

PROJETO DE CONTROLE NÃO PERIÓDICO PARA SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDES SEM FIO

YURI S. ANDRADE, RAUL K. MANSANO, EDUARDO P. GODOY

UNESP – Univ. Estadual Paulista, Sorocaba - SP

E-mails: yuri_smiljanic@hotmail.com, rkmanzano@yahoo.com.br, epgodoy@sorocaba.unesp.br

Abstract - A recent trend has been on the use of wireless networks in network control systems (NCS). One of the main challenges related to the implementation of wireless networked control systems (WNCS) concerns the energy efficiency of the devices. As the wireless sensors are powered by batteries, the lowest possible consumption is required to extend battery lifetime. This paper seeks to overcome this problem through the study and comparison of aperiodic control strategies for WNCS. Aperiodic control consists in the implementation of control systems that do not require the periodic transmission of the process variable and calculated control signals. The aperiodic control aims to ensure the WNCS control requirements, in addition to decrease data transmission on the wireless network. As a result it is expected a reduction in the energy expenditure of the wireless sensors and consequently an increase in their battery lifetime. Experimental results demonstrated that the PIDPlus controller is indicated for aperiodic control and that aperiodic control strategies can reduce the wireless sensor transmissions, saving their battery lifetime, without decreasing the WNCS control performance.

Keywords - Aperiodic control, Wireless sensor, PIDPlus and WNCS

Resumo - Uma recente tendência tem sido o uso de redes sem fio em sistemas de controle via rede (NCS). Um dos principais desafios relacionados à aplicação desses sistemas de controle via redes sem fio (WNCS) diz respeito à eficiência energética dos dispositivos. Como os sensores sem fio são alimentados por baterias, espera-se o menor consumo possível para estender a vida útil da bateria. Este trabalho busca superar esse problema através do estudo e comparação de estratégias de controle não periódicas para WNCS. 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. A aplicação da estratégia de controle não periódica busca garantir os requisitos de controle especificados, além de diminuir a quantidade de informações transmitidas na rede sem fio, obtendo uma diminuição do gasto energético dos sensores e consequentemente um aumento da vida útil da bateria. Resultados experimentais demonstram que o controlador PIDPlus é indicado para aplicações de controle não periódico e que técnicas de controle não periódico podem reduzir o número de transmissões do sensor sem fio, possibilitando uma economia de energia desses dispositivos, sem prejudicar o desempenho de controle do WNCS.

Palavras-chave - Controle não Periódico; Sensor sem fio, PIDPlus e WNCS

1. Introdução

Nos sistemas de automação atuais, a introdução de arquiteturas de redes industriais pode melhorar a eficiência, a flexibilidade e a confiabilidade do sistema, reduzindo o tempo e os custos de instalação e manutenção (SAUTER, 2010). Aplicações de controle distribuído demonstram o surgimento de uma nova abordagem para a utilização de redes industriais. Nessa abordagem, o controlador e a planta ficam fisicamente separados e são conectados por uma rede de comunicação. Este tipo de implementação em sistemas industriais, onde as malhas de controle são fechadas sob uma rede industrial tem sido denominada de Sistema de Controle via Redes (NCSs - *Networked Control System*) (GUPTA & CHOW, 2010).

Avanços recentes na tecnologia de redes de sensores sem fio levaram ao desenvolvimento de dispositivos multifuncionais de baixo custo e baixo consumo de energia. Com esses avanços, uma nova tendência surgiu com o uso de redes sem fio em NCS (FISCHIONE et al. 2011), promovendo interoperabilidade entre redes com fio já existentes e novas redes sem fio. Estes sistemas são conhecidos como sistemas de controle via redes sem fio (WNCS - *Wireless Networked Control Systems*). WNCSs ultimamente têm atraído muitos esforços de pesquisa e desenvolvimento, conduzidos principalmente pela crescente evolução e padronização de redes sem fio como ZigBee, Wi-Fi,

WirelessHART e ISA-100.11a (PAAVOLA & LEIVISKA, 2010).

