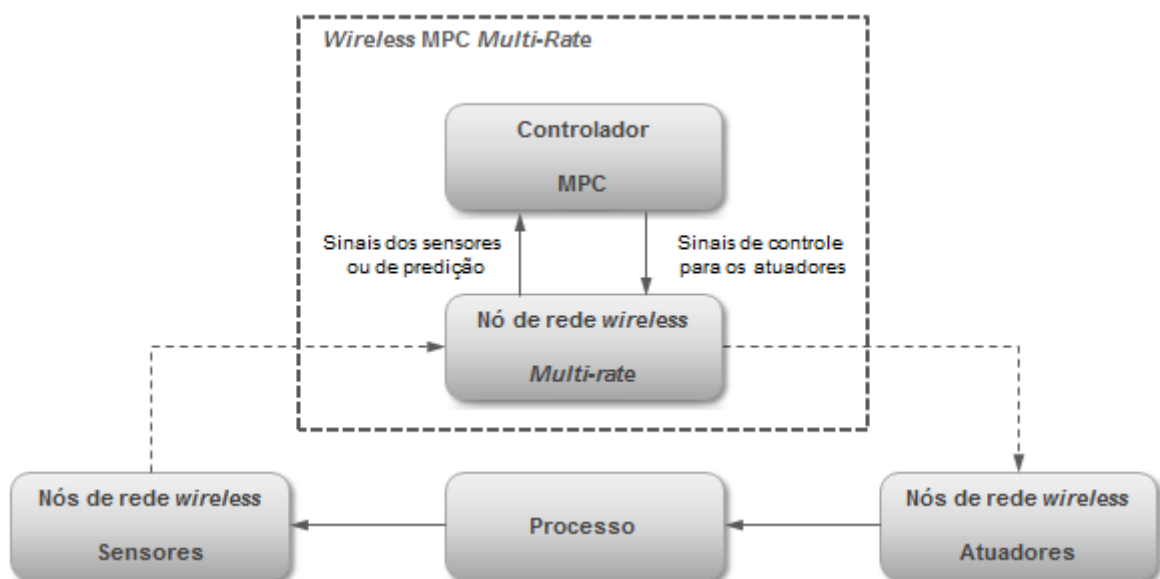
5.1 PROPOSTA DO TRABALHO

Propõe-se nesta dissertação de mestrado o estudo e desenvolvimento de uma estratégia de controle MPC *multi-rate* aplicada a um sistema de controle via rede sem fio (WNCS) no domínio de controle de processos industriais. Para estes WNCSs sob análise, o período de amostragem dos sensores excede o limite de segundos e o controlador MPC *multi-rate*, diferentemente da maioria das aplicações de controle onde o objetivo principal é controlar o sistema com o melhor desempenho possível, possui a finalidade técnica de:

- Superar a restrição de amostragem imposta por sensores industriais sem fio;
- Aumentar a vida útil da bateria dos sensores;

Dessa forma, o foco principal do controlador MPC *multi-rate* proposto é no desafio do quesito energético, no qual o objetivo é incrementar a eficiência energética do sistema diminuindo a quantidade de transmissões de dados dos sensores através da rede sem fio, tendo em vista o desempenho do sistema de controle dentro de uma faixa aceitável. A Figura 21 retrata o diagrama de blocos geral da arquitetura do controlador MPC *multi-rate* para WNCS e seus componentes.

Figura 21 – Diagrama geral da arquitetura do controlador MPC *multi-rate* para WNCS.



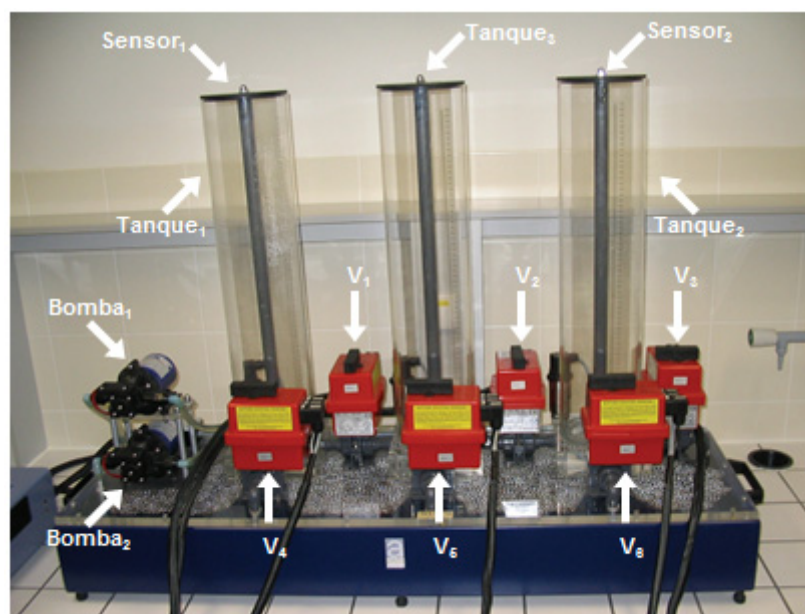
Fonte: Autoria própria.

O princípio de funcionamento é baseado na transmissão dos sinais dos sensores (dispositivos *wireless*) através de uma rede sem fio, combinados a sinais virtuais preditos pelo controlador MPC. Ambos os sinais (informação de realimentação dos sensores e informação virtual dos estados da planta fornecido pelo modelo interno do controlador) são utilizados pelo controlador MPC multi-rate para o cálculo dos sinais de controle e por fim estes são transmitidos aos atuadores. Como o controlador MPC usa o recurso de *multi-rate* para fazer uso de dados virtuais (adicionais à capacidade/frequência de transmissão definida para o sensor), torna-se possível aumentar o período de amostragem dos sensores sem fio, reduzindo a frequência de transmissão de dados na rede sem fio e conseqüentemente aumentando a eficiência energética do WNCS sem prejudicar significativamente o desempenho de controle.

A plataforma de trabalho constituiu-se do simulador computacional Matlab/Simulink R2012b da MathWorks e blocos de controle contidos em diversos toolbox foram utilizados. Os principais foram o TrueTime-2.0-beta10.1 Toolbox (CERVIN *et al.*, 2003) que possui blocos de simulação em tempo real, e o Model Predictive Control Toolbox que contém o bloco do controlador MPC.

O sistema AMIRA DTS200 apresentado pela Figura 22 é composto por três tanques acoplados, sensores e atuadores e pode ser encontrado nos Laboratórios de Graduação da UNESP Sorocaba. Detalhes sobre o sistema encontra-se em AMIRA (2002). Este sistema foi escolhido como a planta a ser controlada pelo WNCS com o controlador MPC *multi-rate*.

Figura 22 – Estrutura da planta de três tanques AMIRA DTS200.



Fonte: (CHALUPA; NOVÁK; BOBÁL, 2011).

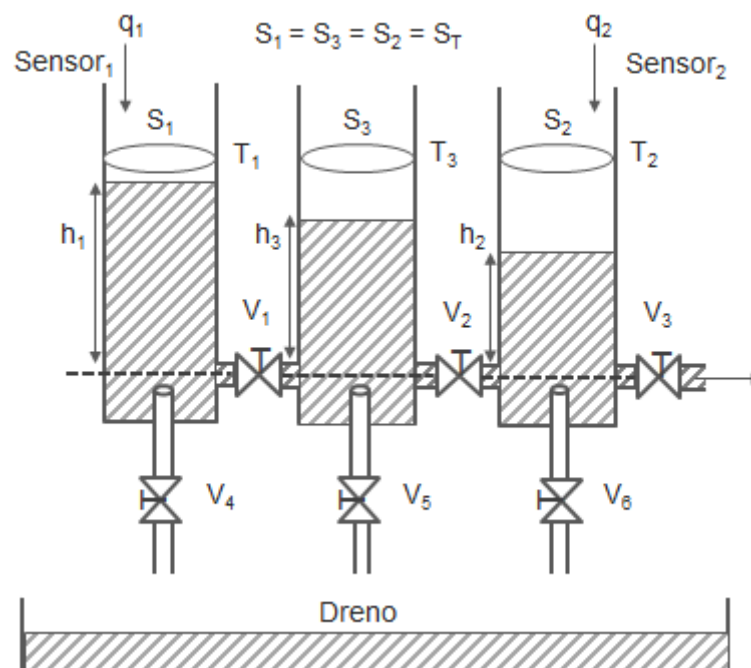
A etapa subsequente à escolha da plataforma de desenvolvimento e da planta foi o desenvolvimento do modelo matemático da planta e criação do bloco do modelo do processo com sua respectiva dinâmica de sistema. Após a criação do bloco de modelo do sistema dinâmico, foi desenvolvido o controlador MPC *multi-rate* para um sistema de controle via rede sem fio (WNCS). O sistema de controle via rede sem fio mais o controlador MPC *multi-rate* foram integrados ao bloco de modelo da planta e diversas simulações foram realizadas e os resultados coletados.

5.2 PLANTA DTS200

O sistema, AMIRA DTS200 (AMIRA, 2002) representado pela Figura 23 é composto por três tanques cilíndricos acoplados, dois sensores para medição de nível nos tanques T_1 e T_2 , duas bombas e seis válvulas sendo que a válvula V_1 é responsável pelo acoplamento entre os tanques 1 e 3, a válvula V_2 pelos tanques 3 e 2 por fim a válvula V_3 é denominada como válvula de saída do sistema.

As válvulas V_4 , V_5 e V_6 podem ser utilizadas para inserir distúrbios no sistema e se encontram respectivamente interligadas aos tanques T_1 , T_3 e T_2 respectivamente.

Figura 23 – Esquemático da planta de três tanques AMIRA DTS200.



Fonte: Adaptado de (AMIRA, 2002).

5.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática da planta AMIRA DTS200 utiliza-se das variáveis apresentadas na Figura 23. As vazões em cada uma das válvulas podem ser calculadas através da regra de Torricelli descrita pela Equação (25), onde az_n é o coeficiente de vazão na saída da válvula n , valor adimensional que pode variar entre 0 a 1, Δh representa a diferença entre dois níveis, g como sendo a aceleração da gravidade e por fim a área da seção transversal máxima da válvula é dada por S_n .

$$q_n = az_n S_n \text{sign}(\Delta h) (2g |\Delta h|)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

As variáveis h_1 , h_2 e h_3 representam a altura do nível de líquido nos tanques 1, 2 e 3, respectivamente, os parâmetros q_{V1} , q_{V2} , q_{V3} , q_{V4} , q_{V5} e q_{V6} representam a vazão do líquido nas válvulas V_1 , V_2 , V_3 , V_4 , V_5 e V_6 respectivamente, S_T como sendo a área da seção transversal dos tanques, e por fim, q_1 e q_2 representam a vazão volumétrica das bombas 1 e 2 é possível gerar o modelo matemático do sistema.

De forma genérica, é possível descrever o balanço de vazão do sistema utilizando o conceito apresentado na Equação (26), no qual a variável A representa a área da seção transversal, $\frac{dh}{dt}$ a taxa de variação do nível pelo tempo e $\sum q$ a somatória de todas as vazões no tanque em análise.

$$A \cdot \frac{dh}{dt} = \sum q \quad (26)$$

Aplicando-se o conceito da Equação (26) aos Tanques 1,2 e 3 respectivamente, obtêm-se as Equações (27), (28) e (29) que rege o comportamento dinâmico do sistema em cada tanque individualmente.

$$S_T \cdot \frac{dh_1}{dt} = q_1 - q_{V1} - q_{V4} \quad (27)$$

$$S_T \cdot \frac{dh_3}{dt} = q_{V1} + q_{V2} - q_{V5} \quad (28)$$

$$S_T \cdot \frac{dh_2}{dt} = q_2 - q_{V2} - q_{V3} - q_{V6} \quad (29)$$

Substituindo as variáveis q_{V1} , q_{V2} , q_{V3} , q_{V4} , q_{V5} e q_{V6} que representam a vazão do líquido nas válvulas pela Equação (25), regra de Torricelli, obtém-se o modelo matemático geral da planta a ser controlada, esta pode ser representada através do conjunto de equações diferenciais apresentados através da Equação (30).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dh_1}{dt} = \left(\frac{q_1 - az_1 S_{n1} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{|h_1 - h_3|} \cdot \text{sign}(h_1 - h_3) - az_4 S_{n4} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{h_1}}{S_T} \right) \\ \frac{dh_3}{dt} = \left(\frac{az_1 S_{n1} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{|h_1 - h_3|} \cdot \text{sign}(h_1 - h_3) + az_2 S_{n2} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{|h_2 - h_3|} \cdot \text{sign}(h_2 - h_3) - az_5 S_{n5} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{h_3}}{S_T} \right) \\ \frac{dh_2}{dt} = \left(\frac{q_2 - az_2 S_{n2} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{|h_2 - h_3|} \cdot \text{sign}(h_2 - h_3) - az_3 S_{n3} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{h_2} - az_6 S_{n6} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{h_2}}{S_T} \right) \end{array} \right. (30)$$

Atribui-se os estados do sistema como sendo o nível nos tanques (h_1 , h_2 e h_3) conforme Equação (31) e as entradas da planta com sendo a vazão das bombas (q_1 e q_2) conforme Equação (32).

$$\begin{cases} x_1 = h_1 \\ x_2 = h_2 \\ x_3 = h_3 \end{cases} (31)$$

$$\begin{cases} u_1 = q_1 \\ u_2 = q_2 \end{cases} (32)$$

Considerando as saídas do sistema como sendo a altura nos T_1 e T_2 e substituindo-se as variáveis de estado das Equações (31) e (32) na Equação (30) obtém-se a forma de estados apresentados pelas Equações (33) e (34).

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \left(\frac{u_1 - az_1 S_{n1} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{|x_1 - x_3|} \cdot \text{sign}(x_1 - x_3) - az_4 S_{n4} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{x_1}}{S_T} \right) \\ \dot{x}_3 = \left(\frac{az_1 S_{n1} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{|x_1 - x_3|} \cdot \text{sign}(x_1 - x_3) + az_2 S_{n2} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{|x_2 - x_3|} \cdot \text{sign}(x_2 - x_3) - az_5 S_{n5} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{x_3}}{S_T} \right) \\ \dot{x}_2 = \left(\frac{u_2 - az_2 S_{n2} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{|x_2 - x_3|} \cdot \text{sign}(x_2 - x_3) - az_3 S_{n3} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{x_2} - az_6 S_{n6} (2g)^{\frac{1}{2}} \sqrt{x_2}}{S_T} \right) \end{array} \right. (33)$$

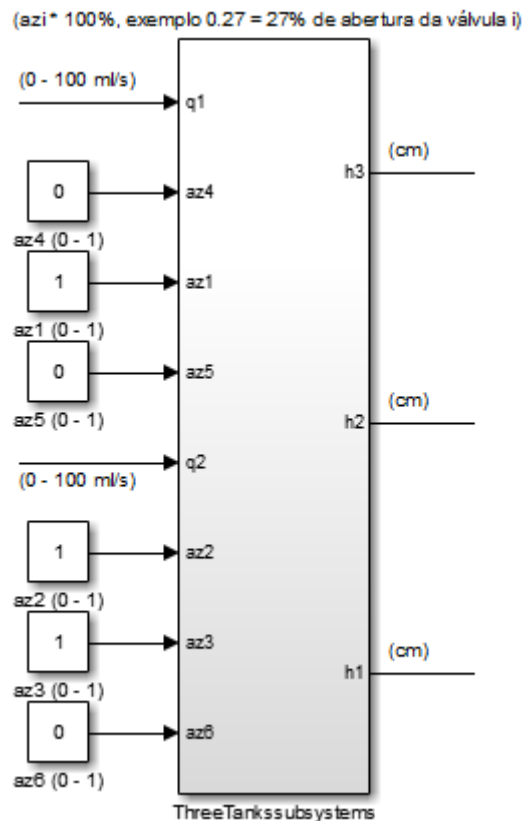
$$\begin{cases} y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \end{cases} \quad (34)$$

5.4 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO EM MATLAB/SIMULINK

A implementação do modelo matemático do processo foi realizada em ambiente Matlab/Simulink. A Equação (30), apresentada na subseção anterior, foi implementada em forma de diagrama de blocos utilizando os recursos disponíveis no ambiente de programação.

O resultado deste desenvolvimento é o bloco chamado *ThreeTankSubsystems*, representado pela Figura 24, utilizado como o modelo do processo nas simulações. Este bloco contém todas as funções matemáticas que regem a dinâmica do sistema e disponibiliza os sinais de entrada e saída para as simulações.

Figura 24 – Bloco do modelo da planta de três tanques acoplados para ambiente Matlab/Simulink.



Fonte: Autoria própria.

As variáveis de entradas, saídas e parâmetros de configuração utilizados pelo modelo são descritas a seguir para melhor compreensão:

- h_1, h_2, h_3 : Medição real do nível nos tanques 1, 2 e 3 respectivamente, representa a saída do sistema em cm.
- $az_1, az_2, az_3, az_4, az_5, az_6$: Posição das válvulas V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 e V_6 respectivamente, az_n é multiplicado por 100 para obter a % de abertura de cada válvula, az_n pode variar entre 0 e 1 e não possui dimensão.
- q_1, q_2 : Valor da vazão volumétrica nas bombas 1 e 2 respectivamente, representa o sinal de controle aplicado ao sistema.

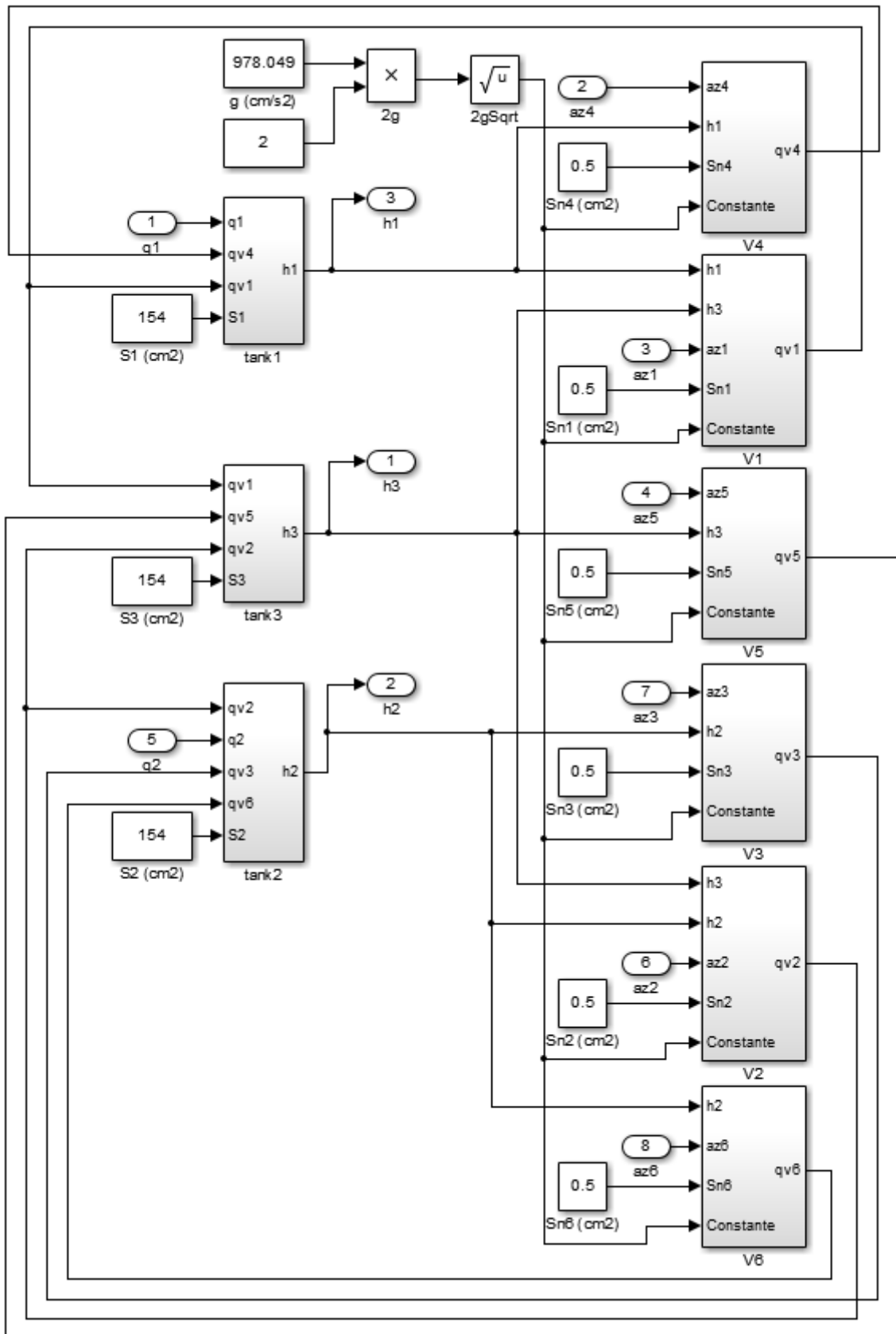
O bloco *ThreeTankSubsystems* é melhor detalhado pela Figura 25. As variáveis utilizadas por este modelo são as mesmas apresentadas na seção da modelagem matemática para facilitar a correlação das equações já apresentadas e modelo implementado. Outras variáveis e constantes utilizadas pelo modelo e seus valores encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis de processo e constantes.

