

IMPLEMENTAÇÃO DO MODBUS PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDE SEM FIO

MARCOS R. CALDIERI, JEFERSON A. BIGHETI

SENAI – Lençóis Paulista - SP

E-mails: mrcaldieri@gmail.com, jefersonbigheti@terra.com.br

EDUARDO P. GODOY

UNESP – Univ. Estadual Paulista, Sorocaba - SP

E-mails: epgodoy@sorocaba.unesp.br

Abstract- The recent introduction of wireless transmitters in the industry has driven a new interest in measuring and control techniques, but most applications are restricted to measurements of process variables in open loop or monitoring applications. The reason is the lack of reliability due to problems inherent in the transmission medium, such as loss of information, time varying delays, slow and sometimes aperiodic update measurements and various kinds of interference. In order to enable and make the wireless networked control systems (WNCS) more reliable, many control techniques have been researched, including the PIDPlus representing a modified PID algorithm developed for use in systems in which the sampling frequency requirement cannot be guaranteed. This paper presents the implementation of the Modbus protocol for WNCS applications. The Modbus TCP was embedded in dedicated hardware enabling the transmission of data via Ethernet TCP/IP and Wi-Fi. Experimental results in a pilot plant seek to prove the efficiency of the implementation of a wireless control loop using a Wi-Fi network with embedded Modbus protocol.

Keywords – PIDPlus, Wireless sensor, Modbus TCP/IP, Networked control

Resumo – A recente introdução de transmissores sem fio na indústria provocou um novo interesse em técnicas de medição e controle, porém a maioria das aplicações está restrita a medições de variáveis de processo em malha aberta ou aplicações de monitoramento. O motivo é a falta de confiabilidade devido aos problemas inerentes ao meio de transmissão, como a perda de pacotes de informação, atrasos de comunicação variantes no tempo, atualização muito lenta e não periódica da medição e vários tipos de interferências. Para tornar a tecnologia de sistemas de controle via redes sem fio (WNCS) mais confiável, muitas técnicas de controle têm sido pesquisadas, entre elas o PIDPlus que representa uma modificação do conhecido algoritmo PID que foi desenvolvido para ser aplicado em sistemas onde o requisito de periodicidade não pode ser garantido. Este trabalho apresenta a implementação do protocolo Modbus para aplicações de WNCS. O protocolo Modbus TCP foi embarcado em hardware dedicado viabilizando a transmissão de dados via Ethernet TCP/IP e Wi-Fi. Resultados experimentais numa planta piloto buscam comprovar a eficiência da implementação de uma malha de controle sem fio usando uma rede Wi-Fi com o protocolo Modbus embarcado e um controlador PIDPlus.

Palavras-chave— PIDPlus, Sensor sem fio, Modbus TCP/IP, Controle via rede

1. Introdução

O conceito de redes industriais fornece muitos benefícios, acima de tudo, uma maior flexibilidade e modularidade de instalações e a facilidade de configuração do sistema, comissionamento e manutenção (GALLOWAY & HANCKE, 2013). De acordo com Sauter (2010), as redes de controle industrial podem ser divididas em três gerações distintas, com diferentes níveis de compatibilidade. A primeira consiste em protocolos seriais fieldbus tradicionais, o segundo de protocolos baseados em Ethernet e a última geração, que começou a incorporar a tecnologia de comunicação wireless.

Aplicações recentes de sistemas 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 onde as malhas de controle são fechadas sob uma rede de comunicação industrial tem sido denominado de Sistema de Controle via Redes (NCS – *Networked Control System*) (GUPTA & CHOW, 2010)).

Os sistemas de controle em rede possuem alguns problemas inerentes a aplicações de controle que não existiam em sistemas analógicos e que são normalmente difíceis de serem detectados devido às variações e incertezas introduzidas pela rede de comunicação, como: atrasos, instabilidade, limitações de largura de banda e perda de pacotes (BAILLIEUL & ANTSAKLIS, 2007). Um consenso na pesquisa sobre NCS é que a presença dessas imperfeições e restrições relativas à rede de comunicação pode afetar significativamente o desempenho da malha de controle, podendo até torná-lo instável.