A tecnologia de WNCS é de grande interesse devido à sua contribuição com a redução de custo, flexibilidade e escalabilidade, além de facilitar a distribuição dos sensores e reduzir a quantidade de conexões físicas, que poderiam porventura apresentar falhas e, portanto, gerar problemas de confiabilidade (NAGHSHTABRIZI & HESPANHA, 2011). Apesar das vantagens, WNCSs apresentam atualmente requisitos que podem não ser atingidos de maneira satisfatória ou, simplesmente, não podem ser atingidos. Assim, para que sejam competitivos e viáveis economicamente, esta tecnologia tem que atacar os problemas diretamente e atingir os requisitos de comunicação e controle em malha fechada (JOHANSSON, 2011).

Um problema mais recente e importante requisito tecnológico para a aplicação de WNCS é a eficiência energética dos dispositivos (ARAÚJO et al., 2014), pois como são alimentados por baterias, espera-se o menor consumo possível para estender a vida útil da bateria. No entanto, reduzir o consumo de energia em WNCS pode ser um desafio devido à exigência por rápidas atualizações dos atuais sistemas de controle digital.

Portanto, a pesquisa sobre estratégias de controle focadas na redução do gasto energético para aplicações de WNCSs tem ganhado importância (ARAÚJO et al., 2014; SADI et al., 2014; MANSANO et al., 2014). Em se tratando de redução do gasto energético,

é conhecido que a transmissão de dados sem fio consome a uma importante quantidade de energia num dispositivo e é o principal consumidor de energia numa grande classe de aplicações (WEN et al., 2007). Dessa forma, uma abordagem comum para economia de energia tem sido a redução das transmissões sem fio (DE CASTRO et al., 2012, ARAÚJO et al., 2014).

Buscando a economia de energia, além de garantir os requisitos de controle especificados, uma solução que tem sido usada é a teoria de controle não periódico. 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 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.

Neste sentido, este trabalho estuda e compara estratégias de controle não periódicas para WNCS. O foco está na redução do gasto energético dos dispositivos sem fio do WNCS, obtida através da redução da transmissão de dados na rede sem fio e consequentemente aumento da vida útil da bateria desses dispositivos. Experimentos realizados comparam o desempenho de controladores PID e PIDPlus em aplicações de controle não periódico e de estratégias de controle não periódico com execução (gatilho) baseada em informação do erro do WNCS.

2. Estratégias de Controle

2.1. Controlador PIDPLUS

A introdução de sensores sem fio na indústria origina novos desafios quando a medição da variável é utilizada em aplicações de controle. Para lidar estes desafios, o controlador PID pode ser modificado para operar de forma adequada com grandes períodos de amostragem do sensor, atualizações não periódicas da variável e perda de mensagens transmitidas (BLEVINS et al., 2014). A chave para se compreender como o PID deve ser modificado é realizando o reset do PID implementado utilizando uma rede de realimentação e um filtro onde a constante de tempo é um reflexo direto da resposta dinâmica do processo.

A implementação PIDPlus (SONG et al., 2006) para WNCS é ilustrada na Figura 4. O PIDPlus mantém o sinal de controle no último nível calculado até que uma nova medida seja recebida. É importante notar que sua sintonia é independente do período de amostragem, depende apenas das características físicas da planta.

A realimentação (*newest measurement value*) e o filtro de 1ª ordem (*filter*) são modificados para criar a contribuição de reposição com o seguinte comportamento:

✓ Manter a última saída do filtro calculado (F_{N-1}), até uma nova medição ser informada (*new value flag*);

✓ Quando uma nova medição é recebida (*new value flag*), utilize a nova saída do filtro como contribuição da realimentação (F_N).

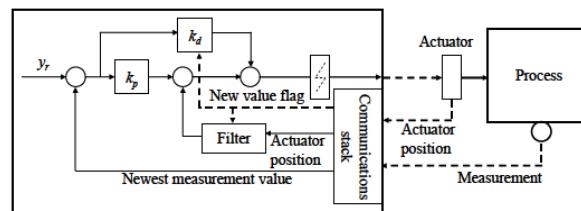


Figura 1 - Estrutura do controlador PIDPlus

A principal diferença do PID e PIDPLUS está na parte integrativa que foi substituído por um filtro de 1ª ordem. A saída do filtro é calculada conforme (1):

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

Onde: F_N = nova saída do filtro, F_{N-1} = saída do filtro na última execução, O_{N-1} = saída do controlador na última execução e ΔT = intervalo de tempo desde que o último valor medido foi recebido e T_{reset} = constante de tempo da planta somado ao tempo morto.

