

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FABIO LUIZ VALE DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE REDES COM FOCO NA
APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE CONTROLE DIGITAIS**

VITÓRIA
2005

FABIO LUIZ VALE DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE REDES COM FOCO NA
APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE CONTROLE DIGITAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Automação.

Orientador: Prof. Dr. Anilton Salles Garcia.

VITÓRIA
2005

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Souza, Fabio Luiz Vale de, 1975-

S729a Avaliação do desempenho de redes com foco na aplicação em sistemas de controle digitais / Fabio Luiz Vale de Souza. – 2005.

107 f. : il.

Orientador: Anilton Salles Garcia.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Ethernet (Sistema de rede local de computação). 2. CAN (Sistema de rede industrial de computação). 3. Controlnet (Sistema de rede industrial de computação). 4. Networked Control System (Sistema de controle baseado em redes). 5. Desempenho. I. Garcia, Anilton Salles. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU:621.3

FABIO LUIZ VALE DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE REDES COM FOCO NA
APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE CONTROLE DIGITIAS**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.

Aprovada em 22/12/2005

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Anilton Salles Garcia
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. José Denti Filho
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno

Dr. Fernando José Martinelli
Companhia Siderúrgica de Tubarão
Examinador Externo

Dedicatória

Dedico este trabalho a meus pais - Ronaldo e Vanderli.

Ao meu irmão Bruno.

E a minha esposa Kelly.

Agradecimentos

Este trabalho não foi fruto único e exclusivo meu, mas de um conjunto de pessoas que me ajudaram na sua realização. Sendo assim agradeço:

Ao amigo e Mestre Anilton pela sua confiança, sua disponibilidade e seus ensinamentos que foram além do conteúdo técnico.

Aos amigos que compreenderam que eu tinha um objetivo a alcançar.

A minha família pelo estímulo para que eu conseguisse alcançar meu objetivo.

E finalmente a minha esposa Kelly que a todo momento foi minha companheira, minha estimuladora, minha conselheira e que felizmente estava junto comigo e não me deixou parar no meio do caminho.

Sumário

1	Introdução.....	15
1.1	Justificativa.....	16
1.2	Metodologia.....	16
1.3	Resultados esperados.....	17
1.4	Principais contribuições do trabalho.....	17
1.5	Organização do trabalho.....	17
2	Situação do Problema.....	19
3	Sistemas de Controle.....	21
3.1	Estratificação do sistema de controle industrial.....	21
3.2	Interfaces utilizadas no Controle Industrial.....	22
3.3	<i>Networked Control System</i> (NCS).....	24
4	Redes de Controle.....	26
4.1	Introdução.....	26
4.2	DeviceNet.....	29
4.2.1	Introdução.....	29
4.2.2	Características da DeviceNet.....	29
4.2.3	Características do Protocolo de Comunicação.....	30
4.3	ControlNet.....	33
4.3.1	Introdução.....	33
4.3.2	Especificações da ControlNet.....	34
4.3.3	Características do protocolo de comunicação.....	34
4.4	Ethernet.....	38
4.4.1	Introdução.....	38
4.4.2	Especificações da Ethernet.....	39
4.4.3	Características do protocolo de comunicação.....	39
4.5	Características de Comunicação nos Sistemas de Controle.....	42
4.5.1	Interface Homem Máquina (Nível Um).....	43
4.5.2	Controlador Lógico Programável (Nível Um).....	44
4.5.3	Equipamento de Nível Zero.....	45
5	Avaliação de Desempenho de Rede em Sistema de Controle.....	47
5.1	Introdução.....	47
5.2	Componentes do atraso.....	47

5.2.1	Tempo de Bloqueio	49
5.3	Modelamento da influência dos atrasos no sistema de controle.....	50
6	Metodologia proposta para Avaliação de desempenho	57
7	Simulação e Resultados	63
7.1	Modelo de Simulação Rede Ethernet	63
7.1.1	Modelo de geração de pacotes.....	64
7.1.2	Modelo de um <i>Nó</i> de rede	65
7.1.3	Arquitetura de rede	65
7.1.4	Análise dos resultados	66
7.1.5	Cenário 1 – Resultados das simulações com meio coaxial	72
7.1.6	Cenário 2 – Resultados das simulações com meio UTP e HUB	76
7.1.7	Cenário 3 – Resultados das simulações com meio UTP e Switch	80
7.2	Modelo de Simulação Rede CONTROLNET	84
7.2.1	Modelo de geração de pacotes.....	85
7.2.2	Modelo de um <i>Nó</i> de rede	85
7.2.3	Arquitetura de rede	86
7.2.4	Análise dos resultados	87
7.2.5	Resultados das simulações com Rede ControlNet e meio coaxial	90
7.3	Modelo de Simulação Rede CAN	91
7.3.1	Modelo de geração de pacotes.....	92
7.3.2	Modelo de um <i>Nó</i> de rede	93
7.3.3	Arquitetura de rede	93
7.3.4	Análise dos resultados	94
7.3.5	Resultados das simulações com Rede CAN.....	97
8	Conclusão	101

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características da DeviceNet.....	30
Tabela 2 - Tabela de comprimentos máximos da DeviceNet.....	30
Tabela 3 - Características da Controlnet.....	34
Tabela 4 - Características da Ethernet	39
Tabela 5 - Principais Protocolos x Modelo OSI.....	40
Tabela 6 – Classificação das mensagens	57

Tabela 7 – Condições executadas nas simulações com Ethernet	67
Tabela 8 - Resumo dos resultados do índice Utilização para simulação Ethernet	68
Tabela 9 - Resumo do índice Eficácia	72
Tabela 10- Condições executadas nas simulações com Controlnet	87
Tabela 11 - Resumo dos resultados do índice Utilização para simulação ControlNet.....	88
Tabela 12 - Condições executadas nas simulações com rede CAN	94
Tabela 13 - Resultados do índice Utilização para simulação CAN.....	95

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Divisão níveis de controle.....	15
Figura 2 - Estratificação do Controle Industrial	22
Figura 3 - Interface entre Nível Um e Nível Zero	23
Figura 4 - Arquitetura Geral do Sistema de Controle.....	23
Figura 5 - Diagrama de Blocos do NCS	25
Figura 6 - Diagrama de Tempo da Comunicação.....	26
Figura 7 - OSI versus DeviceNet.....	31
Figura 8 - Frame do protocolo CAN	32
Figura 9 - Formato do pacote I/O Message	33
Figura 10 - Formato do pacote Explicit Message.....	33
Figura 11 - Componentes do Network Update Time	36
Figura 12 - Frame da ControlNet	37
Figura 13 - Formato do Lpacket.....	37
Figura 14 - Exemplo de transmissão e recebimento de pacote ControlNet.....	38
Figura 15 - <i>Frame</i> Ethernet	40
Figura 16 - Modelo de Camadas para Ethernet/IP	42
Figura 17 - Sistema Nível Um e Nível Zero.....	42
Figura 18 - Gráfico do tempo de transmissão Dnet, Cnet e Ethernet.....	49
Figura 19 - Padrões de tempo de processamento (dispositivos Devicenet)	53
Figura 20 - Desempenho comparativo de controle contínuo, discreto e NCS	54
Figura 21 - Relação utilização meio X banda morta e erro X banda morta	56
Figura 22 - Bursty Source FSM.....	64
Figura 23 - FSM do gerador de pacote dos <i>Nós</i> escravos	64
Figura 24 - Modelo genérico de um <i>Nó</i>	65
Figura 25 - Arquitetura básica rede	66

Figura 26 - Utilização com processo transmissão <i>Strobe</i>	72
Figura 27 - Utilização com processo de transmissão <i>Polling</i>	73
Figura 28 - Utilização com processo transmissão aleatório	73
Figura 29 - Atraso processo transmissão <i>Strobe</i>	73
Figura 30 - Atraso processo transmissão <i>Polling</i>	74
Figura 31 - Atraso processo de transmissão aleatório	74
Figura 32 - Núm. Colisões processo transmissão <i>Strobe</i>	74
Figura 33 - Núm. colisões processo transmissão <i>Polling</i>	75
Figura 34 - Núm. colisões processo de transmissão aleatório.....	75
Figura 35 - Pacotes recebidos <i>Nó 4</i> processo transmissão <i>Strobe</i>	75
Figura 36 - Pacotes recebidos <i>Nó 4</i> processo transmissão <i>Polling</i>	76
Figura 37 - Pacotes recebidos <i>Nó 4</i> processo transmissão aleatório.....	76
Figura 38 - Utilização processo transmissão <i>Strobe</i>	76
Figura 39 - Utilização processo transmissão <i>Polling</i>	77
Figura 40 - Utilização processo transmissão aleatório	77
Figura 41 - Atraso processo de transmissão <i>Strobe</i>	77
Figura 42 - Atraso processo de transmissão <i>Polling</i>	78
Figura 43 - Atraso processo de transmissão aleatório	78
Figura 44 - Número colisões processo transmissão <i>Strobe</i>	78
Figura 45 - Número colisões processo transmissão <i>Polling</i>	79
Figura 46 - Número colisões processo transmissão aleatório.....	79
Figura 47 - Pacotes recebidos <i>Nó 4</i> processo transmissão <i>Strobe</i>	79
Figura 48 - Pacotes recebidos <i>Nó 4</i> processo transmissão <i>Polling</i>	80
Figura 49 - Pacotes recebidos <i>Nó 4</i> processo transmissão aleatório	80
Figura 50 - Utilização processo transmissão <i>Strobe</i>	81
Figura 51 - Utilização processo transmissão <i>Polling</i>	81
Figura 52 - Utilização processo transmissão aleatório	81
Figura 53 - Atraso processo transmissão <i>Strobe</i>	82
Figura 54 - Atraso processo de transmissão <i>Polling</i>	82
Figura 55 - Atraso processo de transmissão aleatório	82
Figura 56 - Pacotes recebidos <i>Nó 4</i> processo transmissão <i>Strobe</i>	83
Figura 57 - Pacotes recebidos <i>Nó 4</i> processo transmissão <i>Polling</i>	83
Figura 58 - Comparativo entre os cenários de simulação Ethernet.....	83
Figura 59 - Bursty Source FSM.....	85

Figura 60 - FSM do gerador de pacote dos <i>Nós</i> escravos	85
Figura 61 - Modelo genérico de um <i>Nó</i>	86
Figura 62 - Arquitetura básica rede	86
Figura 63 - Índice Utilização para rede ControlNet	90
Figura 64 - Índice Atraso para rede ControlNet.....	91
Figura 65 - Índice Pacotes/s para rede ControlNet.....	91
Figura 66 - Bursty Source FSM.....	92
Figura 67 - FSM do gerador de pacote dos <i>Nós</i> escravos	92
Figura 68 - Modelo genérico de um <i>Nó</i>	93
Figura 69 - Arquitetura básica rede	93
Figura 70 - Utilização processo transmissão <i>Polling</i>	97
Figura 71 - Utilização processo transmissão <i>Strobe</i>	98
Figura 72 - <i>Atraso</i> processo transmissão <i>Polling</i> 500ms.....	98
Figura 73 - <i>Atraso</i> processo transmissão <i>Polling</i> 50ms	98
Figura 74 - <i>Atraso</i> processo transmissão <i>Polling</i> 5ms	99
Figura 75 - <i>Atraso</i> processo transmissão <i>Strobe</i> 500ms.....	99
Figura 76 - <i>Atraso</i> processo transmissão <i>Strobe</i> 50ms.....	99
Figura 77 - <i>Atraso</i> processo transmissão <i>Strobe</i> 10ms.....	100
Figura 78 - Pacotes recebidos <i>Nó</i> 4 processo transmissão <i>Polling</i>	100
Figura 79 - Pacotes recebidos <i>Nó</i> 4 processo transmissão <i>Strobe</i>	100

Lista de Equações

Equação 5.1 - Equação do tempo de atraso	48
Equação 5.2 - Equação do tempo de bloqueio para Ethernet	50
Equação 5.3 - Equação do tempo de bloqueio para Controlnet.....	50
Equação 5.4 - Equação do tempo de bloqueio para Devicenet	50
Equação 5.5 - Equação do desempenho do sistema com atrasos	51
Equação 5.6 - Equação genérica de desempenho	51
Equação 5.7 - Equação da perturbação na resposta de fase devido à discretização	53
Equação 5.8 - Equação da perturbação na resposta de fase devido ao atraso	53
Equação 5.9 - Desenvolvimentos para encontrar valor de PB	54
Equação 5.10 - Equação final do valor de PB	55
Equação 5.11 - Equação de PC.....	55
Equação 5.12 - Equação de desempenho considerando erro e banda morta	56

Equação 6.1 - Equação do tempo total de atraso	58
Equação 6.2 - Equação de utilização do meio de transmissão	59
Equação 6.3 - Equação da taxa de descarte de pacotes	60
Equação 6.4 - Equação de eficiência da codificação.....	60
Equação 6.5 - Equação da proporção de tempo de processamento	61
Equação 6.6 - Equação da eficácia da rede	62

Lista de Siglas e Acrônimos

- ACK – Acknowledgement.
- BEB – Binary Exponential Backoff.
- CAN – Controller Area Network.
- CID – Connection Identifier.
- CLP – Controlador Lógico Programável.
- CRC – Ciclic Redundancy Check.
- CSMA/CD – Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection.
- CTDMA – Concurrent Time Domain Multiple Access.
- ERP – Enterprise Resource Planning.
- IHM – Interface Homem Máquina.
- IP – Internet Protocol.
- LQR – Linear Quadratic Regulator.
- MAC – Medium Access Control.
- NCS – Networked Control System.
- ODVA – Open DeviceNet Vendor Association.
- RTD – Resistance Temperature Detector.
- TCP – Transmission Control Protocol.
- Tblock – Tempo de bloqueio na fonte.
- Tdcode – Tempo de decodificação no *Nó* de destino.
- Tdcomp - Tempo de processamento no *Nó* de destino.
- Tddec - Tempo de decodificação no *Nó* de destino.
- Tdelay Tempo de atraso de uma mensagem.
- Tframe – Tempo do frame no meio de transmissão.