Variável	Valor
S_T	154 cm ²
S_n	0,5 cm ²
Máx. q_1 e q_2	100 ml/s
h máx.	62 cm +/- 1 cm
g	978,049 cm/s ²

Fonte: (AMIRA, 2002)

Figura 25 – Modelo detalhado da planta de três tanques acoplados para ambiente Matlab/Simulink.

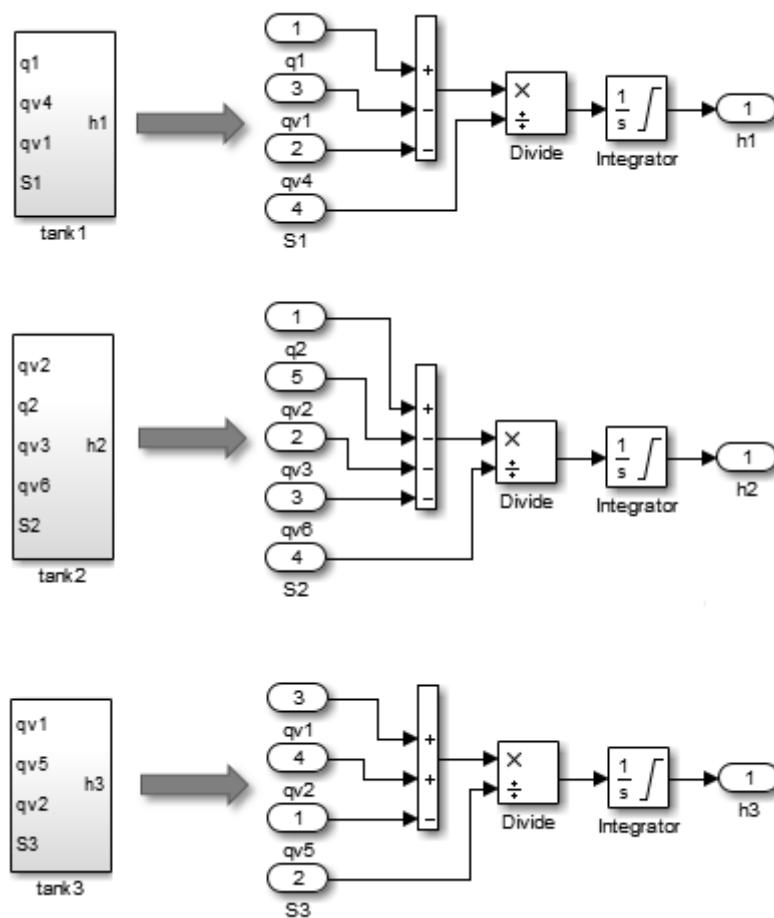


Fonte: Autoria própria.

5.5 MODELO DOS TANQUES

A Figura 26 apresenta o modelo detalhado dos tanques representados na Figura 25. Os blocos *tank1*, 2 e 3 podem ser expandidos para se obter maiores detalhes. A implementação através dos blocos de função nada mais é que tradução das Equações (27), (28) e (29) para a linguagem de diagrama de blocos, no qual o integrador é utilizado para obter a resolução das equações diferenciais.

Figura 26 – Modelo detalhado dos tanques.

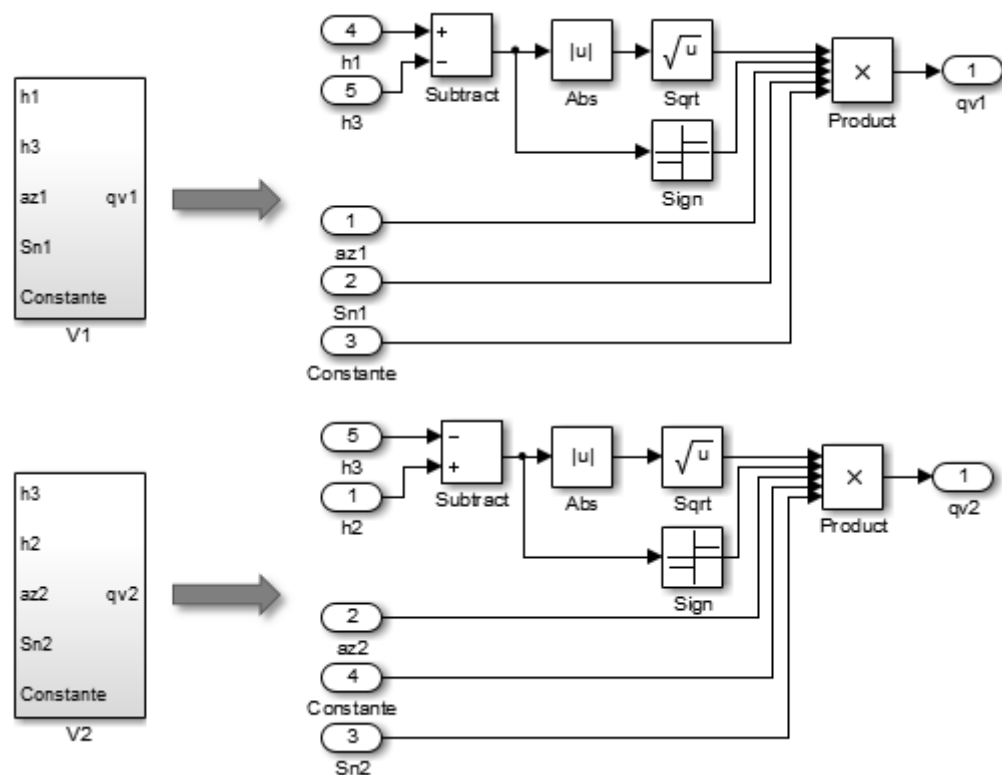


Fonte: Autoria própria.

5.6 MODELO DAS VAZÕES NAS VÁLVULAS

A Figura 27 apresenta o modelo detalhado da vazão nas válvulas V1 e V2 representados na Figura 25. Os blocos V1 e V2 podem ser expandidos para se obter maiores detalhes. A implementação através dos blocos de função nada mais é que tradução das respectivas parcelas das vazões encontradas na Equação (30) para a linguagem de diagrama de blocos.

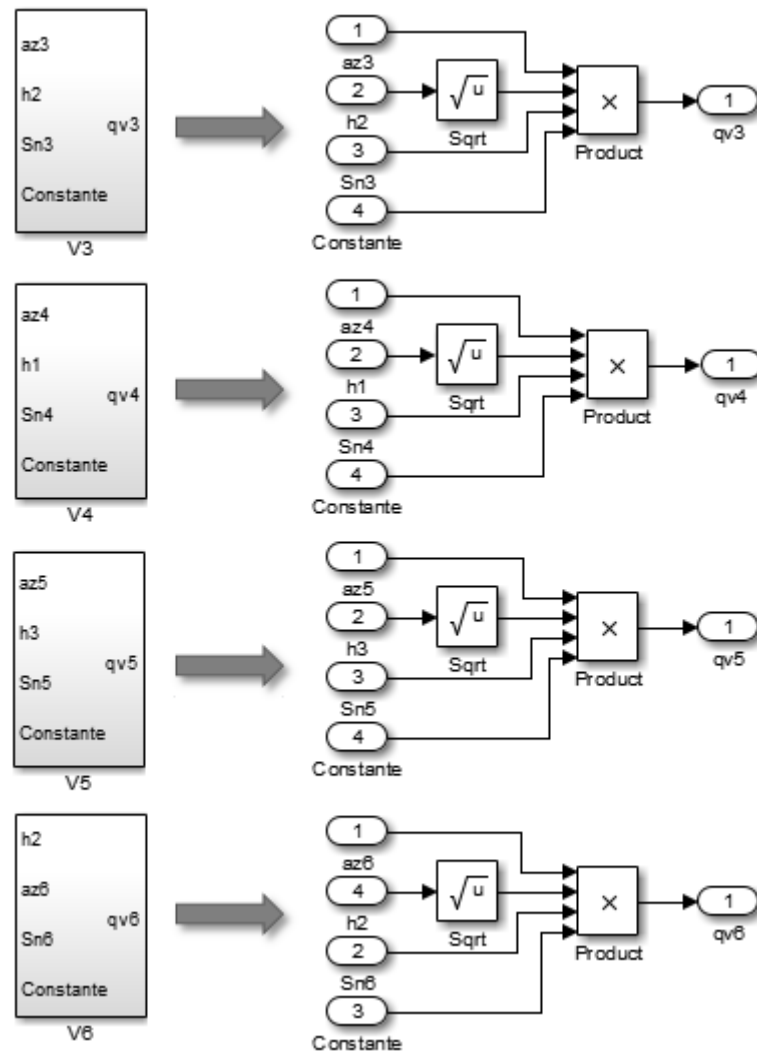
Figura 27 – Modelo detalhado das válvulas V1 e V2.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 28 apresenta o modelo detalhado da vazão nas válvulas V3, V4, V5 e V6 representados na Figura 25. Os blocos V3, V4, V5 e V6 podem ser expandidos para se obter maiores detalhes da implementação. A implementação através dos blocos de função nada mais é que tradução das respectivas parcelas das vazões encontradas na Equação (30) para a linguagem de diagrama de blocos.

Figura 28 – Modelo detalhado das válvulas V3, V4, V5 e V6.



Fonte: Autoria própria.

5.7 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR MPC *MULTIRATE* PARA WNCs

Um controlador do tipo MPC possui a capacidade de tratar sistemas com múltiplas entradas e saídas, sendo assim, é possível obter uma resolução de controle aplicado a um problema de sistema dinâmico do tipo *MIMO*. Além desta característica, este, normalmente é também considerado no controle de sistemas não lineares podendo ser estes caracterizados como variantes no tempo devido à possibilidade de ajustes automáticos no modelo interno utilizado na predição do estado futuro e nos sinais de controle.

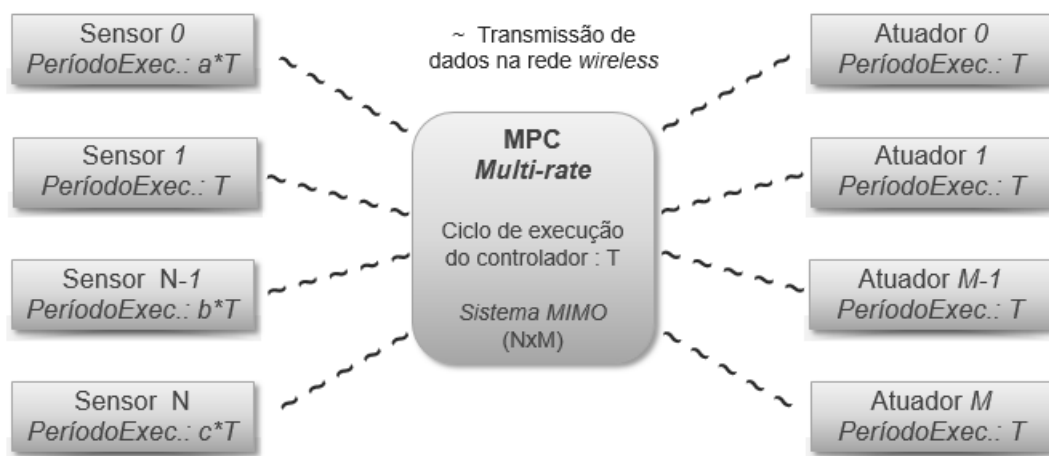
A Figura 29 apresenta o conceito geral desenvolvido na adequação de um MPC convencional a um controlador MPC que pode operar em modo *multi-rate*. Dado um sistema de controle MPC convencional, espera-se que a execução de todo o ciclo de controle seja a

cada T s, ou seja, a transmissão dos dados pelos sensores, a execução do bloco de controle e a transmissão dos sinais de controle para os atuadores devem ocorrer a cada T s.

No MPC *multi-rate* é esperado que o bloco de controle e a transmissão dos sinais de controle para os atuadores sejam executados a cada T s. No entanto, a transmissão dos valores dos sensores para o bloco de controle pode ocorrer em períodos de amostragem múltiplos de T s (transmissão de dados pelos sensores 0, $N-1$ e N), respeitando a premissa de que a variável de processo com a dinâmica mais rápida seja transmitida na mesma frequência que o período de execução do bloco de controle (transmissão de dados pelo sensor 1).

O período de transmissão dos dados pelos sensores operando em *multi-rate* devem respeitar a regra de múltiplos comum, sendo assim as constantes a , b e c apresentadas pela Figura 29 devem possuir um múltiplo divisor comum, para que no período de tempo no qual o bloco de controle faz a leitura real de todos os sensores, seja possível atualizar os parâmetros do modelo interno de processo com os dados reais, caso a otimização esteja habilitada.

Figura 29 – MPC multi-rate para WNCS.

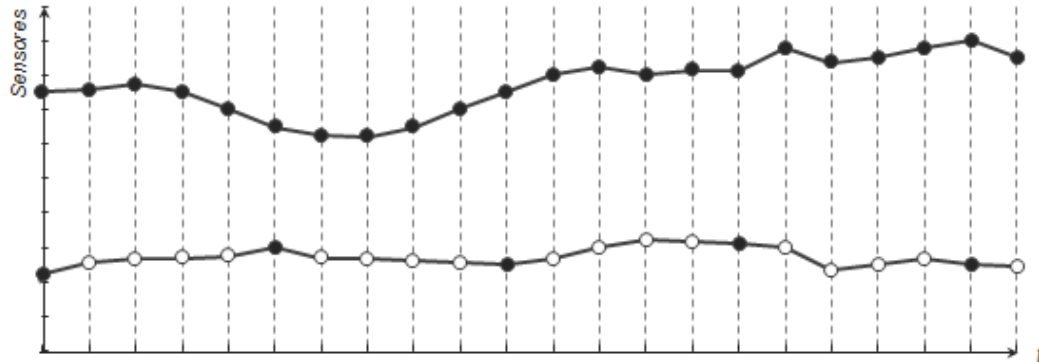


Fonte: Autoria própria.

A Figura 30 apresenta a operação de um controlador MPC *multi-rate* em termos da transmissão dos sinais pelos sensores. Duas variáveis de processos são monitoradas, a primeira (parte de cima) é transmitida periodicamente a cada T s a outra (parte de baixo) é transmitida a cada $5*T$ s. Os marcadores (círculo) das curvas dos gráficos representam os instantes T de transmissão de mensagens. A representação de marcador não preenchido (círculo branco) indica que naquele exato momento o MPC está consultando os valores preditos das variáveis para calcular o sinal de controle a ser aplicado no processo a ser

controlado. Já o marcador preenchido (círculo preto) simboliza o dado real transmitido pelo sensor e usado pelo MPC.

Figura 30 – Operação do MPC multi-rate para WNCS.

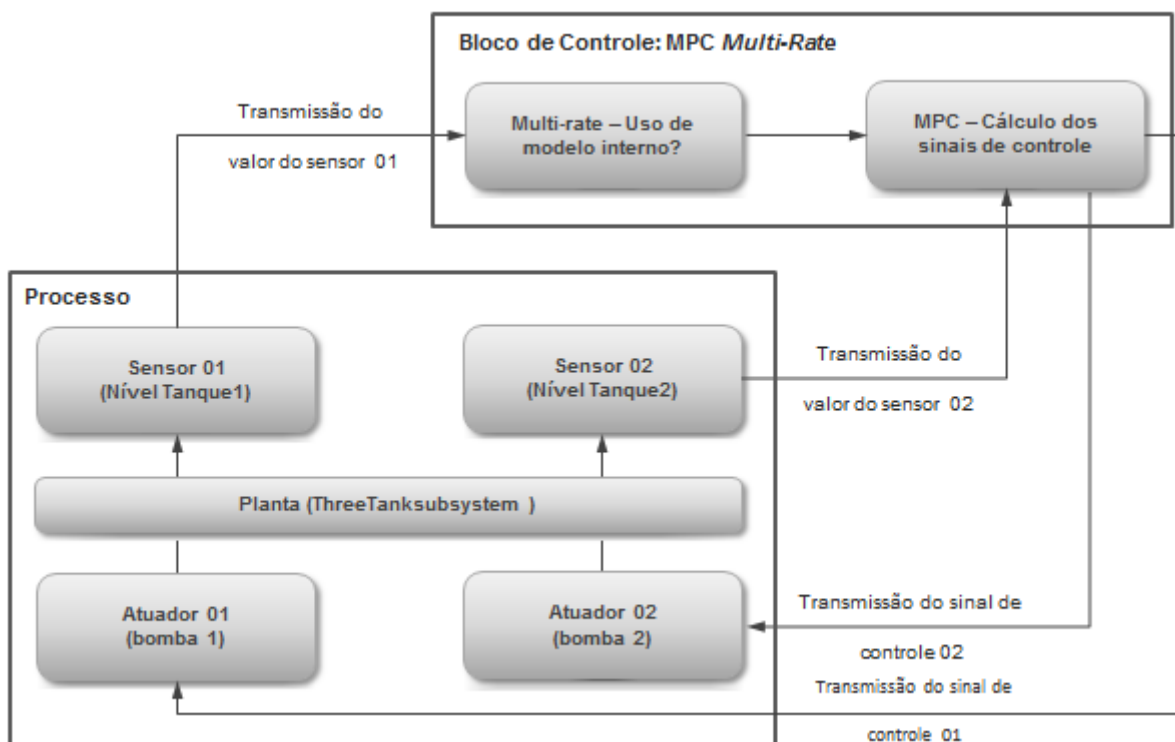


Fonte: Autoria própria.

5.8 ESTRUTURA DO WNCS

O MPC multi-rate desenvolvido para aplicações em WNCS é representado pela Figura 31, que apresenta um diagrama de blocos com todos os componentes envolvidos no sistema. Este diagrama foi construído no ambiente Matlab/Simulink juntamente com o toolbox TrueTime e com o MPC toolbox.

Figura 31 – Diagrama de blocos do controle MPC multi-rate para WNCS.



Fonte: Autoria própria.

Cada componente do diagrama de blocos do MPC *multi-rate* para WNCS apresentado na Figura 31 possui funções específicas. Os componentes planta, sensores e atuadores que compõem o bloco de processo, são descritos a seguir:

- **Planta:** Contém a dinâmica (modelo matemático) do processo a ser controlado, nesta aplicação é representada pelo bloco *ThreeTanksSubsystem*.

- **Sensor 01:** O transmissor *wireless* envia o sinal do sensor 01 para o bloco de controle: MPC *multi-rate* a cada período de tempo pré-definido. Este é definido através de um bloco *TrueTime Kernel* chamado de *h1 Node* combinado ao bloco *TrueTime Battery h1 Node*.

- **Sensor 02:** O transmissor *wireless* envia o sinal do sensor 02 para o bloco de controle: MPC *multi-rate* a cada período de tempo pré-definido. Este é definido através de um bloco *TrueTime Kernel* chamado de *h2 Node* combinado ao *TrueTime Battery h2 Node*.