A parte derivativa é substituída conforme (2):

$$O_D = K_D \frac{e_N - e_{N-1}}{\Delta T} \quad (2)$$

Onde: e_N = erro atual, e_{N-1} = último erro, O_D = termo derivativo do controlador e K_D = ganho derivativo.

Considere a contribuição da parte derivativa quando as entradas são perdidas durante vários períodos. Para o algoritmo PID tradicional, o divisor na parte derivativa seria o período (discretização do controlador), enquanto que, no algoritmo PIDPlus é o tempo decorrido entre duas medições recebidas com sucesso (ΔT). É óbvio que o algoritmo modificado produz uma ação derivativa menor do que o algoritmo de controle PID. (SONG et al, 2006).

Na implementação do PIDPlus, o cálculo de reposição compensa automaticamente a alteração da medição e taxa de atualização da medição. Os cálculos do termo derivativo para um novo valor de medição não estão disponíveis a cada execução do PID. Assim, não há necessidade de modificar a sincronização para o controle sem fio, ou seja, o ajuste é baseado estritamente no ganho e dinâmica do processo.

2.2. Controle não periódico

O ciclo de controle em malha fechada de um WNCS consiste em: Amostragem da variável controlada realizada pelo sensor, transmissão da informação do sensor ao controlador, cálculo do sinal de controle, transmissão do sinal de controle ao atuador e a ação do atuador na planta controlada. Métodos tradicionais trabalham com uma frequência fixa de amostragem, o que frequentemente acarreta em um alto tráfego de informações e consequentemente um uso excessivo da rede no caso de WNCS.

Controle não periódico se diferencia por realizar a amostragem do sistema em períodos de tempo de largura variada, que dependem dos eventos ocorridos, buscando-se transmitir apenas informações relevantes (ARAÚJO et al., 2014). Assim, as comunicações na rede ocorrem somente quando um evento acontece como o cruzamento de um limiar definido ou um requisito de desempenho de estabilidade ou controle perdido (DE CASTRO et al., 2012). 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).

O controle não periódico aplicado nesse projeto utiliza uma técnica de amostragem classificada como híbrida. Isso significa que os momentos de transmissão de dados entre o sensor e o atuador são definidos por uma regra que possui componentes periódicas e aperiódicas. As componentes não periódicas são baseadas em Sánchez (2009), que podem ser aplicadas em conjunto com um controlador PID, e não necessitam do modelo matemático da planta controlada.

A Tabela 1 resume o comportamento dos diferentes agentes do sistema de controle. Dois parâmetros constantes definem os experimentos:

- ✓ Δt_{Max} : constante que representa o tempo máximo que o sensor sem fio pode permanecer sem transmitir seus dados ao controlador.
- ✓ ΔV_{Max} : termo constante da condição aperiódica.

Tabela 1 - Comportamento dos componentes do sistema

Agente	Evento	Ação
Sensor	Critério de transmissão é atingido (aperiódica).	Envia a nova medida ao controlador.
Sensor	Tempo Δt_{Max} expirado desde a última transmissão (periódica)	Envia a nova medida ao controlador.
Atuador	Novo sinal vindo do controlador	Altera sua atuação na planta de acordo com a nova entrada
Controlador	Novo valor de referência	Calcula novo sinal de controle
Controlador	Nova entrada (estado da planta atualizado)	Calcula novo sinal de controle
Controlador	Novo valor calculado para o sinal de controle	Envia o novo sinal de controle ao Atuador

Conforme Tabela 1, o sensor envia sua leitura quando uma das duas condições é atendida. A primeira é uma função dos últimos N valores lidos pelo sensor (em todos os casos estudados, N=2). Dependendo do valor retornado por essa função a condição torna-se verdadeira e por consequência o sinal é transmitido. A segunda condição é atendida quando o sensor permanece um tempo maior que Δt_{Max} sem enviar dados ao controlador. Uma consequência dessa segunda regra é a existência de um limite mínimo para a frequência média de amostragem do sistema.

