

# Perspectiva de Redes de Sensores Sem fio em um Sistema de Controle de Malha Fechada

Felipe O. S. Gama, Diego A. M. Fonseca, Xiankleber C. Benjamim, Andrés O. Salazar, Luiz F. Q. Silveira

felipe.sgama@hotmail.com, diegomoura@dca.ufrn.br, xianklebercb@gmail.com, andres@dca.ufrn.br, lfelipe@dca.ufrn.br

Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
59078-970  
Natal - Brasil

**Resumo:** Atualmente uma das áreas de atuação da computação móvel é a que aborda redes de sensores sem fio. Essas redes são constituídas por uma elevada quantidade de nós com capacidade de sensoriamento, controle e atuação. Entretanto, o desempenho do sistema de comunicação dessas redes se torna limitado, principalmente, em virtude do desvanecimento produzido por múltiplos percursos de propagação. Com o objetivo de minimizar os efeitos destrutivos do desvanecimento, várias técnicas têm sido propostas recentemente, dentre elas técnicas de diversidade e codificação de canal. A codificação wavelet surge como mais uma abordagem neste cenário, devido à sua baixa complexidade de decodificação e ao seu bom desempenho, obtido em canais com desvanecimento. Com a inserção da comunicação sem fio em uma malha de controle também surge o problema da perda de informação, o qual pode afetar a estabilidade do sistema. Neste sentido, é crescente o número de técnicas de controle avançado, principalmente os sistemas de controle baseado em modelo (Model Based Control - MBC). Este trabalho apresenta duas abordagens com objetivo de minimizar os impactos ocasionados com inserção da comunicação sem fio em uma malha de controle. A primeira delas é a inserção da codificação wavelet no sistema, da qual são analisados os parâmetros de atraso, tempo de processamento da codificação e o desempenho da codificação em forma de pacotes em termos de probabilidade de erro de bit (Bit Error Rate - BER). Por fim, é avaliada a inserção de estratégia MBC em uma malha de controle.

**Palavras chave:** Codificação Wavelet, Desvanecimento, Redes de Sensores Sem Fio, MBC.

**Abstract:** Nowadays the wireless sensor networks are a field of mobile computing. Such networks are formed by a large number of nodes with a capacity of remote sensing, control, and performance, despite the limited performance of such communication systems because of fading. Several techniques have been proposed in order to minimize the destructive effects of fading, among them, techniques of diversity and channel coding. The wavelet coding emerges as another approach in this scenario, due to its low complexity of coding and its good performance, obtained in channels with fading. With the insertion of wireless communication in control loop it also brings the problem of information loss, which may affect the stability of the system. In this sense, it is growing the number of advanced techniques, especially the systems of model based control (MBC). This paper presents two approaches aiming to minimize the impacts caused by insertion of wireless communication in a control loop. First, it is examined the impact caused by the insertion of wavelet coding, analyzing the parameters delay and processing time of coding. It also evaluates the performance of the wavelet coding completion from packages in terms of bit error rate (BER). The second analysis is the impact of the insertion of a strategy MBC in a control loop.

**Keywords:** Wavelet coding, fading, Sensor Networks Wireless, MBC.

## 1 Introdução

As arquiteturas tradicionais de comunicação nos sistemas de controle e manufatura industriais implementados são compostas por cabeamento. Segundo [Yang, 2006], este tipo de arquitetura de comunicação é centralizado, portanto não fornece os novos requisitos, modularidade, controle descentralizado, facilidade de diagnóstico e baixo custo.

A instalação de uma rede cabeada nas indústrias tem um custo muito alto, além da dificuldade da manutenção da rede. Diante dos problemas na rede cabeada uma solução é a aplicação e instalação de redes de sensores sem fio pelas suas características de baixo custo, flexibilidade, instalação, manutenção e sistemas remotos, segundo [Gomes et al., 2014].

Recentes avanços nos sistemas de controle distribuído, cujos sensores, atuadores e controladores são conectados

por uma rede de comunicação, demonstram o surgimento de uma nova abordagem para a utilização de redes industriais. Nessa abordagem, o controlador e a planta ficam fisicamente alocados em locais separados e são conectados por uma rede de comunicação, portanto formando uma malha de controle remota [Fischione et al., 2011].

As utilizações de redes de sensores sem fio no ambiente industrial podem ocasionar problemas como perda de informação e variações no tempo da transmissão dos dados pela rede, sendo determinante para a estabilidade do sistema de controle [Godoy, 2011]. Neste sentido, é crescente o número de técnicas que visam minimizar os efeitos degenerativos que a perda de informação possa ocasionar nos sistemas de controle. Dentre essas, estão as técnicas de controle avançado, mais precisamente o (MBC).

O controle preditivo baseado em modelo é uma estratégia de controle em que há a utilização direta de um modelo do processo para se calcular as ações de controle [Kwong, 2005]. Sua principal característica é a utilização do modelo de processo para prever o comportamento futuro das variáveis controladas [Rodriguez and Cortes, 2012]. O propósito de se utilizar técnicas MBC em aplicações de rede sensores sem fio (*Wireless Sensor Network* - WSN) parte do pressuposto de que os dados perdidos em decorrência de falhas na comunicação sejam fornecidos através da simulação desses modelos.

Neste trabalho adota-se uma estratégia MBC, que consiste em um controlador proporcional, integrativo e derivativo (PID), no qual é realizado uma simulação em paralelo com o modelo da planta, tendo-se como objetivo utilizar os parâmetros obtidos pela simulação quando o sistema detectar perda de informação.