Tfonte - Instante de tempo no *Nó* de origem.
Tpos – Tempo de pós-processamento no *Nó* de destino.
Tpre – Tempo de pré-processamento no *Nó* de origem.
Tprop – Tempo de propagação do frame.
Tqueue – Tempo na fila no *Nó* de origem.
Tscod – Tempo de codificação no *Nó* de origem.
Tscomp – Tempo de processamento no *Nó* de origem.
Ttx – Tempo de transmissão.
Twait – Tempo de espera no *Nó* de origem.
Tdest - Instante de tempo no *Nó* de destino.
Tsrc – Instante de tempo no *Nó* de origem.
UDP – User Datagram Protocol.
UTP – Unshielded Twisted Pair.

Resumo

Com a crescente evolução das estratégias de controle, muitos fabricantes estão optando por utilizar redes como interface entre os dispositivos de campo e controladores e também entre os próprios controladores. Como exemplo pode-se citar as redes a seguir: Devicenet, ControlNet, Ethernet, Profibus, Modbus, DH+, Industrial IP etc. Estes sistemas de controle que contém redes em sua infra-estrutura são denominados como "Networked Control Systems" (NCS).

Na fase de planejamento e avaliação de projetos de automação industrial torna-se cada vez mais importante o conhecimento das tecnologias referentes aos controladores lógicos programáveis bem como das redes industriais comumente utilizadas. Surge então a necessidade de avaliar se aquilo que o proponente está oferecendo para o sistema de controle é adequado ou não, considerando as características das redes propostas e as necessidades do sistema de controle.

Assim, este trabalho tem como foco principal o estudo de arquiteturas de sistemas NCS consistindo basicamente de realização de simulações utilizando o software OPNET IT-GURU o qual através do uso de bibliotecas básicas permitiu a simulação da Rede Ethernet submetida a condições de geração de pacotes e formas de transmissão comuns de ambientes industriais. Através da alteração das bibliotecas básicas foi possível efetuar simulações das Redes ControlNet e DeviceNet sendo as mesmas submetidas a condições especiais de geração e transmissão de pacotes.

Através dos resultados das simulações, foram efetuadas análises que permitiram identificar as características específicas de cada rede e sua aplicabilidade em sistemas de controle e também foram realizadas comparações entre os resultados e discutidas as causas das diferenças.

Ao final do trabalho o leitor terá a disposição material com conteúdo objetivo e claro sobre o desempenho das redes estudadas e também adquirirá subsídios técnicos que irão auxiliar na avaliação de outras redes não estudadas neste trabalho.

Abstract

The continuous evolution of control strategies has lead many manufactures to use networks as the interface between field devices and the logic process controller and also between controllers, e.g., DeviceNet, ControlNet Profibus, Ethernet, DH+, Industrial IP. These systems which use network as part of its loop control are called Networked Control System (NCS).

During the engineering phase of industrial plant automation, the knowledge about process controllers and industrial networks are indispensable. Therefore, the necessity of evaluating if the proposed system fits the control system basic specifications considering the fact of using a network is the new challenge.

This dissertation has the focus of studying NCS by running simulations using the OPNET IT_GURU software. For Ethernet Network simulation was used the basic library available in the software and the traffic generation patterns and transmission modes used were the ones normally used industrial applications. To simulate ControlNet and DeviceNet was necessary to modify and also create new libraries that could represent these networks behavior and similar to Ethernet different kind of traffic generation and transmission modes were used.

By using the obtained results form the simulations many analysis were done which allowed the identification of each network and their applicability in control systems. Additionally comparisons among the networks were done and the differences causes also were discussed.

Finally at the end of this dissertation the reader will have an objective fast consulting material that will help the performance evaluation of networks herein studied and will be able to evaluate other networks just by using the concepts and methodology applied in this job.

1 Introdução

No ambiente industrial é comum utilizar a hierarquia de sistemas de controle em níveis como, por exemplo, Nível Zero - compreendendo os dispositivos de campo, Nível Um - compreendendo os controladores lógicos programáveis; Nível Dois – compreendendo os computadores de otimização de processo e Nível Três – compreendendo os sistemas de gestão corporativa. A Figura 1 a seguir fornece uma visão macro dos sistemas descritos.

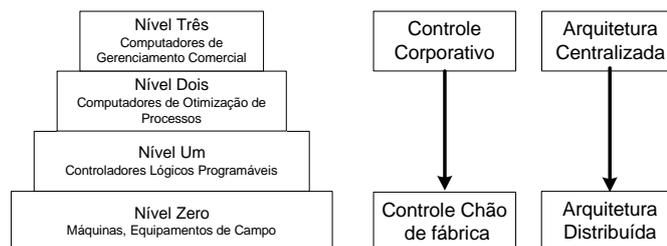


Figura 1 - Divisão níveis de controle

A interface tradicionalmente utilizada entre dispositivos de Nível Zero e Nível Um é do tipo ponto-a-ponto, ou seja, os dispositivos são conectados entre si e aos controladores lógicos programáveis (CLP) através de cabeamento conectando entradas e saídas. Como alternativa tecnológica para a crescente busca de flexibilidade e mais informações, foram desenvolvidas tecnologias as quais permitem que a interface entre Nível Um e Nível Zero seja feita através de redes e a esta arquitetura dá-se o nome de Networked Control System (NCS). O que se busca com o NCS é a flexibilidade do sistema, redução dos custos de montagem e a capacidade de utilizar dispositivos inteligentes. Esta última característica é de grande utilidade para aqueles responsáveis pela manutenção de sistemas, pois assim torna-se possível diagnosticar problemas nos dispositivos e no processo de produção.

A utilização desta arquitetura por sua vez demanda que sejam estudadas as interferências que ocorrem no sistema de controle resultantes da utilização de redes.

Este trabalho tem como objetivo proporcionar uma base concreta de avaliação do desempenho das redes Ethernet, ControlNet e CAN através da análise de simulações feitas no software OPNET IT-GURU. Os resultados destas simulações serão analisados sob o ponto de vista do desempenho da rede para a aplicação em sistemas de controle permitindo assim que o leitor seja capaz de julgar, ao menos de forma preliminar, pela análise dos índices apresentados neste trabalho as alternativas para o uso das redes no sistema de controle. Para

isto, mais especificamente, são mostrados alguns elementos indicativos de desempenho considerados prioritários para avaliações de engenharia e estes são discutidos ao longo do texto e sempre que possível far-se-á um paralelo com situações que são encontradas, isto é, vivenciadas por aqueles que são responsáveis pela engenharia de sistemas de controle.

1.1 Justificativa

O desenvolvimento de tecnologias naturalmente está ligado às grandes empresas e estas por sua vez as criam com o intuito aperfeiçoar os equipamentos e processos existentes. O processo de divulgação para o conhecimento de profissionais de engenharia mostra normalmente as vantagens sobre os concorrentes, mas não fornece a devida atenção à aplicação propriamente dita.

No caso de Sistemas tipo "NCS" é relativamente fácil encontrar manuais com informações sobre determinada rede como, por exemplo, os pré-requisitos para instalação física, os equipamentos necessários para configurar, a forma de configurar e etc., porém não é apresentada uma visão crítica, em termos de conjunto, do processo a ser controlado e a rede utilizada.

Assim, este trabalho, considerando que serão discutidos aspectos relacionados ao desempenho de redes e seus impactos para o sistema de controle, visa acrescentar conhecimento sobre o assunto dado que estão em desenvolvimento cada vez mais acelerado os estudos sobre sistemas NCS.

1.2 Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido baseando-se em estudos já desenvolvidos encontrados em artigos publicados em congressos científicos dos quais foram extraídos pontos considerados importantes para a avaliação de desempenho de redes em sistemas de controle.

Baseando-se nos pontos mencionados anteriormente, foram elaborados cenários para a execução de simulações que permitissem a análise sob o ponto de vista de engenharia de projeto. O software de simulação utilizado é o OPNET IT- GURU o qual é ferramenta poderosa para a simulação de redes de pequeno ou grande porte.

Das simulações executadas são extraídos os resultados que por sua vez são analisados de forma a proporcionar ao leitor uma visão do desempenho da rede correlacionada às aplicações em sistemas de controle.

1.3 Resultados esperados

Este trabalho foi desenvolvido buscando aproximar as simulações a situações comumente encontradas durante o projeto de sistemas de controle do tipo NCS e a situações onde se deseja identificar possíveis causas de baixo desempenho de sistemas.

Sendo assim, neste trabalho, ao se direcionar os estudos para a avaliação do desempenho de Rede Ethernet quando aplicada em situações típicas de sistemas de controle, pretende-se identificar em quais situações o seu uso se torna inadequado e confirmar a capacidade da rede Ethernet de ser utilizada em sistemas de controle desde que sejam respeitados limites de utilização do meio.

Outro ponto que se destaca é a possibilidade de melhorias no desempenho da rede quando se faz melhor aproveitamento do meio de comunicação através de alteração do processo de comunicação.

1.4 Principais contribuições do trabalho

Na literatura estão disponíveis estudos bastante focalizados no desempenho do sistema de controle quando estes estão submetidos a situações onde ocorrem atrasos. Estes estudos são extremamente importantes, pois evidenciam os possíveis impactos que as redes podem causar no sistema de controle.

A linha desenvolvida neste trabalho foi identificar o desempenho de redes Ethernet, ControlNet e CAN quando submetidas a configurações que se assemelham àquelas utilizadas em sistemas de controle. Baseando-se nas condições das simulações executadas foram feitas análises buscando correlacionar diversos índices de desempenho e os seus fatos geradores, permitindo assim o desenvolvimento da capacidade de análise de arquiteturas de redes quando de sua aplicação. O conjunto de informações disponibilizadas pelas análises será também bastante útil para auxiliar a especificação de equipamentos que se pretende utilizar para o controle do processo em questão.

1.5 Organização do trabalho

Buscando proporcionar um melhor entendimento das propostas apresentadas, este trabalho está organizado da seguinte forma: No capítulo 2 é feito esclarecimento sobre o

problema de análise de desempenho de redes; No capítulo 3 é feita uma revisão sobre redes de controle; O capítulo 4 discute a avaliação de desempenho de rede de controle; No capítulo 5 é apresentada a metodologia proposta para a avaliação de desempenho de redes; No capítulo 6 são apresentadas simulações e os seus resultados; e finalmente no capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e algumas sugestões de trabalhos futuros nesta direção de pesquisa.

2 Situação do Problema

Na literatura de sistemas de controle [20] é claramente identificado o efeito da amostragem e do atraso sobre a estabilidade do sistema. Porém, os fatores que causam o atraso não são identificados, tornando, portanto, esta variável algo que não se tem o tratamento adequado principalmente quando se trabalha com sistemas de controle cuja margem de fase esteja bastante reduzida.

Em [4, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18 e 19] encontram-se vários estudos sobre sistemas tipo “Networked Control System” (NCS), tais com o projeto de controladores otimizados que consideram o atraso na troca de dados, a perda de pacotes, características de protocolos, cálculo de tempo de atraso e etc.

Em [5, 6, 18] são feitas simulações onde se utilizam formas de transmissão de dados e redes diferentes. Dessas simulações são colhidos dados como o impacto dos atrasos na dinâmica do sistema e também analisado o comportamento do sistema quando se utilizam diferentes tipos de controladores. Os resultados obtidos pelo autor quando o mesmo utiliza controlador NCS-LQR (Networked Control System – Linear Quadratic Regulator) mostrou-se muito satisfatório.

