

## UMA COMPARAÇÃO ENTRE OS PROTOCOLOS TTP E *FLEXRAY* USANDO UM SIMULADOR DE TEMPO REAL

MOISÉS PEREIRA BASTOS<sup>1</sup>; OSAMU SAOTOME<sup>2</sup>; LUIZ ALBERTO QUEIROZ CORDOVIL JUNIOR<sup>3</sup>

1 – UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS (UEA); 2 – INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA(ITA); 3 - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS (UEA)

*moises\_bastos@hotmail.com*

**Abstract.** *This article presents a comparison between fault tolerance protocols TTP and Flexray using a real-time simulator, proposing model an application brake-by-wire fault tolerant that generates a intense exchange of data through the communication network. This work is based on a model of a antilock brake system to one wheel by Michaels and Quinn (1997), extending this work to develop a brake-by-wire application, composed mainly of five nodes, with one central controller and four nodes on the wheel of the vehicle. After a brief introductory description on basic concepts needed to understand the design, the brake-by-wire application will be presented. This section will be presented concepts about application operation, fault tolerance, control braking. The simulation was performed using real-time kernels of real-time simulation tool True Time based on Matlab/Simulink. The simulation demonstrates the different behaviors of TTP and Flexray protocols varying bandwidth and utilization rate of the communication network. The results obtained with real-time simulation showed that the protocol TTP presented greater stability and security for such hard real-time application.*

**Keywords:** *TTP. Flexray. Real-time. Simulation. Brake-by-wire.*

### I. INTRODUÇÃO

Muitos sistemas controlados por computador são tidos como sistemas distribuídos formados por nós computacionais com poder de processamento e uma rede de comunicação conectando os nodos computacionais. Não é incomum para o sensor, atuador e cálculos de controle residirem em diferentes nós, como em sistemas de veículos, por exemplo. Isto dá origem a malhas de controle em rede e que consequentemente aumenta a complexidade do sistema. Dentro do nó, controladores são geralmente implementados com uma ou várias tarefas em um microprocessador com sistema operacional de tempo real (CERVIN; ARZEN).

A área automotiva tem auferido benefício da utilização dos sistemas embarcados distribuídos. Atualmente, os veículos possuem combinações múltiplas de sensores, atuadores e unidades de controle eletrônicas, sendo cada vez mais necessária a implementação de sistemas de controle avançados nesta área. Tal evolução trouxe aos automóveis aplicações eletrônicas, que oferecem maior conforto e principalmente segurança, tais como: controle de tração, controle de estabilidade e sistemas de segurança ativos. Muitas dessas funções não são autônomas, necessitando trocar informações (geralmente com restrições rigorosas de tempo) com outras aplicações. Com isso, foi necessário o desenvolvimento de sistemas de comunicação mais eficientes na troca de dados, com maior imunidade a qualquer tipo de interferência e capaz de suportar sistemas

de controle distribuídos. Um dos protocolos implementados para suprir tal carência foi o *Flexray*.

Além do *Flexray* estar sendo bem aceito na área automotiva, projeta-se difundir-lo em outros domínios de aplicação, como exemplo à área Aeroespacial. Paulitsch e Hail (2008)<sup>0</sup> fazem um estudo para a utilização do protocolo em gerações futuras de aviões e também em espaçonaves, uma vez que o *Flexray* contempla os exigentes requisitos de tais aplicações.

Segundo Rushby (2002), sistemas de controle e sistemas aviônicos para aeronaves usam sistemas distribuídos de controle tolerantes a falha para fornecer funções de segurança crítica como controle de voo e de motor. Tal arquitetura deve tolerar panes de hardware em seus próprios componentes e deve oferecer garantias muito fortes sobre a exatidão e a confiabilidade dos seus próprios mecanismos e serviços. Os recursos uma vez encontrados em barramentos aeronáuticos estão sendo disponibilizados nos barramentos destinados ao mercado automobilístico, onde a economia de escala garante preços baixos. O baixo preço dos barramentos automotivos, em seguida, os torna atraentes para aplicações em determinadas aeronaves, desde que possam alcançar a segurança necessária.

Com isso, existe uma freqüente utilização de TTP/C, inicialmente de caráter aeronáutico, na área automotiva, e já existem também estudos para utilização de *Flexray* (barramento tipicamente automotivo) na área aeroespacial. Heller e Reichel (2009) relatam um estudo para viabilizar o *Flexray* em aplicações aeronáuticas.