Além do problema da perda de informação presente na comunicação sem fio o desvanecimento plano, produzido por múltiplos percursos de propagação, limita a aplicação de redes de sensores sem fio em uma malha de controle. Neste ambiente de comunicação, os sinais que chegam à antena receptora terão atenuações e atrasos distintos podendo comprometer de forma severa o desempenho destes sistemas. Com o objetivo de minimizar os efeitos degenerativos ocasionados pelo desvanecimento é crescente o número de técnicas de diversidade e codificação. As técnicas de diversidade consistem, basicamente, em gerar redundância (réplicas) do sinal transmitido no receptor. Essas réplicas são transmitidas sobre canais independentes e, portanto, são afetadas diferentemente, de maneira descorrelacionada, pelo canal. Com a geração de réplicas há uma distribuição da informação no tempo o que geralmente diminui consideravelmente a eficiência espectral do sistema. Porém, existe uma estratégia de se gerar diversidade sem comprometer a eficiência espectral do sistema, conhecida como codificação wavelet.

A codificação wavelet foi inicialmente proposta em [Tzannes and Tzannes, 1992], como uma nova alternativa para combater os efeitos do desvanecimento. A codificação wavelet baseia-se nas propriedades de ortogonalidade entre as linhas de uma matriz de coeficientes wavelets (MCW). No processo de codificação wavelet, cada bit de informação que entra no codificador, é multiplicado, de maneira sucessiva, pelos coeficientes de uma das linhas da MCW, disseminando a informação de cada bit sobre vários símbolos codificados. O resultado dessa codificação é um conjunto não-equiprovável de símbolos wavelet que carregam a informação de vários bits, e que serão transmitidos em intervalos de tempo distintos.

Devido à propriedade de ortogonalidade da MCW a sequência de bits de informação pode ser recuperada por um banco de correladores. Este mecanismo de espalhamento da informação no tempo, antes da transmissão e o recolhimento dela no receptor, contribui para melhorar a robustez do sistema de comunicação, à combinação desses efeitos do desvanecimento no plano variante no tempo e do ruído localizado.

Este trabalho tem como objetivo verificar a interferência da inserção do codificador e decodificador wavelet sobre um sistema de controle. Avalia-se o desempenho do sistema de controle utilizando codificação wavelet em termos de atraso e tempo de processamento dessa técnica de codificação, com o objetivo de se obter subsídios para o uso da codificação em sistemas de controle embarcados em microcontroladores.

Alguns trabalhos como [Silveira 2002, Silveira 2006, Ferreira 2009, Cavalcante 2014] frisam a contribuição da codificação wavelet em uma transmissão de fluxo contínuo de dados. O modelo proposto deste trabalho é avaliar o impacto da codificação wavelet quando utilizada para a transmissão de pacotes, sobre um canal sujeito ao desvanecimento perfeitamente descorrelacionado.

Na análise da técnica MBC verificou-se o impacto ocasionado com a inserção dessa técnica em um sistema de controle. Por meio dos resultados obtidos pelos testes experimentais com e sem a técnica MBC foi analisado o desempenho do controlador frente a um sistema de controle com perda de informação.

O restante deste artigo está organizado como segue. A Seção 2 apresenta uma revisão da técnica de controle utilizada neste trabalho. Na Seção 3 apresenta uma revisão da técnica de codificação wavelet. Na Seção 4 é apresentado o modelo do sistema desenvolvido e os detalhes do projeto. A Seção 5 ilustra a implementação da técnica de controle. Os resultados obtidos do sistema de controle são mostrados e discutidos na Seção 6. Finalmente, a Seção 7 apresenta as conclusões deste trabalho.

## 2 Sistema de controle

No desenvolvimento de um sistema de redes de sensores sem fio, o modelo matemático que descreve o comportamento da planta é importante para implementar uma estratégia de controle MBC. Nesta seção apresenta-se o modelo matemático da planta que foi utilizado neste trabalho.

### 2.1. Sistema de Tanques Acoplados ou Modelagem da Planta

Sistema de tanques acoplados usado para controle de nível é um modelo de planta que tem sido regularmente utilizado nas indústrias [Rodriguez and Cortes, 2012]. Na aplicação proposta neste artigo, o sistema utilizado consiste em um reservatório, uma bomba e dois tanques verticais, configurados de tal forma que o líquido é bombeado de um reservatório principal até o tanque superior (ou tanque 1), cujo orifício em sua base permita que esse líquido escoe para o segundo tanque, na parte inferior. A saída deste último viabiliza o retorno do líquido até o reservatório, para ser novamente bombeado. Apesar de outras possibilidades, a configuração adotada foi a de um sistema de uma entrada e uma saída (*Single Input Single Output* - SISO), conforme Figura 1.

Nessa configuração, a bomba transfere o líquido para o tanque 1, cujo nível deve ser controlado, sendo ignorado o nível do tanque 2. Essa composição determina o comportamento do sistema como sendo de primeira

ordem. O modelo matemático da Equação (1) representa a dinâmica do sistema de nível para o tanque 1.

$$\dot{L}_1 = -\frac{a_1}{A_1}\sqrt{2gL_1} + \frac{K_m}{A_1} \times V_p \quad (1)$$

onde  $\dot{L}_1$  é a variação do nível no tanque 1,  $a_1$  é a área do orifício de saída do Tanque 1,  $A_1$  área da base do tanque 1,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $K_m$  é a constante da bomba d'água e  $V_p$  é a tensão aplicada na bomba. A tabela 1 é utilizada para identificar os parâmetros da Equação (1).