Em [12] é feito estudo aprofundado sobre a forma de modelagem de um sistema de controle considerando que o mesmo possui atrasos do tipo constante e aleatório. Da modelagem fez-se o desenvolvimento do controlador estocástico adequado ao sistema. Do modelamento feito desenvolveram-se análises de sistemas simplificados, mostrando o comportamento final dos mesmos.

Em [17] o foco do trabalho consiste no estudo detalhado e analítico do impacto no desempenho do sistema de controle das variáveis como, por exemplo, a perda de pacotes, atrasos, modo de transmissão e etc. São também desenvolvidos estudos relativos à identificação de escalonamento ótimo da transmissão. Os resultados obtidos analiticamente são então confirmados através de simulação.

As principais contribuições das teses de doutorado [5, 12 e 17] são a busca de controladores ótimos e de expressões analíticas que considerem as variáveis contidas nos sistemas de controle tipo NCS.

Considerando que o projeto de sistemas de controle deve considerar as situações práticas e reais que existem em função dos equipamentos disponíveis no mercado tais como: tipo de controlador a ser aplicado em determinada malha de controle, tempo de processamento de

controladores lógicos programáveis, tipo de rede disponível, modo de transmissão de informações e etc. a literatura apresenta poucas referências.

Assim, neste trabalho são utilizados três tipos de redes de controle no caso Ethernet, ControlNet e CAN as quais são amplamente utilizadas com uma configuração do sistema de controle próxima ao real. Deste modo é feita análise do desempenho destas redes a qual pode ser utilizada como base teórica de suporte a decisões no projeto de sistemas NCS que utilizem equipamentos padrão.

3 Sistemas de Controle

3.1 Estratificação do sistema de controle industrial

Os sistemas de controle industriais são a peça básica para o funcionamento e continuidade das indústrias, pois através deles é que se consegue gerenciar toda a produção, integrar diferentes níveis de atividades existentes e integrar diferentes níveis de informações geradas no processo produtivo.

Considerando os diversos níveis de atividades e informações existentes, tradicionalmente definiram-se quatro níveis de controle conforme descrito a seguir:

- Nível Três – responsável pelo controle comercial, ou seja, é neste nível que são controlados os recebimentos de pedidos e os envios de mercadorias aos clientes. Compõe-se normalmente de computadores que utilizam softwares de gestão como, por exemplo, ERP (Enterprise Resource Planning). O vínculo com a cadeia produtiva da empresa é feito através de comunicação com os computadores de Nível Dois;
- Nível Dois – responsável pelo controle da produção, modelagem da(s) cadeia(s) produtiva(s) bem como de receber as instruções (necessidades) de produção do Nível Três, otimizar o processo de produção, gerar e enviar ajustes para o Nível Um e também de receber as informações geradas pelo Nível Um. Compõe-se normalmente de computadores com sistemas operacionais robustos e com elevada capacidade de processamento;
- Nível Um – responsável pela efetiva execução da produção, isto é, o Nível Um comanda todos os acionamentos de máquinas e equipamentos contidos em um determinado processo produtivo. Para isto, utiliza os ajustes recebidos do Nível Dois ou os ajustes definidos pelos operadores. Compõe-se basicamente de computadores especiais chamados de controladores lógicos programáveis (CLP).
- Nível Zero – são as máquinas e equipamentos contidos em um determinado processo produtivo. Basicamente são motores, válvulas, bombas, inversores, contadores etc. A interface entre o Nível Zero e o Nível Um é feita através de entradas e saídas física ou através de redes dedicadas.

A Figura 2 a seguir ilustra a estratificação descrita e também mostra a arquitetura tradicionalmente utilizada. Por exemplo, nos sistemas corporativos é comum a utilização de um software ERP o qual concentra as atividades de gerenciamento. Já nos sistemas de controle mais próximos ao chão de fábrica é comum haver distribuição das atividades e conseqüentemente do controle propriamente dito.

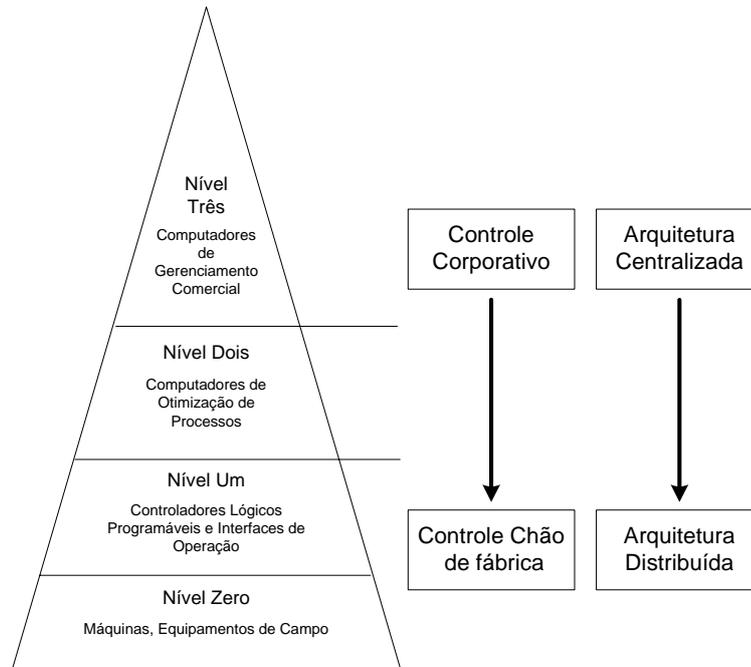


Figura 2 - Estratificação do Controle Industrial

A Grande vantagem da divisão em níveis é que cada nível torna-se especializado em determinada atividade e utiliza as ferramentas e equipamentos que são mais adequados à atividade.

3.2 Interfaces utilizadas no Controle Industrial

Cada um dos níveis mostrados na Figura 2 trabalha em conjunto com os níveis adjacentes, pois nenhum deles é totalmente independente. A forma e confiabilidade dos dados trocados entre os vários níveis é fundamental para o bom desempenho do sistema.

Tradicionalmente a troca de dados entre o Nível Três e Nível Dois e entre Nível Dois e Nível Um é feita por intermédio de redes de comunicação de dados.

Entre o Nível Um e o Nível Zero predomina a arquitetura ponto-a-ponto, isto é, os denominados dispositivos de campo e os controladores lógicos programáveis estão interligados através de conexões físicas denominadas de entradas e saídas.

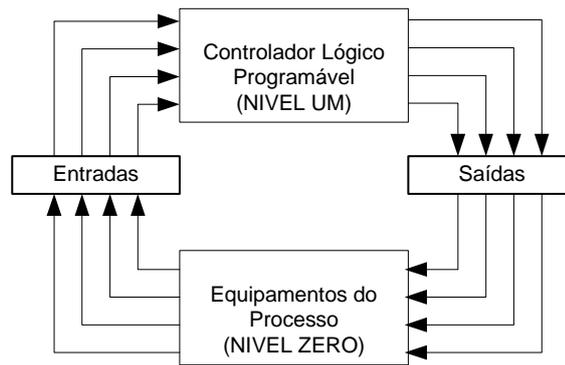


Figura 3 - Interface entre Nível Um e Nível Zero

Para o entendimento do conceito de entradas e saídas deve-se imaginar o diagrama de blocos da Figura 3 onde a função do Controlador Lógico Programável é controlar determinado processo de uma planta para atingir um objetivo denominado de *setpoint*. Para isto o controlador utiliza as entradas provenientes do processo e os valores de *setpoint* desejados, processa os cálculos do modelo existente em sua programação e então gera as saídas que por sua vez irão atuar na planta.

No caso da arquitetura ponto-a-ponto a interface de entrada e saída faz-se por meio de sinais digitais do tipo nível lógico zero ou um, sinais analógicos do tipo 0-20 mA, 4-20 mA, 0-10V, RTD (Resistance Temperature Detectors), além de outros. A seguir, na Figura 4, está representada uma arquitetura frequentemente utilizada em sistemas de industriais.

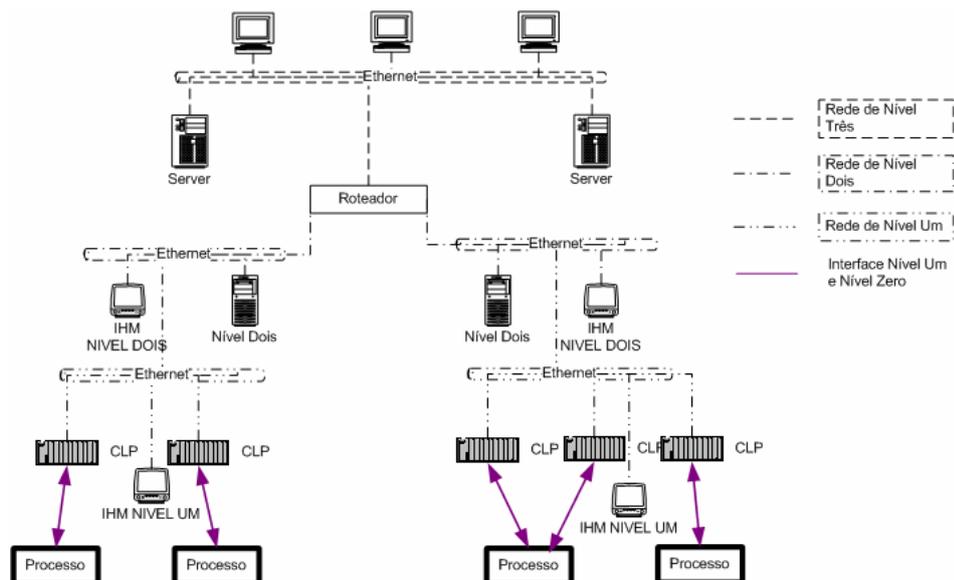


Figura 4 - Arquitetura Geral do Sistema de Controle

Ao se constituir um sistema com a interface entre o Nível Um e o Nível Zero feita por entradas e saídas, o sistema fica caracterizado pela grande quantidade de cabeamento utilizado. Considerando a crescente e necessária modernização dos parques industriais, a utilização do modelo ponto-a-ponto acarreta maior trabalho de reengenharia quando se pensa em reformas e realocações em áreas da planta.

A utilização de interfaces gráficas, aliadas aos sistemas de apoio à manutenção com seus registros de alarmes, de falhas e gráficos de variáveis do processo, permite a monitoração dos próprios dispositivos de campo ou pelo menos daqueles que são essenciais para a planta e que precisam de elevados índices de disponibilidade.

Acompanhando a evolução dos equipamentos de Nível Um, os dispositivos de campo também estão disponibilizando informações sobre o seu estado, mas quando se trabalha com arquitetura ponto-a-ponto, para que se possa receber estas informações necessita-se de maior quantidade de pontos de interface.

Buscando aumentar a flexibilidade do sistema sem haver queda no desempenho e confiabilidade, a alternativa tecnológica utilizada é a rede de barramento comum como interface entre o Nível Um e o Nível Zero. Neste caso todos os dados entre os dispositivos de Nível Zero e Nível Um são transferidos utilizando este barramento, inclusive os dados de estado do equipamento. A esta arquitetura dá-se o nome de "*Networked Control System*".

3.3 *Networked Control System (NCS)*

Existe uma forte tendência nas indústrias modernas de se integrar computação, comunicação e o controle em seus diversos níveis (conforme Figuras 2 e 3). Paralelamente, a utilização de redes permite que os sistemas se tornem descentralizados na medida do necessário e continuem mantendo a capacidade de controlar o sistema com confiabilidade.

Os sistemas com arquitetura ponto-a-ponto (Nível Um e Nível Zero) não são adequados quando se pensa em trabalhar com modularidade, diagnóstico integrado e descentralização do controle. Sendo assim, a utilização de arquiteturas baseadas em redes de barramento comum, conforme ilustrado na Figura 5, permite ao sistema ser projetado com modularidade e redução de custos de instalação.

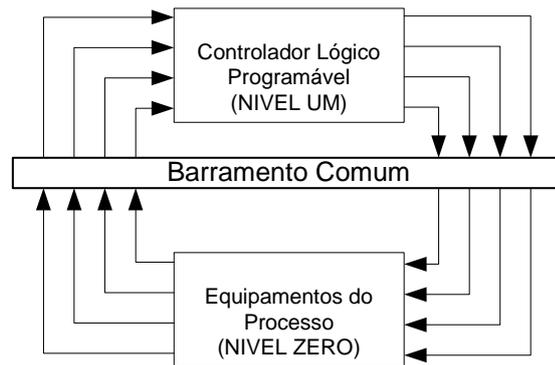


Figura 5 - Diagrama de Blocos do NCS

A utilização de um barramento comum traz benefícios já citados anteriormente, mas também introduz atrasos na troca de informações entre sensores e atuadores (Nível Zero) e os controladores lógicos programáveis (Nível Um). Estes atrasos são ocasionados pelo compartilhamento do meio de comunicação, pelo tempo de codificação e decodificação e pelo tempo de transmissão. Os valores desses atrasos podem ser constantes, randômicos ou com limites, tudo dependerá do tipo de protocolo e do hardware utilizados. Para o sistema de controle a existência de atrasos pode causar degradação de desempenho ou mesmo levar a instabilidade.