O presente trabalho analisa o comportamento desses barramentos utilizando modelamento e simulação de tempo real, com a ferramenta computacional *TrueTime*. No trabalho de Cervin, Ohlin e Henriksson (2007), tem-se uma introdução ao *TrueTime*, bem como uma demonstração de sua utilização para simular aplicações controladas via rede.

Para tal comparação ser implementada, foi necessário modelar e simular uma aplicação que gerasse intensa troca de dados através do seu barramento. Atualmente, as tecnologias *X-by-wire* tem atraído grandes investimentos e interesse dentro do campo automobilístico devido a sua complexidade e futuros benefícios que serão alcançados, tais como conforto e segurança. *Drive-by-Wire* é uma variação do termo *X-by-Wire* que significa substituir um sistema puramente mecânico por um eletromecânico formado por um módulo de controle, sensores e atuadores. Logo, *drive-by-wire* estende tais transformações aos veículos. *Drive-by-Wire* possui varias variações, entre elas: *brake-by-wire* (freio eletrônico), *steer-by-wire* (Direção eletrônica), *throttle-by-wire* (acelerador eletrônico), entre outros.

De acordo com o propósito do trabalho, alta complexidade na comunicação, ficou definida a modelagem de sistema *brake-by-wire* que possui uma rede de comunicação com cinco nós trocando informações entre eles, diferentemente de uma aplicação *steer-by-wire* que possui basicamente dois nós. Sistemas *brake-by-wire* consistem em substituir sistema de freio hidráulico ou eletrônico por uma rede de controle de tempo real. Neste sistema a intenção de freio é enviada eletronicamente do pedal de freio aos atuadores de freio eletromecânicos ou eletro-hidráulicos posicionados em cada roda.

O presente estudo apresenta a simulação de uma aplicação *brake-by-wire* tolerante a falhas em *TrueTime* com o intuito de verificar o comportamento do TTP/C e *Flexray* em determinada situação de operação em tempo real crítico.

## II. MODELANDO UMA APLICAÇÃO BRAKE-BY-WIRE

### 2.1 Análise Física

Todo veículo em movimento se desloca com uma velocidade que é definida pela equação (1):

$$v_{\text{carro/roda}} = \frac{ds}{dt} \quad (1)$$

Tal expressão demonstra que o veículo desloca um espaço  $s$  durante um intervalo de tempo  $t$ , sendo esta definição de velocidade conhecida como velocidade linear ou velocidade instantânea. Mas o deslocamento sofrido pelos veículos é imposto através do giro das rodas, isso quer dizer que para cada rotação do seu conjunto de rodas o veículo desloca uma distância que é equivalente ao perímetro da roda, sendo o perímetro da roda definido pela equação (2):

$$s = r\theta \quad (2)$$

Onde :

$r$  = raio da roda

Teta = ângulo formado pelo arco

E a velocidade angular  $\omega$  é definida pela equação (3):

$$\omega_{\text{roda(girolivre)}} = \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

Por conseguinte para se relacionar a velocidade linear do conjunto carro/roda à velocidade angular da roda, sendo possível realizar esta relação uma vez que a distância percorrida pelo automóvel é idêntica ao perímetro da roda multiplicado por sua frequência de giro, substitui-se (2) em (1), temos a equação (4):

$$v_{\text{carro/roda}} = \frac{ds}{dt} = \frac{d(r\theta)}{dt} \\ v_{\text{carro/roda}} = r \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

Substituindo (3) em (4), tem a equação (5):

$$v_{\text{carro/roda}} = r\omega_{\text{roda}} \quad (5)$$

Evidenciando a velocidade angular da roda, tem-se a equação (6):

$$\omega_{\text{roda}} = \frac{v_{\text{carro/roda}}}{r} \quad (6)$$

Então, para um veículo em movimento usualmente a equação (6) representa a velocidade angular da roda que por sua vez define a velocidade do carro como um todo, mas isso nem sempre é verdade, já que durante uma frenagem, onde a roda trava, a velocidade angular do conjunto é zero e a velocidade linear é um valor arbitrário maior que isso. Quando isso ocorre, o veículo sofre um deslizamento, isso quer dizer que o veículo, devido a sua inércia, tende a continuar sua trajetória com uma velocidade que é proporcional a qual vinha se movimentando até o instante da frenagem, sendo essa velocidade proporcional a velocidade angular da roda ante esse instante, então a equação (6) será designada pela equação (7):