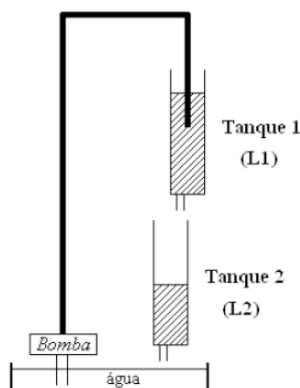


Figura 1: Sistema de tanques acoplados da Quanser.

Uma vez desenvolvida a equação que descreve o comportamento do sistema, se faz necessária a obtenção de um modelo linear a fim de que se possa desenvolver um controlador de processo baseado em estratégias lineares de controle. A Equação (2) representa o sistema em espaço de estado discreto para um período de amostragem  $T = 0,1$  segundos, linearizado no ponto  $L_{15} = 15$  cm.

Tabela 1: Parâmetros Adotados.

Parâmetros	Valores
$A_1$	15,518 cm <sup>2</sup>
$a_1$	0,178 cm <sup>2</sup>
$K_m$	4,6 cm <sup>3</sup> /sV
$g$	981 cm/s <sup>2</sup>

$$L(k+1) = 0,9935L(k) + 0,01477V_p(k) + 0,01477V_p(k-1) \quad (2)$$

### 3 Fundamentos da codificação Wavelet

A codificação wavelet utiliza as linhas da MCW com o objetivo de codificar os bits de informação. Como mostrado em [Resnikoff and Wells, 1998], uma MCW de posto  $m$  e gênero  $g$  tem dimensão  $m \times mg$ , denotada por:

$$A = \begin{pmatrix} a_0^0 & \dots & a_{mg-1}^0 \\ a_0^1 & \dots & a_{mg-1}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_0^{m-1} & \dots & a_{mg-1}^{m-1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

cujas as entradas podem pertencer ao conjunto dos números inteiros, reais, ou complexos.

Em particular, uma matriz MCW é denominada inteira e plana, quando seus coeficientes são números inteiros escolhidos no conjunto  $\{-1,1\}$ , e satisfazem as condições de escala wavelet [Resnikoff and Wells, 1998]:

$$\sum_{k=0}^{mg-1} a_k^j = m\sqrt{g}\delta_{j,0}, \quad 0 \leq j \leq m-1 \quad (4)$$

$$\sum_{k=0}^{mg-1} a_{k+ml}^{-j} + a_{k+m'l}^{j'} = mg\delta_{j,j'}\delta_{l,l'}, \quad 0 \leq j, j' \leq m-1 \quad (5)$$

$$0 \leq l, l' \leq g-1$$

sendo  $\delta_{j,j'}$  o delta de Kronecker.

A propriedade fundamental de MCWs para a codificação de canal é dada pela Equação (5). Esta equação afirma que as linhas de uma MCW de ordem  $m$  são mutuamente ortogonais sobre deslocamentos de comprimento  $lm$ , sendo  $0 \leq l \leq g-1$ . Esta equação também afirma que cada linha é ortogonal a uma cópia de si mesma, quando deslocada por  $lm$ , sendo  $0 \leq l \leq g-1$ .

#### 3.1. Algoritmo de codificação Wavelet

Nesta subseção, o algoritmo de codificação com matrizes wavelets, proposto em [Tzannes and Tzannes, 1992], é apresentado de forma matricial. O algoritmo do codificador wavelet pode ser implementado a partir de um produto matricial simples, expresso por

$$y = x \cdot C_{MCW} \quad (6)$$

em que  $y$  é a palavra-código wavelet e  $C_{MCW}$  é uma matriz de codificação, construída a partir de sucessivas repetições e deslocamento (de  $m$  posições) da MCW até que o número de linhas da matriz  $C_{MCW}$  seja igual à dimensão do vetor de bits de informação que se deseja codificar. Um exemplo de matriz de codificação construída a partir de uma MCW de posto  $m=2$  é:

$$C_{MCW} = \begin{pmatrix} a_0^0 & a_1^0 & a_2^0 & \dots & a_{2g-1}^0 \\ a_0^1 & a_1^1 & a_2^1 & \dots & a_{2g-1}^1 \\ & & a_0^0 & a_1^0 & a_2^0 & \dots & a_{2g-1}^0 \\ & & a_0^1 & a_1^1 & a_2^1 & \dots & a_{2g-1}^1 \\ & & & & a_0^0 & a_1^0 & a_2^0 & \dots & a_{2g-1}^0 \\ & & & & a_0^1 & a_1^1 & a_2^1 & \dots & a_{2g-1}^1 \\ & & & & & & \vdots & \ddots & \vdots \end{pmatrix} \quad (7)$$

Tabela 2: Símbolos wavelets produzidos pelo codificador com MCW 2 X 8.