Segundo [5, 6,7] para que se garanta a estabilidade e desempenho de um NCS é preciso que, partindo-se de valores pré-estabelecidos de Qualidade de Serviço (característica relacionada principalmente a rede) e de Desempenho, se faça análise dos tempos envolvidos e se crie o modelo adequado para o sistema. Após isto se torna possível decidir se a configuração é ou não suficiente para atender ao sistema de controle.

4 Redes de Controle

4.1 Introdução

Conforme citado no capítulo anterior, a utilização de redes em sistemas de controle provoca o aparecimento de atrasos e estes podem degradar o desempenho do sistema e até levar o sistema à instabilidade. O atraso na troca de informações entre dispositivos na rede é uma característica natural quando se trabalha em rede de barramento comum e pode ser entendido como uma soma de diversos atrasos que ocorrem em diversas fases do processo de comunicação. Na Figura 6, a seguir, pode ser observado um diagrama dos tempos entre fonte e destino [5, 6, 7].

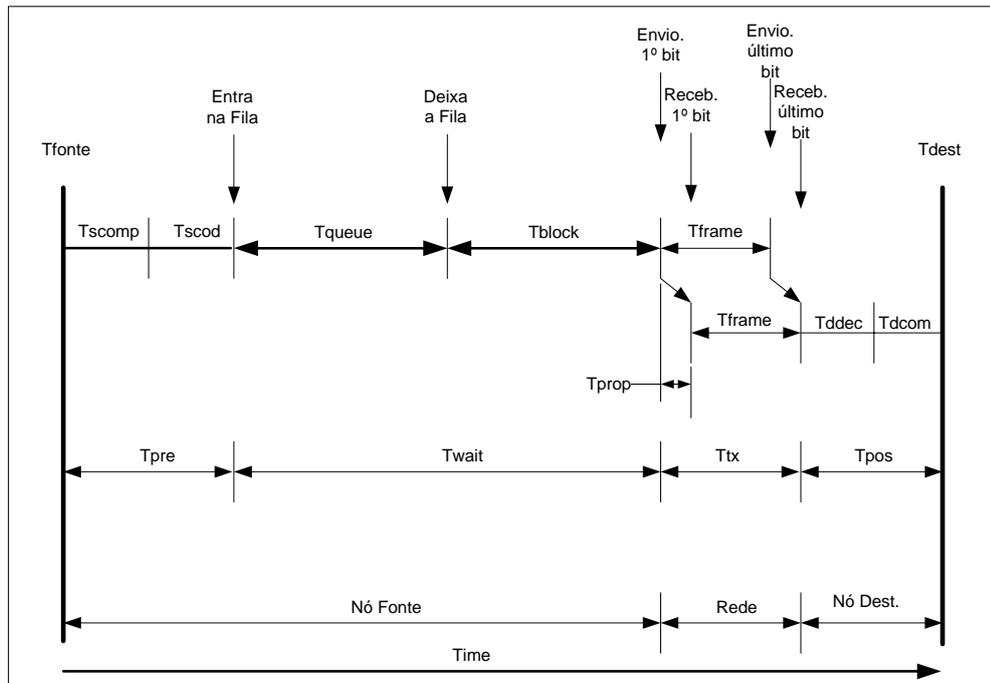


Figura 6 - Diagrama de Tempo da Comunicação

Dentro do processo de comunicação os tempos como T_{scod} e T_{ddec} estão fortemente relacionados ao hardware do fabricante, já T_{wait} e T_{block} estão relacionados à configuração do sistema e tipo de rede utilizada. A identificação dos valores dos tempos da Figura 6 normalmente é feita de maneira experimental, pois os dispositivos de campo com interface de rede (sensores, atuadores etc.) não dispõem de hardware sofisticado que possibilite a medição desses tempos. Sendo assim formas indiretas são utilizadas, mas sem que haja queda na qualidade da informação.

Essencialmente, os dispositivos conectados em rede deverão ser reconhecidos unicamente o que implica na utilização de algum tipo de identificação (endereço) e na necessidade de um campo no pacote a ser transmitido contendo informações sobre origem e destino dos dados. Outros elementos como campos para controle de prioridade e datação do tempo de criação na origem também podem existir e estão diretamente ligados ao tipo de rede utilizada. Em primeira análise, o aumento do tamanho do pacote pode acarretar problemas, mas se verificará que a existência de campos de controle é extremamente importante.

As redes inseridas em determinada parte do sistema de controle devem apresentar características compatíveis com os tipos de dados a que estão sujeitas a trafegar. Em [5] classificam-se as redes em tipos como:

Redes de Sistemas de Informação – tráfego baseado em dados sem criticidade temporal, caracterizado pelo grande volume de dados, porém com baixa frequência de transmissão como, por exemplo, sistemas de gestão corporativos onde há acesso a grandes bases de dados;

Redes de Eventos Discretos – tráfego baseado em dados em que a criticidade temporal pode, ou não, ser essencial, normalmente com volume médio de dados e frequência de transmissão em função de eventos do sistema. É utilizada como integradora entre diversos sistemas. Por exemplo, entre Nível Dois e Nível Um e entre diferentes subsistemas de Nível Um;

Rede de Dispositivos – tráfego baseado em dados com criticidade temporal, caracterizada pelo pequeno volume de dados entre dispositivos, mas com frequência de transmissão elevada. Exemplo clássico é o envio de temperatura de um dispositivo de campo para o CLP (Controlador Lógico Programável) onde o valor será utilizado no controle de temperatura de determinada área;

Na arquitetura de um NCS utilizam-se basicamente as Redes de Eventos Discretos e Redes de Dispositivos, pois é o nível que a definição do sistema abrange.

Nota-se que em todas as referências feitas a uma rede é evidenciada a característica temporal, ou seja, o atraso de tempo por ela causado. Considerando esta importante característica pode-se caracterizar as redes em três tipos básicos: Rede com Atraso

Estocástico, Rede com Limite Máximo de Atraso e Rede com Atraso Constante. Estas diferenças são consequência direta do método de acesso ao meio utilizado pela rede.

No caso da rede Ethernet é utilizado o protocolo CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Detection) segundo o qual cada *Nó* deverá escutar o meio e detectar se o mesmo está ou não disponível para então enviar mensagem. Pode, então, haver coincidência de transmissão de mensagem e a este fato dá-se o nome de colisão. Após a colisão o protocolo faz o tratamento segundo o *Binary Exponential Backoff* (BEB) e que leva o sistema a apresentar característica aleatória.

Para uma rede baseada na filosofia de passagem de *token*, por exemplo, Controlnet, apenas o *Nó* que está com a posse da *token* é que pode transmitir no momento. Isto permite que o sistema apresente atrasos máximos desde que não exista a saturação do mesmo. No projeto de sistemas é imprescindível a utilização de valores máximos de atraso proporcionados pela rede, pois destes valores pode-se analisar o pior caso para o sistema de controle.

Em se tratando de uma rede baseada no protocolo CAN (*Controller Area Network*), desde que conhecido os tempos de cada requisição de mensagem, pode-se considerar que o tempo de atraso é constante, pelo fato do sistema trabalhar com priorização de *Nós* e quando estes vão se comunicar entre si prevalece a prioridade e o tempo de comunicação entre dois dispositivos fica praticamente constante.

Fazendo comparação entre os sistemas discretos e contínuos verifica-se que o atraso provocado pela rede é resultado indireto de uma taxa de amostragem à qual os sinais oriundos e destinados aos dispositivos estão submetidos. Imagine, então, se fosse possível aumentar indefinidamente a taxa de amostragem, ou seja, com o aumento da velocidade com que as informações são enviadas e recebidas, haveria a tendência do sistema se comportar semelhante a um sistema contínuo.

Infelizmente, o simples aumento da taxa de amostragem resolve o problema para o sistema NCS quanto à instabilidade devido a atrasos, mas em contrapartida aumenta o tráfego na rede e a partir de determinado ponto poderá haver saturação da utilização do meio, perda de pacotes de informações e também atrasos maiores. Fica evidente que existe um compromisso entre a taxa de amostragem, degradação do desempenho da rede e degradação do desempenho do sistema.

4.2 DeviceNet

4.2.1 Introdução

Durante anos a indústria vem tentando desenvolver um padrão único e aberto para a comunicação entre todos os tipos de dispositivos de campo, mas por não haver um escopo totalmente definido o desenvolvimento de um padrão atrasou.

Como uma opção para a comunicação entre os dispositivos de campo, surgiu a DeviceNet a qual conforme definição da *Open DeviceNet Vendor Association* (ODVA), DeviceNet é um elo de comunicação que permite conectar dispositivos industriais (sensores de posição, sensores fotoelétricos, interfaces homem-máquina etc.) a uma rede permitindo, portanto, a comunicação entre dispositivos e o diagnóstico de falhas.

A DeviceNet permite que haja intercambiabilidade entre dispositivos e possibilita a conexão de dispositivos mais complexos, ou seja, permite ler os estados de dispositivos discretos, temperaturas, correntes e diagnóstico do dispositivo. Também é possível escrever dados como *setpoint* de velocidade, aceleração etc.

O link de comunicação da DeviceNet baseia-se no protocolo *Controler Area Network* (CAN) o qual apresenta boa velocidade de resposta e elevada confiabilidade. Por exemplo, este protocolo é utilizado na indústria automobilística no sistema de controle do freio ABS e *air-bags*.

4.2.2 Características da DeviceNet

A rede Devicenet utiliza a especificação do protocolo CAN para as Camadas Física e Camada de Enlace, enquanto as demais camadas são cobertas pela especificação DeviceNet propriamente dita. Na Tabela 1 estão listadas as principais especificações da DeviceNet.

Número de Nós	máximo de 64	
Comprimento da rede	Taxa de Comunicação	Distância
	125Kbps	500m
	250Kbps	250m
	500Kbps	100m
Tamanho do pacote de dados	0 a 8 bytes	

Topologia	Linha tronco com derivação, mas somente com configurações lineares.
Configurações de comunicação do dispositivo	Ponto-a-ponto com multicast; mestre e escravo e múltiplos mestres;
Outras características	Pode-se remover e colocar dispositivos na rede com o sistema em funcionamento

Tabela 1 - Características da DeviceNet

Quanto ao comprimento de rede existem informações adicionais que relacionam tipo de cabo utilizado e comprimento conforme mostrado na Tabela 2:

Taxa de Comunicação	125 Kbps	250 Kbps	500 Kbps
Tronco com cabo Thick	500 m	250 m	100 m
Tronco com cabo Thin	100 m	100 m	100 m
Tronco com cabo Flat	380 m	200 m	75 m
Máximo comprimento da derivação	6 m	6 m	6 m
Comprimento acumulado das derivações	156 m	78 m	39 m

Tabela 2 - Tabela de comprimentos máximos da DeviceNet

Elementos como os mostrados na Tabela 2 são fundamentais na fase do projeto do sistema uma vez que qualquer desvio dentro das características mostradas pode impedir o funcionamento correto do sistema. Isto acontece porque os dispositivos disponíveis no mercado são projetados para serem compatíveis com o padrão dessa tabela.

4.2.3 Características do Protocolo de Comunicação

O protocolo de comunicação DeviceNet utiliza como sintaxe e forma de movimentação dos dados o protocolo CAN e é na camada de aplicação onde se faz todo processamento dos dados que são enviados e recebidos. A Figura 7, a seguir, mostra como é a estrutura da DeviceNet segundo o modelo OSI (Open System Interconnection).

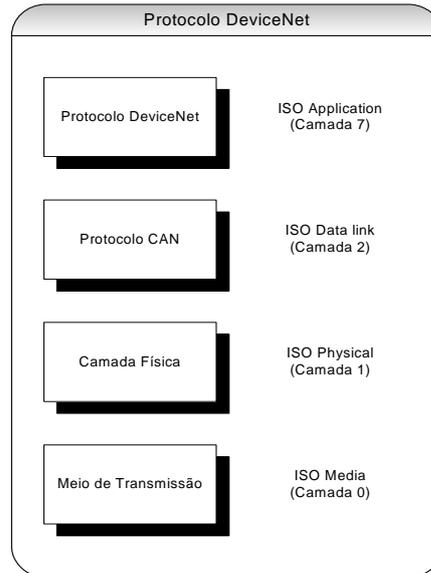


Figura 7 - OSI versus DeviceNet

A Camada de Enlace é completamente definida pela especificação do protocolo CAN. Nesta especificação são definidos dois estados chamados de estado dominante (equivalente ao zero lógico) e estado recessivo (equivalente ao um lógico). Vários tipos de *frames* são definidos pelo CAN como, por exemplo, data frame, *overload* frame, *remote* frame e *error* frame.