$$\omega_{\text{roda(girolivre)}} = \frac{v_{\text{carro/roda}}}{r} \quad (7)$$

Assim a roda passará a girar numa velocidade desproporcionalmente menor que a velocidade com que o carro se movimenta e devido a isso sofrera um arrasto, e dessa forma sua velocidade angular será chamada de  $\omega_{\text{roda(giroadarrastado)}}$  e será representada pela equação (8):

$$\omega_{\text{roda(giroadarrastado)}} \propto \frac{v_{\text{carro/roda}}}{r} \quad (8)$$

chegando à seguinte conclusão exposta na equação (9):

$$\text{slip} = 1 - \frac{\omega_{\text{roda(giroadarrastado)}}}{\omega_{\text{roda(girolivre)}}} \quad (9)$$

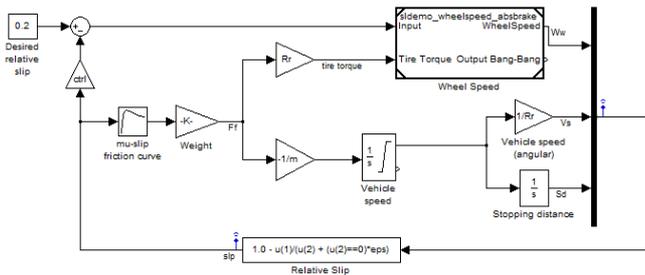
Da equação (9), pode-se ver que o *slip* é zero quando a velocidade da roda com giro livre e arrastado são iguais. O valor desejável de *slip* é 0,2, de tal maneira que o número de revoluções da roda seja igual 0,8 vezes o número de revoluções sobre condições de não-frenagem com a mesma velocidade do veículo. Isso aumenta a adesão entre o pneu e a estrada e diminui a distância de parada.

### 2.2 Modelagem

Para o conjunto roda, pneu e freio foi utilizado o modelo de frenagem ABS para apenas 1 roda proposto por Michaels e Quinn (1997), mostrado na Figura 1. O coeficiente de atrito entre o pneu e a superfície da estrada,  $\mu$ , é uma função empírica do *slip*, conhecida como curva *mu-slip*. Foi criado curvas *mu-slip* passando variáveis para o diagrama de bloco usando uma tabela de pesquisa Simulink. O modelo multiplica o coeficiente de atrito  $\mu$ , pelo peso da roda  $W$ , para render a força de atrito  $F_f$ , agindo sobre a circunferência do pneu.  $F_f$  é dividida pela massa do veículo

para gerar a desaceleração do veículo, que o modelo integra para obter a velocidade do veículo.

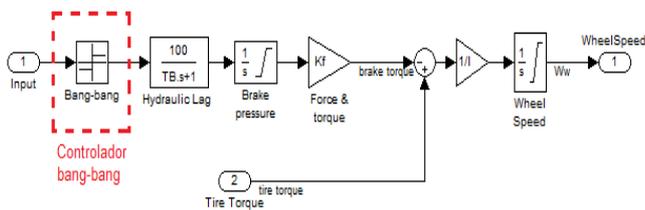
Figura 1 – Modelo ABS para uma única roda



Fonte: (MICHAELS; QUINN,1997)

Nesse modelo, foi utilizado um controlador de anti-bloqueio de travagem ideal, que usa controle "bang-bang" com base no erro entre o escorregamento real e o desejado. Foi ajustado o deslizamento desejado para o valor de escorregamento em que a curva mu-derrapante atinge um valor de pico, sendo este o valor ideal para uma distância mínima de frenagem (MICHAELS; QUINN,1997) conforme Figura 2.

Figura 2 - Unidade Wheel Speed



Fonte: (MICHAELS; QUINN,1997)

Para controlar a taxa de variação de pressão de frenagem, o modelo subtrai o *slip* real do *slip* desejável e alimenta esse sinal em um controlador bang-bang, conforme mostra Figura 2. Este liga/desliga passa através de uma taxa de defasagem de primeira ordem que representa o atraso associado com as linhas hidráulicas do sistema de freio. O modelo integra então a taxa de filtrado para produzir a pressão de freio real. O sinal resultante, multiplicado pela área do pistão e raio em relação a roda (Kf), é o torque de frenagem aplicado ao volante (MICHAELS; QUINN,1997).