- **Atuador 01:** Recebe o sinal de controle transmitido através do bloco de controle: MPC *multi-rate* e atua na planta através da bomba 1. Este é definido através de um bloco *TrueTime Kernel* chamado de *q1 Node* combinado ao *TrueTime Battery q1 Node*.

- **Atuador 02:** Recebe o sinal de controle transmitido através do bloco de controle: MPC *multi-rate* e atua na planta através da bomba 2. Este é definido através de um bloco *TrueTime Kernel* chamado de *q2 Node* combinado ao *TrueTime Battery q2 Node*.

A Figura 32 retrata os componentes do bloco de processo utilizando-se o toolbox TrueTime. Os componentes correspondentes à planta, sensores e atuadores podem ser visualizados nesse ambiente e são correspondentes as funções já apresentadas na Figura 31.

- **ThreeTanksSubsystem:** Planta, contém o desenvolvimento matemático representado pela Equação (30).

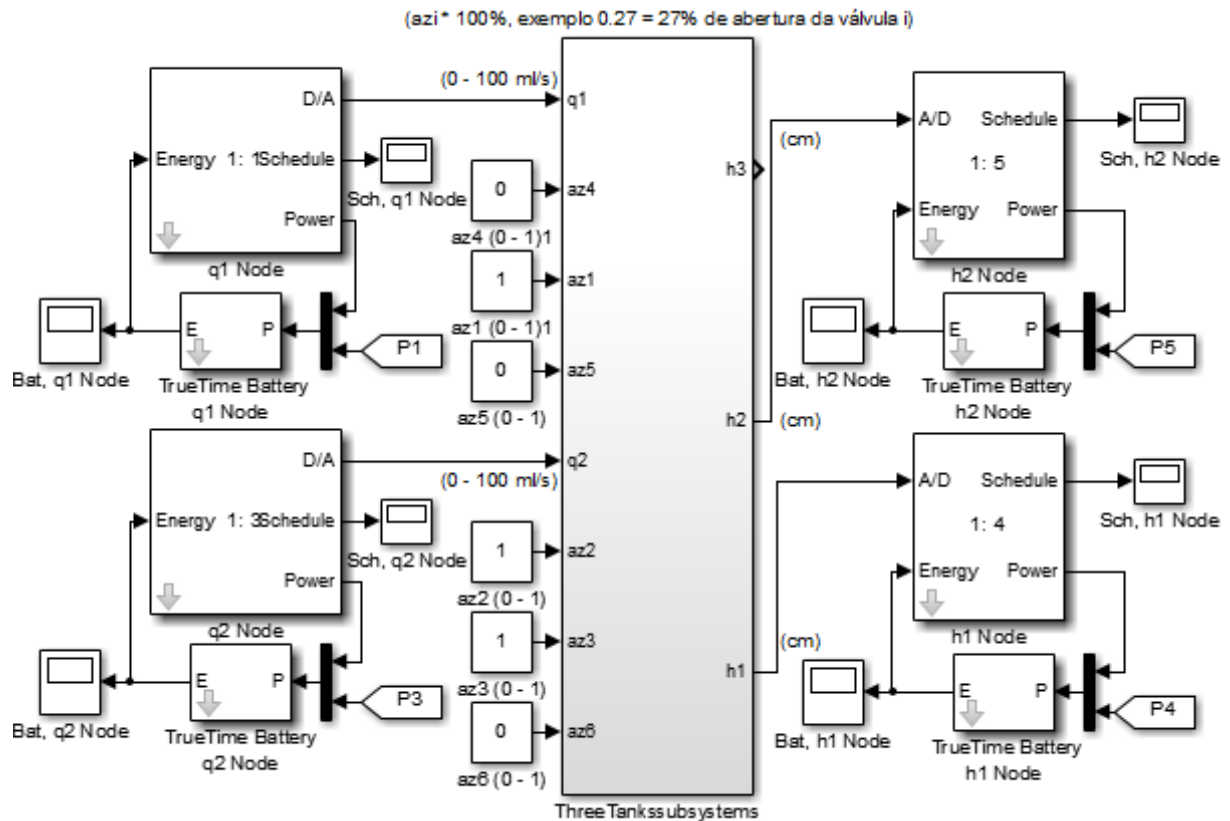
- **h1 Node:** Sensor 01. Nó sensorial da rede *wireless*, possui a função de transmitir o sinal do Sensor 01, medição do nível no Tanque 1.

- **h2 Node:** Sensor 02. Nó sensorial da rede *wireless*, possui a função de transmitir o sinal do Sensor 02, medição do nível no Tanque 2.

- **q1 Node:** Bomba 01. Nó de atuação da rede *wireless*, possui a função de atuar na planta com o objetivo de controlar o nível no Tanque 1, Vazão de alimentação do Tanque 01 através da Bomba 01.

- **q2 Node:** Bomba 02. Nó de atuação da rede *wireless*, possui a função de atuar na planta com o objetivo de controlar o nível no Tanque 2, Vazão de alimentação do Tanque 02 através da Bomba 02.

Figura 32 – Modelo da planta, sensores e atuadores.



Fonte: Autoria Própria

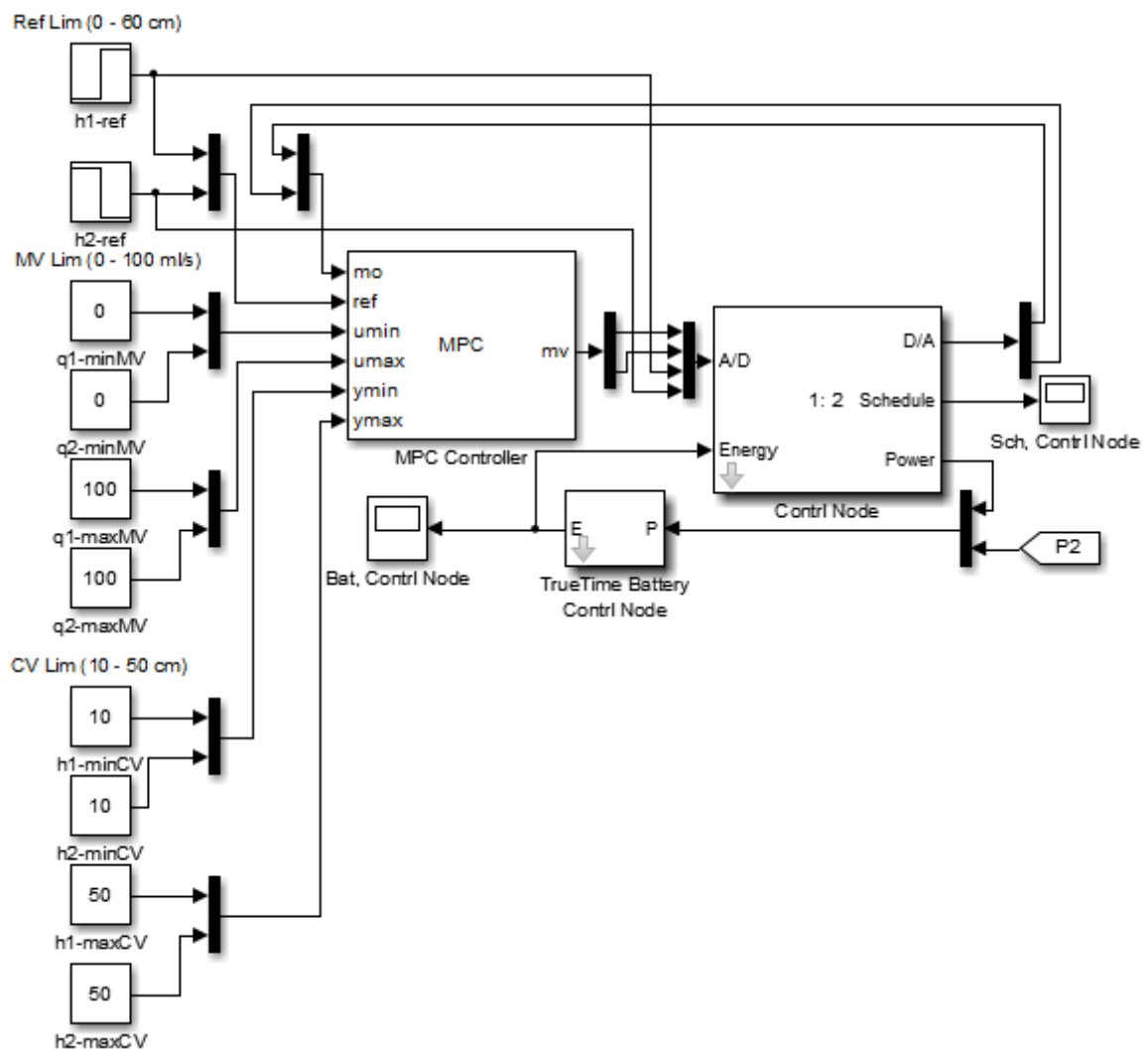
O Bloco de controle: MPC *multi-rate* apresentado na Figura 31 é composto pelos componentes Multi-rate - *Uso de modelo interno?* e MPC - *Cálculo dos sinais de controle* que correspondem respectivamente aos componentes *Contrl Node* e *MPC Controller* apresentados na Figura 33 a seguir. Estes componentes são descritos a baixo:

- Uso de modelo interno?:** Como o sensor 02 opera na mesma taxa que o controlador MPC, a estrutura de decisão do uso de modelo interno é realizada somente para o sensor 01, a qual pode operar em taxas de amostragem maiores. O bloco MPC é sempre executado utilizando valores reais do sensor 02 e em uma taxa menos frequente com os valores reais dos sensores 01 e 02, quando este não é possível, o controlador utiliza-se de valores calculados através do horizonte de predição, e utiliza-se desse valor no controle. Este é implementado através de um bloco *TrueTime Kernel* chamado de *Contrl Node* combinado ao *TrueTime Battery Contrl Node*;

- MPC - Cálculo dos sinais de controle:** Este representa o bloco de controle MPC. O bloco *MPC Controller* convencional disponibilizado no MPC toolbox do Simulink executa o algoritmo de controle calculando os sinais de controle para os atuadores com base nas variáveis de entrada reais ou virtuais selecionadas pelo bloco de decisão previamente adicionado.

A Figura 33 retrata os componentes do bloco de controle MPC multi-rate, apresentados previamente pela Figura 31, utilizando-se o toolbox TrueTime.

Figura 33 – Controlador MPC multi-rate.



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 2, Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam os limiares das variáveis do sistema.

Tabela 2 – Limites dos sinais de referência.

Sinal de referência	Limites (cm)	
	Mínimo	Máximo
h1-ref	0	60
h2-ref	0	60

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Limites da variável manipulada (Sinal de controle).

Sinal de referência	Limites (ml/s)	
	Mínimo	Máximo
q1	0	100
q2	0	100

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Limites da variável de controle (Saída da planta).

Sinal de referência	Limites (cm)	
	Mínimo	Máximo
h1	10	50
h2	10	50

Fonte: Autoria própria.

5.9 CONFIGURAÇÃO DE REDE DO WNCS

O WNCS utilizado possui as seguintes configurações de rede:

- Network Type = 802.15.4 (ZigBee);
- Network Number = 1;
- Number of Nodes = 5;
- Data rate (bit/s) = 250000;
- Minimum frame size (bits) = 272;
- Transmit Power (dbm) = 30;
- Receiver signal threshold (dbm) = -48
- Pathloss function = default
- Pathloss exponent = $(1/\text{distance}^x)$

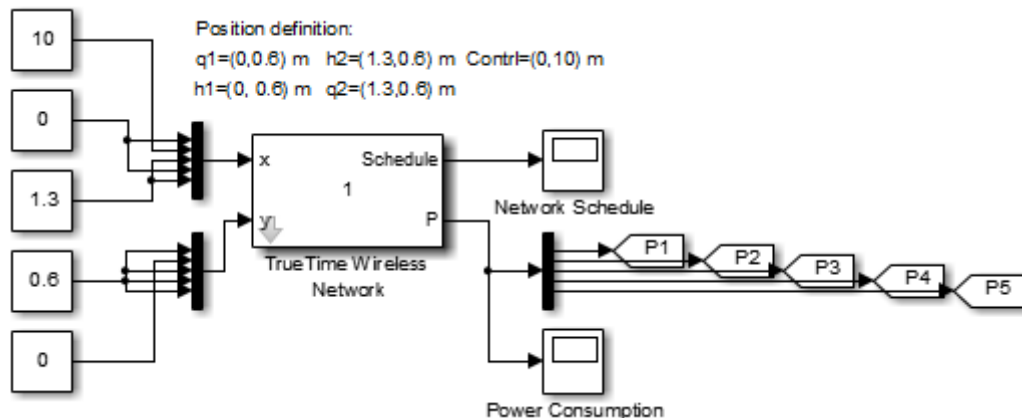
A definição da posição dos sensores, atuadores e controlador no plano cartesiano é apresentada pela Tabela 5. A Figura 34 apresenta o bloco com estas características configuradas.

Tabela 5 – Posição dos nós de rede wireless.

Coordenadas cartesianas	Distância (m)	
	x	y
Nó 1 (Bomba 1)	0	0.6
Nó 2 (Controlador)	10	0
Nó 3 (Bomba 2)	1.3	0.6
Nó 4 (Sensor 1)	0	0.6
Nó 5 (Sensor 2)	1.3	0.6

Fonte: Autoria própria.

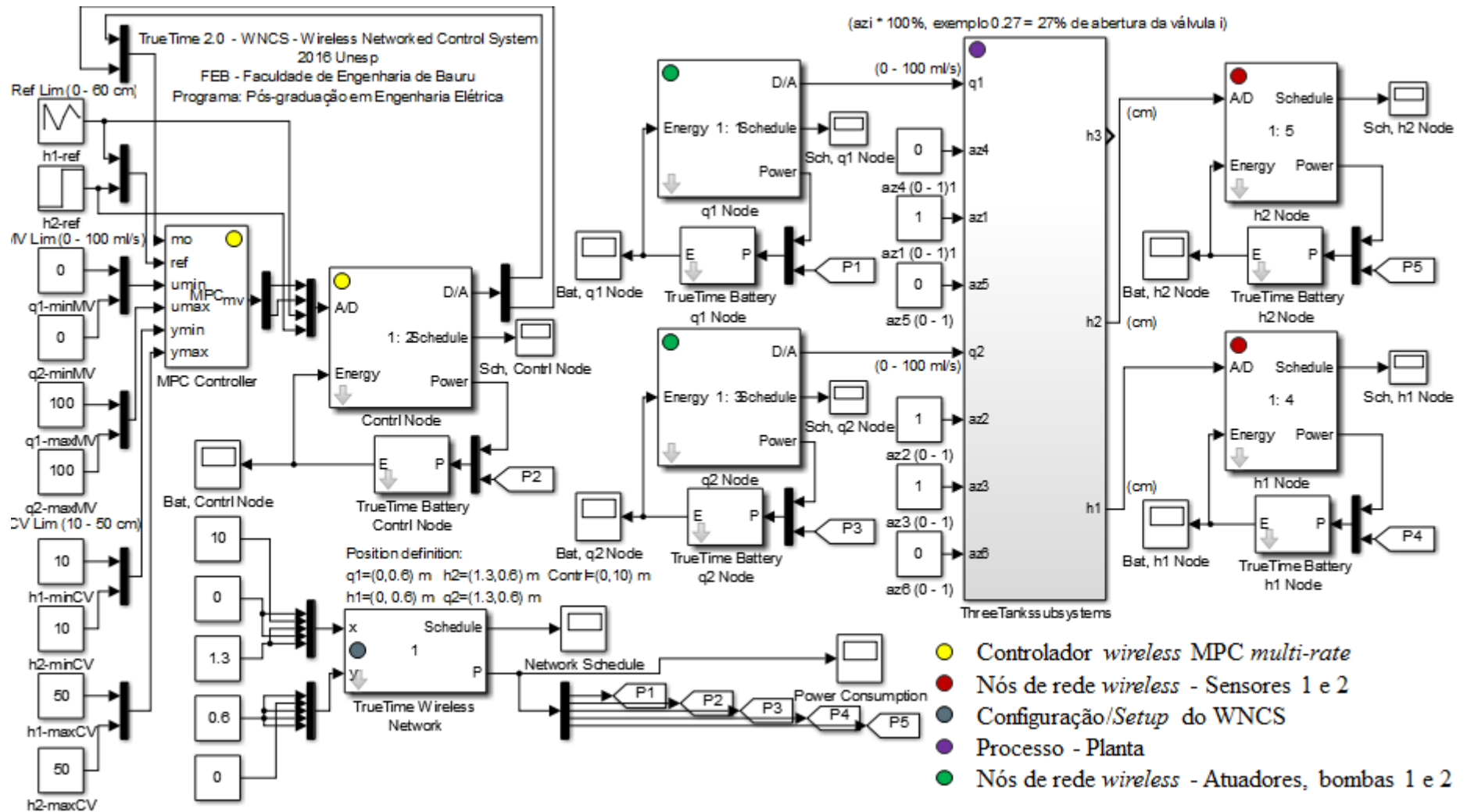
Figura 34 – Definição das posições dos nós do sistema de controle.



Fonte: Autoria Própria

Por fim, o diagrama geral do WNCS é apresentado na Figura 35. Este é o resultado do desenvolvimento do controlador MPC multi-rate e do modelo do processo adicionando também os componentes necessários da simulação no Matlab/Simulink com o toolbox TrueTime. As legendas da Figura 35 apresentam no diagrama geral do WNCS cada um dos subitens (Controlador MPC Multi-rate, Nós de rede Sensores, Nós de rede Atuadores, Planta e Rede Wireless configurada) apresentados e explicados anteriormente na Figura 24, Figura 32, Figura 33 e Figura 34.

Figura 35 – Diagrama geral do WNCS.



Fonte: Autoria Própria

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE

Os primeiros experimentos realizados 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.

Primeiramente, comparou-se o desempenho de um controlador MPC convencional utilizando instrumentos *wireless* transmitindo os valores das variáveis de processo a cada 1 s com o MPC *multi-rate* variando-se a taxa de amostragem dos sensores. Todos os dados foram coletados e analisados, este primeiro conjunto de simulações não levou em consideração a eficiência energética do sistema visto que o objetivo foi estudar e analisar o comportamento do WNCS com base na variação do período de amostragem dos sensores. O principal foco desta etapa inicial foi o estudo comparativo entre o número de acessos do sistema de controle ao transmissor e o índice de desempenho da malha de controle.

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 fechadas. Neste caso, como o tanque dois apresenta uma válvula de entrada e 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 1000s de duração para cada experimento. A curva padrão de referência escolhida para as simulações levou em consideração o limite operacional dos atuadores do sistema, evitando que estes operem em regime de saturação, geralmente a operação do sistema em regime de saturação dificulta a análise do desempenho dos controladores. Sendo assim, o perfil de referência definido para evitar saturação dos atuadores, levou em consideração rampas de subida e descida para o tanque 1 e sinais de referência constante no tanque 2, para se analisar a influência do acoplamento entre os tanques no desempenho do controlador visto que o sistema possui dinâmica acoplada em seus submodelos.

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. As equações matemáticas para os cálculos do valor RMS do erro e do ITAE, considerando t como o tempo de simulação do experimento, são apresentados nas Equações (35) e (36).

$$RMS_{Erro} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|e_i|)^2} \quad (35)$$

$$ITAE = \int_0^t t |e(t)| dt \quad (36)$$

Antes de analisar as curvas de resposta, é importante salientar que o desempenho do controlador é dependente do modelo de planta identificado pelo bloco MPC do Matlab/Simulink. O modelo foi linearizado utilizando-se os recursos disponíveis no bloco de controle MPC do Matlab/Simulink, principalmente a função *design* disponível nesse bloco. Para utilizar esse recurso, o controlador MPC foi conectado através de suas entradas e saídas ao bloco do modelo, *ThreeTankssubsystems*, no qual possui valores iniciais de nível em 30 cm para cada tanque. Esse ponto de operação foi escolhido pois é a média da altura de cada tanque, faixa ideal de operação do sistema. Após o uso da função *design*, o modelo da planta utilizada pelo controlador MPC foi identificado e utilizado nos experimentos. Esta função encontra as matrizes de estado **A**, **B**, **C** e **D**, que representam a dinâmica do sistema linearizado no ponto de interesse.

$$A = \begin{bmatrix} -0.05743 & 0 & 0.05743 \\ 0 & -0.0838 & 0.05743 \\ 0.05743 & 0.05743 & -0.1149 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.006494 & 0 \\ 0 & 0.006494 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Todas as configurações para o WNCS e parâmetros de configuração de rede utilizados seguiram o definido na subseção 5.9. Com o intuito de se utilizar dados de transmissores reais, é apresentado na Tabela 6 um transmissor de nível industrial do tipo radar, cujos dados foram utilizados para as simulações.