O protocolo, de maneira semelhante a Ethernet, sempre escuta o meio para então iniciar sua transmissão, mas através do uso de arbitragem não destrutiva são resolvidos os problemas de transmissão simultânea.

O método de resolução de conflitos de transmissão consiste em todos os receptores em uma rede CAN sincronizarem quando há uma transição do estado recessivo para o estado dominante representando o Bit de Início do Pacote (*Start of Frame Bit*). Logo a seguir estão o campo identificador (*Identifier*) e o campo requisição de transmissão remota (RTR- Remote Transmission Request) os quais juntos formam o campo de arbitragem. Um dispositivo ao transmitir também monitora aquilo que envia para certificar se aquilo que ele envia é o mesmo que é monitorado, possibilitando assim detectar múltiplas transmissões. Se um *Nó* estiver transmitindo um bit recessivo e monitorar um bit dominante, a transmissão é automaticamente finalizada. O vencedor da arbitragem é aquele que possui o menor número de identificador e no caso da DeviceNet são utilizados 11 bits neste campo. Na Figura 8 é mostrado um Frame do protocolo CAN.

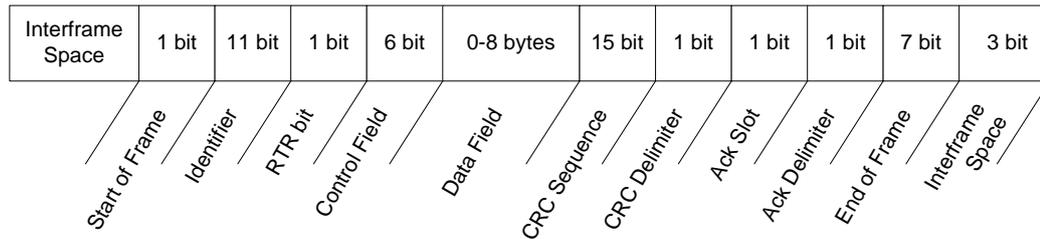


Figura 8 - Frame do protocolo CAN

Existe especificação do protocolo CAN que define campo *Identifier* com 29 bits, mas esta forma não é utilizada pela DeviceNet.

Ao se trabalhar com o nível da camada de aplicação deve-se entender que a DeviceNet é baseada em conexões, isto é, é preciso estabelecer uma conexão com o dispositivo para então trocar informações com o mesmo.

Por definição os *Nós* em uma rede DeviceNet são responsáveis pelo gerenciamento dos seus identificadores. Estes são distribuídos por toda a faixa disponível e todos os *Nós* possuem uma faixa de prioridades de mensagem independente dos seus MAC ID (Medium Access Control Identifier). Existe um algoritmo para a resolução de duplicidade de endereços o qual garante a unicidade dos identificadores do CAN, pois a DeviceNet utiliza o endereço MAC ID dentro do identificador do protocolo CAN.

A camada de aplicação define como os identificadores são atribuídos (indiretamente atribuí a prioridade) e a forma como o campo *Data Field* do CAN é utilizado, ou seja, a troca de dados entre os dispositivos é gerada na camada de aplicação e encapsulada dentro do campo *Data Field*.

A fim de otimizar a utilização da rede a DeviceNet utiliza o modelo produtor-consumidor. Neste modelo o dispositivo que produz os dados na rede com o identificador apropriado e todos os dispositivos na rede que necessitam daquela informação a recebem. Quando o dispositivo reconhece o identificador ele então consome a informação. Assim, com este modelo, a mensagem não é específica de uma fonte para um destino particular, ou seja, uma mensagem pode ser utilizada por vários dispositivos.

Existem dois tipos de mensagens chamadas de *I/O Message* e *Explicit Message*. A seguir segue explicação de sua funcionalidade.

A *I/O Message* (ver Figura 9) é utilizada quando se trabalha com mensagens com criticidade temporal. Este tipo de mensagem gera um canal dedicado entre o produtor e um ou mais consumidores. São utilizadas *single* ou *multi-cast connections* e não existem funções de controle no campo *Data Field* do CAN. A única exceção são as mensagens fragmentadas

onde um byte é utilizado como protocolo de fragmentação. No campo identificador do CAN está identificado o conteúdo da mensagem, mas para ser possível a correta identificação antes do envio da mesma é preciso que tanto o dispositivo que envia quanto o que recebe a mensagem sejam configurados para tal. Na etapa de configuração é onde são definidos os endereços dos atributos dos objetos do consumidor e do produtor.

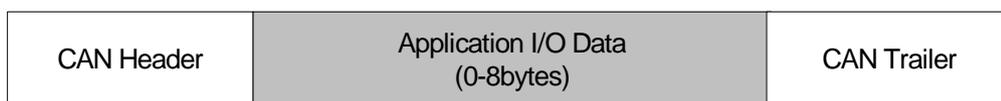


Figura 9 - Formato do pacote I/O Message

Explicit Message (ver Figura 10) trata das mensagens gerais e ponto-a-ponto entre os dispositivos. Seria como a comunicação típica de requisição x resposta e é utilizada quando se faz a configuração dos dispositivos ou verificação do diagnóstico dos mesmos. Normalmente os identificadores desses tipos de mensagens são de baixa prioridade e existem dados importantes dentro do campo *Data Field* do CAN. É neste campo onde são definidos os tipos de serviços que deverão ser executados.



Figura 10 - Formato do pacote Explicit Message

A camada de aplicação conforme mostrado anteriormente possui capacidade de gerenciar diferentes tipos de mensagens e, por consequência, configurar os dispositivos da forma que for melhor para o sistema. Dado que alguns dispositivos não utilizarão a camada de aplicação em toda a sua capacidade, e procurando otimizar a configuração da troca de dados, foram criados campos identificadores pré-definidos.

4.3 ControlNet

4.3.1 Introdução

A rede ControlNet foi primariamente desenvolvida para atender aos requisitos de aplicações de tempo-real em sistemas de Nível Um. As suas características são compatíveis

com as aplicações que necessitam de determinismo, repetibilidade, alto *throughput*, distribuição de dados através de grandes distâncias, sincronismo e mecanismos de interloque. Apesar de a ControlNet ser capaz de gerenciar tanto as atualizações de entradas e saídas como mensagens de serviços *peer-to-peer* e programação remota, ela pode ser utilizada em sistemas bastante simples.

Um dos pontos-chaves para que a ControlNet alcance os objetivos acima é que ela utiliza o protocolo de acesso ao meio denominado de *Concurrent Time Domain Multiple Access* (CTDMA) o qual será explicado posteriormente.

4.3.2 Especificações da ControlNet

O padrão ControlNet especifica desde a camada física até a camada de aplicação do modelo OSI. Na Tabela 3 a seguir estão mostradas as principais características da ControlNet

Número de Nós	máximo de 99;
Taxa de Transmissão	5 Mbit/s;
Comprimento da rede	Distância variável de acordo com o número de Nós, ex: 1000m para dois Nós, 500m para 32 Nós. Também é possível utilização de fibra ótica (3000m);
Tamanho do pacote de dados	0 a 510 bytes;
Topologia	Linha tronco simples, árvore, estrela e combinações;
Configurações de comunicação	Mestre e escravo (<i>Master/Slave</i>), múltiplos mestres (<i>Multi-Master</i>) e <i>Peer-to-Peer</i> ;
Modelo de comunicação	Produtor/Consumidor
Alimentação dos dispositivos	Alimentação dos dispositivos é externa;
Outras características	Pode-se remover e colocar dispositivos na rede com o sistema energizado, determinística, detecção de duplicidade de Nós;

Tabela 3 - Características da Controlnet

4.3.3 Características do protocolo de comunicação

A ControlNet utiliza como protocolo de acesso ao meio o chamado *Concurrent Time Domain Multiple Access* (CTDMA) o qual foi desenvolvido para garantir o desempenho de

transmissões de dados críticas como entradas/saídas, dados de controle e interloques, sem que haja conseqüências quando se faz a transmissão de informações não críticas como, por exemplo, programação e execução de conexões.

Este método utiliza um algoritmo de divisão por tempo, ou seja, o tempo é dividido em *Network Update Time* (NUT) com duração que pode variar entre 2ms a 100ms. Dentro de cada NUT o tempo de transmissão é alocado baseando-se na criticidade do dado a ser transmitido.

O acesso ao meio é garantido a todos os *Nós* através da utilização de *token* (*token virtual*) o qual circula todos os *Nós* dentro do intervalo de um NUT, a arbitragem é descentralizada. A detecção de duplicidade de *Nós* também está incluída neste método de acesso. Todos os *Nós* são sincronizados no tempo de forma que cada um sabe o momento quando poderá acessar o meio e transmitir seus dados. A circulação do *token* é feita de forma circular partindo do *Nó* de menor valor até chegar ao *Nó* de maior valor.

Dentro do intervalo de um NUT são definidos três tipos de tempos:

Scheduled – tempo para a transmissão de dados dos *Nós* configurados como de prioridade e que necessitam de repetitividade;

Unscheduled – tempo para a transmissão de dados dos *Nós* configurados como de baixa prioridade e também para as comunicações envolvendo programações e criação de conexões;

Guardband – tempo para a realização da manutenção da rede e coordenação;

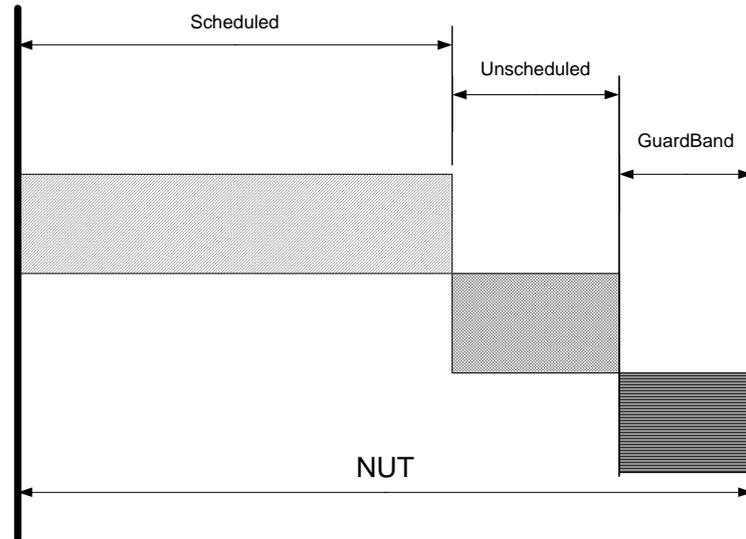


Figura 11 - Componentes do Network Update Time

Dada a composição temporal mostrada na Figura 11, os *Nós* da ControlNet fazem através de configuração prévia a alocação de tempo para a transmissão de seus dados. Quando a configuração é feita de forma que o *Nó* transmita dentro da faixa *Scheduled* significa que há garantia de que a transmissão será repetitiva e determinística; já quando a configuração inclui o *Nó* na faixa *Unscheduled* o mesmo será tratado como *Nó* não crítico e sem reserva prévia de tempo de transmissão o que leva a concorrência entre os *Nós* e não garantia de transmissão de dados. Próximo ao término do intervalo de um NUT existe o *GuardBand* o qual é prioritário dentro da banda *Unscheduled* e é nesta faixa onde são feitas sincronizações e manutenções da rede. Na faixa de tempo reservada ao *GuardBand* o *Nó* moderador (*Nó* com o menor endereço de rede) envia um Frame contendo informações sobre o NUT, número do maior *Nó* da banda *scheduled* (SMAX), número do maior *Nó* da banda *unscheduled* (UMAX) e o tempo de duração de um *slot* de tempo (baseado na rede e na configuração existente).

O formato do MAC Frame ao se enviar dados pela ControlNet é como mostrado na Figura 12.

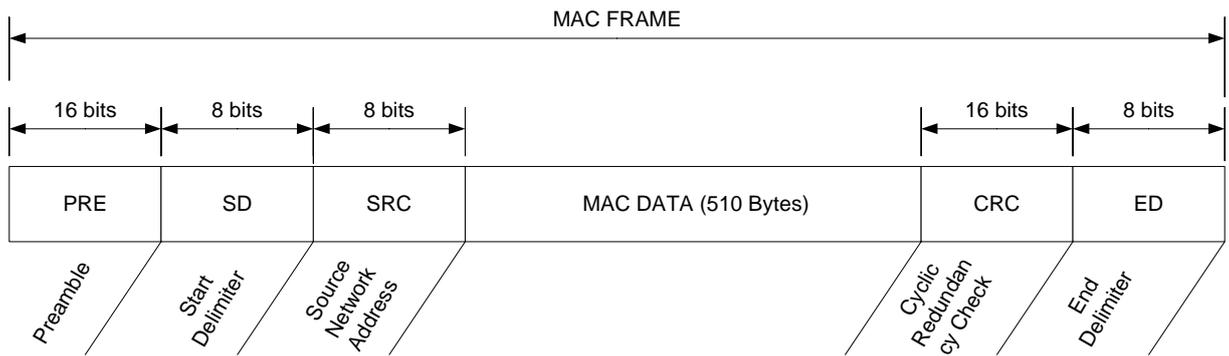


Figura 12 - Frame da ControlNet

Dentro do campo de dados do frame é possível existirem vários pacotes denominados de *Lpackets* e estes pacotes são os responsáveis por carregar as informações e os identificadores para o envio e recebimento das mensagens. Na Figura 13 a seguir é mostrado o formato do *Lpacket*.