Por existir um elemento periódico na regra de amostragem, o controle é classificado como não periódico híbrido. O elemento não periódico é um fator

de segurança. Ele é introduzido para evitar que o sistema se estabilize em um estado onde o erro seja diferente de zero, mas ao mesmo tempo a condição de transmissão nunca é atingida. O funcionamento do atuador é simples, ele mantém seu estado até que um novo sinal de controle seja recebido. Após o evento, sua atuação na planta é alterada de acordo com a nova entrada. O controlador possui duas entradas, o sinal de setpoint e a leitura do sensor. Quando uma dessas entradas é alterada, um novo sinal de controle é calculado. Se o novo sinal de controle for diferente do sinal anterior, ele é transmitido ao atuador.

Os diferentes critérios aperiódicos de transmissão estudados podem ser definidos como:

- ✓ DE: A função retorna verdade quando o módulo da diferença entre o erro atual e o erro anterior for maior que ΔV_{Max} . Caso contrário, a função retorna falso;
- ✓ IDE: A função retorna verdade quando a integral do módulo da diferença entre o erro e o erro anterior for maior que ΔV_{Max} . A integral é definida entre o instante da última vez em que a condição foi atendida e o instante atual. Caso contrário, a função retorna falso;
- ✓ EDE: A função retorna verdade quando a diferença de energia da função da diferença entre o erro atual e a última vez em que a condição foi atendida for maior que ΔV_{Max} . Caso contrário, a função retorna falso.

3. Análises dos resultados

Neste trabalho foi utilizado um WNCS de controle de motor DC composto por um motor Motron M910 de 24V e 43W, cuja velocidade é medida por um encoder incremental Hohnen de 600 pulsos por revolução. Um circuito eletrônico de leitura do encoder processa o dado recebido e envia o sinal de velocidade para o módulo sem fio ZigBee do sensor. A informação do sensor é enviada pela rede ZigBee para um computador, onde foram desenvolvidos os algoritmos de controle (PID, PIDplus e Não periódico). Este computador é responsável por calcular o sinal de controle que é enviado via rede cabeada CAN (interface PCI-CAN) para a ECU do atuador, responsável pelo processamento e aplicação do sinal PWM no motor, através de um circuito de potência. O esquemático do sistema é mostrado na Figura 2.

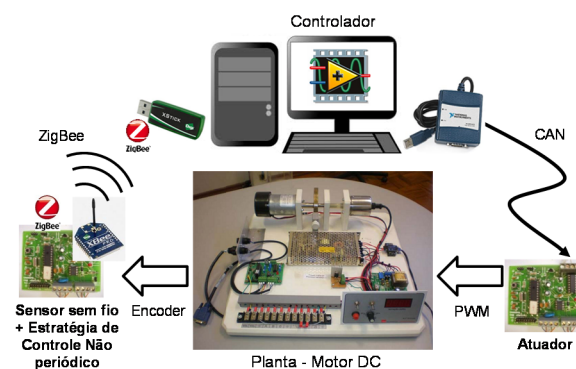


Figura 2 -Esquemático do WNCS para controle de velocidade.

Para realizar os experimentos criou-se um perfil de setpoint, isso é, a variação da velocidade do motor ao longo do tempo. O mesmo perfil foi utilizado em todos os experimentos para tornar possível a comparação dos resultados. A duração dos experimentos é de 60 segundos e tomou-se o cuidado de sempre iniciá-los com o motor parado.

Utilizou-se os índices de desempenho de controle IAE e ITAE para avaliar cada caso. Em ambos os casos, um valor mais elevado indica um pior desempenho. Como esses índices são funções integrativas, o número de amostras influencia no valor final. Para tornar viável a comparação entre as diversas condições utilizou-se a mesma quantidade de amostras (frequência de amostragem utilizada foi de 20 Hz).