Avanços recentes na tecnologia de redes de sensores sem fio levaram ao desenvolvimento de dispositivos 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 (PAAVOLA &

LEIVISKA, 2010), Wireless Hart e ISA-100.11a (PETERSEN & CARLSEN, 2011).

Muitas características interessantes inerentes às redes sem fio estão motivando o desenvolvimento de WNCS. Os sistemas sem fio proporcionam vantagens (GALLOWAY & HANCKE, 2013) como a redução na quantidade de fiação necessária para a comunicação, que por sua vez reduz os custos de instalação, comissionamento e reconfiguração pode ser realizada mais rápido, instalação preferencial em equipamentos que se movimentam onde o cabeamento pode ser facilmente danificado, em ambientes perigosos e instalações de segurança intrínseca, em localidades onde cabos pode restringir o funcionamento das máquinas a serem monitoradas e em ambientes com longas distâncias entre dispositivos e de difícil acesso como em refinarias ou de outras plantas de processamento.

A aplicação de redes sem fio tem sido um tema de pesquisa desafiador por um longo tempo e ainda está longe de se esgotar. Neste momento não é de se esperar que as redes sem fio substituam completamente as redes de automação com fio, pelo contrário, as redes sem fio irão complementar os sistemas atuais. O WNCS pode ser operado entre os sistemas com fio e sem fio existentes e também proporciona vantagens em relação a potência e flexibilidade quando comparados aos com fio formando uma rede híbrida (NAGHSHTABRIZI & HESPANHA, 2011).

Esta introdução de transmissores e atuadores sem fio na indústria de processo provocou um novo interesse em técnicas que podem ser usadas para permitir que o controle em malha fechada, seja usado com atualizações de informação não periódicas (BLEVINS et al., 2014). Um pressuposto de controle de processo sempre foi que o controle é executado em uma base periódica e que um novo valor de medição está disponível para cada execução. No entanto, para minimizar o consumo de energia de um transmissor sem fio, os valores de medição podem ser transmitidos com uma frequência baixa, ou somente se o valor da medição mudar significativamente (BLEVINS et al., 2014). Desta forma o controle tem que ser modificado para trabalhar com atualizações não periódicas de medição. Além disso, é importante que a perda de comunicação seja tratada automaticamente pelo controle de uma forma a não introduzir uma interrupção do processo.

Quando a medição não é atualizada em uma base periódica, um PID tradicional não é indicado, pois as ações de controle não serão calculadas de forma correta. Se o controle só é executado quando uma nova medida é informada, isso poderia resultar em um atraso na resposta de um controlador. Assim, um desafio tem sido a proposta de uma técnica que minimize a frequência de medição de uma variável sem comprometer o desempenho do controle. Para resolver estas questões o algoritmo PID pode ser modificado para funcionar corretamente com atualizações de medição lentas, não periódica e perda de comunicação. Por exemplo, o PIDPlus oferece um PID modificado para controle em malha fechada, usando um transmissor de rede sem fio (BLEVINS et al., 2014).

2. Redes de Comunicação

2.1. Modbus

O Modbus é um protocolo aberto que define uma estrutura de mensagens de comunicação usadas para transferir dados discretos e analógicos entre dispositivos microprocessados com detecção e informação de erros de transmissão. Dispositivos Modbus comunicam usando o método mestre-escravo (cliente-servidor) técnica em que apenas um dispositivo (mestre/cliente) pode iniciar operações (chamadas consultas). Os outros dispositivos (escravos/servidor) respondem, fornecendo os dados solicitados para o mestre, ou tomar as medidas solicitadas na consulta. Um escravo é qualquer dispositivo periférico (transdutor, válvula, unidade de rede ou outro dispositivo de medição) que processa a informação e envia sua saída para o mestre usando o Modbus (MODBUS, 2015).