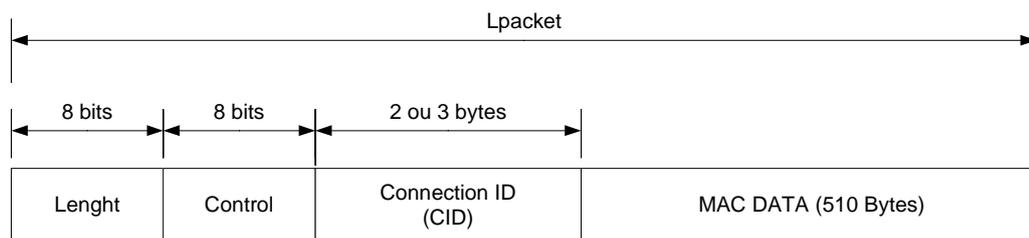


Figura 13 - Formato do Lpacket

No pacote do *Lpacket* existe um campo denominado de *Connection ID (CID)* o qual é exatamente o campo identificador de conexão. A conexão define um caminho virtual entre dois pontos que devem trocar dados e esta conexão é criada pelas camadas de Rede e de Transporte. Considerando que a ControlNet é uma rede do tipo produtor /consumidor não há em seus pacotes de dados endereço fixo do destinatário, mas um identificador, neste caso o CID, o qual é uma identificação para os outros *Nós* dos dados que estão sendo enviados. Esta identificação é criada pelo protocolo da ControlNet através de mensagens de configuração utilizando a banda *Unscheduled* para a transmissão. A partir deste momento já existe então identificador e a mensagem quando enviada pelo produtor poderá ser recebida no destino bastando que o *Nó* filtre somente o *Lpacket* que contém o CID para o qual está configurado, conforme Figura 14.

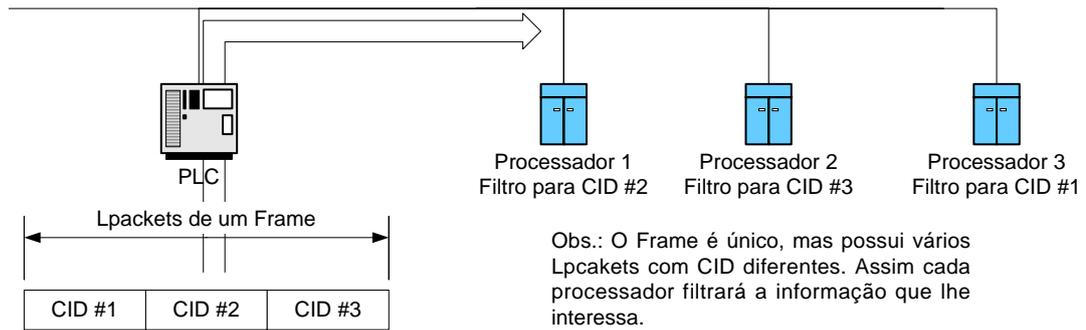


Figura 14 - Exemplo de transmissão e recebimento de pacote ControlNet

Cada *Nó* pode, de acordo com a necessidade, ser configurado como um *Nó* produtor, *Nó* consumidor ou ambos e mesmo assim continua verdadeira a afirmação que aqueles *Nós* configurados como pertencentes à banda *scheduled* terão o direito de transmitir uma vez dentro do ciclo do NUT.

Nota-se que a rede é robusta e pode ser utilizada em diversas aplicações que necessitam de integridade de dados e velocidade de transmissão.

4.4 Ethernet

4.4.1 Introdução

Ethernet é um modelo de rede o qual compartilha o meio de transmissão, resultante do trabalho de Xerox, Intel e *Digital Equipment*. Definida pela norma IEEE 802.3 Ethernet é uma arquitetura de rede largamente utilizada em virtude da ampla escala de produção de dispositivos baseado neste padrão e o conseqüente custo reduzido.

Atualmente sua utilização concentra-se em sistemas de transmissão de informação devido ao seu custo reduzido. Face esta característica, diversos fabricantes de dispositivos de automação estão buscando formas de utilizar a Ethernet no chão de fábrica chegando até ao nível de dispositivos de campo. Já é comum encontrar a Ethernet na comunicação entre Nível Um e Nível Dois e também entre Nível Um e Nível Um.

O acesso ao meio de transmissão é feito baseado no protocolo CSMA/CD o qual será explicado adiante.

4.4.2 Especificações da Ethernet

A especificação da Ethernet é o padrão IEEE 802.3 o qual especifica camada física e parte da camada de enlace conforme o modelo OSI. Na Tabela 4 a seguir estão algumas das principais características da Ethernet.

Número de Nós	praticamente sem limite	
Taxa de Transmissão	10 Mbit/s , 100Mbit/s e 1 Gbit/s;	
Comprimento da rede	Variável de acordo com o cabeamento utilizado.	
	Tipo:	Comprimento
	10Base5	500m
	10Base2	200m
	10BaseT, 100BaseTx	100m
Tamanho do pacote de dados	até 1500 bytes;	
Topologia	Linha tronco simples e estrela;	
Configurações de comunicação	Depende dos protocolos acima da camada de Enlace;	
Modelo de comunicação	Depende dos protocolos acima da camada de enlace;	
Alimentação dos dispositivos	Alimentação dos dispositivos é externa;	
Outras características	É base para vários protocolos.	

Tabela 4 - Características da Ethernet

4.4.3 Características do protocolo de comunicação

Ethernet utiliza o mecanismo denominado de *Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection* (CSMA/CD) para o acesso ao meio de transmissão. Quando um *Nó* deseja transmitir ele primeiramente escuta o meio; se o meio estiver utilizado por outra transmissão o *Nó* espera até que o meio fique livre; caso contrário, a transmissão inicia-se imediatamente.

Existe situação onde dois *Nós* da rede identificam que o meio está livre e iniciam a transmissão simultaneamente, neste caso ocorre uma colisão e as transmissões são corrompidas. Ao ser detectada a colisão os *Nós* param de transmitir e esperam um intervalo de tempo aleatório para fazer outra tentativa de transmissão. Este intervalo é definido pelo algoritmo denominado de *Binary Exponential Backoff* e ele define que o tempo para

retransmissão deve ser escolhido randomicamente entre 0 e $(2^I - 1) \times SlotTime$ onde I representa o Iésimo evento de colisão detectado e *slot time* é a diferença de tempo entre o recebimento de pacote pelo primeiro e último *Nó*. Contudo, após detectar-se mais de 10 colisões o algoritmo assume o intervalo $1023 \times SlotTime$ e após 16 colisões o *Nó* aborta a tentativa de transmissão.

O algoritmo CSMA/CD introduz característica estocástica ao processo de transmissão e esta característica é algo indesejável quando se trabalha com sistemas de controle, pois torna a rede sem as garantias de entrega de pacotes.

O *Frame* Ethernet possui vários campos com funções específicas os quais representam 26 bytes (não se considerou o campo de dados). Pelo padrão um *frame* Ethernet não pode ter menos do que 72 bytes, ou seja, o campo de dados não pode ser inferior a 46 bytes. Na Figura 15 segue o formato do *Frame* Ethernet.

Preamble (7 bytes)	SOF (1 byte)	Destination Address (6 bytes)	Source Address (6 bytes)	Length (2 bytes)	802.2 Header e Data (46 a 1500 bytes)	FCS (4 bytes)
-----------------------	-----------------	-------------------------------------	--------------------------------	---------------------	------------------------------------------	------------------

Figura 15 - *Frame* Ethernet

Já foi citado anteriormente que Ethernet puramente não é capaz de promover comunicação efetiva entre dois dispositivos. Para isto são necessários protocolos das camadas superiores do modelo OSI para que a comunicação seja efetiva. Neste caso os fabricantes que se baseiam na Ethernet não precisam necessariamente utilizar os mesmos protocolos nas camadas superiores do modelo OSI e isto acrescenta dificuldades quando se fala em interoperabilidade de sistemas e dispositivos.

A Tabela 5 a seguir mostra os principais protocolos utilizados considerando as divisões do modelo OSI.

Camada	Protocolo
Aplicação	FTP, SNMP, SMTP, HTTP, Telnet e CIP
Apresentação	
Sessão	
Transporte	UDP/TCP
Rede	IP
Enlace	Ethernet
Física	

Tabela 5 - Principais Protocolos x Modelo OSI

Buscando um protocolo ao nível de camada de aplicação que torne a interoperabilidade entre dispositivos, alguns fabricantes utilizam protocolos já conhecidos como *Modbus* e *Profibus*. Mesmo utilizando a Ethernet, o núcleo do protocolo permaneceu o mesmo e quando comparados com outros protocolos mais novos percebe-se que estes possuem algumas qualidades a mais.

Considerando a existência de um protocolo como os de aplicação da DeviceNet e ControlNet, o mesmo grupo responsável pelo desenvolvimento das especificações da ControlNet desenvolveu uma camada de aplicação a qual utilizava a Ethernet, TCP/IP e/ou UDP/IP como protocolos nas camadas inferiores do modelo OSI. A este novo protocolo deu-se o nome de *Ethernet Industrial Protocol* (Ethernet/IP).

Semelhante a ControlNet e DeviceNet o núcleo do protocolo baseia-se no modelo de objetos e também necessita que sejam criadas e gerenciadas conexões para que sejam feitas as trocas de dados. Em todo o processo utilizam-se as chamadas *Implicit Messages* e *Explicit Messages*.

Para as chamadas *Explicit Messages* a comunicação é inerentemente do tipo ponto-a-ponto e, portanto, na Ethernet/IP utiliza-se o TCP/IP como protocolos da camada de transporte e de rede, respectivamente, já que eles permitem esta característica. Assim, podem ser realizadas as configurações para as trocas de dados entre dispositivos de forma semelhante ao realizado na DeviceNet e ControlNet.

Para as chamadas *Implicit Messages* a comunicação não precisa ser do tipo ponto-a-ponto e por isso a Ethernet/IP utiliza o UDP/IP como protocolos das camadas de transporte e rede. Com a utilização de endereços *multicast* é possível que sejam transmitidas informações para diferentes destinos sem que haja desperdício de largura de banda (possível com UDP e IP). Para isto, todo o campo de dados disponível na camada relativa ao protocolo UDP (camada de transporte) é utilizado apenas com informações a serem trocadas (dados em si e a identificações necessárias). Outra característica do UDP é que o mesmo é mais rápido no processo de transmissão. A seguir, Figura 16, seguem as disposições dos protocolos e aplicações conforme citado anteriormente.

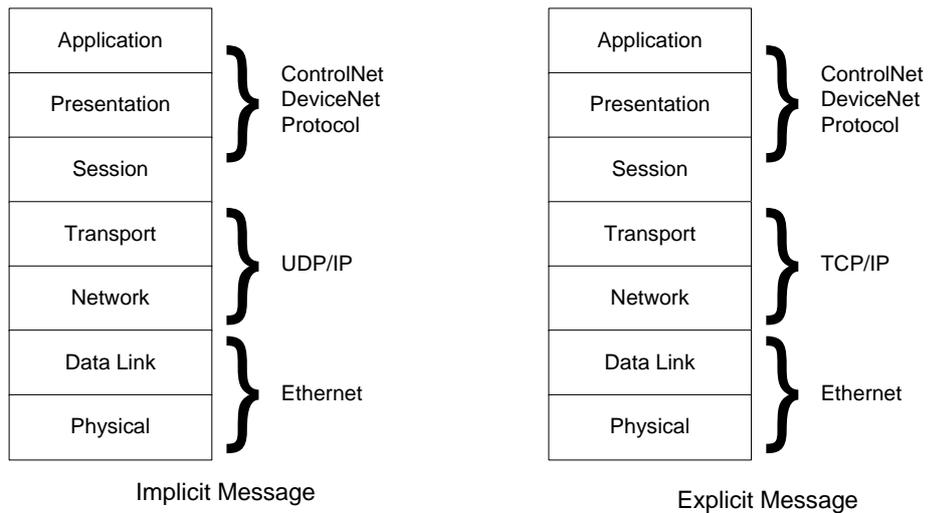


Figura 16 - Modelo de Camadas para Ethernet/IP

4.5 Características de Comunicação nos Sistemas de Controle

No ambiente industrial conforme mostra a Figura 17, existe uma hierarquia de divisão de tarefas para o controle total de um processo industrial. Aqui são analisadas as características comuns em sistemas Nível Zero e Nível Um.