3.1. PID vs PIDPlus

O objetivo da primeira parte do trabalho foi avaliar o efeito da variação na taxa de amostragem em um controle PID tradicional, e verificar se os efeitos negativos são amenizados pelo uso do algoritmo modificado PIDPlus. A Figura 3 apresenta as respostas do WNCS ao perfil de setpoint utilizando os controladores. Em ambas as situações a frequência de amostragem é igual a 10hz, que é a frequência para a qual o controlador PID foi sintonizado manualmente. O PIDPlus usa a mesma sintonia do PID tradicional.

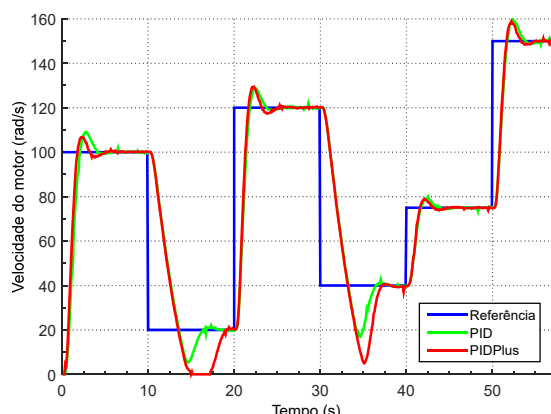


Figura 3 - PID vs PIDPlus com controle periódico (frequência de amostragem = 10Hz)

Como é possível observar, o WNCS consegue seguir a referência de forma adequada com ambos os controladores. Isso confirma uma das características do PIDPlus: não é necessária uma nova sintonização dos ganhos do controlador PIDPlus, ou seja, o controlador PIDPlus pode ser projetado a partir do PID.

Em sequência, avaliou-se o desempenho dos controladores quando a frequência de amostragem é variável no tempo (difere da frequência de projeto do PID). Os resultados para este caso são mostrados na Figura 4. Nesse caso, nota-se que o controlador PIDPlus conseguiu manter uma resposta adequada ao perfil do setpoint, enquanto o controlador PID teve seu desempenho drasticamente prejudicado. Verifica-se no caso do PIDPlus que o motor tem dificuldade de seguir a referência quando o valor de setpoint cai. Isso se deve a uma limitação construtiva do WNCS, no

caso do drive de acionamento do motor. Não é possível aplicar uma ação contrária à velocidade (freio) do motor utilizado pois é usado um drive de acionamento simples (1 quadrante) e não uma ponte H, portanto, quando o sinal de controle é negativo, o motor deve contar com a perda de energia por atrito para reduzir sua velocidade. Essa demora na reação a uma queda na referência tem um efeito de acúmulo de valor negativo na componente integrativa do PID, o que prejudica o desempenho do controle. Tal fato justifica a presença dos picos na resposta do WNCS operando com o PIDPlus na Figura 4.

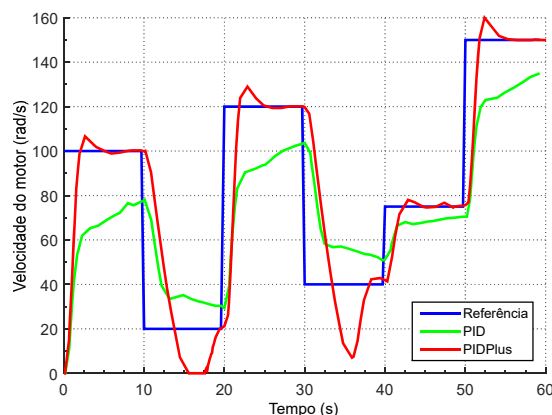


Figura 4 - PIDPlus vs PID utilizando controle não periódico

A Figura 5 apresenta o perfil de amostragem do controle não periódico na Figura 4.

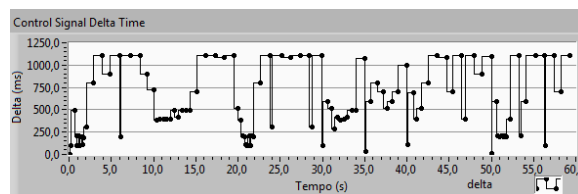


Figura 5 - Perfil de amostragem do PIDPlus não periódico

Cada círculo presente no gráfico da Figura 5 representa uma amostra usada no controle, o eixo x representa o tempo decorrido desde o início do experimento, e o eixo y a diferença dos instantes entre uma amostra e a amostra anterior a ela.