Tabela 6 – Estimativa da autonomia de sensores industriais sem fio para diferentes períodos de amostragem.

Sensor Industrial Sem Fio - Emerson Process Management	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

Fonte: (EMERSON, 2015).

A estratégia utilizada para a análise de viabilidade foi a de realizar experimentos com base nos períodos de amostragem disponíveis pelo transmissor selecionado adicionando o caso de período de amostragem a 1 s. Os períodos de amostragem disponíveis pelo transmissor e expectativa de vida da bateria em anos são detalhados na Tabela 6. Nos cinco experimentos realizados, fixou-se a taxa de execução do controlador MPC *multi-rate* e período de amostragem (T_{s2}) do sensor 2, ou seja, ambos operam na mesma taxa, e variou-se o período de amostragem (T_{s1}) no sensor 1.

É importante lembrar que a menor taxa de amostragem do sensor 1 pode ser igual à menor taxa utilizada pelo MPC *multi-rate* e período de amostragem do sensor 2 e a maior taxa como sendo a maior taxa de amostragem disponibilizada pelo transmissor, no caso 32 s. A Tabela 7 sintetiza os experimentos que foram realizados e os parâmetros utilizados nessas simulações. Curvas de resposta do WNCS para o nível dos tanques 1 e 2 foram obtidas para cada experimento e os resultados dos experimentos discutidos nas subseções a seguir.

Tabela 7 – Parâmetros dos Experimentos para Análise de Viabilidade do Controle MPC Multi-rate para WNCS.

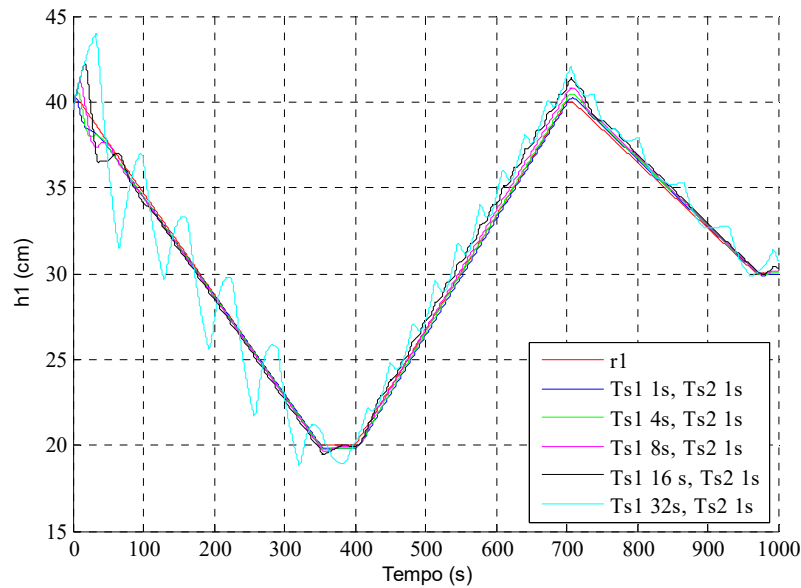
Experimento	Período de amostragem do sensor 1 – T_{S1} (s)	Período de execução do controlador MPC <i>multi-rate</i> e de amostragem do sensor 2 – T_{S2} (s)
1	1	1
	4	1
	8	1
	16	1
	32	1
2	4	4
	8	4
	16	4
	32	4
3	8	8
	16	8
	32	8
4	16	16
	32	16
5	32	32

Fonte: Autoria própria

6.2 ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS 1 E 2

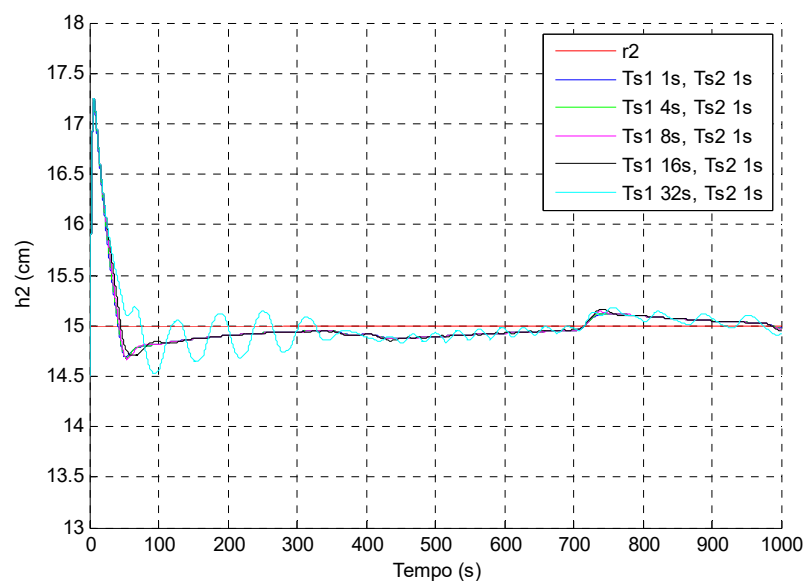
O experimento 1 foi realizado mantendo-se fixo o período de execução do MPC *multi-rate* e o período de amostragem do sensor 2 (T_{S2}) no menor valor disponível para este conjunto, que é de 1 s. O valor do período de amostragem do sensor 1 (T_{S1}) foi variado em 1, 4, 8, 16 e 32 s resultando nos gráficos encontrados na Figura 36 e Figura 37.

Como o MPC *multi-rate* opera em ciclos de execução mais rápidos que a taxa de amostragem do sensor 1, o controlador faz uso dos valores preditos através do submodelo interno da variável de processo, o qual possui incertezas referentes ao modelo real da planta. Isto ocorre, pois em diversos ciclos de execução o valor real do sensor 1 não está disponível para o cálculo do sinal de controle. De forma geral, as análises realizadas sobre esta estratégia de controle MPC multi-rate apontam que o aumento do período de amostragem do sensor 1 tem influência no desempenho da malha de controle em um WNCS, resultando em valores mais altos de $error_{RMS}$ e ITAE normalizado.

Figura 36 – Dados de h_1 coletados no Experimento 1.

Fonte: Autoria Própria

As curvas que se referem à medição do nível no tanque 1 em relação ao perfil de setpoint (r_1), encontradas na Figura 36, demonstram que aumentando o período de amostragem do sensor 1, as curvas tornam-se tenuamente mais oscilatórias, resultando no incremento dos valores do $error_{RMS}$ e ITAE normalizado. Nota-se que ao executar a simulação com o período de amostragem do sensor 1 a 32 s, o sistema pode se tornar oscilatório em alguns intervalos, demonstrando que seria inviável trabalhar com o controlador MPC multi-rate com esta amostragem do sensor 1.

Figura 37 – Dados de h_2 coletados no Experimento 1.

Fonte: Autoria Própria

As curvas que se referem a medição do nível no tanque 2 em relação ao setpoint constante (r_2), encontradas na Figura 37, quando comparadas entre si, não apresentaram diferenças significativas para os valores dos índices do $error_{RMS}$ e ITAE normalizado. Isso era esperado, já que o controlador MPC multi-rate opera com base num período de amostragem mais rápido e fixo ($T_{S2} = 1s$), minimizando alterações no desempenho de controle para esse tanque. Uma pequena amplitude de oscilação pode ser observada na Figura 37 quando o período de amostragem do sensor 1 é configurado para 32 s. Conforme constatado na análise da Figura 36, observa-se uma influência direta na qualidade do controle no nível no tanque 2 quando a taxa de multi-rate do controlador MPC é aumentada até o valor de 32 s, inviabilizando sua aplicação ao WNCS estudado.

Os valores dos índices $error_{RMS}$ e do ITAE normalizado calculados para cada caso simulado no experimento 1 são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Síntese de Resultados do WNCS com MPC-multi-rate para o Experimento 1.

Experimento	T_{S1} (s) - sensor1	T_{S2} (s) - MPC <i>multi-rate</i> + sensor2	Error _{RMS}		ITAE normalizado	
			h1	h2	h1	h2
1	1	1	0,232	0,276	0,036	0,030
	4	1	0,233	0,281	0,034	0,030
	8	1	0,328	0,286	0,050	0,031
	16	1	0,605	0,290	0,094	0,031
	32	1	1,526	0,307	0,230	0,035

Fonte: Autoria própria

Os resultados apresentados na Tabela 8 apontam pouca variação nos casos em que os períodos de amostragem para o sensor 2 são respectivamente 1, 4 e 8 s. Os índices de desempenho mantiveram-se bem próximos atingindo boas respostas à variação de setpoint. No caso em que $T = 16$ s os índices apresentam menor desempenho quando comparados aos primeiros testes, porém a resposta à variação de setpoint pode ser aceitável dependendo da aplicação. O último caso, no qual $T = 32$ s, apresenta grande variação dos índices de desempenho quando comparados às demais simulações inviabilizando este cenário na atual aplicação.

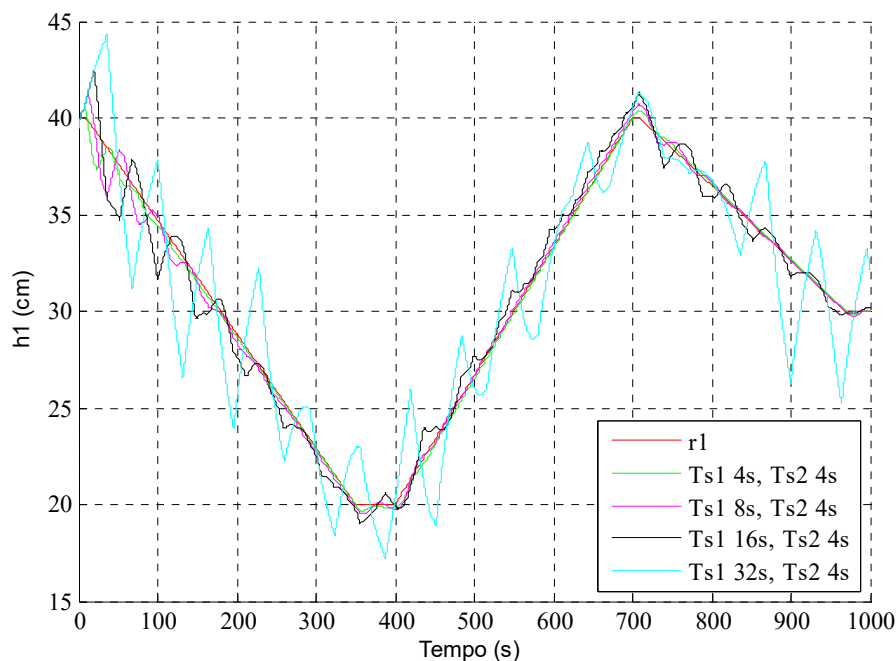
O experimento 2 foi realizado mantendo-se fixo o período de execução do MPC *multi-rate* e o período de amostragem do sensor 2 (T_{S2}) num valor configurado de 4 s. Em seguida, variou-se o valor do período de amostragem do sensor 1 (T_{S1}) em 4, 8, 16 e 32 s resultando nos gráficos encontrados na Figura 38 e Figura 39. Neste experimento o MPC *multi-rate*

também opera em ciclos de execução mais rápidos que a taxa de amostragem do sensor 1, porém, o seu período de execução é quatro vezes maior que a do experimento 1. Isso corresponde a dividir por quatro a quantidade de acesso às informações do sensor 2 e de atualização dos sinais de controle transmitidos a entrada da planta.

De forma geral, as análises realizadas apontam que ainda existe viabilidade de aplicação do controle MPC multi-rate para o WNCS considerando o aumento do período de amostragem do sensor 1 e eventual aumento do período do ciclo de execução do controlador. O aumento do período de execução do MPC multi-rate, e consequente diminuição da frequência de recebimento de informações provenientes do sensor 2, altera o desempenho da malha de controle do WNCS resultando em valores mais altos do $error_{RMS}$ e ITAE normalizado.

As curvas referentes a medição do nível no tanque 1 em relação ao perfil de setpoint (r_1), encontradas na Figura 38, demonstram que aumentando o período de amostragem do sensor 1 e o ciclo de execução do controlador, as curvas tornam-se mais oscilatórias quando comparado com o experimento 1, resultando no incremento dos valores do $error_{RMS}$ e ITAE normalizado. Nota-se que ao executar a simulação com o período de amostragem do sensor 1 de 16 s, o sistema torna-se ligeiramente oscilatório em alguns intervalos, e ao incrementar o período de amostragem para 32 s o sistema torna-se oscilatório com tendência a desestabilização.

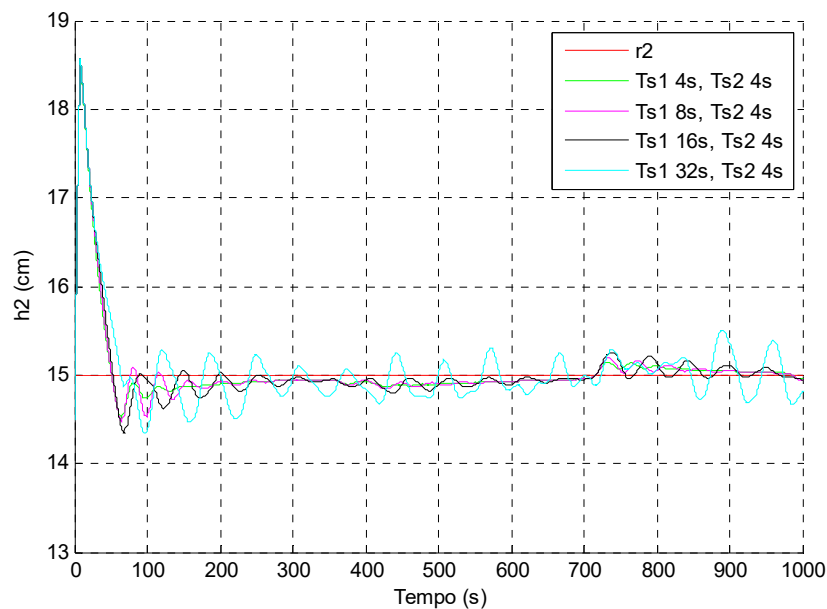
Figura 38 – Dados de h_1 coletados no Experimento 2.



Fonte: Autoria Própria

As curvas referentes a medição do nível no tanque 2 em relação ao setpoint constante (r_2), encontradas na Figura 39, quando comparadas entre si, não apresentaram diferenças significativas entre os valores dos índices do $error_{RMS}$ e ITAE normalizado. Da mesma forma que no experimento 1, somente no caso extremo onde o período de amostragem do sensor 1 foi de 32 s é que a resposta do WNCS se tornou oscilatória. No entanto, verifica-se através da comparação entre as respostas do experimento 1 da Figura 37 e do experimento 2 da Figura 39, que o aumento do período de execução do MPC multi-rate exerce influência na qualidade do controle no nível no tanque 2, tornando as respostas um pouco mais oscilatórias.

Figura 39 – Dados de h_2 coletados no Experimento 2.



Fonte: Autoria Própria

Os valores dos índices $error_{RMS}$ e do ITAE normalizado calculados para cada caso simulado do experimento 2 são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Síntese de Resultados do WNCS com MPC-multi-rate para o Experimento 2.

Experimento	T_{S1} (s) - sensor1	T_{S2} (s) - MPC <i>multi-rate</i> + sensor2	$error_{RMS}$		ITAE normalizado	
			h1	h2	h1	h2
2	4	4	0,268	0,445	0,033	0,038
	8	4	0,436	0,453	0,053	0,038
	16	4	0,853	0,464	0,126	0,041
	32	4	2,268	0,503	0,350	0,060

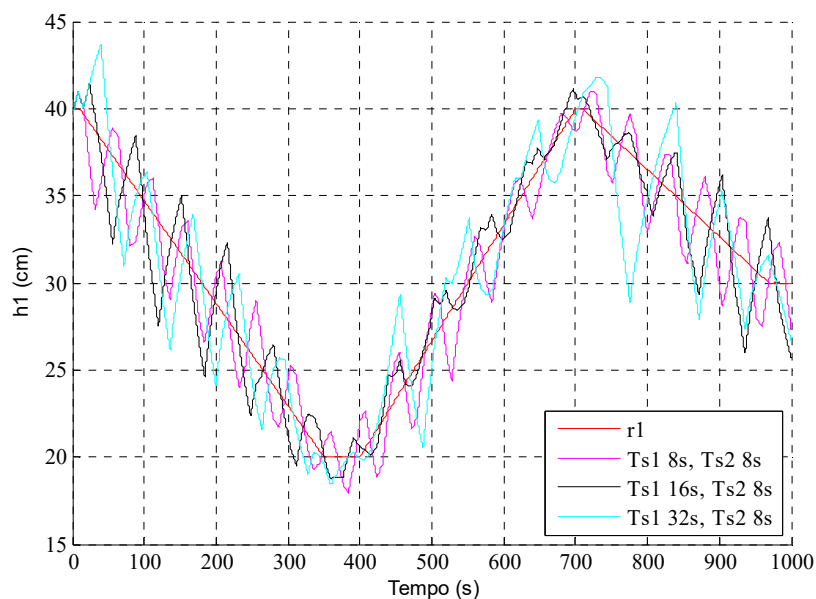
Fonte: Autoria própria

Os resultados apresentados na Tabela 9 apontam pouca variação nos casos em que os períodos de amostragem para o sensor 2 são respectivamente 4 e 8 s. Os índices de desempenho mantiveram-se bem próximos atingindo boas respostas à variação de setpoint. No caso em que $T = 16$ s os índices apresentam menor desempenho quando comparados aos primeiros testes, porém a resposta à variação de setpoint pode ser aceitável dependendo da aplicação. No caso extremo, no qual $T = 32$ s, é apresentado grande variação dos índices de desempenho quando comparados às demais simulações inviabilizando este cenário na atual aplicação.

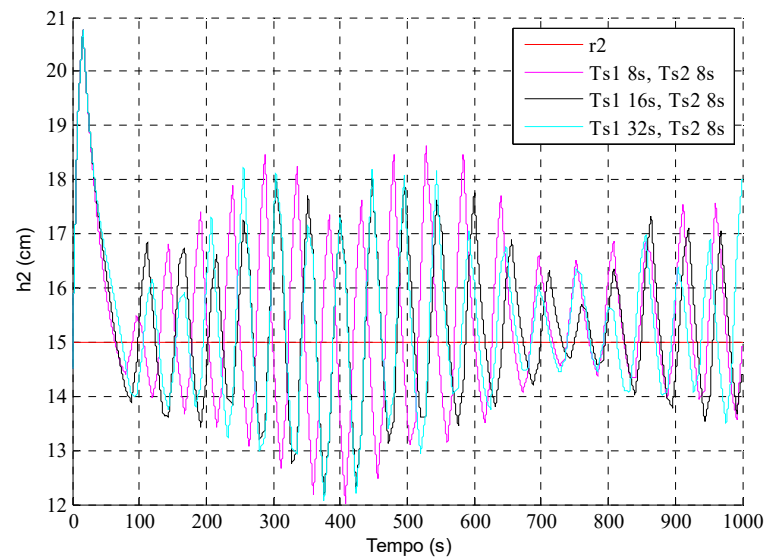
6.3 ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS 3, 4 E 5

Os experimentos 3, 4 e 5 foram realizados variando-se o período de execução do MPC *multi-rate* e o período de amostragem do sensor 2 (T_{S2}) nos valores de 8, 16 e 32 s. Para o período de amostragem do sensor 1 (T_{S1}), os valores foram variados de 8, 16 e 32 s para o experimento 3, 16 e 32 s para o experimento 4 e o valor de 32 s foi utilizado para o experimento 5. Para cada experimento, os resultados gráficos das curvas de resposta são mostrados nas Figura 40 a Figura 45, respectivamente.