Como equipamentos básicos para o Sistema Nível Um tem-se as Interfaces de Operação (IHM) e os Computadores Lógicos Programáveis (CLP) e para os Sistemas de Nível Zero tem-se os instrumentos de campo, relés, atuadores e etc.

Na Figura 17 a seguir, tem-se uma visão das interfaces existentes entre os sistemas e dispositivos.

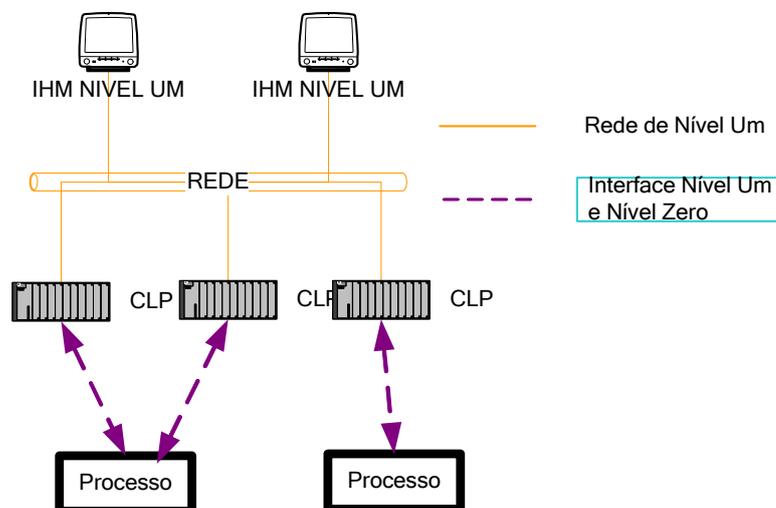


Figura 17 - Sistema Nível Um e Nível Zero

4.5.1 Interface Homem Máquina (Nível Um)

A Interface Homem Máquina (IHM) é o elemento do sistema de controle que faz a interface da operação do sistema com o sistema de controle. Nela são disponibilizadas informações tais como alarmes, estados de equipamentos, valores de variáveis etc.

É através da IHM que o operador executa comandos relativos a ciclos do processo de produção e até mesmo efetua a troca de *set-points* do sistema. De maneira geral os dados são recebidos e enviados diretamente aos controladores lógicos programáveis através de rede de comunicação utilizando protocolos específicos.

Na IHM, normalmente não são executados controles relativos ao processo, mas somente a supervisão do mesmo.

Considerando as características descritas, pode-se classificar a troca de informações entre IHM e CLP segundo:

- **Troca de informação crítica** – esta característica está presente nas ações de comando que por sua vez são caracterizadas pela sua eventualidade, ou seja, se é efetuado comando na IHM o mesmo deverá ser enviado ao CLP. Outra situação seria o registro de dados do processo com elevado desempenho quanto à taxa de amostragem.
- **Troca de informação não crítica** - esta característica é a mais presente na IHM devido à funcionalidade de supervisão. Normalmente a IHM mostra os estados de equipamentos para a tomada de ação dos operadores e também registra valores para posterior análise. Para o primeiro caso, considerando a velocidade de reação do operador se houver alguma mudança muito rápida de estado, um certo índice de perda de informações é admissível visto que em um curto espaço de tempo ela será novamente atualizada; já para o caso de registro de valores a perda de informações também é admissível à exceção dos casos de sistema de alto desempenho.
- **Quanto ao Tamanho** – a IHM apresenta dois tipos básicos de tamanhos de pacotes de informações que seriam: a leitura de grandes blocos de dados do CLP e o envio de comandos ou *set-points*. O primeiro geralmente possui grande quantidade de bytes/palavras variando de acordo com o número de registros lidos do CLP e o

protocolo específico; já o segundo é caracterizado pela pequena quantidade de bytes necessários a serem enviados variando de acordo o protocolo específico.

- **Atraso máximo e variações** - a IHM por não controlar o processo não gera grandes restrições quanto ao atraso, mas é importante que o mesmo seja na ordem de segundos (<2s) porque este é o tempo que é possível o operador tomar ações. Restrição haverá quando se tratar de sistema de alto desempenho dedicado ao registro de variáveis, sendo a restrição diretamente ligada à exigência de amostragem do sistema.
- **Processo de transmissão** – a IHM apresenta dois tipos de trocas com CLP: **Polling** e **por eventos**. A primeira é resultado da coleta de grande quantidade de informações para registro e sinalização, já o segundo acontece no momento da execução de comandos e envio de *set-points*. Os modos **Strobe** e **cíclico** não são comuns, mas podem ser encontrados.

4.5.2 Controlador Lógico Programável (Nível Um)

O Controlador Lógico Programável (CLP) é o elemento do sistema de controle que faz o efetivo controle do processo, ou seja, é nele que estão concentradas todas as lógicas de controle e as interfaces com os equipamentos de campo.

É no CLP que está toda a lógica de controle relativa aos ciclos do processo de produção e através dele são obtidos os dados necessários para a apresentação e registro de estados e variáveis na IHM.

De maneira geral as trocas de informações do CLP com a IHM são através de rede e as trocas com os equipamentos de Nível Zero são efetuadas tanto por conexões físicas de sinais discretos e analógicos quanto por redes.

Considerando as características descritas, pode-se classificar a troca de informações do CLP conforme a descrição seguinte (será considerada a interface de rede entre Nível 1 e Nível Zero):

- **Troca de informação crítica** – esta característica está presente nas ações de comando do CLP para dispositivos de Nível Zero e nas trocas de interloques entre CLP's. Ambas as trocas caracterizam-se pela constante repetição ao longo do tempo.

- **Troca de informação não crítica** - esta característica é mais presente para as requisições de informação que a IHM faz ao CLP. Normalmente a IHM mostra os estados de equipamentos para a tomada de ação dos operadores e também registra valores para posterior análise.
- **Quanto ao Tamanho** – o CLP apresenta dois tipos básicos de tamanhos de pacotes de informações que seriam: as respostas de requisições de leitura da IHM e o envio de comandos ou interloques. O primeiro possui uma grande quantidade de bytes/palavras variando de acordo com o número de registros solicitados pela IHM; já o segundo é caracterizado pela pequena quantidade de bytes necessários a serem enviados.
- **Atraso máximo e variações** – o CLP por controlar o processo é o maior responsável pelas restrições quanto ao atraso e variações do mesmo. Esses valores são função direta do sistema controlado [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].
- **Processo de transmissão** – o CLP apresenta principalmente os processos de troca como o *Polling* e *por eventos*. O primeiro é resultado da resposta às solicitações da IHM e trocas com dispositivos de Nível Zero (comandos e leituras dos mesmos) e trocas entre dispositivos de Nível Um; o segundo acontece normalmente nas situações de troca de informações entre CLP's. Os modos *Strobe* e *cíclico* são menos comuns que os citados anteriormente.

4.5.3 Equipamento de Nível Zero

Os equipamentos de nível zero são os elementos do sistema de controle que executam a ação no processo de produção, ou seja, são neles que se concentram os dispositivos que atuam fisicamente no processo.

Estes equipamentos possuem a característica de serem distribuídos tanto fisicamente quanto funcionalmente, isto é, estão localizados em diversos pontos da planta do processo produtivo e possuem funcionalidades diversas.

Geralmente efetuam trocas de informações com os CLP's ou com outros equipamentos de Nível Zero.

Considerando as características anteriores, pode-se classificar a troca de informações destes equipamentos conforme a descrição seguinte:

- **Troca de informação crítica** – esta característica está presente nas ações de comando recebidas do CLP e nos envios de estados e valores para o CLP. Ambas as trocas caracterizam-se pela constante repetição ao longo do tempo.
- **Troca de informação não crítica** – esta característica está presente quando relacionada a sinais de monitoração que não fazem parte do controle do sistema, por exemplo, diagnóstico dos equipamentos. Estes sinais admitem certo índice de perda e em sua maioria variam muito lentamente quando comparado ao tempo da troca de informações.
- **Quanto ao Tamanho** – os equipamentos de Nível Zero apresentam trocas de informações com tamanhos de pacotes reduzidos, pois são basicamente estados. Exceções acontecem para aqueles dispositivos multifuncionais que podem apresentar várias informações de relativa importância.
- **Atraso máximo e variações** – juntamente com o CLP, os equipamentos de Nível Zero são os responsáveis pelo atraso total na troca de informações e, portanto, co-responsáveis pela consequência de sua ação no processo. Por serem dispositivos que atuam no sistema, não são afetados pelo atraso, apenas contribuem para no resultado do atraso total.
- **Processo de transmissão** – os equipamentos de Nível Zero apresentam principalmente o processo de troca *Polling* na forma de resposta a requisições ou de ação aos comandos feitos pelo(s) CLP(s). Os modos *Strobe*, *cíclico* e *por eventos* são possíveis, mas são menos utilizados.

5 Avaliação de Desempenho de Rede em Sistema de Controle

5.1 Introdução

Pode-se identificar dois grandes grupos de redes quanto ao seu uso: Redes de Dados e Redes de Controle. As Redes de Dados são caracterizadas por grandes pacotes de dados, transmissões esporádicas, elevadas taxas de transmissão e as aplicações não exigem garantias de comunicação tempo real. Já as Redes de Controle se caracterizam por pacotes de dados menores, transmissões freqüentes e aplicações que exigem comunicação em tempo real.

A tomada de decisão de qual tipo de rede utilizar não é direta e necessita que sejam verificados vários parâmetros auxiliares para que a definição seja bem sucedida no momento da aplicação real.

De acordo com [5, 6, 7, 8, 9, 12, 17] existem dois atrasos importantes no sistema de controle: atraso total entre o sensor e o controlador e o atraso entre o controlador e o atuador. Esta atenção especial é explicável, pois nos sistemas de controle que utilizam ligações físicas de entradas e saídas com a topologia ponto-a-ponto os atrasos na comunicação sensor-controlador e controlador-atuador são praticamente função da capacidade do controlador. Em contrapartida, nos sistemas que incluem redes em sua topologia (NCS) o atraso também dependerá do tipo de rede utilizada, pois cada uma possui sua especificação.

5.2 Componentes do atraso

Segundo trabalho realizado por [5, 6, 7] o atraso na transmissão de dados pode ser dividido em três partes sendo a primeira relativa aos atrasos no *Nó* de origem, a segunda relativa aos atrasos no meio de transmissão e a terceira relativa aos atrasos no *Nó* de destino.

Os atraso no *Nó* de origem consiste nos tempos de processamento da mensagem a ser enviada, tempo de espera no *buffer* de saída e tempo de bloqueio devido ao tráfego no meio de transmissão. A partir do momento em que a mensagem já está sendo transmitida passa-se a ter o atraso referente ao meio e este consiste no tempo de propagação (função das distâncias envolvidas) e tempo de transmissão (função da taxa de transmissão e protocolos). No *Nó* receptor existe atraso devido ao tempo de processamento da mensagem. Os atrasos em dispositivos são dependentes da eletrônica dos mesmos, podendo existir dispositivos que tenham processadores separados para comunicação e interface com o campo bem como

dispositivos em que um único processador é responsável pela aquisição e interface com o campo.

A equação formal para representar o Tempo de Atraso (T_{atraso}) é descrita a seguir.

$$\begin{aligned}
 T_{\text{atraso}} &= T_{\text{dest}} - T_{\text{orig}} \\
 T_{\text{atraso}} &= \underbrace{T_{\text{pre}} + T_{\text{wait}}}_{\text{origem}} + \underbrace{T_{\text{tx}}}_{\text{meio de transmissão}} + \underbrace{T_{\text{pos}}}_{\text{destino}} \\
 T_{\text{atraso}} &= \underbrace{T_{\text{scomp}} + T_{\text{scod}}}_{T_{\text{pre}}} + \underbrace{T_{\text{queue}} + T_{\text{block}}}_{T_{\text{espera}}} + \underbrace{T_{\text{frame}} + T_{\text{prop}}}_{T_{\text{tx}}} + \underbrace{T_{\text{ddec}} + T_{\text{dcomp}}}_{T_{\text{pos}}}
 \end{aligned}$$

Equação 5.1 - Equação do tempo de atraso

No *Nó* de origem tem-se: o tempo de pré-processamento (T_{pre}), tempo que o dispositivo de origem gasta para receber informações do campo e codificá-las de forma que possam ser enviadas e o seu valor pode variar mesmo para dispositivos idênticos, mas normalmente é desconsiderado; tempo de espera (T_{wait}) que é resultado da soma do tempo em que a informação fica retida no dispositivo em função do envio de mensagens anteriores ou prioritárias com o tempo em que a mensagem permanece no *buffer* em função de não disponibilidade do meio de transmissão (o tráfego elevado resulta em bloqueio da mensagem). O tempo de espera é mais complexo para ser analisado, sendo mais usual a realização de simulações. Situação semelhante ocorre para o *Nó* de destino.