A camada de aplicação Modbus define uma unidade de protocolo de dados simples, mostrada na Figura 1, independente das camadas inferiores (PDU). E o mapeamento do protocolo em portas específicas ou redes se dá por meio da unidade de aplicação de dados (ADU). O modelo cliente/servidor estabelecido pelo serviço de mensagens do Modbus é baseado em quatro tipos de mensagens utilizadas para a troca de informações: Modbus Request PDU (consulta), Modbus Response PDU (resposta), Modbus Exception Response PDU (erro). Neste processo o cliente envia uma mensagem de consulta (*request*), o servidor indica o recebimento e envia uma mensagem de resposta para o cliente (*response*) ou uma mensagem de erro (*exception response*).

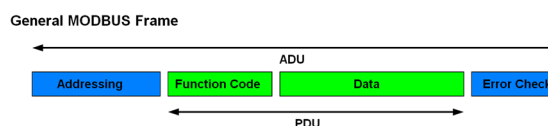


Figura 1: Estrutura de uma Mensagem Modbus (Fonte: Modbus 2015)

Uma mensagem Modbus é composta pelos seguintes campos:

- ✓ **Address:** Tamanho de 1 byte. Número que define o endereço do dispositivo (escravo);
- ✓ **Function Code:** Tamanho de 1 byte. Define a ação a ser executada pelo escravo (ler dado, aceitar dado, reportar estado, reporte de erros);
- ✓ **Data:** Tamanho 0 a 252 bytes. Contém informações que o Escravo/Servidor deve usar para executar a ação definida pela função requisitada pelo Mestre/Cliente (endereços de memória, quantidade de itens transmitidos, tamanho do campo Data);
- ✓ **Errorcheck:** Tamanho de 2 bytes representando a checagem de erro na comunicação (enviado por um e checado pelo outro). Em caso de erro, é solicitada a retransmissão da mensagem.

O protocolo Modbus é implementado atualmente usando três versões (MODBUS, 2015):

✓ TCP / IP sobre Ethernet - Este modo implementa dados encapsulados em formato binário, em quadros TCP (*Transmission Control Protocol*), usando o protocolo Ethernet (IEEE 802.3). O controle de acesso ao meio utilizado é o Acesso Múltiplo por Detecção de Portadora com Detecção de Colisão (CSMA-CD);

✓ Transmissão Serial - Este modo opera em meio físicos variados (fios, fibra óptica e rádio). Os principais protocolos são: EIA / TIA-232-E (conhecida como RS232), EIA-422 (conhecida como RS422) e EIA / TIA-485-A (conhecida como RS485). O modo de transmissão em serial tem duas variantes: Modbus RTU - os dados são transmitidos em formato binário 8-bit e Modbus ASCII - os dados são transmitidos em formato ASCII de 7 bits;

✓ Modbus Plus - Este modo implementa uma rede de transferência de alta velocidade com muitos recursos adicionais para o encaminhamento, o diagnóstico, a consistência dos dados e endereçamento. Embora mais robusto e eficiente, este modo não tem uma especificação aberta, uma vez que é de domínio da Schneider Electric.

Modbus TCP/IP é simplesmente o protocolo Modbus com uma interface Ethernet TCP/IP. O Modbus TCP/IP utiliza o TCP/IP e Ethernet para transportar os dados da estrutura de mensagem Modbus entre dispositivos compatíveis. Isto é, o Modbus TCP/IP combina uma rede física (Ethernet), com um protocolo de rede (IP) e transporte (TCP), e um método de representação de dados padrão (Modbus como o protocolo da aplicação). A principal função do TCP é garantir que todos os pacotes de dados são recebidos corretamente, enquanto IP garante que as mensagens são corretamente endereçadas e encaminhadas. Conforme mostrado na Figura 2, o encapsulamento TCP/IP não modifica a estrutura básica da mensagem Modbus. As diferenças estão na interpretação do endereço (IP) e na verificação de erro (CRC-32).