Figura 40 – Dados de $h1$ coletados no Experimento 3.

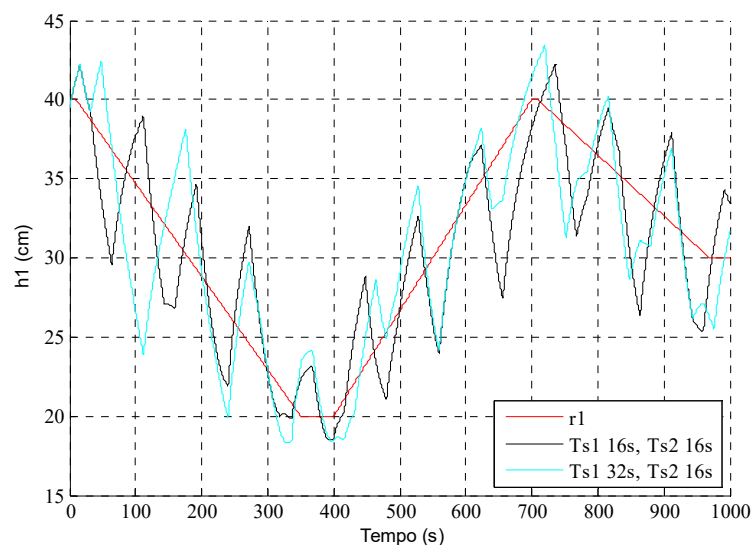


Fonte: Autoria Própria

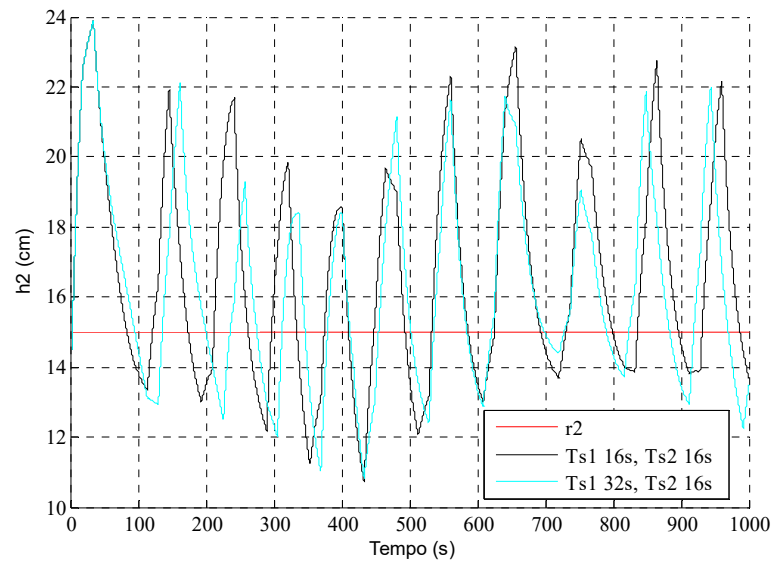
Figura 41 – Dados de h_2 coletados no Experimento 3.

Fonte: Autoria Própria

As curvas referentes à medição do nível no tanque 1 em relação ao perfil de setpoint (r_1), encontradas na Figura 40, Figura 42 e Figura 44 demonstram a mesma tendência dos experimentos 1 e 2, conforme esperado, quanto maior o período de amostragem do sensor 1 e do ciclo de execução do controlador, as curvas possuem a tendência de se tornar cada vez mais oscilatórias. Os gráficos nitidamente apontam que há incremento dos valores do $error_{RMS}$ e ITAE normalizado. Nota-se que ao executar a simulação com estes valores de período de amostragem o sistema torna-se oscilatório com tendência a desestabilização, tornando-se inviável a aplicação nestas condições.

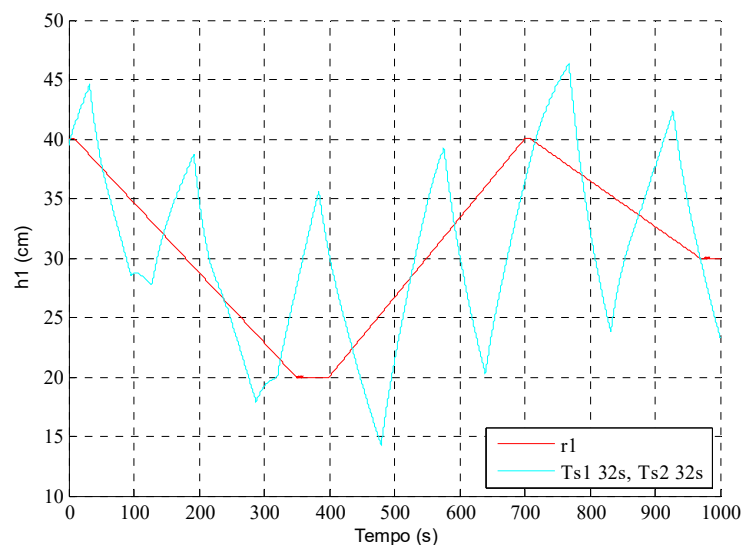
Figura 42 – Dados de h_1 coletados no Experimento 4.

Fonte: Autoria Própria

Figura 43 – Dados de h_2 coletados no Experimento 4.

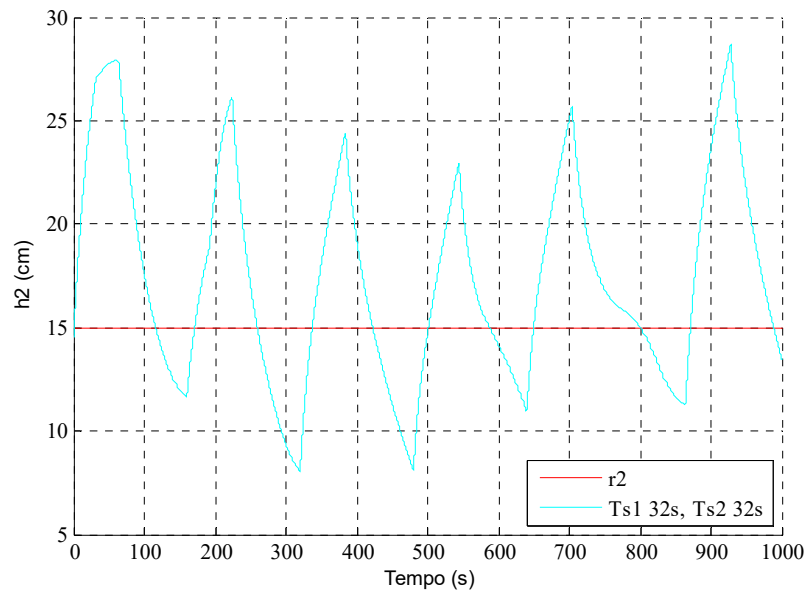
Fonte: Autoria Própria

As curvas referentes a medição do nível no tanque 2 em relação ao setpoint constante (r_2), encontradas na Figura 41, Figura 43 e Figura 45 quando comparadas entre si, apresentaram diferenças significativas entre os valores dos índices do $error_{RMS}$ e $ITAE$ normalizado. Grandes amplitudes de oscilação podem ser observadas nestas figuras para estes experimentos. Conforme constatado nas análises sobre a resposta do sistema em relação ao perfil de setpoint (r_2), observa-se uma influência direta na qualidade do controle no nível no tanque 2 quando a taxa de multi-rate do controlador MPC é aumentada, inviabilizando sua aplicação ao WNCS em análise.

Figura 44 – Dados de h_1 coletados no Experimento 5.

Fonte: Autoria Própria

Figura 45 – Dados de h2 coletados no Experimento 5.



Fonte: Autoria Própria

Os valores dos índices $error_{RMS}$ e do ITAE normalizado calculados para cada caso simulado nos experimentos 3, 4 e 5 são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Síntese de Resultados do WNCS com MPC-multi-rate para os Experimento 3,4 e 5.

Experimento	T_{S1} (s) - sensor1	T_{S2} (s) - MPC <i>multi-rate</i> + sensor2	Error _{RMS}		ITAE normalizado	
			h1	h2	h1	h2
3	8	8	1,770	1,532	0,292	0,273
	16	8	1,848	1,442	0,278	0,258
	32	8	2,526	1,445	0,387	0,255
4	16	16	3,363	3,407	0,541	0,605
	32	16	3,385	3,097	0,545	0,549
5	32	32	6,242	5,593	1,000	1,000

Fonte: Autoria própria

Os resultados para estes experimentos, apresentados na Tabela 10, apontam grande variação dos índices de desempenho quando comparados às demais simulações apresentadas nos experimentos 1 e 2 inviabilizando estes cenários para atual aplicação.

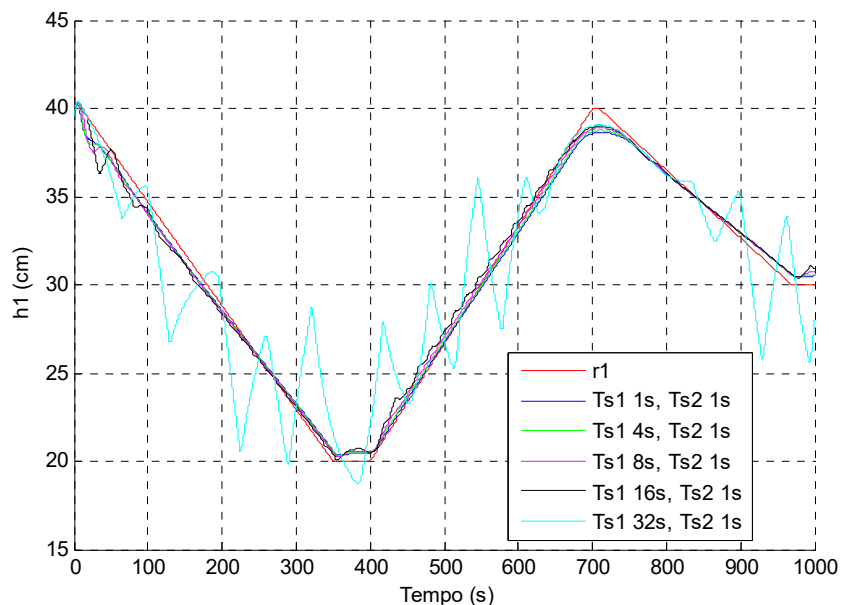
6.4 ANÁLISE NA PRESENÇA DE DISTÚRBIOS

Para verificar a robustez do controlador, foram propostas duas situações de operação do WNCS na presença de distúrbios. Os experimentos com distúrbios foram realizados variando-se o período de execução do MPC *multi-rate* e o período de amostragem do sensor 2 (T_{S2}) nos

valores de 1 e 4 s, não foram realizados experimentos na presença de distúrbios utilizando valores de amostragem de 8, 16 e 32 s para o sensor 2 visto que os experimentos 3, 4 e 5 apresentaram resultados inadequados para controle. Para o período de amostragem do sensor 1 (T_{S1}), os valores foram variados de 1, 4, 8, 16 e 32 s.

Na primeira situação as simulações foram realizadas na presença de um distúrbio senoidal de amplitude 30 ml/s com frequência de oscilação de 0,01 Hz na vazão de alimentação no tanque 1. Para este experimento, os resultados gráficos das curvas de resposta de h_1 e h_2 são mostrados na Figura 46, Figura 47, Figura 48 e Figura 49.

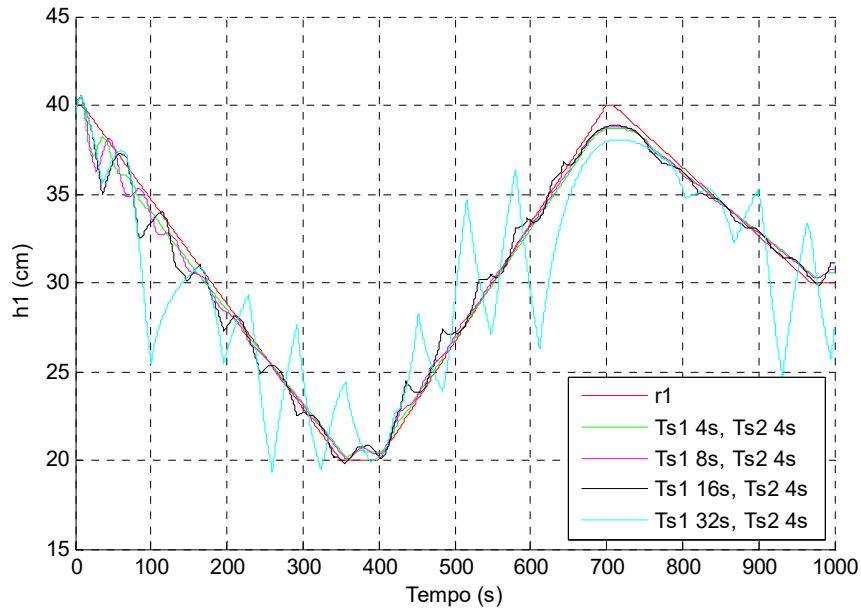
Figura 46 – Dados de h_1 coletados no Experimento com distúrbio senoidal no qual T_{S2} é 1 s.



Fonte: Autoria própria

As curvas referentes à medição do nível no tanque 1 em relação ao perfil de setpoint (r_1), encontradas na Figura 46 e Figura 47 demonstram que o controlador MPC multi-rate obteve boa resposta ao distúrbio senoidal inserido no sistema, excluindo-se o caso em que o valor de T_{S1} é 32 s. Nota-se que ao executar a simulação com estes valores de período de amostragem, o sistema demonstrou-se robusto, tornando-se viável a aplicação do WNCS nestas condições.

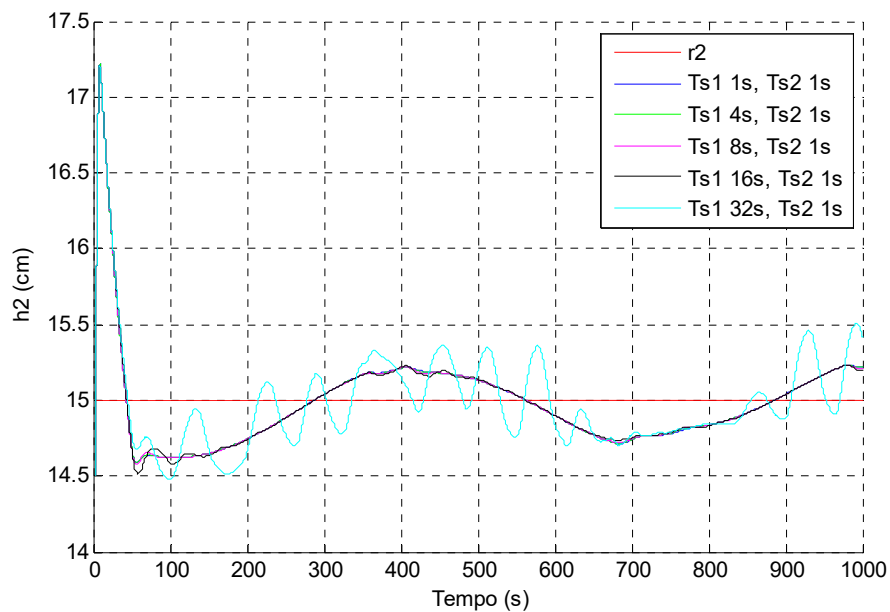
Figura 47 – Dados de h_1 coletados no Experimento com distúrbio senoidal no qual T_{S2} é 4s.



Fonte: Autoria própria

As curvas referentes à medição do nível no tanque 2 em relação ao setpoint constante (r_2), encontradas na Figura 48 e Figura 49, apresentam uma influência direta na qualidade do controle no nível no tanque 2 quando um distúrbio é adicionado a vazão do tanque 1. Isto é justificado devido ao acoplamento da dinâmica do sistema.

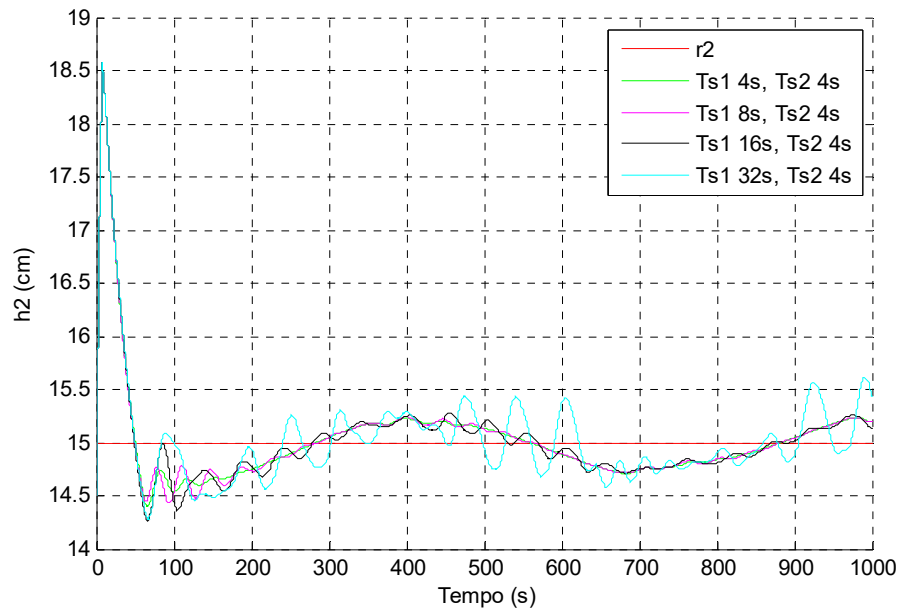
Figura 48 – Dados de h_2 coletados no Experimento com distúrbio senoidal no qual T_{S2} é 1s.



Fonte: Autoria própria

Nota-se, pela análise das Figura 48 e Figura 49, que ao executar a simulação com estes valores de período de amostragem excluindo-se o caso em que o valor de T_{S1} é 32 s, o sistema demonstrou-se robusto, apresentando somente uma pequena variação relacionada ao distúrbio introduzido, mas seguindo o sinal de referência.

Figura 49 – Dados de h_2 coletados no Experimento com distúrbio senoidal no qual T_{S2} é 4s.



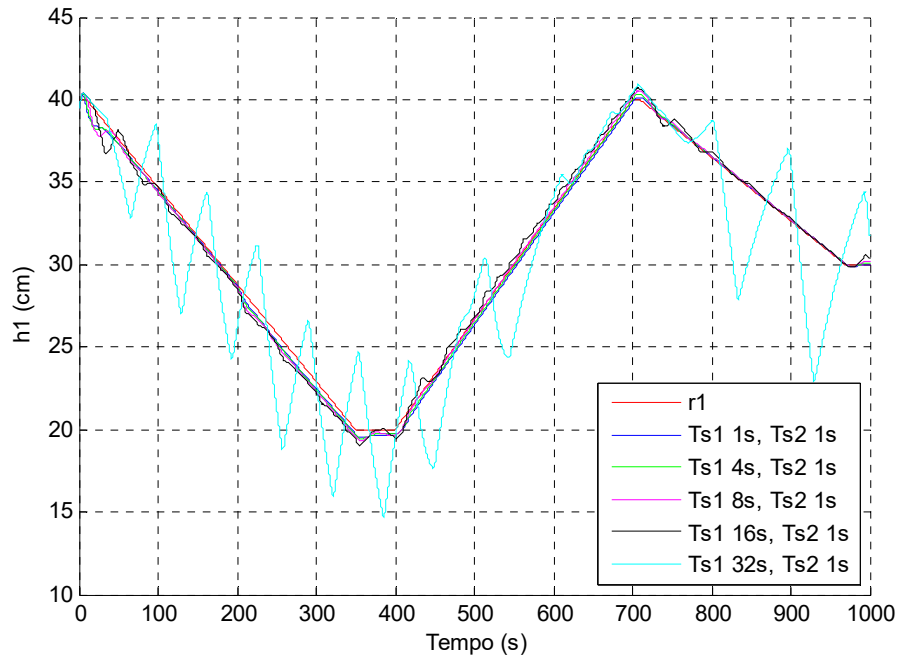
Fonte: Autoria própria

Outro cenário proposto para verificar a robustez do controlador é a situação de operação do WNCS na presença de distúrbios referente ao bloqueio do fluido que passa na válvula V_1 , acoplamento entre T_1 e T_3 , e a abertura da válvula V_4 , dreno do T_1 . O experimento foi conduzido na presença do distúrbio aplicado quando o tempo de simulação ultrapassa o valor de 200 s, a V_1 tem sua % de abertura reduzida de 100% a 30% e a V_4 têm sua % de abertura incrementada de 0% a 40% impactando na resposta do sistema devido a alteração da dinâmica do processo. Para esta situação, os resultados gráficos das curvas de resposta de h_1 e h_2 são apresentados na Figura 50 a Figura 53.