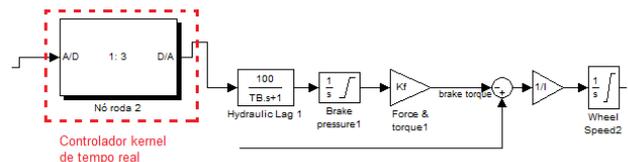
O modelo multiplica a força de atrito da roda pelo raio da roda (RR) para obter o torque de aceleração da estrada sobre a roda. O torque de freio é subtraído para dar um torque líquido na roda. Dividindo o torque líquido pela inércia de rotação da roda *I*, tem-se a aceleração da roda que posteriormente é integrada para fornecer a velocidade da roda. A fim de manter a velocidade da roda e do veículo positivas, integradores limitadores são utilizados nesse modelo (MICHAELS; QUINN,1997).

### 2.3 Modelo ABS Proposto Para Uma Roda

No modelo proposto para este trabalho, cada nó, situado na roda do veículo, possui um *kernel* de tempo real da ferramenta True Time como controlador de bloqueio de travagem. Ele funciona basicamente como o controlador bang-bang com base no erro entre deslizamento e

escorregamento real desejado, com a vantagem de ter um monitoramento de tempo real. O *kernel* recebe como entrada o coeficiente *slip* (escorregamento) da roda e envia para o nó Controlador Central (CC) através da rede de comunicação. Como saída temos o sinal de frenagem enviado pelo nó CC que vai atuar na roda local. A Figura 3 demonstra o *kernel* que está intitulado como "Nó roda 2".

Figura 3 - Unidade Wheel slip, com a substituição proposta do controlador bang-bang pelo kernel de tempo real.



Tomando como base o modelo de frenagem ABS de 1 roda proposto por Michaels e Quinn (1997) foi possível modelar o modelo de frenagem *brake-by-wire* ABS de um veículo. Basicamente um sistema *brake-by-wire* possui 5 nós de controle, sendo um nó controlador central (CC) e 4 nós locais junto as rodas do automóvel, conforme apresentado nas Figura 4 e Figura 5.

Figura 4 – Disposição dos nós em um sistema *brake-by-wire*

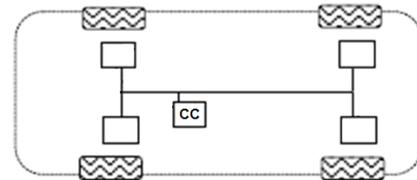
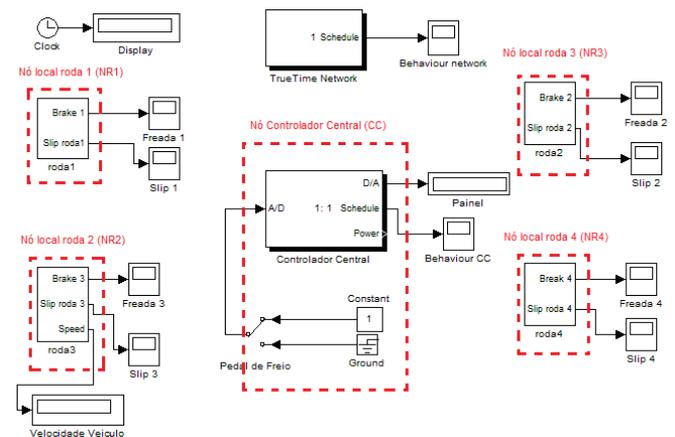


Figura 5 – Modelo ABS com 4 rodas utilizando *kernels* True Time com os nós destacados.



Na presente aplicação, utilizou-se *kernels* da ferramenta True Time conforme mostra a Figura 5.