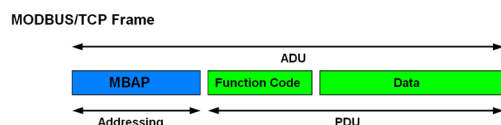


Figura 2: Estrutura de uma Mensagem Modbus TCP/IP (Fonte: Modbus 2015)

2.2. Wi-Fi 802.11

Redes locais sem fio (WLAN) podem operar em 2,4 GHz ou 5 GHz. Estas redes suportam dois modos: ad-hoc e de infraestrutura. O modo ad-hoc permite que todas as estações se comuniquem umas com os outros de forma peer-to-peer. O modo de infraestrutura, a rede tem um ponto de acesso (AP), por meio do qual cada estação cliente se comunica.

Em automação de processos, as redes Wi-Fi podem servir como a espinha dorsal para a concentração de dados. Por exemplo, ele pode ser usado em conjunto com uma rede de curto alcance, dispositivos decampo de baixa potência em uma rede sem fio para coletar

dados a partir do gateway de enviá-lo para a sala de controle ou outro ponto de coleta de dados.

As vantagens de WLAN em automação de processos incluem: padrões abertos, robustez, boa relação custo-benefício, fácil acessibilidade e alta taxa de transmissão de dados. A segurança também aumentou com duas melhorias de segurança, Wi-Fi Protected Access (WPA) e WPA2, que substituem tecnologia mais antiga e menos segura.

O protocolo Wi-Fi IEEE 802.11 possui ainda uma característica importante entre os dispositivos sem fio que deve ser considerado quando o controle é implementado através de uma WLAN. Embora o protocolo IEEE 802.11, não tenha sido concebido para aplicações em WNCs, a sua implementação pode ser útil no controle de rede quando define o DCF (*Distributed Control Function*). Neste protocolo, a decisão da estação que pode transmitir é tomada entre os nós da WLAN (Millan et al., 2011).

3. Materiais e Métodos

3.1. Implementação do Modbus Wi-Fi

Modbus é um protocolo de comunicação da camada de aplicação, representada pela camada sete do modelo OSI e, portanto, independente das outras seis camadas, sendo apenas necessário que elas sejam funcionais, no caso de redes wireless. Isso permite vários métodos de implementar o uso do Modbus com diferentes meios físicos. Neste trabalho, foram implementadas uma versão do Modbus TCP/IP e do Modbus Wi-Fi, baseadas em Arduino, para uso em aplicações de controle via rede sem fio baseadas em Modbus, conforme mostrado na Figura 3.

A camada de aplicação do Modbus foi implementada em código na plataforma Arduino. Através do uso de uma pilha TCP/IP compatível, juntamente com um módulo shield Ethernet e um módulo XBee Wi-Fi é possível realizar a comunicação de dados via Modbus TCP/IP e Modbus Wi-Fi. Quando o mestre da rede solicita uma informação (controlador), o XBee irá enviar a solicitação ao Arduino de forma serial no protocolo Modbus. Esta solicitação será automaticamente alterada do padrão TCP/IP para Modbus, mudando seu cabeçalho e verificação de erro. A solicitação do mestre no protocolo Modbus no Arduino será desmembrada para podermos interpretar cada byte da solicitação do mestre. Com o código de função de solicitação interpretado, podemos responder ao mestre com o conteúdo da entrada analógica e acrescenta-lo ao endereço de dados no frame de resposta Modbus. Este frame é montado repetindo as informações de endereço do servidor, o código da pergunta e endereço do dado, desta forma estará pronta para responder ao mestre. O Arduino irá devolver o frame ao XBee de forma serial no protocolo Modbus e este por sua vez irá modificar para o protocolo TCP/IP e envia-lo via rede Wi-Fi ao mestre.