As curvas referentes à medição do nível no tanque 1 em relação ao perfil de setpoint (r_1), encontradas na Figura 50 e Figura 51 demonstram que o controlador MPC multi-rate obteve boa resposta ao distúrbio inserido no sistema. Nota-se que ao executar a simulação com estes valores de período de amostragem, o sistema demonstrou-se robusto para valores no qual T_{S1} é 1, 4 ou 8 s, tornando-se viável a aplicação do WNCS nestas condições. No entanto, ao simular o sistema com valores de T_{S1} igual a 16 ou 32 s, há maiores oscilações em

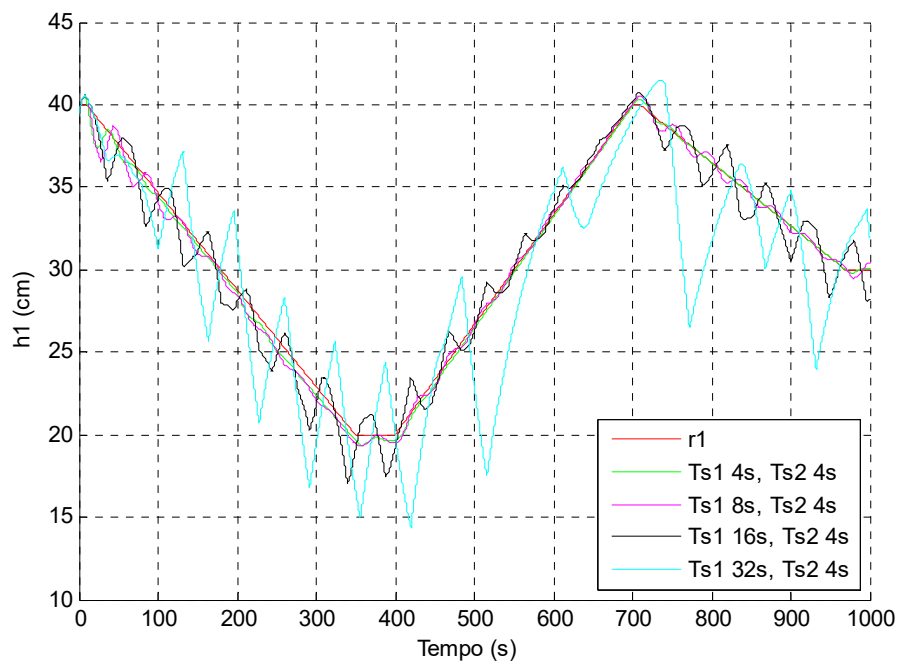
torno do sinal de referência, sendo que no experimento ao qual T_{S1} é 16 s e T_{S2} é 1 s ainda é aceitável, porém no cenário ao qual T_{S1} é 16 s e T_{S2} é 4 s ou T_{S1} é 32 s as respostas obtidas não são recomendadas.

Figura 50 – Dados de h_1 coletados no Experimento com distúrbios alterando as posições das válvulas de acoplamento e dreno do tanque no qual T_{S2} é 1s.



Fonte: Autoria própria

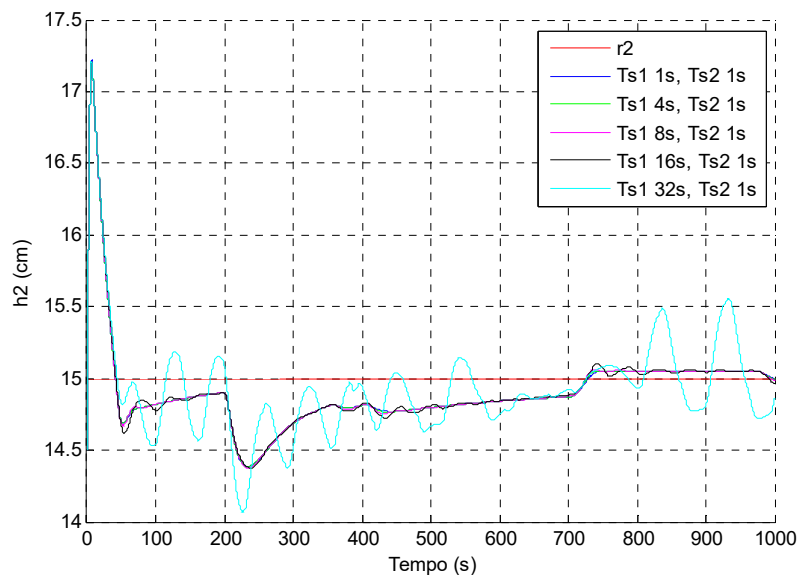
Figura 51 – Dados de h_1 coletados no Experimento com distúrbios alterando as posições das válvulas de acoplamento e dreno do tanque 1 no qual T_{S2} é 4s.



Fonte: Autoria própria

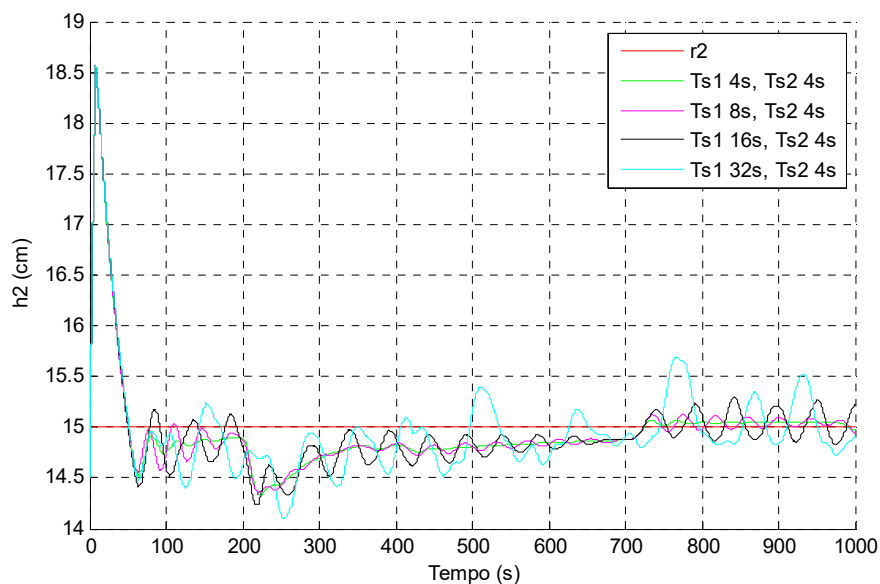
As curvas referentes à medição do nível no tanque 2 em relação ao setpoint constante (r_2), encontradas na Figura 52 e Figura 53, apresentam uma influência direta na qualidade do controle no nível no tanque 2 quando o distúrbio é adicionado ao tanque 1. Isto é justificado devido ao acoplamento da dinâmica do sistema. Nota-se que ao executar a simulação com estes valores de período de amostragem excluindo-se o caso em que o valor de T_{S1} é 32 s, o sistema demonstrou-se robusto, apresentando somente uma pequena variação relacionada ao distúrbio introduzido, mas seguindo o sinal de referência.

Figura 52 – Dados de h_2 coletados no Experimento com distúrbios alterando as posições das válvulas de acoplamento e dreno do tanque 1 no qual T_{S2} é 1s.



Fonte: Autoria própria

Figura 53 – Dados de h_2 coletados no Experimento com distúrbios alterando as posições das válvulas de acoplamento e dreno do tanque 1 no qual T_{S2} é 4s.



Fonte: Autoria própria

Os valores dos índices $error_{RMS}$ e do ITAE normalizado calculados para cada caso simulado nos experimentos com distúrbios são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Síntese de Resultados do WNCS com MPC-multi-rate na presença de distúrbios.

Experimento	T_{S1} (s) - sensor 1	T_{S2} (s) - MPC <i>multi-rate</i> + sensor 2	Error _{RMS}		ITAE normalizado	
			h1	h2	h1	h2
Com distúrbio - senoidal	1	1	0,474	0,272	0,076	0,049
	4	1	0,460	0,327	0,074	0,049
	8	1	0,472	0,327	0,076	0,049
	16	1	0,563	0,328	0,088	0,049
	32	1	2,410	0,354	0,336	0,056
	4	4	0,502	0,478	0,078	0,058
	8	4	0,571	0,478	0,082	0,057
	16	4	0,817	0,485	0,113	0,058
Com distúrbio - válvulas do tanque 1	32	4	2,706	0,509	0,393	0,068
	1	1	0,300	0,331	0,048	0,047
	4	1	0,295	0,331	0,044	0,047
	8	1	0,335	0,332	0,048	0,047
	16	1	0,481	0,334	0,075	0,048
	32	1	2,809	0,378	0,417	0,058
	4	4	0,350	0,481	0,048	0,055
	8	4	0,503	0,483	0,074	0,056
	16	4	1,164	0,499	0,180	0,062
32	4	3,372	0,527	0,502	0,071	

Fonte: Autoria própria

Os resultados apresentados na Tabela 11 apontam pouca variação do desempenho nos casos em que os períodos de amostragem para o sensor 1 são respectivamente 1, 4 e 8 s e amostragem para o sensor 2 são respectivamente 1 e 4 s. Os índices de desempenho mantiveram-se bem próximos atingindo boas respostas nestes cenários de distúrbios. No caso em que T_{S1} é 16 s os índices apresentam pior desempenho, porém a resposta nesta condição quando T_{S2} é 1 s ainda pode ser aceitável dependendo da aplicação. Nos casos em que T_{S1} é 32 s ou T_{S1} é 16 s e T_{S2} é 4 s, encontra-se maior variação dos índices de desempenho quando comparados às demais simulações inviabilizando este cenário na atual aplicação.

6.5 DISCUSSÃO DOS EXPERIMENTOS DE 1 A 5 E COM DISTÚRBIOS

Os experimentos propostos objetivaram verificar a viabilidade de aplicação da estratégia de controle MPC multi-rate para o WNCS desenvolvido. Os valores dos índices de

desempenho foram obtidos para cada situação aos quais diferentes taxas de amostragem foram utilizadas. Os resultados para estes experimentos apresentados na Tabela 12 são uma síntese dos experimentos para efeito comparativo.

Tabela 12 – Síntese dos Resultados dos Experimentos do WNCS com MPC multi-rate.

Experimento	T _{S1} (s) – sensor1	T _{S2} (s) – MPC <i>multi-rate</i> + sensor2	Error _{RMS}		ITAE normalizado	
			h1	h2	h1	h2
1	1	1	0,232	0,276	0,036	0,030
	4	1	0,233	0,281	0,034	0,030
	8	1	0,328	0,286	0,050	0,031
	16	1	0,605	0,290	0,094	0,031
	32	1	1,526	0,307	0,230	0,035
2	4	4	0,268	0,445	0,033	0,038
	8	4	0,436	0,453	0,053	0,038
	16	4	0,853	0,464	0,126	0,041
	32	4	2,268	0,503	0,350	0,060
3	8	8	1,770	1,532	0,292	0,273
	16	8	1,848	1,442	0,278	0,258
	32	8	2,526	1,445	0,387	0,255
4	16	16	3,363	3,407	0,541	0,605
	32	16	3,385	3,097	0,545	0,549
5	32	32	6,242	5,593	1,000	1,000
Com distúrbio - senoidal	1	1	0,474	0,272	0,076	0,049
	4	1	0,460	0,327	0,074	0,049
	8	1	0,472	0,327	0,076	0,049
	16	1	0,563	0,328	0,088	0,049
	32	1	2,410	0,354	0,336	0,056
	4	4	0,502	0,478	0,078	0,058
	8	4	0,571	0,478	0,082	0,057
	16	4	0,817	0,485	0,113	0,058
	32	4	2,706	0,509	0,393	0,068
Com distúrbio - válvulas do tanque 1	1	1	0,300	0,331	0,048	0,047
	4	1	0,295	0,331	0,044	0,047
	8	1	0,335	0,332	0,048	0,047
	16	1	0,481	0,334	0,075	0,048
	32	1	2,809	0,378	0,417	0,058
	4	4	0,350	0,481	0,048	0,055
	8	4	0,503	0,483	0,074	0,056
	16	4	1,164	0,499	0,180	0,062
	32	4	3,372	0,527	0,502	0,071

Fonte: Autoria própria

Estes experimentos iniciais não levaram em consideração a eficiência energética do sistema visto que o objetivo foi estudar e analisar o comportamento do WNCS com base na variação do período de amostragem dos sensores. O principal foco foi o estudo comparativo entre o número de acessos do sistema de controle ao transmissor e o índice de desempenho da malha de controle.

Através da Tabela 12 é possível notar que de forma geral, as análises realizadas sobre esta estratégia de controle MPC multi-rate apontam que o aumento do período de amostragem do sensor 1 e do ciclo de execução do controlador multi-rate tem influência no desempenho da malha de controle em um WNCS e no desempenho de controle das variáveis com dinâmicas acopladas, resultando em valores mais altos de $error_{RMS}$ e ITAE normalizado. Como pode ser observado, os experimentos com menores taxas de amostragens possuem melhores desempenhos de forma geral.

No entanto, ao se analisar o impacto (variação) nos índices de desempenho do $error_{RMS}$ e ITAE normalizado causado pela variação do período de amostragem do sensor 1 e pela variação do período de execução do controlador multi-rate, pode-se observar que existe a possibilidade de aumentar o período de amostragem do transmissor sem fio sem deteriorar significativamente o desempenho de controle do WNCS. Um exemplo é apresentado quando os resultados do experimento 2, com período de 4 s para ciclo de controle e para a amostragem de sensor 1, são comparados aos resultados do experimento 1 no qual o ciclo de controle é 1 s e período de amostragem do sensor 1 é de 8 s. Nestes cenários um menor erro para h_1 é obtido e maior eficiência energética no sistema pode ser obtida.

Adicionalmente, a robustez do controlador foi validada através de experimentos do WNCS aplicando distúrbio senoidal no fornecimento de água e pela modificação da posição das válvulas de T_1 . Com os resultados obtidos através do experimento com distúrbio senoidal, foi possível verificar que o WNCS apresentou pouca variação nos índices de $error_{RMS}$ e ITAE normalizado quando comparado ao experimento sem distúrbio. Os resultados encontrados no experimento com distúrbio baseado na alteração da posição das válvulas de T_1 quando comparados aos experimentos realizados utilizando a mesma faixa de período de amostragem também apresentaram pouca variação nos índices de desempenho.

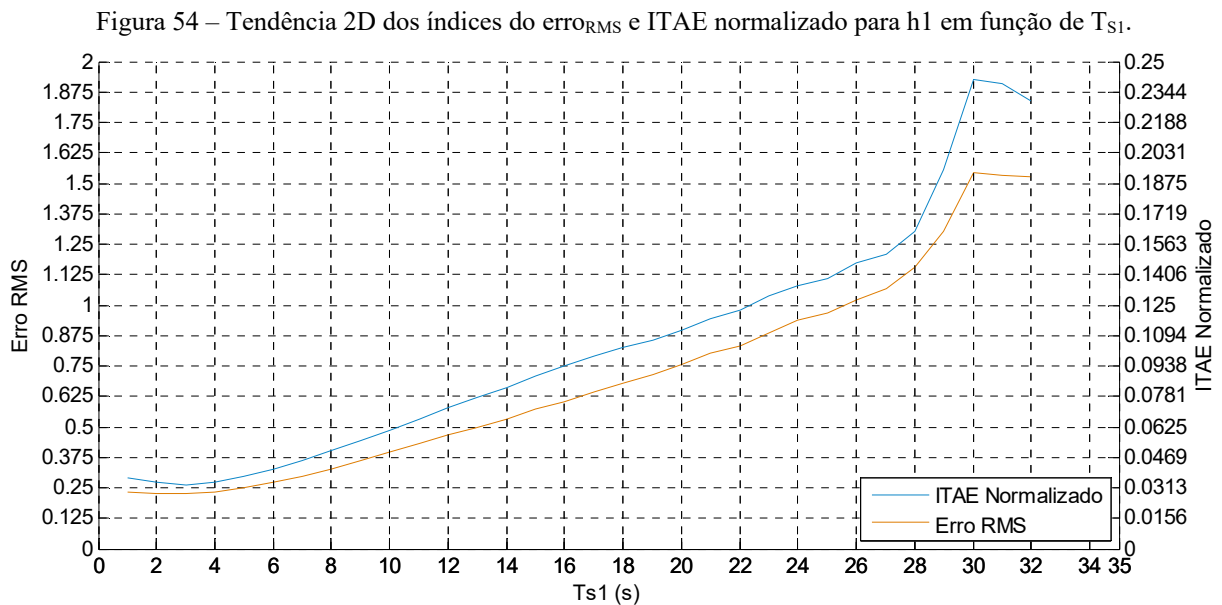
6.6 ANÁLISE DOS LIMITES OPERACIONAIS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para a análise dos limites operacionais do WNCS operando com o controlador MPC *multi-rate*, diversas simulações foram realizadas abrangendo todos os possíveis períodos de

amostragem dos sensores e os índices de desempenho foram levantados para cada cenário proposto. O Anexo A apresenta todos os cenários identificados e os valores dos índices de desempenho foram coletados em cada uma das simulações e utilizados nesta seção para a análise dos limites operacionais.

Tendência do $error_{RMS}$ e ITAE normalizado vs Período de amostragem T_{S1}

A análise da tendência dos índices do $error_{RMS}$ e ITAE normalizado em função do período de amostragem dos sensores em um WNCS foi utilizada para apresentar os limites operacionais do sistema. A Figura 54 apresenta as curvas dos índices de desempenho do controlador MPC multi-rate referente ao controle de nível do T_1 em função da variação do parâmetro T_{S1} mantendo-se constante o valor T_{S2} em 1 s.



Fonte: Autoria própria

As curvas da Figura 54 apresentam quatro regiões com diferentes comportamentos conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Análise dos índices de desempenho com base em T_{S1} .

T_{S1} (s)	Análise da variação dos índices de desempenho
1 – 5	Mínima
5 – 27	Linear
27 – 30	Exponencial
30 – 32	Não uniforme

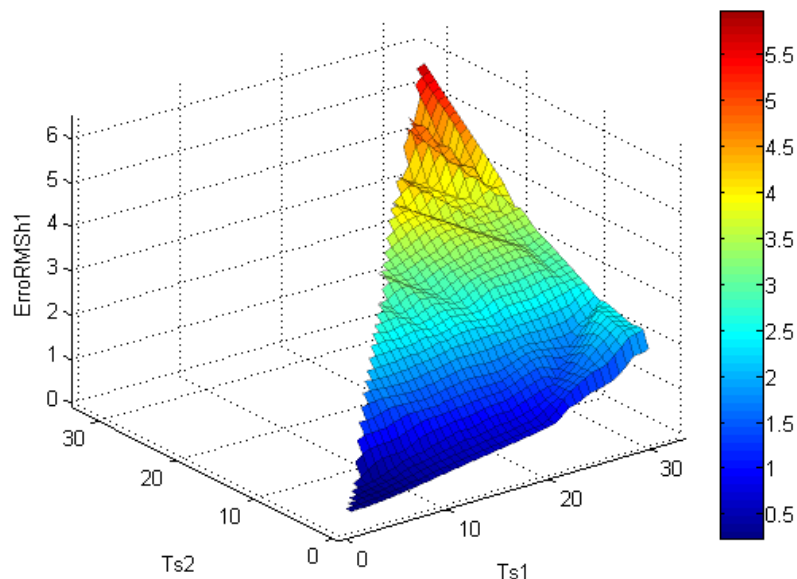
Fonte: Autoria própria.