$nT_s$	$y_n$
0	$a_0^0x_0 + a_1^0x_1$
1	$a_0^1x_0 + a_1^1x_1$
2	$a_2^0x_0 + a_3^0x_1 + a_0^0x_2 + a_1^0x_3$
3	$a_2^1x_0 + a_3^1x_1 + a_0^1x_2 + a_1^1x_3$
4	$a_4^0x_0 + a_5^0x_1 + a_2^0x_2 + a_3^0x_3 + a_0^0x_4 + a_1^0x_5$
5	$a_4^1x_0 + a_5^1x_1 + a_2^1x_2 + a_3^1x_3 + a_0^1x_4 + a_1^1x_5$
6	$a_6^0x_0 + a_7^0x_1 + a_4^0x_2 + a_5^0x_3 + a_2^0x_4 + a_3^0x_5 + a_0^0x_6 + a_1^0x_7$
7	$a_6^1x_0 + a_7^1x_1 + a_4^1x_2 + a_5^1x_3 + a_2^1x_4 + a_3^1x_5 + a_0^1x_6 + a_1^1x_7$
8	$a_8^0x_0 + a_9^0x_1 + a_6^0x_2 + a_7^0x_3 + a_4^0x_4 + a_5^0x_5 + a_2^0x_6 + a_3^0x_7 + a_0^0x_8 + a_1^0x_9$
9	$a_8^1x_0 + a_9^1x_1 + a_6^1x_2 + a_7^1x_3 + a_4^1x_4 + a_5^1x_5 + a_2^1x_6 + a_3^1x_7 + a_0^1x_8 + a_1^1x_9$
$\vdots$	$\dots$

Procedendo dessa forma, consegue-se manter as relações de ortogonalidade definidas pela Equação (5) entre as linhas da  $C_{MCW}$ . Os símbolos gerados pelo codificador com MCW 2 X 8 é apresentado na Tabela 2.

### 3.2. Algoritmo de decodificação Wavelet

Na recepção a sequência de bits de informação  $x_n$  pode ser recuperada a partir da sequência de símbolos  $y_n$  recebida utilizando-se um banco de  $m$  correlatores de comprimento  $mg$ , casados com as  $m$  linhas da MCW utilizada na codificação wavelet, ilustrado na Figura 2 da referência [Ferreira, 2009].

Admitindo ausência de ruído, a saída do correlator  $z_1^j$ ,  $j \in \{0,1,\dots, m-1\}$ , casado com a linha  $a^j$  da MCW, no instante de tempo  $i=m(g+p)-l$ , em que  $p \in Z$ , é dada por:

$$\begin{aligned} z_1^j &= \sum_{k=0}^{mg-1} a_{mg-1}^j y_{i-k} \\ &= \sum_{k=0}^{mg-1} \sum_{j'=0}^{m-1} \sum_{l=0}^{g-1} a_k^j (a_{k-lm}^{j'} x_{j'+lm+i-(mg-1)}) \\ &= x_{j+i-(mg-1)} \sum_{k=0}^{mg-1} a_k^j a_k^j \\ &= mg x_{j+i-(mg-1)} \end{aligned} \quad (8)$$

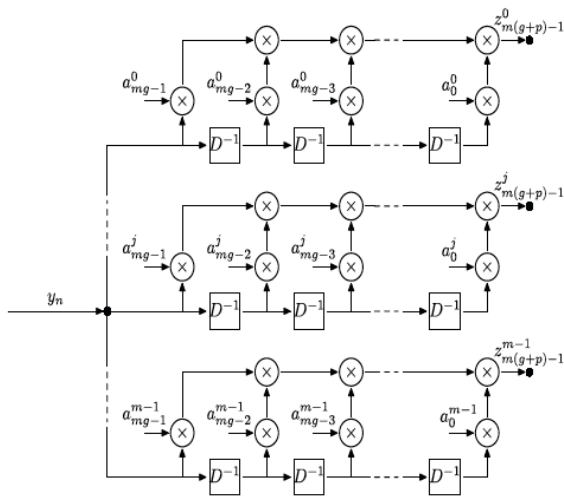


Figura 2: Decodificador wavelet baseado uma MCW  $m \times mg$ .

De forma geral, levando-se em consideração a interferência causada pelo canal de comunicação sobre os símbolos wavelet transmitidos, assume-se estimativas dos bits dadas por  $x_{j+i-(mg-1)} = \text{sgn}(z_1^j)$ .

## 4 Modelo do sistema

A composição da bancada experimental utilizada na execução do projeto consiste em um circuito à base de amplificadores operacionais (Figura 3) responsável pela emulação da planta de primeira ordem, microcontroladores ATmega 328p, representando o elemento sensor, o atuador e o controlador, e módulos de

comunicação sem fio nrf24L01 para realizar o enlace de comunicação. Uma visão panorâmica da estrutura é ilustrada na Figura 4.

O elemento sensor recebe da planta, através de comunicação cabeada, um sinal de tensão referente ao nível do tanque 1. Esse sinal é transmitido através do módulo rádio frequência para o controlador, que executa uma rotina de controle PID tomando como referência o valor que é passado pelo computador. O atuador, por fim, recebe do módulo controlador, via comunicação sem fio, a ação de controle e produz o sinal PWM a ser injetado na bomba.

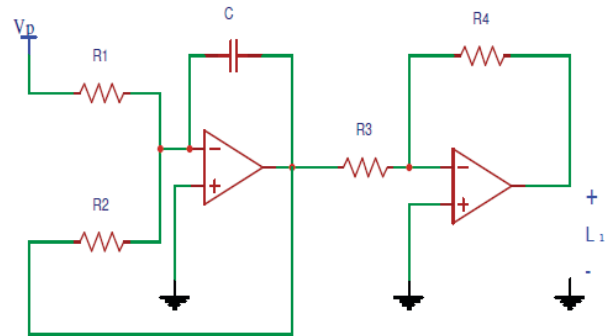


Figura 3: Esquema elétrico para simulação da planta.