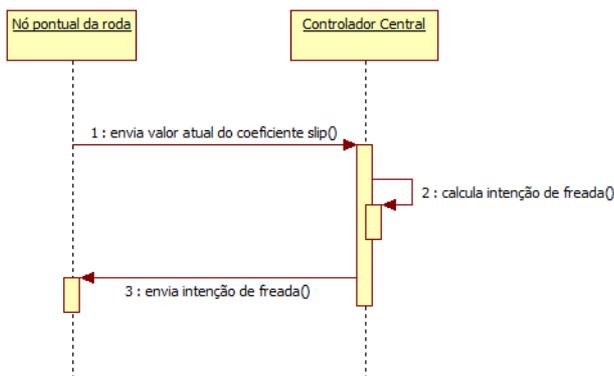
### 2.4 Funcionamento

O funcionamento da aplicação consiste da interação em tempo real entre os nós locais às rodas (NR1, NR2, NR3 e NR4) e o CC. A fim de facilitar o entendimento, foi gerado um diagrama de sequência que visa demonstrar o envio e recebimento de pacotes da aplicação proposta. A Figura 6 demonstra o envio e recebimento de pacotes que ocorre de um nó local em uma roda ao CC, visando informar

o valor atual do coeficiente *slip* e receber a intenção de freada, iniciando a comunicação em tempo real.

Conforme mostra a Figura 6, existe um monitoramento exercido pelo nó CC, que recebe dados dos nós das rodas, e através de uma análise retorna aos mesmos a intenção de frenagem que cada roda deve exercer. O período deste ciclo de comunicação é determinado pela aplicação e será chamado de período de amostragem. Com isso a aplicação tem um *feedback* de todos os nós locais as rodas.

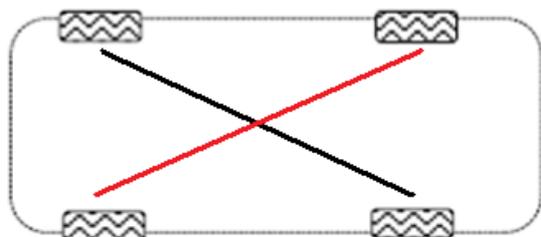
Figura 6 – Diagrama de sequência para a aplicação BBW proposta



### 2.5 Controle de Frenagem das Rodas

Uma vez que se tem um veículo disposto de 4 rodas é necessário um controle de frenagem correto, isto é, evitando a perda de controle quando for necessária uma parada brusca. Um controle bastante utilizado no meio automotivo é o controle em X, o qual evita que o veículo perca o controle mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Controle de frenagem em X



O controle em X funciona da seguinte maneira: qualquer intenção de freada é enviada igualmente aos pares, isto é, se o CC quer enviar uma determinada intenção de frenagem ao nó 1, será obrigatoriamente enviada a mesma intenção ao nó 4. O mesmo comportamento ocorre aos nós 3 e 4, conforme mostra Figura 7.

## III. RESULTADOS

### 3.1 Simulação da Aplicação BBW Proposta com Protocolo TTP

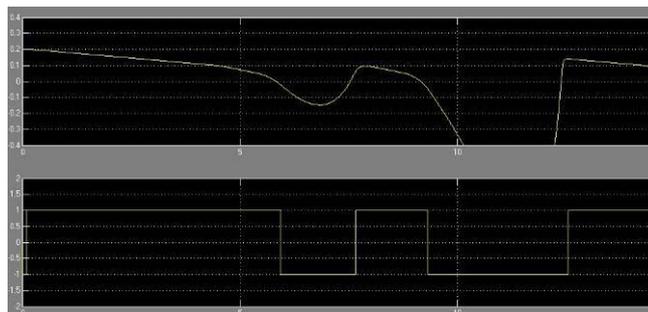
Primeiramente será variada a largura de banda (LB), ou seja, a taxa de transmissão de dados da rede com um período inicial de amostragem igual a 0,075 s. Para uma largura de banda inicial de 100 Kb/s tem-se os resultados mostrados na Figura 8.

Na Figura 8 pode-se perceber dois gráficos.

O gráfico superior é referente ao comportamento do coeficiente *slip* na roda 1, onde o eixo x representa tempo

decorrido em segundos na simulação e o eixo y representa o comportamento do coeficiente *slip* conforme Figura 8.

Figura 8 – Comportamento do protocolo TTP a 100 Kb/s e período de amostragem = 0,075 s.