Modelo ISO/OSI de Camadas	Modbus TCP/IP ou WiFi	Implementação
7 Aplicação	Modbus	Arduino
6 Apresentação		
5 Sessão		
4 Transporte	Protocolo TCP	Pilha TCP/IP
3 Rede	Protocolo IP	
2 Enlace	Ethernet ou Wi-Fi	Ethernet Shield ou Módulo XBee Wi-Fi
1 Física		

Figura 3: Implementação do Modbus WiFi

3.2. 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.

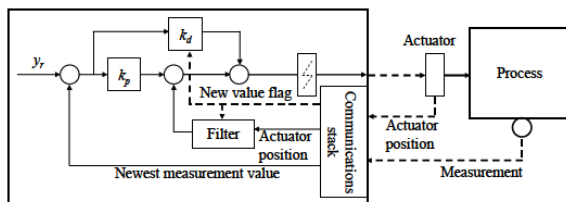


Figura 4: Estrutura do controlador PIDPlus (Fonte: Song et al. 2006)

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).

A principal diferença do PID e PIDPLUS está na parte integrativa que foi substituído por um filtro de 1º 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.

3.3. Estrutura do WNCs com Modbus

A implementação do sistema de controle via rede sem fio (WNCs) em estudo, foi baseada em uma Planta Piloto de Instrumentação da escola SENAI de Lençóis Paulista mostrada na Figura 5.



Figura 5. Planta Piloto de Processos – SENAI Lençóis Paulista

O esquemático do WNCs é mostrado na Figura 6. Em um medidor de vazão magnético desta planta foi instalado um conversor de sinal analógico (0 a 10Vcc) para Wi-Fi, com o pacote Modbus na camada de aplicação, onde foi criada uma rede sem fio entre o medidor de vazão, um Access Point e um Notebook (controlador). O sinal de controle é transmitido através de uma rede Ethernet TCP/IP entre o Access Point e um conversor de Ethernet para sinal analógico (0 a 5Vcc) para um inversor de frequência que está ligada a uma

moto-bomba que fará o controle da vazão. Para o cálculo do sinal de controle, foram implementados um controlador PID tradicional e um PIDPlus. A taxa de atualização do controlador usada foi de 2 s.

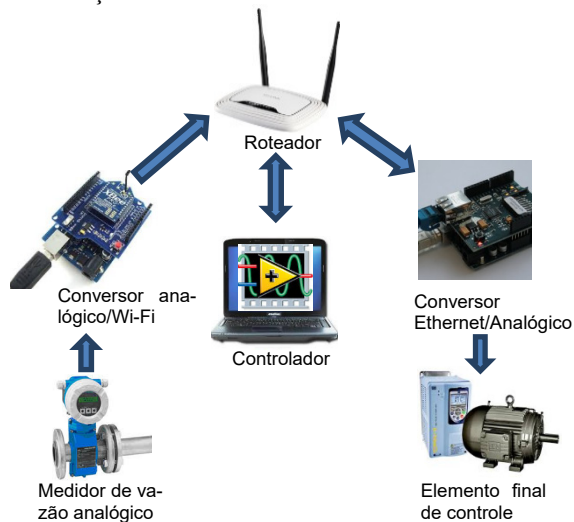


Figura 6. Arquitetura do WNCs com redes Modbus

4. Resultados e análise

4.1. Métricas de desempenho do Modbus Wi-Fi

Os principais parâmetros que caracterizam o desempenho de NCS são a média do tempo de atraso e instabilidade. O mais crítico destas métricas para os NCS é o tempo que decorre entre o envio de um dado de um nó até o outro recebê-lo ou o tempo de atraso.

Uma maneira de medir esse tempo de atraso é medir o tempo de comunicação de ida e volta dentro da malha. O tempo de viagem é o tempo de atraso no envio de um pacote de um nó para outro e vice-versa. Se um cálculo estatístico é realizado a partir de uma quantidade de atrasos, podemos obter o tempo de atraso médio (T_d) das transmissões de mensagens na rede sem fio. A variabilidade nos valores de medição do tempo de atraso fornece o Jitter (J) do WNCs.