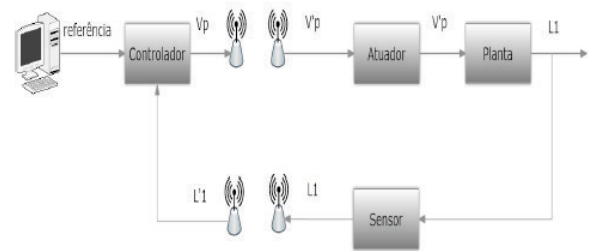


Figura 4: Diagrama do sistema para a realização dos testes experimentais.

Na intenção de se aumentar a probabilidade de perda de pacote, alguns parâmetros foram previamente configurados, a potência de transmissão foi definida como sendo de -18 dBm, o tamanho do pacote fixado em 16 bytes e foi desativado o *cyclic redundancy check* (CRC) para evitar a verificação de erro na comunicação sem fio afim de verificar o desempenho da codificação wavelet.

### 4.1. Modelo computacional simulado

O modelo do sistema com codificação wavelet adotado para simulações computacionais está ilustrado na Figura 5. Neste sistema, a fonte de informação gera uma sequência de bits  $x_n$  estatisticamente independentes e equiprováveis. Essa sequência de bits é então codificada por uma MCW real e plana de dimensões  $m \times mg$ .

Após realizar a codificação wavelet, os símbolos  $y_n$  são modulados utilizando uma constelação PSK, sendo cada símbolo wavelet mapeado em um ponto da constelação, e transmitido por uma única antena sobre um canal com desvanecimento Rayleigh decorrelacionado. Assume-se que o canal é coerente na frequência, portanto o canal é constante durante um intervalo de sinalização, apesar de



ser variante no tempo. É importante observar que  $n$  bits de informação são codificados em  $n$  símbolos wavelets e enviados durante  $n$  intervalos de sinalização. Entretanto, como a transmissão adotada é por pacote de dados, a calda da codificação de cada pacote, de tamanho  $mg-m$ , pode influenciar na eficiência espectral do sistema quando o tamanho do pacote de dados for próximo do tamanho dessa calda. A transmissão por pacotes é necessária para compatibilizar a codificação wavelet embarcada no microcontrolador ao módulo RF utilizado na interface aérea do sistema.

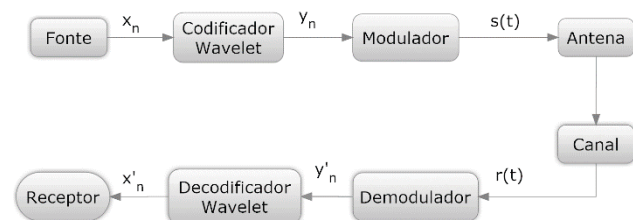


Figura 5: Modelo do sistema de comunicações baseado na codificação wavelet.

A saída do canal em tempo discreto é modelada pela variável aleatória complexa  $r_n = \alpha_n s_n + \omega_n$ , sendo  $\alpha_n$  a amostra de desvanecimento,  $s_n$  o símbolo transmitido, e  $\omega_n$  o ruído complexo gaussiano branco, de média nula e partes real e imaginária de mesma variância  $N_0/2$ .

Na recepção, considera-se que o receptor tem perfeita informação sobre o estado do canal, ou seja, ele conhece o valor exato do desvanecimento Rayleigh em cada intervalo de sinalização.

Neste trabalho foi adotada duas regras de demodulação, Euclidiana e máxima probabilidade a posteriori (*maximum a posteriori probability* -MAP). Após a demodulação, as estimativas dos sinais recebidos são inversamente mapeadas nos símbolos  $y_n$ .

O sistema com codificação wavelet considerado foi analisado em termos de sua BER.

## 5 Implementação da técnica MBC

No controle baseado em modelo, um modelo matemático da dinâmica do processo é explicitamente incorporado ao sistema de controle do processo, a fim de melhorar o desempenho do sistema [Estrada and Antsaklis, 2009]. Algoritmos mais complexos de controle, como o caso do MBC, utilizam o modelo matemático da planta para tratar problemas de perda de informações na rede [Scorzoni, 2011].

A metodologia de controle baseado em modelo aqui adotada tem por objetivo reduzir os problemas, como a perda de dados, decorrentes da utilização de protocolos sem fio em controle de processos. Esta técnica utiliza um modelo matemático da planta para gerar os dados quando ocorrerem perdas de pacotes durante os ensaios, garantido o desempenho do controle.

A metodologia empregada para implantação do MBC consiste na utilização do *timer* de um microcontrolador. Esse *timer* é previamente configurado para uma interrupção por *overflow* para um período de 0,15 s. Uma

vez ocorrido o *overflow* o sistema detecta que houve perda de pacote e ao invés de esperar o próximo para calcular a ação de controle, o controlador recebe o valor estimado do nível da planta, obtido da simulação baseada no modelo apresentado na Seção 2.

A Figura 6 apresenta de forma simplificada a estratégia de controle. A “chave *overflow*” ilustra uma representação da ocorrência ou não da interrupção por *overflow*. Em caso de perda de pacote, o sinal enviado ao controlador é obtido através da equação em espaço de estado do sistema discutido na Seção 2. Quando não houver perda, o sinal enviado para o controlador é calculado a partir do sinal mensurado pelo sensor.