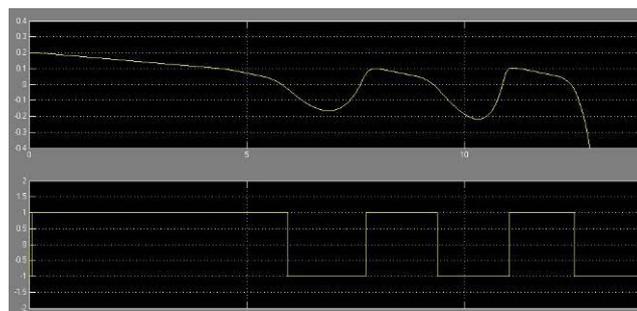


O gráfico inferior da Figura 8 representa a ação do controlador de frenagem antitravamento também na roda 1, o qual é composto pelo eixo x que representa o tempo decorrido na simulação sendo apresentado em segundos e y que demonstra o comportamento de frenagem da aplicação, variando entre 1 (frenagem total) e -1 (nenhuma ação de frenagem). Todos os gráficos semelhantes à Figura 8 serão dispostos dessa maneira.

Analisando a Figura 8 pode-se perceber que o sistema apresentou comportamento instável, uma vez que o *slip* teve uma variação maior que o desejável (0,2) apresentado um valor de coeficiente *slip* muito alto a partir do 9 s de simulação, resultando em apenas 2 ciclos de frenagem o que não ocasionou a parada total do veículo no tempo de simulação proposto (15 s).

Agora a largura de banda será aumentada para 5 Mb/s que para este padrão representa o valor máximo de transferência de dados. O resultado da simulação é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Comportamento do protocolo TTP a 5 Mb/s e período de amostragem = 0,075 s

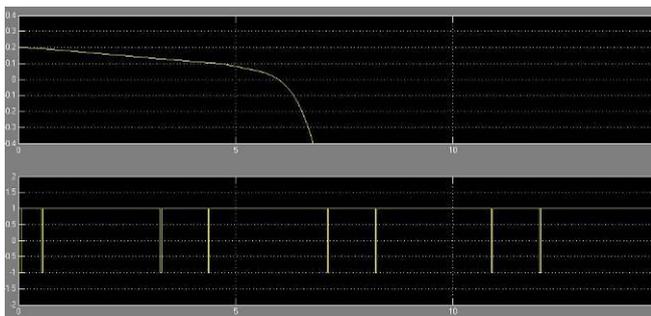


No caso da Figura 9 permanece a instabilidade do sistema, uma vez que o *slip* apresenta um valor muito alto no instante igual a 13 s, o que certamente ocasionaria derrapagem. Ao final desta simulação o veículo apresentou velocidade maior que zero já que obtemos apenas dois ciclos de frenagem.

O sistema tem um comportamento instável nas duas situações, muitas vezes perdendo controle, tendo em situações reais uma consequência catastrófica. Isto acontece porque o período de amostragem está muito alto para tal aplicação de tempo real rígido. Para tentar corrigir isso é necessário diminuir o período de amostragem, o que ocasionará maior tráfego de rede. Será diminuído o período

de amostragem para 0,0075 s, para ser feita a análise do comportamento da aplicação, conforme Figuras 10 e 11.

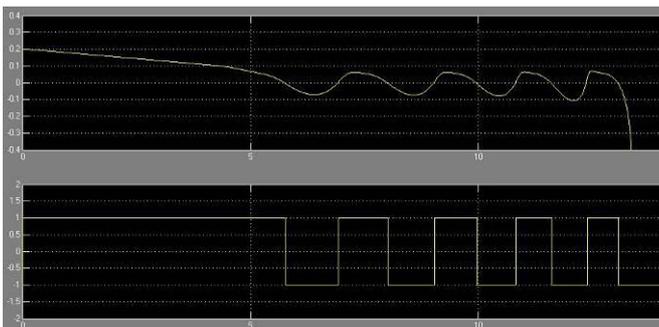
Figura 10 – Comportamento do protocolo TTP a 100 Kb/s e período de amostragem = 0,0075 s



Com LB = 100 Kb/s permanece a instabilidade da aplicação, uma vez que o gráfico apresentado na Figura 10 revela um considerável aumento do coeficiente slip próximo do instante igual a 7 s, não obtendo nenhum ciclo de frenagem para este caso.