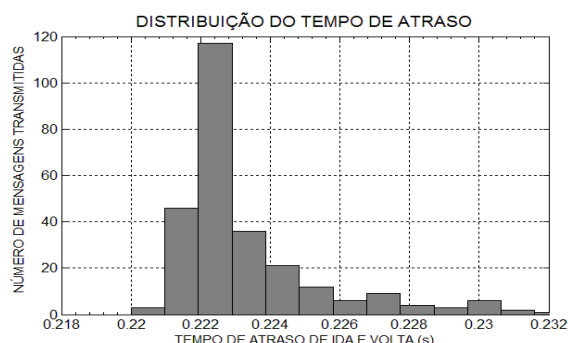


Figura 7. Histograma do tempo de atraso da rede Modbus Wi-Fi

A Figura 7 apresenta a distribuição dos tempos de atraso obtidos com o envio de mensagens no Modbus Wi-Fi. Como pode ser observado, a maioria dos valores aproximam-se do valor médio de 0,2226s. Sem a presença de grandes valores extremos, o histograma

nos mostra um bom determinismo, como é possível observar na Tabela 1.

Tabela 1. Desempenho da rede sem fio no controle PID.

Controle	T_d (ms)	J (ms)	Pior valor (ms)	Mensagem Perdida
PID	222,6	10,7	231	0

4.2. Desempenho dos controladores

Os controladores PID e PIDPlus foram submetidos às mesmas condições de operação e distúrbios para que as respostas possam ser analisadas de forma qualitativa. O comportamento dos dois controladores para a malha de vazão proposto em situações normais, ou seja, quando a transmissão de dados sem fio está sendo realizada de forma eficiente e sem interferências ou erros, somente variação de *setpoint* para podermos comparar o desempenho. Conforme mostrado na Figura 8, os desempenhos de controle do WNCs em operação livre de erros são semelhantes para o controlador PID e PIDPlus.

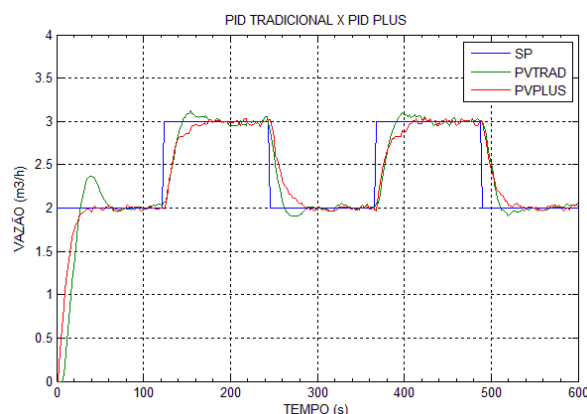


Figura 8. Controle de vazão utilizando o PID e PIDPlus

Na Figura 9, foram inseridas falhas de comunicação, onde a cada 60 segundos de transmissão eram gerados 5 segundos de falha. Notamos que nos momentos onde houve a perda do sinal da vazão o processo se desestabilizou pelo fato do controlador não se adequar a ausência do valor da vazão, ocasionando a saturação da saída do controlador e consequentemente um desgaste excessivo no elemento final de controle. Em um processo industrial, essa situação seria prejudicial e deveria ser evitada.

A Figura 9 mostra que o controlador PIDPlus conseguiu manter o processo estável mesmo na ausência do valor da vazão. O controlador PIDPlus mantém o último valor da saída do controlador (sinal de controle), pois ele calcula as contribuições do termo integral e derivativo para a saída do controlador somente quando há uma atualização da medição da variável e usa o tempo decorrido entre as atualizações em seus cálculos. Assim, o PIDPlus atua apenas quando é recebido um novo valor da medição e considera que a mudança na variável medida ocorreu não apenas no

último período de execução do controlador, mas ao longo do tempo decorrido entre as atualizações.