As curvas apresentadas na Figura 54 e os resultados apresentados na Tabela 13 demonstram diferentes comportamentos quando a análise por região é realizada. Ao incrementar T_{S1} nota-se que as curvas dos índices $error_{RMS}$ e ITAE normalizado possuem a mesma tendência. Em um primeiro instante há uma mínima variação nos índices, logo após, estes possuem um comportamento linear e em seguida exponencial. Finalmente, o sistema possui um comportamento não uniforme devido as grandes oscilações da variável de processo em torno da curva de referência.

Esses resultados sugerem que os limites aceitáveis dos índices de $error_{RMS}$ e ITAE normalizado nestas condições devem ser aproximadamente menores que 1,067 ou 0,151 respectivamente, pois, após exceder estes patamares, os índices resultam em baixa performance do controlador e também se encontram na região de crescimento exponencial ou não uniforme, mantendo-se os índices dentro dos limites proposto é esperado que o sistema opere com performance adequada.

De forma geral, realizou-se algumas investigações sobre o comportamento dos índices de desempenho em função do período de amostragem dos sensores. A Figura 55 e a Figura 56 apresentam as curvas dos índices do $error_{RMS}$ e ITAE normalizado do controlador do T_1 em função das variações dos parâmetros T_{S1} e T_{S2} . A Figura 55 confirma o comportamento apresentado anteriormente pelos experimentos de 1 a 5, portanto, aumentando os períodos de amostragem dos sensores, T_{S1} e T_{S2} , do sistema o resultado do índice $error_{RMS}$ também tende a aumentar reduzindo a qualidade de controle do sistema.

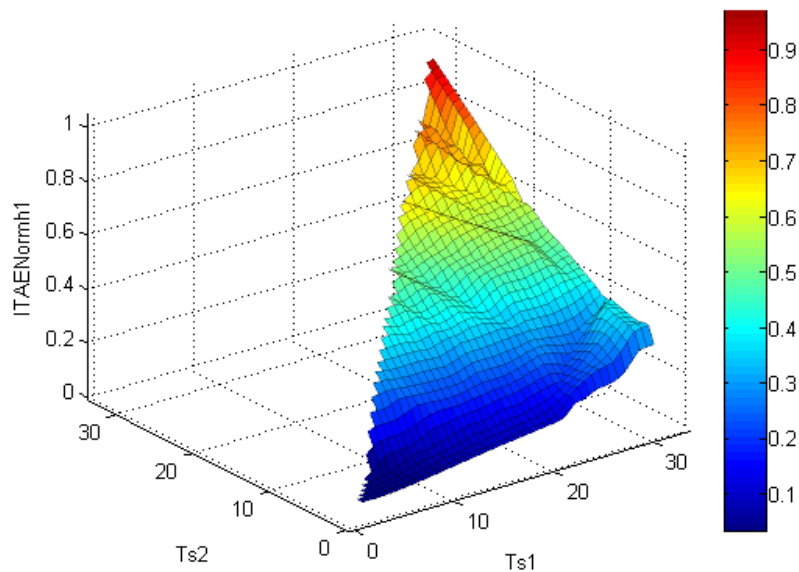
Figura 55 – Tendência 3D dos índices do $error_{RMS}$ para h_1 em função de T_{S1} e T_{S2} .



Fonte: Autoria própria

A Figura 56 apresenta a curva do índice ITAE normalizado do controlador do T_1 em função das variações dos parâmetros T_{S1} e T_{S2} . Os resultados encontrados neste gráfico são similares aos encontrados na Figura 55. Aumentando-se os períodos de amostragem dos sensores, T_{S1} e T_{S2} , do sistema os resultados do índice ITAE normalizado também tendem a aumentar, conseqüentemente, reduz o desempenho de controle do sistema.

Figura 56 – Tendência 3D dos índices do ITAE normalizado para h_1 em função de T_{S1} e T_{S2} .



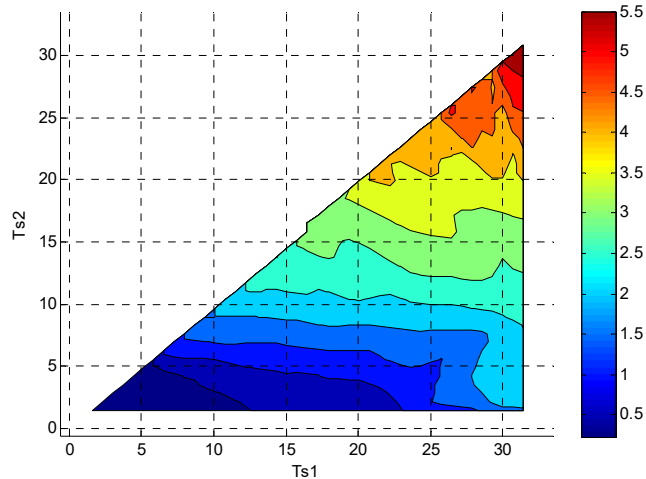
Fonte: Autoria própria

As curvas de nível apresentadas pela Figura 57 e Figura 58 mostram os valores dos índices $error_{RMS}$ e ITAE normalizado e através destas são identificadas as regiões de interesse que abrangem os resultados nos quais os índices de desempenho se encontram dentro dos limites propostos: $error_{RMS}$ menor que 1,067 ou ITAE normalizado menor que 0,151. Portanto é possível analisar as regiões de melhor operação para o WNCS proposto.

A Figura 57 é apresentada através de curvas de nível, no qual as cores frias representam baixos valores dos índices de desempenho do $error_{RMS}$ e conforme aumenta-se os períodos de amostragem dos sensores as curvas passam por cores intermediárias e finalmente transformam-se em cores quentes, que representam os maiores valores dos índices de desempenho representando baixo desempenho de controle ou instabilidade. A região de interesse do WNCS em análise é apresentada pelas duas primeiras faixas e parte da terceira faixa azul da Figura 57, nos quais os maiores períodos de amostragem aceitáveis para o sensor 1 é 27 s e para o sensor 2 é 1 s, ou a combinação do sensor 1 e sensor 2 com períodos de amostragem

equivalentes a 6 s, este último apresentando a máxima economia do sistema visto que a bateria dos sensores será consumida na mesma taxa.

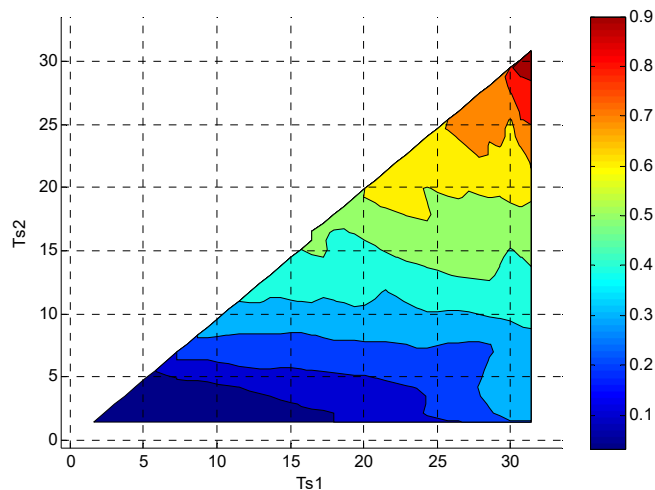
Figura 57 – Tendência 2D com nível dos índices do erro_{RMS} para h1 em função de T_{S1} e T_{S2} .



Fonte: Autoria própria

A Figura 58 segue o mesmo padrão de representação da Figura 57, a região de interesse do WNCS proposto quando analisado o índice de desempenho do ITAE normalizado é apresentada pela primeira e parte da segunda faixa da Figura 58, nos quais os maiores períodos de amostragem aceitáveis para o sensor 1 é 27 s e para o sensor 2 é 1 s, ou a combinação do sensor 1 e sensor 2 com períodos de amostragem equivalentes a 6 s, este último apresentando a máxima economia do sistema visto que a bateria dos sensores será consumida na mesma taxa.

Figura 58 – Tendência 2D com nível dos índices do ITAE normalizado para h1 em função de T_{S1} e T_{S2} .



Fonte: Autoria própria

Análise da eficiência energética

A análise da eficiência energética baseou-se em simulações realizadas com o objetivo de investigar a economia de bateria dos dispositivos sem fio que transmitem dados através da rede *wireless* do WNCS. Para isso, simulações foram realizadas, variando-se o período de amostragem do sensor 2 em conjunto com o ciclo de execução do controlador MPC *multi-rate* e também o período de amostragem do sensor 1. Dentre todos os resultados das simulações encontrados no Anexo A, selecionaram-se os com as condições limites aceitáveis dos índices de $error_{RMS}$ e ITAE normalizado (menores que 1,067 ou 0,151 respectivamente) e excluíram-se os cenários intermediários (cenários que não possuem períodos de amostragem iguais ou não possuem maior valor possível de amostragem, casos de menor eficiência energética dentro de uma faixa), e mediu-se o consumo de cada um dos elementos que transmitem dados pela rede *wireless* do WNCS.

Para a medição do consumo energético nestas simulações, utilizou-se as informações disponibilizadas através do bloco TrueTime *Battery* conectada aos sensores e ao controlador MPC *multi-rate*. A Tabela 14 apresenta o consumo teórico dos elementos de controle em um WNCS, particionando-se o consumo de cada componente que o compõe. Conforme WEN et al. (2007), observa-se que o radio é responsável por 50% do consumo de energia do WNCS sendo que os outros 50% da energia é consumida através de sensoriamento, microprocessamento, armazenamento de dados (*loggings*) e atuação.

Tabela 14 – Consumo teórico dos elementos de controle em um WNCS.

Componente	Consumo de Energia (%)
Radio	50
Microprocessador	30
Sensor	10
Loggings e Atuação	10

Fonte: Adaptado de (WEN *et al.*, 2007).

A Tabela 15 apresenta o consumo energético, em mW (J/s), e o tempo de duração, em ms (milissegundos), de cada uma das funções/atividades executadas pelo sensor (microcontrolador mais módulo de comunicação sem fio) do WNCS (DIGI, 2016; CASILARI *et al.*, 2010; MANSANO *et al.*, 2014). As funções definidas para o sensor são: idle (sensor ativo e em estado de espera), sleep (sensor inativo e em estado de baixo consumo de energia), medição (sensor ativo e com processamento das ações de medição da variável analógica e conversão A/D) e transmissão de 2 bytes de dados (sensor e rádio de comunicação ativos e

realizando a transmissão da medição do nível do tanque no formato de 16 bits). Para o cômputo dos valores relacionados à comunicação sem fio, foi utilizado o módulo S2B (Series 2 Model B) da Digi International (DIGI, 2016). O valor do tempo de duração da atividade está associado ao parâmetro Exectime do TrueTime configurado na atividade realizada. Para os casos do sensor em idle e sleep (parâmetro Exectime = -1), este tempo ou duração depende do valor de período de amostragem do sensor que está sendo utilizado. Por exemplo, para um período de amostragem de 4 s, o sensor executa as funções de medição (1 ms) e transmissão de dados (18 ms) e permanece em idle ou sleep até o início do próximo ciclo de amostragem. (4 s menos 19 ms).

Tabela 15 – Consumo do sensor com base no módulo XBee dividido por função.

Função	Consumo (mW)	Duração/Exectime (ms)
Sleep	26,4	-1
Idle	72,6	-1
Medição	82,5	1
Transmissão de 2 bytes de dados	693,0	18

Fonte: Adaptado de (DIGI, 2016, CASILARI *et al.*, 2010, MANSANO *et al.*, 2014)

A Tabela 16 apresenta o consumo energético e o tempo de duração de cada uma das funções executadas pelo controlador do WNCS utilizando o módulo XBee S2B (Series 2 Model B) quando as funções idle, processamento e transmissão de 2 bytes de dados (transmissão do sinal de controle para o atuador no formato de 16 bits) são executadas (DIGI, 2016, CASILARI *et al.*, 2010, MANSANO *et al.*, 2014). A função processamento corresponde às tarefas relacionadas com a execução do algoritmo de controle (MPC multi-rate) pelo controlador.

Tabela 16 – Consumo do controlador com base no módulo XBee dividido por função.

Função	Consumo (mW)	Duração/Exectime (ms)
Idle	72,6	-1
Processamento	99,0	5
Transmissão de 2 bytes de dados	693,0	18

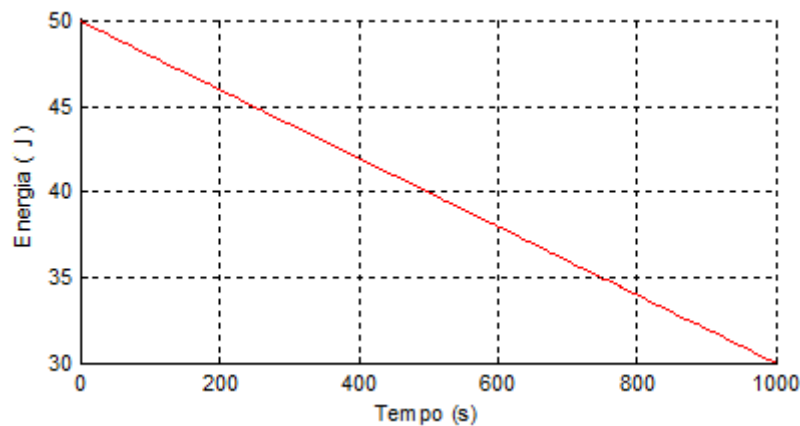
Fonte: Adaptado de (DIGI, 2016, CASILARI *et al.*, 2010, MANSANO *et al.*, 2014)

O consumo dos atuadores do WNCS não foi levado em consideração, pois estes não transmitem dados através da rede *wireless*, somente recebem os sinais de controle enviados pelo controlador MPC *multi-rate*. Vale reforçar que o foco deste trabalho busca o aumento da eficiência energética em WNCS através da redução do consumo de energia dos elementos de

rede, de forma que reduzindo a quantidade do fluxo de informação através da redução da transmissão dos dados pela rede *wireless*, consequentemente o sistema torna-se mais eficiente considerando-se o quesito energético (MANSANO; GODOY; PORTO, 2014).

O gasto energético dos dispositivos do WNCS medido nas simulações realizadas caracteriza-se pela diferença entre a carga de energia inicial e o valor da carga final medido na saída do bloco TrueTime Battery. A operação deste bloco Battery foi mantida de acordo com a função padrão da ferramenta TrueTime, a qual corresponde à integral, durante o tempo de simulação, do parâmetro de consumo energético (mW) pelo tempo de duração da atividade realizada. Por exemplo, sendo o parâmetro de consumo energético de um sensor configurado em 10mW, têm-se que o valor final, da saída do bloco, é representado pela diferença da carga inicial da bateria e a integral do parâmetro de consumo energético (10mW) pelo tempo de simulação. O parâmetro de consumo energético pode ser alterado ao longo da simulação com base no estado atual do elemento de rede ao qual pode ser sleep, idle (sem atividade), medição, transmissão ou processamento. A Figura 59 apresenta um exemplo do comportamento da saída do bloco TrueTime Battery ao longo do tempo, o qual mostra o consumo de energia do dispositivo a longo do tempo de simulação.

Figura 59 – Consumo de energia utilizando o block TrueTime Battery.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 17 apresenta o gasto energético dos dispositivos de rede (Sensores e controlador MPC *multi-rate*) e o consumo energético geral do WNCS, com foco nos dispositivos que transmitem dados. Os valores de consumo energético para os sensores foram obtidos com base nos dados fornecidos pela Tabela 15, o consumo energético do controlador foi obtido com base nos dados fornecidos pela Tabela 16 e finalmente o consumo geral do

WNCS foi calculado para cada caso. Os resultados foram analisados numericamente através do cálculo da eficiência do WNCS, calculado como a relação em porcentagem entre o consumo do WNCS no cenário em análise e o maior valor de consumo energético do sistema, caso em que os elementos de rede operam com a taxa de amostragem equivalente a 1 s. Portanto, a maior eficiência energética obtida para o WNCS é aquele que possui o maior valor em %, sendo que a eficiência do WNCS é apresentada pela última coluna (Eficiência) da Tabela 17.

Tabela 17 – Síntese dos resultados do consumo do WNCS com filtro nos limites dos índices de desempenho.

T _{S1} (s)	T _{controlador, S2} (s)	Consumo Energético em 1000 s				Eficiência
		Sensor ₁ (J)	Sensor ₂ (J)	Controlador (J)	WNCS (J)	WNCS (%)
1	1	38,795	38,795	84,579	162,168	0,000
27	1	26,871	38,795	84,579	150,245	7,352
2	2	32,597	32,597	78,589	143,784	11,336
22	2	26,970	32,597	78,590	138,157	14,806
3	3	30,540	30,540	76,601	137,681	15,100
21	3	26,995	30,540	76,601	134,136	17,286
4	4	29,499	29,499	75,595	134,592	17,005
20	4	27,020	29,499	75,595	132,113	18,533
5	5	28,879	28,879	74,996	132,754	18,138
10	5	27,639	28,879	74,996	131,514	18,903
6	6	28,470	28,470	74,601	131,540	18,886

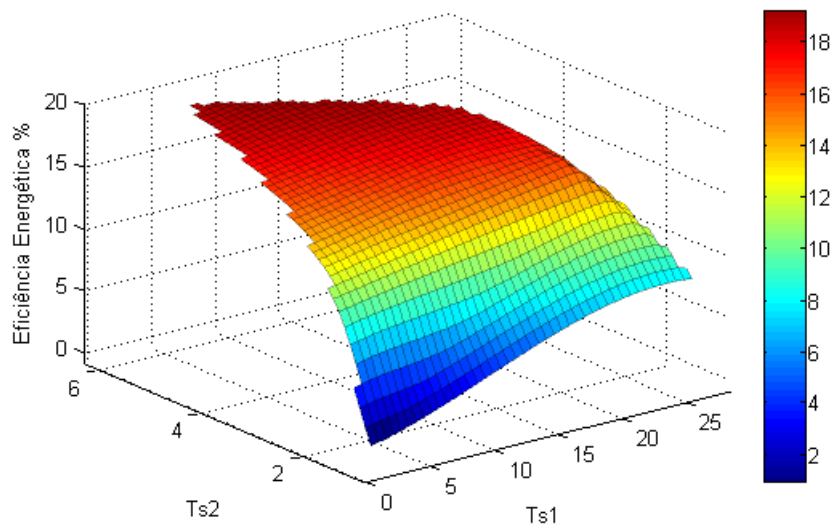
Fonte: Autoria própria

Os resultados encontrados nas simulações confirmam que diminuindo a frequência de amostragem/transmissão de dados na rede sem fio pelos dispositivos de rede é possível aumentar a eficiência energética do WNCS dentro das faixas aceitáveis de desempenho de controle. Comparando-se as duas últimas linhas das Tabela 17, nota-se que a diferença do consumo geral do WNCS nestas situações pode ser considerada como nula. Portanto, para um caso prático de aplicação deste WNCS com o controlador MPC *multi-rate*, a melhor estratégia de amostragem seria obtida com o sensor 2 e o ciclo de execução do controlador MPC *multi-rate* amostrando e transmitindo os dados a cada 6 s e o período de amostragem do sensor 1 também com a mesma taxa de 6 s. Isso é justificado pelo fato de nesse caso a manutenção ou parada do sistema de controle para realizar a troca das baterias do sensores poderem ser realizadas ao mesmo tempo, sem a necessidade de múltipla intervenções no processo para

substituição intercalada das baterias dos transmissores wireless (primeiramente para substituir a bateria do sensor 2 e após algum tempo a do sensor 1).

A Figura 60 apresenta a curva de eficiência energética do WNCS em função das variações dos parâmetros T_{S1} e T_{S2} utilizando-se os dados da Tabela 17. Aumentando os períodos de amostragem dos sensores, T_{S1} e T_{S2} , do sistema obtém-se maior eficiência energética.

Figura 60 – Tendência 3D da eficiência energética em função de T_{S1} e T_{S2} .