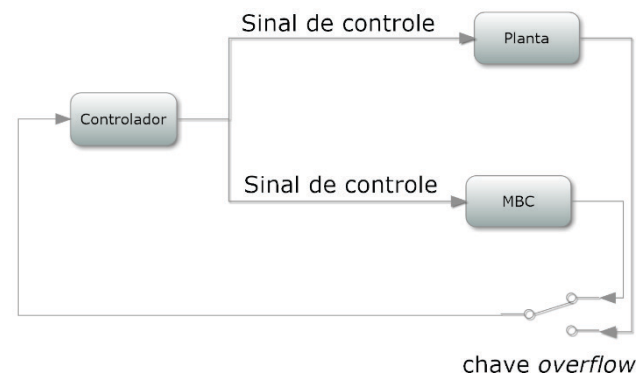


Figura 6: Esquema simplificado da estratégia de controle baseado em modelo.

## 6 Resultados obtidos

Nesta seção são apresentados os resultados de desempenho obtidos através de simulações computacionais e de testes experimentais. A Subseção 6.1 ilustra os resultados obtidos através de simulações computacionais e experimentais da codificação wavelet.

### 6.1. Resultados obtidos com a codificação Wavelet

Nesta subseção são apresentados os resultados de desempenho obtidos através de simulações computacionais dos sistemas com codificação wavelet com MCW 2x8 e MCW 2x32, sobre canais com desvanecimento Rayleigh perfeitamente entrelaçados e perfeitamente estimados na recepção.

Na Figura 7 apresenta-se as curvas de desempenho do sistema com MCW 2x8 com critério de demodulação Euclidiana. Como referência, se encontra também na Figura 7 uma curva de BER obtida para uma transmissão sequencial de dados, em condições equivalentes as consideradas em [Silveira, 2006]. A partir dos resultados obtidos, observa-se que o tamanho do bloco empregado no sistema baseado em transmissão de pacotes possui pequeno impacto no sistema com codificação wavelet, em termos de BER.

A Figura 8 apresenta as curvas de desempenho do sistema com MCW 2x8 com critério de demodulação MAP. Como referência, se encontra também na Figura 8 uma curva de BER obtida para uma transmissão sequencial de dados, em condições equivalentes as consideradas em [Silveira, 2006]. A partir dos resultados obtidos, observa-

se que para pacotes com 10 e 16 símbolos gera um ganho de desempenho em relação ao sistema com transmissão de fluxo de bits, ou ao sistema com transmissão de pacotes de tamanhos maiores.

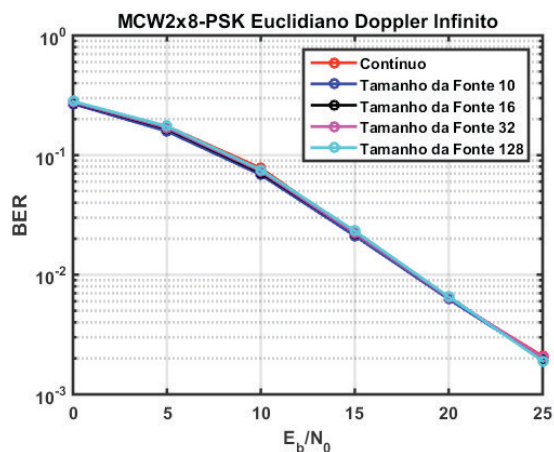


Figura 7: MCW 2 X 8 – Demodulação Euclidiana.

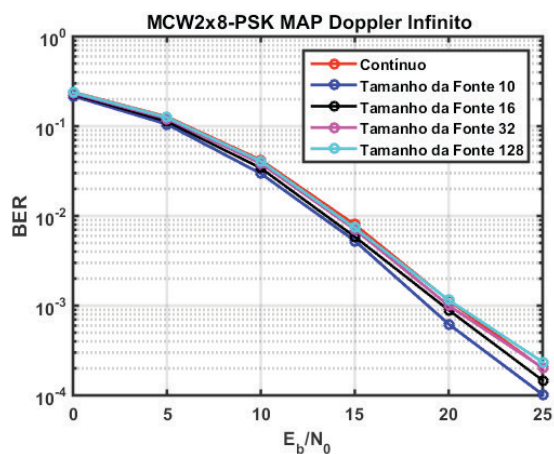


Figura 8: MCW 2 X 8 – Demodulação MAP.

A Figura 9 apresenta as curvas de desempenho do sistema com MCW 2 X 32 com critério de demodulação MAP. Como referência, se encontra também na Figura 9, curva de BER versus  $E_b/N_0$  obtida para um sistema wavelet com transmissão de fluxo de bits, em um contexto similar ao considerado em [Ferreira et al., 2007]. A partir dos resultados obtidos, observa-se que pacotes pequenos em relação a dimensão da MCW utilizada na codificação consegue produzir maiores ganhos de desempenho no sistema de comunicação, ao custo de uma diminuição da eficiência espectral do sistema. Entretanto, considerando o tempo de resposta lento de plantas industriais, essa diminuição da eficiência espectral do sistema não ocasiona qualquer impacto sobre o sistema de controle.

Após a análise de desempenho em termos de taxa de erro de bit versus  $E_b/N_0$ , a codificação wavelet foi embarcada em uma planta de controle, conforme ilustrado na Figura 4, afim de verificar o impacto da codificação wavelet no sistema. Na Figura 10 apresenta as curvas de desempenho do sistema de controle obtidos pelos experimentos. Como referência, se encontra também na Figura 10, curva obtida com o experimento sem a codificação. A partir da Figura 10, pode-se observar que a adição da codificação wavelet não gera atraso no sistema de controle. Por fim, também

foi mensurado o tempo de processamento do codificador e decodificador wavelet embargado no microcontrolador ATmega 328p com clock de 16 MHz, ficando, respectivamente, em torno de 450  $\mu$ s e 180  $\mu$ s, ratificando os resultados apresentados na Figura 10, visto que o tempo de processamento na escala de  $\mu$ s não gera atraso num sistema de controle com período de amostragem de 0.1 s.