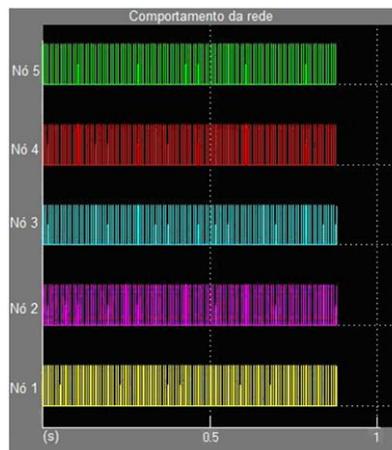
Na configuração máxima do padrão, isto é LB = 5 Mb/s, conforme apresenta Figura 11 o sistema mostrou-se bastante estável, uma vez que o mesmo funcionou idealmente se comparado com o modelo de Michaels e Quinn (1997) que utilizava um controlador *bang-bang* em cada roda sem nenhum monitoramento e controle de um controlador central.

Figura 11 – Comportamento do protocolo TTP a 5 Mb/s e período de amostragem = 0,0075 s



A Figura 12 demonstra o comportamento de rede para esta configuração, onde o eixo x representa o tempo decorrido em segundos e no eixo y o número do nó. Cada pulso apresentado pelo gráfico representa um período de amostragem executado pela aplicação, isto é, um ciclo de comunicação entre os nós. Com este gráfico pode-se perceber o tráfego na rede. Os demais gráficos semelhantes a este serão apresentados desta maneira.

Figura 12 - Comportamento da rede no protocolo TTP/C a 5 Mb/s e período de amostragem igual a 7,5 ms



### 3.2 Simulação da Aplicação BBW Proposta com Protocolo Flexray

Assim como no teste anterior, inicialmente será variada a largura de banda. A Figura 13 demonstra o resultado para simulação com LB = 20 Mb/s, a qual configura-se como taxa máxima de transferência de dados do protocolo *Flexray*.

Na Figura 13 percebe-se comportamento semelhante ao protocolo TTP com esta configuração (100 Kb/s e 0,075 s), aumentando consideravelmente o coeficiente *slip* a partir do instante igual a 9 s obtendo apenas dois ciclos de frenagem. O mesmo resultado é aplicado para a Figura 14.

Figura 13 – Comportamento do protocolo Flexray a 100 Kb/s e período de amostragem = 0,075 s

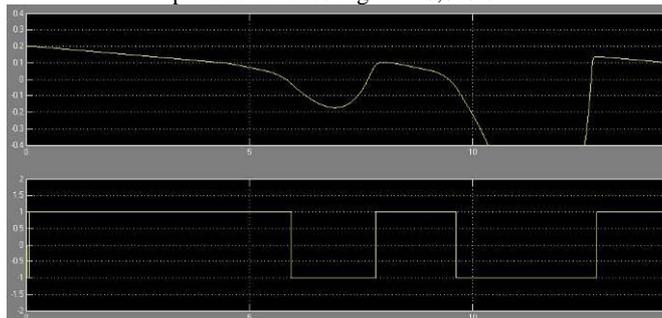
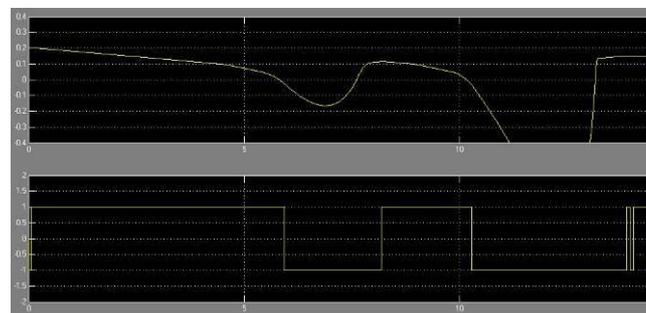
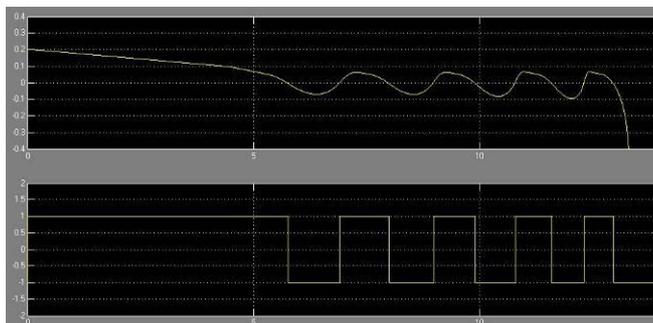


Figura 14 – Comportamento do protocolo Flexray a 10 Mb/s e período de amostragem = 0,075 s