Fonte: Autoria própria

A Tabela 18 apresenta o gasto energético dos dispositivos de rede (Sensores e controlador MPC *multi-rate*) e o consumo energético geral do WNCS, alterando-se somente a função de operação do sensor do modo sleep para idle. Os resultados também foram analisados numericamente através do cálculo da eficiência do WNCS conforme apresentado anteriormente.

Tabela 18 – Resultado do consumo do WNCS alterando a função sleep pela idle nos sensores.

T_{S1} (s)	$T_{\text{controlador, } S2}$ (s)	Consumo Energético em 1000 s				Eficiência
		Sensor ₁ (J)	Sensor ₂ (J)	Controlador (J)	WNCS (J)	WNCS (%)
6	6	74,523	74,523	74,601	223,647	-37,911

Fonte: Autoria própria

O resultado encontrado nesta última simulação mostra que há grande diferença (38%) entre a utilização dos modos sleep e idle para os sensores, e confirma que se utilizando a função sleep é possível aumentar ainda mais a eficiência energética do WNCS.

6.7 DISCUSSÃO DOS LIMITES OPERACIONAIS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Os resultados apresentados nas simulações do WNCS proposto apontam através da Figura 54 que os limites dos índices $error_{RMS}$ e ITAE normalizado aceitáveis para estabilidade do WNCS são menores que 1,067 ou 0,151 respectivamente. A faixa de trabalho recomendável do WNCS pode ser visualizada pelas duas primeiras faixas e parte da terceira faixa azul das curvas de nível para o $error_{RMS}$ mostradas na Figura 57. Considerando o ITAE normalizado, a faixa de trabalho recomendável do WNCS pode ser visualizada pela primeira faixa e parte da segunda faixa azul mostradas na Figura 58, mostrando certa flexibilidade na escolha da taxa de variação do sistema em relação aos índices de desempenho.

Os resultados encontrados nas simulações de eficiência energética através do toolbox TrueTime e mostrados nas Tabela 17 e Tabela 18, confirmam que diminuindo a taxa de transmissão de dados na rede sem fio dos dispositivos de rede é possível aumentar a eficiência energética do WNCS em até 19%, dentro de faixas aceitáveis de desempenho de controle. Os resultados mostram que a condição ótima de operação, em termos de eficiência energética, para o WNCS com o controlador MPC multi-rate é obtida com a configuração dos períodos de amostragem dos sensores e ciclo de execução do controlador operando com 6 s.

Como pode também ser verificado na Tabela 6 (EMERSON, 2015), caso prático real, 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. Portanto, pode-se afirmar que, ao aumentar o período de amostragem dos sensores 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 MPC multi-rate desenvolvido apresenta resultados de 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.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um controlador preditivo *multi-rate* baseado em modelo (MPC) a fim de controlar um sistema multivariável e não linear com o objetivo principal de aumentar a eficiência energética do WNCS. Os resultados dos experimentos realizados possibilitaram analisar o desempenho do controlador MPC *multi-rate* e observar a influência do aumento do período de amostragem e transmissão de dados dos dispositivos sem fio do WNCS. Adicionalmente, foi possível determinar a taxa de amostragem de operação do sistema no qual o WNCS possui excelente compromisso entre qualidade de controle e eficiência energética.

Os experimentos, com variação do período de amostragem do sensor 1 entre 1 e 16 s e do sensor 2 entre 1 e 4 s (experimentos 1 e 2), validaram que a eficiência energética do WNCS pode ser melhorada sem comprometer significativamente a qualidade de controle do WNCS. O oposto acontece nos experimentos com variação do período de amostragem para o sensor 2 entre 8 e 32 s (experimentos 3, 4 e 5). Nestes experimentos, os resultados dos índices de desempenho propostos foram bastante elevados, ocasionando um alto grau de degradação na qualidade de controle do WNCS dentro destas faixas de amostragem, consequentemente tornando o controle bastante oscilatório e tendendo a instabilidade. Dessa forma, verificou-se que a operação do WNCS com o controlador MPC *multi-rate* não é recomendada utilizando períodos de amostragem do sensor 2 e do controlador maiores do que 8s.

Os experimentos realizados com o WNCS operando na presença de distúrbios, como a inclusão de um distúrbio senoidal na alimentação do tanque 1 e na modificação do setup operacional da planta (experimento referente a alteração da posição das válvulas do tanque 1), apresentaram bons resultados para os índices de desempenho $error_{RMS}$ e ITAE normalizado e demonstraram que o MPC *multi-rate* fornece robustez para os cenários de operações do WNCS próximos da realidade. Os índices de desempenho apontaram a capacidade de manter o WNCS estável e com desempenho de controle adequado com altos períodos de amostragem e na presença de distúrbios (caso no qual a taxa de amostragem do sensor 1 foi variada entre 1, 4, 8 e 16 s e a do sensor 2 variada em 1 e 4 s). No entanto, verificou-se que a qualidade de controle do WNCS não foi satisfatória para os casos na presença de distúrbios nos quais as amostragens dos sensores 1 e 2 são maiores, respectivamente, do que 16 s e 4 s.

Na análise de viabilidade do uso do controlador MPC *multi-rate*, os resultados encontrados para os índices de desempenho $error_{RMS}$ e ITAE normalizado 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 MPC operando em *multi-rate*. Nesse sentido, verificou-se a possibilidade de aumento do período de amostragem do transmissor sem fio do WNCS até 16 s, executando-se o ciclo de controle multi-rate a cada 4s (valor que seria compatível com dados de um transmissor real).

As simulações realizadas permitiram identificar os limites operacionais para aplicação adequada do controlador MPC multi-rate ao WNCS. Tais limites estabelecem que os índices de desempenho $error_{RMS}$ e ITAE normalizado devem ser menores que 1,067 ou 0,151 respectivamente. Esses limites operacionais relacionados aos índices de desempenho foram encontrados usando gráficos de curvas de nível (3D e 2D) que apresentam a relação entre os índices de desempenho e os períodos de amostragem do sensor 1 (T_{s1}) e do controlador MPC multi-rate (e também do sensor 2 – T_{s2}). Esses gráficos de curva de nível mostraram que valores acima dos limites acarretam em perda acentuada do desempenho de controle e tendência de desestabilização do WNCS.

Considerando o intervalo operacional de valores limites dos índices de desempenho estabelecidos, foram encontrados os valores ótimos de compromisso entre o período de amostragem dos sensores e a eficiência energética do WNCS operando com o controlador MPC multi-rate. A configuração ótima de eficiência energética para o WNCS é obtida quando os períodos de amostragem dos dispositivos do sistema (sensores e controlador) operam a 6 s, proporcionando a melhor qualidade de controle para o WNCS com o menor gasto energético. Esta configuração ótima, quando comparada à configuração inicial de 1 s para os períodos de amostragem dos elementos do sistema, demonstra que o WNCS proposto possui a capacidade de operar reduzindo o consumo energético do sistema em até 19%, mantendo qualidade de controle e estabilidade adequados. Adicionalmente, os resultados das simulações relacionados à questão da eficiência energética mostraram que a implementação do modo de operação em sleep para os sensores sem fio do WNCS proporcionam uma economia do gasto energético de 38% em relação ao gasto total com os sensores em modo idle.

Finalmente, os resultados coletados comprovaram que o controlador MPC *multi-rate* aplicado ao WNCS apresentou a capacidade de manter a estabilidade e desempenho de controle adequados ao WNCS com altos períodos de amostragem e na presença de distúrbios. Estes resultados demonstram que o controlador MPC *multi-rate* aplicado a um WNCS é viável e permite incrementar a eficiência energética do sistema.

Sugere-se como trabalho futuro a implementação real desta técnica ao sistema dos três tanques acoplados para validação da estratégia em plataforma real e para efeito comparativo com a plataforma de simulação.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKERBERG, J.; GIDLUND, M.; BJORKMAN, M. Future research challenges in wireless sensor and actuator networks targeting industrial automation. In: **9th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)**, Lisboa. 2011, p. 410-415. ISSN 1935-4576, 2011.

AMIRA. DTS200 Laboratory Setup Three-Tank-System. Duisburg, 2002. Disponível em: < http://www.utm.mx/~jvasquez/tanques_lab.pdf >. Acesso em: 22 Jan. 2017.

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

ANDRADE, Y. S.; MANSANO, R. K.; GODOY, E. P.; PORTO, A. J. V. Evaluation of Aperiodic Control for Energy Saving in Wireless Networked Control Systems. In: **12th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (IEEE INDUSCON 2016)**, 2016, Curitiba. Brasil: IEEE, 2016.

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

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.

BLEVINS, T.; CHEN, D.; NIXON, M.; WOJSZNIS, W. **Wireless Control Foundations: Continuous and Discrete Control for the Process Industry**. USA: International Society of Automation, 2015.

BLEVINS, T.; NIXON, M.; WOJSZNIS, W. PID control using wireless measurements. In: **American Control Conference**, 2014. 2014, p. 790-795.

CARLOS, R. P. **Implantação de otimizador *online* acoplado ao controle preditivo (MPC) de coluna de Tolueno**. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-14122001-123029/pt-br.php> >. Acesso em: 22 Jun. 2017.

CASILARI, E.; CANO-GARCÍA, J.M.; CAMPOS-GARRIDO, G. Modeling of Current Consumption in 802.15.4/ZigBee Sensor Motes. **Sensors**, v. 10, p. 5443-5468, 2010.

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. 2011. ISBN 978-1-61804-056-5

CERVIN, A.; HENRIKSSON, D.; OHLIN, A. TrueTime 2.0 – Reference Manual. Lund, 2016. Disponível em: < <http://www.control.lth.se/truetime/> >. Acesso em: 22 Jan. 2017.

CERVIN, A.; HENRIKSSON, D.; LINCOLN, B.; EKER, J.; ÅRZÉN, K.E. How Does Control Timing Affect Performance? Analysis and Simulation of Timing Using Jitterbug and TrueTime. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 23, n. 3, p. 16–30, 2003.

DARBY, M. L.; NIKOLAOU, M. MPC: Current practice and challenges. **Control Engineering Practice**, v. 20, n. 4, p. 328-342, 2012. ISSN 0967-0661.

DE CASTRO, N. C. **Energy-Aware Control and Communication Co-Design in Wireless Networked Control Systems**. Tese (Doutorado), Universidade de Grenoble, Grenoble, 2012. Disponível em: < www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr/~carlos.canudas-de-wit/.../Cardoso-de-Castro.pdf >. Acesso em: 22 Jan. 2017.

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

DIGI. ZigBee RF Modules. 2016. Disponível em: < <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf> >. Acesso em: 21 Abr. 2017.

EMERSON. “Emerson Process Management Power Module Life Estimator”. 2015. Disponível em: < <http://www3.emersonprocess.com/rosemount/powermodulelifecalculator/default.aspx> >. Acesso em: 22 Jan. 2017.

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

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. **IEEE, Communications Surveys & Tutorials**, v. 15, n. 2, p. 860-880, 2013. ISSN 1553-877X.

GODOY, E. P. **Desenvolvimento de Sistemas de Controle via Rede (NCS) para Aplicações em Redes com Protocolo CAN**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: < http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18145/tde-11052011-094711/publico/Tese_Definitiva_EPG_2011.pdf >. Acesso em: 22 Jan. 2017.

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

HAN, S.; ZHU, X.; MOK, A. K.; CHEN, D., NIXON, M. Reliable and Real-Time Communication in Industrial Wireless Mesh Networks. In: **IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium**, Chicago, IL, 2011. p. 3-12.

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.

LI, H.; SHI, Y. Output feedback predictive control for constrained linear systems with intermittent measurements. **Systems & Control Letters**, v. 62, n. 4, p. 345-354, 2013.

MACIEJOWSKI, J. M. **Predictive Control with Constraints**. Prentice Hall, Harlow, England, 2002.

MAHMOUD, M. S. Wireless networked control system design: An overview. **IEEE 23rd International Symposium on, Industrial Electronics (ISIE)**, 2014, v1 n.4. p. 2335-2340, 2014.

MANSANO, R. K. **Controle Adaptativo Multi-rate para Eficiência Energética em Sistemas de Controle via Redes Sem Fio**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista ‘Júlio de Mesquita Filho’, Bauru, 2016. Disponível em: http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/144597/mansano_rk_me_bauru.pdf?sequence=3&isAllowed=y >. Acesso em: 22 Jan. 2017.

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**, v. 14, n. 12, p. 24441–24461, 2014.

MOYNE, J. R.; TILBURY, D. M.. The emergence of industrial control networks for manufacturing control, diagnostics, and safety data. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 1, p. 29–47, 2007.

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.

OGATA, K. **Modern control engineering**. Prentice Hall, 2001.

SANTANA, E. S. D. **Algoritmo Preditivo Baseado em Modelo Aplicado ao Controle de Velocidade do Motor de Indução**. Tese (Doutorado). Departamento de Sistemas de Controle e Energia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/zeus/auth.php?back=http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000424982&go=x&code=x&unit=x> >. Acesso em: 22 Jan. 2017.

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.

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

SONG, J.; HAN, S.; MOK, A. K.; CHEN, D.; LUCAS, M.; NIXON, M.; PRATT, W. WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control. In: **Proceedings of the 14th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)**, St. Louis, 2008. p. 377-386.

TABUADA, P.; HEEMELS, W.P.M.H.; JOHANSSON, K.H. An Introduction to Event-triggered and Self-Triggered Control. In: **Tutorial Session of the IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control**, Hawaii, USA, 2012. ISSN 0743-1546.

WEN, R.; MAREELS, I.; KRONGOLD, B. Optimal power analysis for network lifetime balance in wireless sensor networks. In: **International Symposium on Communications and Information Technologies**, 2007.

WILLIG, A. Recent and Emerging Topics in Wireless Industrial Communications: A Selection. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 4, n. 2, p. 102-124, 2008.

WILLIG, A.; MATHEUS, K.; WOLISZ, A. Wireless technology in industrial networks. **Proceedings of the IEEE**, v. 93, n. 6, p. 1130–1151, 2005.

YOOK, J.K.; TILBURY, D.M.; SOPARKAR, N.R. Trading computation for bandwidth: reducing communication in distributed control systems using state estimators. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 10, n. 4, p. 503-518, 2002.

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

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.

Anexo A - Síntese dos resultados das simulações do WNCS com MPC *multi-rate*

Período de Amostragem (s) - sensor1	Período de Amostragem (s) - MPC+sensor2	ERRORMS		ITAE Norm	
		h1	h2	h1	h2
1	1	0,232	0,276	0,036	0,030
2	1	0,226	0,278	0,034	0,030
3	1	0,226	0,280	0,033	0,030
4	1	0,233	0,281	0,034	0,030
5	1	0,249	0,283	0,037	0,030
6	1	0,271	0,284	0,041	0,030
7	1	0,298	0,285	0,045	0,030
8	1	0,328	0,286	0,050	0,031
9	1	0,361	0,286	0,055	0,031
10	1	0,395	0,287	0,061	0,031
11	1	0,431	0,288	0,067	0,031
12	1	0,466	0,288	0,072	0,031
13	1	0,499	0,289	0,078	0,031
14	1	0,534	0,289	0,083	0,031
15	1	0,571	0,289	0,088	0,031
16	1	0,605	0,290	0,094	0,031
17	1	0,643	0,290	0,099	0,031
18	1	0,678	0,291	0,103	0,031
19	1	0,716	0,291	0,107	0,031
20	1	0,758	0,291	0,112	0,031
21	1	0,803	0,292	0,118	0,031
22	1	0,833	0,292	0,123	0,031
23	1	0,888	0,293	0,130	0,031
24	1	0,936	0,294	0,135	0,031
25	1	0,967	0,294	0,138	0,031
26	1	1,020	0,295	0,146	0,031
27	1	1,067	0,296	0,151	0,032
28	1	1,155	0,298	0,163	0,032
29	1	1,301	0,303	0,194	0,033
30	1	1,543	0,311	0,241	0,037
31	1	1,535	0,309	0,239	0,036
32	1	1,526	0,307	0,230	0,035
2	2	0,232	0,330	0,035	0,032
4	2	0,239	0,333	0,032	0,033
6	2	0,280	0,337	0,036	0,033
8	2	0,343	0,339	0,045	0,033
10	2	0,416	0,341	0,056	0,033
12	2	0,494	0,343	0,068	0,034
14	2	0,562	0,344	0,078	0,034
16	2	0,624	0,345	0,089	0,034

18	2	0,686	0,346	0,097	0,034
20	2	0,753	0,347	0,107	0,034
22	2	0,832	0,349	0,114	0,034
24	2	1,339	0,364	0,205	0,041
26	2	1,628	0,370	0,247	0,043
28	2	1,748	0,376	0,261	0,046
30	2	2,178	0,389	0,351	0,050
32	2	2,307	0,390	0,361	0,051
3	3	0,243	0,391	0,034	0,035
6	3	0,307	0,396	0,036	0,036
9	3	0,435	0,400	0,054	0,036
12	3	0,585	0,404	0,078	0,037
15	3	0,684	0,407	0,097	0,037
18	3	0,779	0,409	0,113	0,037
21	3	0,882	0,411	0,130	0,038
24	3	1,314	0,426	0,193	0,045
27	3	1,730	0,436	0,259	0,048
30	3	2,322	0,454	0,367	0,057
4	4	0,268	0,445	0,033	0,038
8	4	0,436	0,453	0,053	0,038
12	4	0,698	0,460	0,096	0,040
16	4	0,853	0,464	0,126	0,041
20	4	0,991	0,468	0,149	0,043
24	4	1,331	0,480	0,198	0,048
28	4	2,060	0,503	0,311	0,060
32	4	2,268	0,503	0,350	0,060
5	5	0,359	0,526	0,039	0,045
10	5	0,779	0,547	0,117	0,051
15	5	1,116	0,549	0,173	0,052
20	5	1,238	0,552	0,195	0,053
25	5	1,372	0,563	0,208	0,058
30	5	2,444	0,591	0,380	0,071
6	6	0,952	1,035	0,152	0,180
12	6	1,320	0,970	0,214	0,164
18	6	1,430	0,964	0,227	0,163
24	6	1,762	0,996	0,271	0,171
30	6	2,503	0,890	0,394	0,146
7	7	1,437	1,279	0,236	0,227
14	7	1,510	1,223	0,243	0,215
21	7	1,637	1,220	0,265	0,214
28	7	1,728	1,225	0,262	0,214
8	8	1,770	1,532	0,292	0,273
16	8	1,848	1,442	0,278	0,258
24	8	2,023	1,455	0,320	0,258
32	8	2,526	1,445	0,387	0,255

9	9	2,033	1,776	0,335	0,318
18	9	2,195	1,687	0,344	0,306
27	9	2,283	1,720	0,352	0,307
10	10	2,210	2,046	0,360	0,368
20	10	2,467	1,896	0,390	0,342
30	10	2,693	1,902	0,422	0,333
11	11	2,480	2,267	0,401	0,407
22	11	2,522	2,133	0,380	0,379
12	12	2,725	2,496	0,443	0,445
24	12	2,953	2,282	0,466	0,411
13	13	2,840	2,772	0,454	0,500
26	13	3,155	2,713	0,498	0,489
14	14	3,073	2,698	0,497	0,479
28	14	3,362	2,803	0,543	0,498
15	15	2,958	3,041	0,477	0,556
30	15	3,109	2,908	0,494	0,524
16	16	3,363	3,407	0,541	0,605
32	16	3,385	3,097	0,545	0,549
17	17	3,227	3,601	0,511	0,658
18	18	3,300	3,580	0,523	0,630
19	19	3,564	4,080	0,563	0,733
20	20	3,959	4,082	0,632	0,739
21	21	4,191	3,824	0,669	0,670
22	22	4,019	4,286	0,635	0,787
23	23	4,550	4,216	0,714	0,750
24	24	4,287	4,732	0,690	0,853
25	25	4,148	5,097	0,678	0,918
26	26	5,214	4,620	0,816	0,805
27	27	4,879	4,946	0,762	0,876
28	28	5,217	4,365	0,816	0,751
29	29	4,503	5,578	0,722	0,982
30	30	5,659	5,340	0,922	0,951
31	31	5,926	5,426	0,970	0,961
32	32	6,242	5,593	1,000	1,000