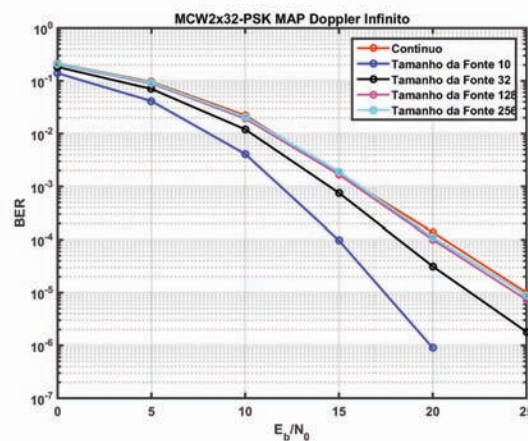


Figura 9: MCW 2 X 32 – Demodulação MAP.

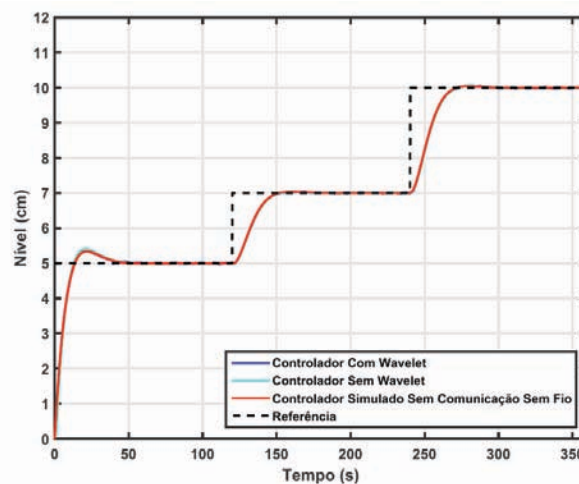


Figura 10: Sistema de controle com e sem codificação wavelet.

## 6.2. Resultados obtidos com a técnica MBC

A validação da técnica de controle baseado em modelo foi feita por meio de ensaios, a partir dos quais pôde-se visualizar os efeitos negativos das perdas de pacotes de dados.

A distância entre o módulo sensor e o módulo controlador é de aproximadamente 5 metros, com cada teste sendo executado por um período de 120 segundos. O gráfico da Figura 11 apresenta resultados experimentais considerando as perdas de 1, 24, 253 e 375 pacotes, sem o emprego da estratégia MBC. Apesar de uma considerável perda no desempenho, a estabilidade do sistema foi mantida.

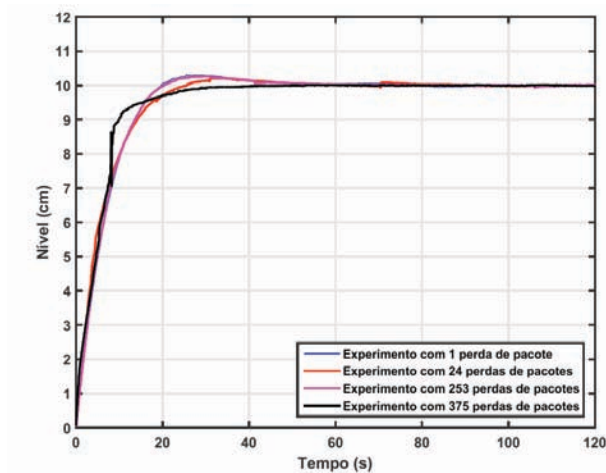


Figura 11: Sistema de controle sem a técnica MBC.

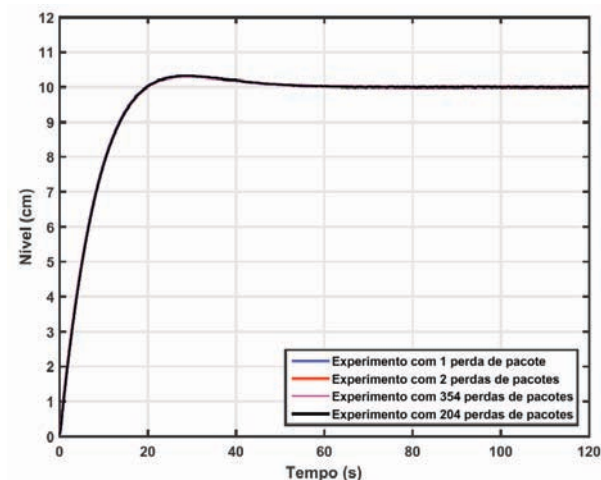


Figura 11: Sistema de controle com a técnica MBC.

Ensaio semelhante foram realizados utilizando a técnica de controle baseado em modelo. Nesta ocasião, foram realizados testes com perdas de 1, 20, 204 e 354 pacotes de dados. A Figura 12 retrata o gráfico contendo os resultados alcançados. No caso de um pacote demorar mais do que o tempo de *overflow* estabelecido em 0,15s, o controlador utilizará dados resultantes da simulação para estimar o sinal de controle.

Uma comparação do desempenho dos sistemas com e sem a técnica MBC pode ser observada na Figura 13. Percebe-se que a utilização da técnica MBC, apesar das perdas de pacotes, proporcionou um desempenho de controle satisfatório, validando a eficiência deste método de controle de perdas de pacotes.