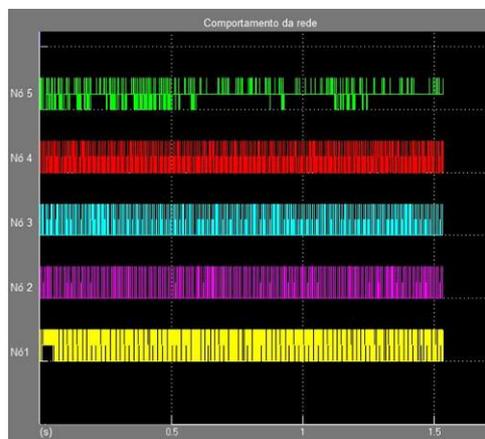
Mais uma vez será aumentado o período de amostragem para 0,0075 s. O resultado para tal situação é demonstrado na Figura 15.

Figura 15 – Comportamento do protocolo *Flexray* a 10 Mb/s e período de amostragem = 0,0075 s



Neste caso pode-se perceber o sistema com comportamento estável igualmente ao TTP com configuração idêntica, porém após uma análise minuciosa percebe-se pequena perda de pacotes para o nó 5 (roda 4) do sistema, porém tal perda não representou instabilidade no sistema. Tal situação é demonstrada na Figura 16.

Figura 16 - Comportamento da rede no protocolo Flexray a 20 Mb/s e período de amostragem igual a 7,5 ms



#### IV. CONCLUSÃO

Este trabalho revelou informações sobre aplicações *brake-by-wire* e protocolos de comunicação tolerante a falha, foco principal deste trabalho, sendo demonstrado a influência no comportamento e desempenho de tais padrões mediante a variação de largura de banda e tráfego na rede de comunicação, possibilitando a comparação entre TTP e *Flexray*.

A aplicação *brake-by-wire* modelada com *kernels* de tempo real, da ferramenta de simulação *True Time*, apresentou o resultado esperado, levando em consideração a existência da mitigação a algumas hipóteses de falha, dentre elas a perda de comunicação com um dos nós do sistema, que se caracteriza por ser um modo de falha comum em aplicações *x-by-wire*.

Através da simulação foi possível analisar o comportamento dos padrões em diferentes situações adotadas pelo projeto, obtendo resultados relevantes sobre o comportamento dos protocolos e da aplicação. Em determinada situação de teste, que ocasionou perda de pacotes no protocolo *Flexray*, o comportamento do sistema de frenagem da aplicação mostrou-se estável devido à

tolerância a falhas proposta pela aplicação, uma vez que mesmo perdendo pacotes em um dos nós mitigou a falha utilizando dados recebidos pelo par referente ao nó em falha. Dentre os resultados obtidos com relação ao comportamento dos padrões avaliados, o protocolo TTP apresentou melhor desempenho mantendo o funcionamento correto da aplicação, no funcionamento ideal para a aplicação *brake-by-wire* proposta ( $p = 0,0075$  s). Por sua vez, o protocolo *Flexray* apresentou pequena defasagem no modo ideal de funcionamento, demonstrando pequena perda de pacotes em um dos nós.

#### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CERVIN, A.; ARZEN, K. *True Time: Simulation Tool for Performance Analysis of Real-time Embedded Systems*. Automatic Control LTH, Lund University, Sweden.
- CERVIN, A.; OHLIN, M.; HENRIKSSON, D. *Simulation of Networked Control Systems Using Truetime*. Sweden: Department of Automatic Control LTH, Lund University, 2007.
- HELLER, C.; REICHEL, R. Enabling Flexray for Avionic Data Buses. In: Digital Avionics Systems Conference, 28., 2009, Orlando. **Proceedings...** Orlando: IEEE, 2009. p. 1.B.1-1 – 1.B.1-14.
- MICHAELS, L.; QUINN, S. *Modeling an Anti-Lock Braking System*. The MathWorks. 1997
- PAULITSCH, M; HAILL, B. Flexray in Aerospace and Safety-Sensitive Systems. IEEE Aerospace e Electronic Systems Magazine, v.23, n.9, p.4-13. Set. 2008.
- RUSHBY, J. *A Comparison of Bus Architectures for Safety-Critical Embedded Systems*. Menlo Park, CA, USA: SRI International, 2002. 51p. NASA/CR-2003-212161.

#### VI. COPYRIGHT

Direitos autorais: O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo material incluído no artigo.