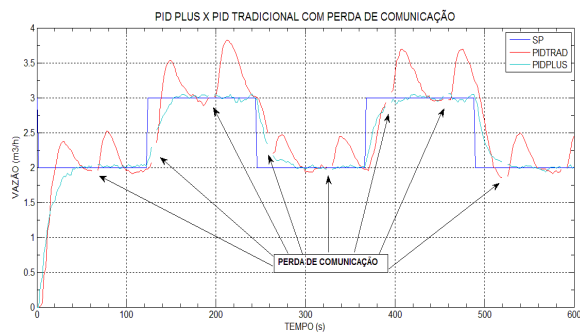


Figura 9. Controle de vazão: PID e PIDPlus com falhas de comunicação

Dessa forma, quando há uma perda de comunicação com o transmissor ou elemento final de controle, o PIDPlus não fornece outra ação de reposição, ele aguarda novas atualizações. Quando a comunicação é restabelecida, ele atua sobre a nova atualização. Na Tabela 2, podemos comprovar que o desempenho de controle do PIDPlus para o WNCS operando sob falhas, é melhor que o PID tradicional.

Tabela 2. Desempenho dos controladores PID e PIDPlus.

Controle	PID Trad.	PID Plus	PID Trad. +Falha	PID Plus +Falha
Índice de Desempenho				
IAE	55	41	91	43
ITAE	10701	9259	24291	9355

5. Conclusão

Os resultados demonstram que a implementação do protocolo Modbus para a comunicação via TCP e Wi-Fi foram efetivas, permitindo adaptar instrumentos analógicos em Modbus e transmitir sinais de controle e realimentação que mesmo com perda de sinal, o controle se mostrou robusto e confiável.

O controlador PIDPlus atende aos processos de controle que utilizam transmissores com e sem fio, mostrando-se com desempenho superior ao PID tradicional nos casos de perda de dados transmitidos. Adicionalmente, o uso do controlador PIDPlus para controle via rede sem fio é fortemente recomendado nas seguintes situações:

- ✓ o tempo de atualização é maior do que o tempo de resposta do processo;
- ✓ aplicações com maior probabilidade de ocorrência de erros e falhas de atualização na rede sem fio;
- ✓ elemento final de controle apresenta significativa manutenção em função dos grandes picos de acionamento.

Para futuros trabalhos, está prevista a implantação de novas malhas WNCS com Modbus para a

planta piloto, com a realização de testes de alguns tipos de interferências para avaliar o desempenho do controlador PIDPlus.

Agradecimentos

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

Referências Bibliográficas

- Baillieul, J. and Antsaklis, P.J. (2007). Control and Communication Challenges in Networked Real Time Systems, Proceedings of IEEE Technology of Networked Control Systems, Vol. 95, p. 09-28.
- Blevins, T; Nixon, M. and Wojsznis, W. (2014). PID Control Using Wireless Measurements American Control Conference (ACC) June 4-6, 2014, p. 1-6.
- 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.
- Galloway, B. and Hancke, G.P. (2013). Introduction to Industrial Control Networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.15, pp. 860-880.
- 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.
- Millan, Y.A.; Vargas, F.; Molano, F. and Mojica, E. (2011). A Wireless Networked Control Systems Review- IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC).
- Modbus (2015). Modbus Organization. Disponível em: <http://www.modbus.org>. Acesso em: Dezembro, 2015.
- 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, p.1-27.
- Paavola, M. and Leiviska, K. (2010). Wireless Sensor Networks in Industrial Automation, J.S. Blanes (Ed.). Factory Automation, Ch 10, Intech, pp. 201-220.
- Petersen, S. and Carlsen, S. (2011). Wireless HART Versus ISA100.11a: The Format War Hits the Factory Floor. IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol. 5, No.4, pp. 23-34.
- 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.