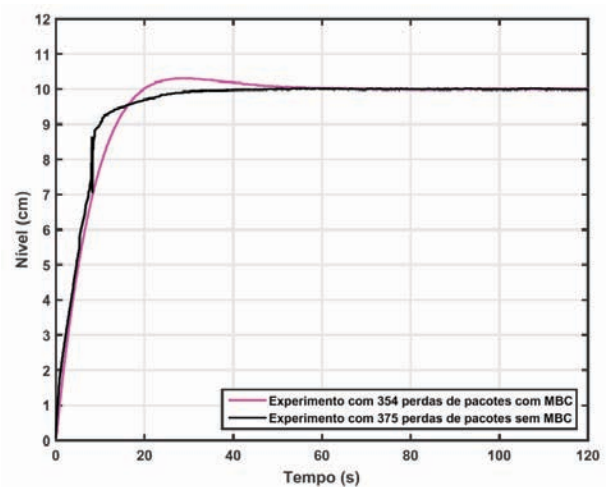


Figura 13: Comparação do desempenho do controlador com e sem a técnica MBC.

## 7 Conclusão

Este trabalho avalia o impacto da inserção de duas técnicas, separadamente, em um sistema de controle, utilizando comunicação sem fio, em relação ao desempenho do controlador. Os resultados obtidos indicam que a técnica de codificação wavelet possui baixa complexidade computacional em termos de tempo de processamento em um microcontrolador ATmega 328p. Com esses resultados e com a robustez da codificação wavelet frente aos efeitos provocados pelo desvanecimento e pelo ruído aditivo branco, demonstrados em trabalhos anteriores e neste trabalho, verifica-se a viabilidade do uso da técnica em diferentes cenários de sistemas de controle utilizando comunicação sem fio.

Também neste trabalho avalia-se o impacto da implementação de uma técnica MBC em um cenário com perdas de informação. Os resultados obtidos indicam que quando é conhecido o modelo da planta a técnica implementada minimiza os efeitos degenerativos ocasionado pela perda de informação em uma malha de controle.

Por fim, este trabalho fornece subsídios para trabalhos futuros, nos quais pretende-se analisar um sistema de controle com as duas técnicas implementadas, de forma verificar o impacto da codificação wavelet com transmissão de pacotes em um canal com efeito.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos à CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro ao trabalho.

## Referências bibliográficas

- [Cavalcante, 2014] Cavalcante, L. C. P. (2014). Avaliação de desempenho da codificação wavelet em canais seletivos em frequência.
- [Estrada and Antsaklis, 2009] Estrada, T. and Antsaklis, P. J. (2009). Performance of model-based networked control systems with discrete-time plants. In Control and Automation, 2009. MED'09. 17th Mediterranean Conference on, pages 628–633. IEEE.

- [Ferreira, 2009] Ferreira, T. R. (2009). Modulação Quantizada para Sistemas com Codificação Wavelet Sujeitos ao Desvanecimento Rayleigh. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [Ferreira et al., 2007] Ferreira, T. R., Silva, S. G., Silveira, L. F. Q., and Silveira Júnior, L. G. Q. (2007). Otimização de sistemas psk com codificação wavelet em canais com desvanecimento plano. In XXVII simpósio Brasileiro de telecomunicações.
- [Fischione et al., 2011] Fischione, C., Park, P., Di Marco, P., and Johansson, K. H. (2011). Design principles of wireless sensor networks protocols for control applications. In *Wireless Networking Based Control*, pages 203–238. Springer.
- [Godoy, 2011] Godoy, E. P. (2011). Desenvolvimento de sistemas de controle via rede (NCS) para aplicações em redes com protocolo CAN. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- [Gomes et al., 2014] Gomes, R. D., Alencar, M. S., Fonseca, I. E., and Lima Filho, A. C. (2014). Desafios de redes de sensores sem fio industriais. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, 4:1–12.
- [Kwong, 2005] Kwong, W. (2005). Introdução ao Controle Preditivo com Matlab.
- [Resnikoff and Wells, 1998] Resnikoff, H. L. and Wells, R. O. (1998). *Wavelet Analysis: The Scalable Structure of Information: With 92 Figures*. Springer Science & Business Media.
- [Rodriguez and Cortes, 2012] Rodriguez, J. and Cortes, P. (2012). *Predictive control of power converters and electrical drives*, volume 40. John Wiley & Sons.
- [Scorzoni, 2011] Scorzoni, F. (2011). Desenvolvimento de um sistema de controle via rede híbrido utilizando can e zigbee.
- [Silveira, 2002] Silveira, L. F. Q. (2002). Desempenho de sistemas com codificação wavelet e diversidade espaço-temporal em canais sujeitos ao desvanecimento rayleigh plano.
- [Silveira, 2006] Silveira, L. F. Q. (2006). Análise da Codificação Wavelet em Sistemas Sujeitos ao Desvanecimento Rayleigh Plano. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande.
- [Tzannes and Tzannes, 1992] Tzannes, M. and Tzannes, M. (1992). Bitby-bit channel coding using wavelets. In *Global Telecommunications Conference, 1992. Conference Record., GLOBECOM'92. Communication for Global Users., IEEE*, pages 684–688. IEEE.
- [Yang, 2006] Yang, T. C. (2006). Networked control system: a brief survey. *IEE Proceedings Control Theory and Applications*, 153(4):403.