A Tabela 2 sintetiza os resultados das comparações entre o PID e PIDPlus, em relação ao valor dos índices de desempenho IAE e ITAE, para os experimentos realizados. Os dados dessa tabela permitem verificar que o controlador PIDPlus apresentou melhor desempenho para aplicações do WNCS com taxas de amostragem variáveis e para o caso de controle não periódico. Dessa forma, nos experimentos seguintes apenas o controlador PIDPlus foi utilizado.

Tabela 2 - Resumo da comparação PID vs PIDPlus

Controle	IAE	ITAE
PID - Periódico (10hz)	7621	456441
PIDPlus - Periódico (10hz)	7788	466590
PID - Não Periódico	14584,4	873771
PIDPlus - Não Periódico	8764,55	525798

3.2. Controle Periódico vs Não Periódico

A Figura 6 ilustra claramente o potencial do uso de controle não periódico para economia de energia (redução de transmissões) do sensor sem fio, onde é possível ver como a planta do WNCS responde ao perfil de setpoint em três situações: Controle periódico com frequência de amostragem igual a 10 Hz, controle periódico com frequência de amostragem igual a 3.3Hz e controle não periódico com $\Delta t_{Max} = 700ms$ e $\Delta V_{Max} = 4$.

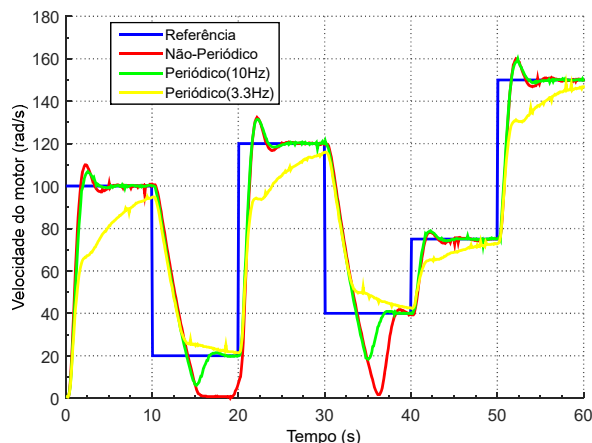


Figura 6 – Comparação de Controle periódico vs não periódico

A Tabela 3 apresenta a avaliação de desempenho entre os controles periódico e não periódico, considerando os índices de desempenho IAE e ITAE e o número de transmissões sem fio em cada situação.

Tabela 3 – Comparação entre controle periódico vs não periódico

Estratégia de controle	IAE	ITAE	Número de transmissões
Periódica (10Hz)	7621	456441	600
Periódica (3.3Hz)	11611	696031	200
Não periódica	9013	540504	177

Como visto na Figura 6 e Tabela 3, a estratégia periódica (10Hz) resulta no melhor desempenho, ao custo de um número elevado de transmissões. A estratégia periódica (3.3Hz) apresenta um número de transmissões quase igual à estratégia não periódica, mas com um desempenho consideravelmente inferior. Isso comprova a eficácia do controle não periódico, que apresenta um melhor balanço entre desempenho de controle e número de transmissões (gasto energético).

3.3. Comparação entre Estratégias de Controle Não Periódico

Para avaliar e comparar o efeito dos algoritmos de não periódicos (DE, IDE, EDE) sobre o desempenho de controle do WNCS e sobre o número de transmissões do sensor sem fio, realizou-se um experimento com todos os algoritmos operando com os mesmos valores para $\Delta t_{Max} = 1s$ e $\Delta V_{Max} = 4$. A Figura 7 apresenta estes resultados e a Figura 8 o perfil de amostragem para o controle não periódico:

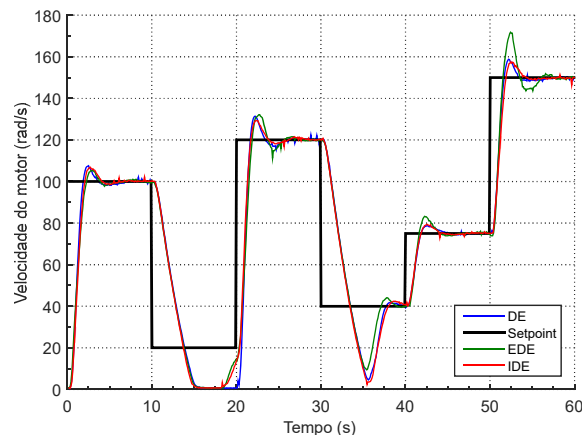


Figura 7 – Comparação das Respostas do WNCS utilizando as Estratégias de Controle não periódico

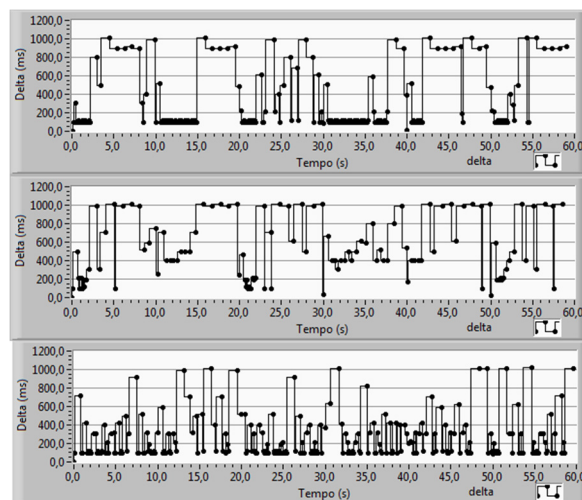


Figura 8 - Perfis de amostragem para as estratégias DE, IDE e EDE

A Tabela 4 resume os resultados de comparação de índices de desempenho IAE e ITAE, além do número de transmissões efetivado pelo sensor sem fio do WNCS, para as estratégias de controle não periódico DE, IDE e EDE.

Tabela 4 - Comparação entre técnicas de controle não periódico

Estratégia	IAE	ITAE	Número de Transmissões
DE	9184,84	550355	250
IDE	8928,3	535425	133
EDE	7315,41	438386	249

A estratégia EDE resultou nos melhores índices de desempenho, enquanto as estratégias IDE e DE apresentam resultados similares. Contudo, o número de transmissões é sempre mais elevado nos casos EDE e DE. Isso pode ser explicado analisando-se as funções das estratégias. EDE integra o valor ao quadrado da diferença do erro, que nunca é um número entre zero e um (valor de velocidade é representado por um inteiro), portanto é esperado que EDE resulte em mais amostras que IDE para um mesmo valor de limiar. No caso de DE, a diferença entre duas amostras também é maior que a integral das amostras, portanto, nova-

mente, o resultado era esperado. IDE apresenta resultados claramente superiores a DE, com desempenho ligeiramente melhor e com menos transmissões. Um problema relacionado ao uso da estratégia EDE é a alta concentração de amostras em determinados momentos, conforme pode ser visto na Figura 8, enquanto IDE apresenta amostras mais dispersas.

É comprovado que o gasto de energia do sensor sem fio está diretamente relacionado com a transmissão de dados na rede sem fio. Portanto é possível afirmar que reduzindo a taxa de amostragem de um sensor sem fio seria possível aumentar a vida útil da bateria utilizada pelo mesmo. Dessa forma, baseando-se nos resultados apresentados na Tabela 4, é possível afirmar que através do controle não periódico usando a estratégia IDE seria possível economizar ou diminuir o gasto energético da bateria utilizada pelo sensor sem fio do WNCS. Essa conclusão pode ser verificada pelos resultados que mostram que foi possível reduzir quase pela metade (de 250 para 133) a quantidade de transmissões de dados do sensor sem fio sem prejuízo de desempenho de controle para o WNCS.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio para este trabalho: 2015/01303-2, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

7. Conclusões

Elencam-se as conclusões obtidas neste trabalho:

- ✓ O controlador PIDPlus opera adequadamente em uma faixa de taxa de amostragem que inclui a frequência de sintonia do PID tradicional e períodos de amostragem variáveis. O controlador PID tem seu rendimento drasticamente reduzido quando não opera em sua frequência de projeto. Portanto, o controlador PIDPlus é indicado quando se utiliza técnicas de controle não periódico;
- ✓ A estratégia IDE apresentou o melhor balanço entre desempenho do controle e número de transmissões, entre as estratégias (DE, IDE e EDE) implementadas neste trabalho;
- ✓ Através de técnicas de controle não periódico, é possível reduzir significativamente o número de transmissões do sensor sem fio sem prejudicar significativamente o desempenho do controle do WNCS;
- ✓ O uso do controle não periódico pode viabilizar o uso de sensores sem fio em aplicações de controle em malha fechada e WNCS, por possibilitar um menor gasto energético.

8. Referências Bibliográficas

Araújo, J.; Mazo, M.; Anta, A.; Tabuada, P. and Johansson, K.H. (2014). System Architectures, Protocols and Algorithms for Aperiodic Wireless

- Control Systems, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol.10, No.1, pp.175-184.
- Blevins, T.; Nixon, M. and Wojsznis, W. (2014). PID Control Using Wireless Measurements American Control Conference (ACC) June 4-6, 2014. p.1-6.
- De Castro, N.C.; Quevedo, D.E.; Garin, F. and De Wit, C.C. (2012). Smart energy-aware sensors for event-based control, in 2012 IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC), pp.7224,7229, 10-13 Dec.
- Fischione, C.; Park, P.; Di Marco, P. and Johansson, K.H. (2011). Design Principles of Wireless Sensor Networks Protocols for Control Applications, S.K. Mazumder (Ed.). Wireless Networking Based Control, Ch. 9, Springer, pp. 203-238.
- Gupta, R.A. and Chow, M.Y. (2010). Networked Control System: Overview and Research Trends. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 7, pp. 2527-2535.
- Johansson, K.H. (2011). Motivations, Challenges and Wireless for Control of Networked and Large Scale Systems. In: Proceedings of the 4th Hycon PhD School on Control Of Networked and Large Scale Systems, June 21-24, Trento, Italy.
- Mansano, R. K.; Godoy, E. P. and Porto, A. J. V. (2014). The Benefits of Soft Sensor and Multirate Control for the Implementation of Wireless Networked Control Systems. Sensors. 2014.
- Naghshabrizi, P. and Hespanha, J.P. (2011). Implementation Considerations for Wireless Networked Control Systems, S.K. Mazumder (Ed.). Wireless Networking Based Control, Ch. 1, Springer, pp. 1-27.
- Paavola, M. and K. Leiviska. (2010). Wireless Sensor Networks in Industrial Automation, J.S. Blanes (Ed.). Factory Automation, Ch 10, Intech, pp. 201-220.
- Sadi, Y.; Ergen, S.C. and Park, P. (2014). Minimum Energy Data Transmission for Wireless Networked Control Systems, IEEE Tran. on Wireless Communications, Vol.13, No. 4, pp. 2163-2175.
- Sánchez, J.; Guarnes, M.Á. and Dormido, S. (2009). On the application of different event-based sampling strategies to the control of a simple industrial process. Sensors, Vol.9, pp. 6795-6818.
- Sauter, T. (2010). The Three Generations of Field-Level Networks—Evolution and Compatibility Issues, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.57, No.11, pp.3585-3595, Nov.
- Song, J.; Mok, A. K.; Chen, D.; Nixon, M.; Blevins, T. and Wojsznis, W. (2006). Improving PID control with unreliable communications. In ISA EXPO Technical Conference.
- Tabuada, P.; Heemels, W.P.M.H. and Johansson, K.H. (2012). Event-triggered and Self-triggered Control, In: IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control, Hawaii, USA.
- Wen, R.; Mareels, I. and Krongold, B. (2007). Optimal power analysis for network lifetime balance in wireless sensor networks. In International Symposium on Communications and Information Technologies.