O tempo de atraso em função do meio de transmissão compõe-se basicamente do tempo de propagação do sinal e do tempo de transmissão. O tempo de propagação é constante dada uma distância entre dois *Nós*, já o tempo de transmissão está estritamente relacionado ao tipo de rede utilizada e o tamanho dos dados. No gráfico da Figura 18, pode-se perceber as diferenças do tempo de transmissão.

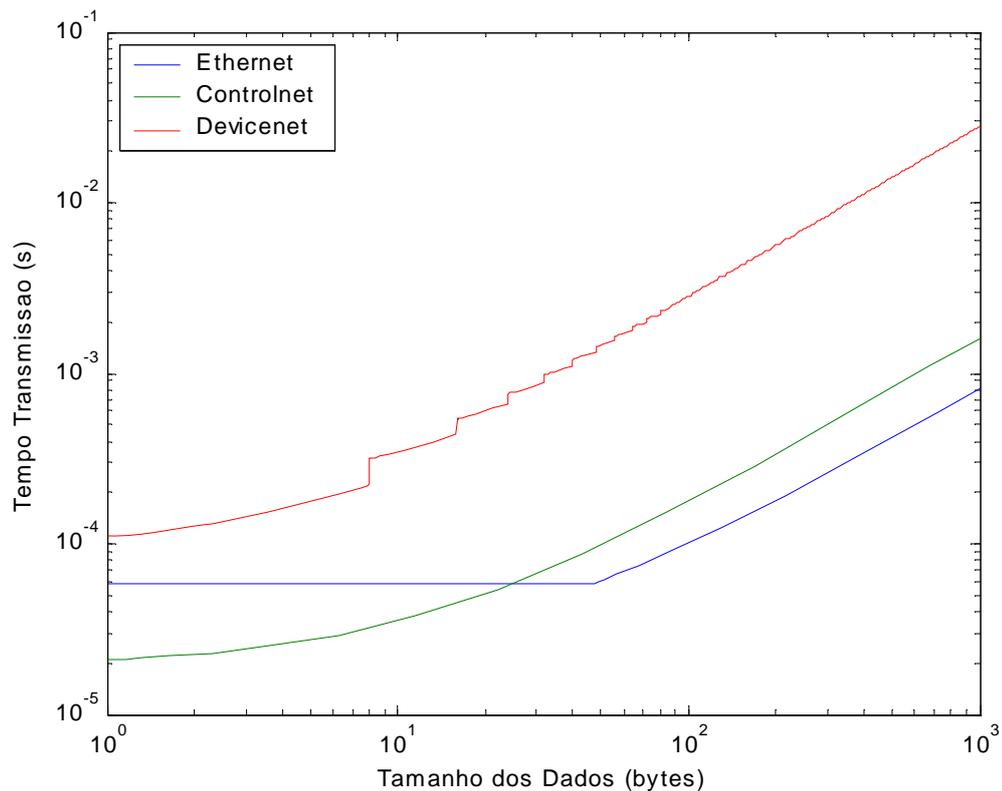


Figura 18 - Gráfico do tempo de transmissão Dnet, Cnet e Ethernet

De maneira geral estes tempos de atraso são influenciados também pela taxa de transmissão do sistema, quantidade de tráfego ao qual o sistema está submetido e ao protocolo de comunicação utilizado e, por conseqüência, haverá relação direta com o tipo de rede utilizada [13].

5.2.1 Tempo de Bloqueio

Dentre os componentes do atraso, o tempo de bloqueio (tempo que uma mensagem necessita esperar para ser transmitida, contado a partir do momento em que o *Nó* está pronto para fazê-lo), também é possível de se avaliar. Este tempo está diretamente relacionado ao protocolo de acesso ao meio.

Em [3,5,7,12] encontram-se os resultados da avaliação do tempo de bloqueio de redes Devicenet, ControlNet e Ethernet. A equações Equação 5.2, Equação 5.3 e Equação 5.4 a seguir ilustram como calcular o tempo de bloqueio para as redes estudadas neste trabalho.

$$E\{T_{\text{bloqueio}}\} = \sum_{k=1}^{16} E\{T_k\} + T_{\text{residual}}$$

Equação 5.2 - Equação do tempo de bloqueio para Ethernet

Onde T_{residual} é o tempo residual até que o meio esteja livre e $E\{T_k\}$ é o tempo esperado da k-ésima colisão.

$$T_{\text{block}} = T_{\text{residual}} + \sum_{j \in N_{\text{nãoqueue}}} T_{\text{token}}^j + \sum_{j \in N_{\text{queue}}} \text{Min}(T_{\text{tx}}^{(j, n_j)}, T_{\text{nó}}) + T_{\text{guarda}}$$

Equação 5.3 - Equação do tempo de bloqueio para Controlnet

Onde $N_{\text{nãoqueue}}$ é o número de Nós sem mensagens para transmitir, N_{queue} é o número de Nós com mensagens para transmitir e n_j é o número de mensagens na fila.

$$T_{\text{bloquio}}^{(k)} = T_{\text{residual}} + \sum_{j \in N_{\text{prio}}} \left[\frac{T_{\text{bloqueio}}^{(k-1)} + T_{\text{bit}}}{T_{\text{periodo}}^{(j)}} \right] T_{\text{tx}}^{(j)}$$

Equação 5.4 - Equação do tempo de bloqueio para Devicenet

Onde T_{residual} é o tempo para o Nó atual terminar de transmitir, $T_{\text{periodo}}^{(j)}$ é o período do j-ésimo Nó, N_{prio} número dos Nós prioritários ao Nó j ,

Das Equações 5.2, 5.3 e 5.4 se pode concluir que: para a Ethernet o tempo de bloqueio não apresenta limite superior e também não apresenta característica contínua; para a ControlNet o tempo de bloqueio é limitado superiormente; para a DeviceNet o tempo de bloqueio não é fixo e em caso de alto tráfego relativo a Nós prioritários o tempo de bloqueio pode não ser limitado superiormente porque os Nós prioritários sempre terão mensagens em seu buffer e os Nós menos prioritários sempre perderão a arbitragem.

Para as mensagens não críticas o que importa é que a rede seja capaz de enviar os dados desejados, com atrasos na entrega da mensagem e até perda de pacotes de informação. Redes como a DeviceNet, ControlNet, Ethernet com TCP/IP, Ethernet com UDP/IP e Ethernet-IP são capazes de fornecer tal tipo de serviço de transmissão.

5.3 Modelamento da influência dos atrasos no sistema de controle

Vários pesquisadores realizaram trabalhos visando modelar e simular os atrasos e os seus efeitos nos sistemas. Em [8] encontra-se um método utilizado para modelar a degradação do desempenho do sistema devido aos atrasos. A principal idéia no trabalho é considerar a aproximação de primeira ordem da série de Taylor da função abaixo, Equação 5.5:

$$\Phi(\tau_{1,1}, \tau_{1,2}, \dots, \tau_{n,m}) = \Phi(0,0,\dots,0) + \frac{\partial\Phi}{\partial\tau_{1,1}}\tau_{1,1} + \frac{\partial\Phi}{\partial\tau_{1,2}}\tau_{1,2} + \dots + \frac{\partial\Phi}{\partial\tau_{n,m}}\tau_{n,m}$$

Equação 5.5 - Equação do desempenho do sistema com atrasos

Onde Φ é a degradação de desempenho e $\tau_{n,m}$ é o atraso entre o Nó n e Nó m .

A partir da Equação 5.6 se pode fazer o modelamento de um sistema mais complexo, bastando encontrar todos os termos da equação e considerar o desempenho do sistema como:

$$P = |\Phi| + P^*$$

Equação 5.6 - Equação genérica de desempenho

Onde P^* é o desempenho (erro) do sistema sem atrasos

A grande dificuldade deste método é a obtenção dos termos da Equação 5.5. Por exemplo, para o tempo de atraso entre Nós, dificilmente haverá uma fórmula fechada que compreenda todos os tipos de dispositivos, mas este tempo pode ser estimado através de simulação real ou até mesmo obtido com certa margem de segurança através de cálculos baseados nas especificações dos dispositivos. Assim, considerando que todos os tempos poderão afetar o sistema, a estimativa deverá ser feita para todos os pares de Nós disponíveis no sistema. Já o termo $\frac{\partial\Phi}{\partial\tau_{n,m}}$ (coeficiente da parte linear da Série de Taylor) é mais complexo de ser obtido e a forma utilizada em [8] baseia-se no fato de haver linearidade e independência (Equação 5.5). Para a obtenção desses coeficientes é necessário primeiramente equacionar o desempenho do sistema considerando todos os atrasos existentes iguais a zero com exceção do atraso cuja relação com o desempenho do sistema se está avaliando; como segundo passo é necessário equacionar o desempenho do sistema considerando a inexistência de qualquer atraso. Assim, ao final ter-se-ão dois valores que ao se considerar um valor de atraso τ a diferença de desempenho dada pelas duas equações é o

resultado de $\frac{\partial \Phi}{\partial \tau_{n,m}} \tau_{n,m}$, sendo então possível obter o valor de $\frac{\partial \Phi}{\partial \tau_{n,m}}$. Nos sistemas onde o desempenho não é obtido de forma analítica é necessário utilizar simulações para obter os resultados acima.

A metodologia descrita em [8], por considerar desempenho versus atrasos em diversos pontos no sistema, pode auxiliar a tomada de decisão quanto à utilização de dispositivos interligados por redes em partes do sistema, pois a consequência da existência de atrasos no desempenho global pode ser avaliada rapidamente. É importante evidenciar que o método descrito anteriormente não faz referência explícita ao tipo de rede utilizada e também não possui no seu modelamento a amostragem do sistema e, portanto, toda a análise comparativa deverá ser feita considerando a igualdade destes termos.

Em [12] foram feitos experimentos para averiguar os tempos de atraso entre controlador-sensor e sensor-controlador em redes do tipo Devicenet e Ethernet. Os principais resultados encontrados para a rede Devicenet são mostrados a seguir:

- Meio de transmissão sem tráfego – os atrasos encontrados mostraram-se praticamente constantes.
- Meio de transmissão com tráfego induzido – os atrasos no sistema foram praticamente constantes com a peculiaridade de apresentar vários picos máximos.
- Meio de transmissão com tráfego periódico – os atrasos apresentaram bastante variação dentro de limites superiores e inferiores. Neste experimento evidenciou a influência da prioridade na transmissão, ou seja, *Nós* de menor prioridade tiveram atrasos maiores.

Já para a Ethernet, os atrasos mostraram-se bastante variáveis, principalmente nos momentos onde a utilização da rede é mais alta. Esse fato é resultado do método de acesso ao meio o qual possui característica aleatória.

Em [3,7] foram feitos experimentos com a rede DeviceNet que revelaram os tempos de espera e tempos de pré e pós-processamento conforme a seguir:

- Tempo de espera – os valores variam dentro de limites sendo que estes aumentam à medida que aumenta o número do *Nó* (diminui a prioridade). Tempos obtidos na faixa de 0,2 a 1 ms;

- Tempo de pré e pós-processamento – os valores mostraram-se muito influenciados pelos dispositivos. Foram identificados quatro padrões básicos para os tempos conforme Figura 19 a seguir.

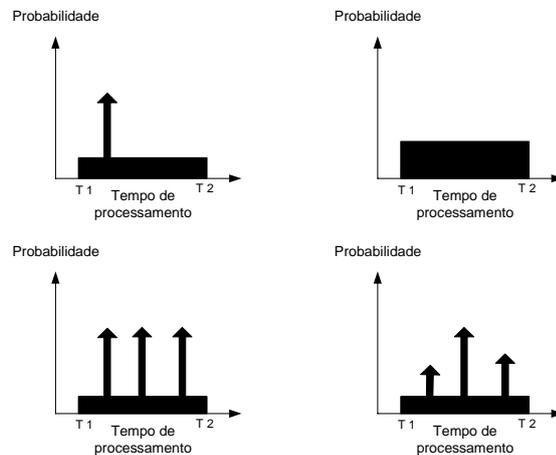


Figura 19 - Padrões de tempo de processamento (dispositivos Devicenet)

Na literatura encontra-se que a consequência dos tempos de atraso para os sistemas de controle é a alteração na resposta de fase do sistema [2,3,5,20]. É importante ressaltar que o tempo de atraso da rede é apenas parte do tempo total de atraso da malha de controle o qual é citado na equação 5.8 a seguir. As relações matemáticas envolvidas são mostradas nas Equações 5.7 e 5.8 abaixo:

$$\Delta\phi_s = \frac{W.T_s}{2}$$

Equação 5.7 - Equação da perturbação na resposta de fase devido à discretização

Onde W é a frequência e T_s é o período de amostragem.

$$\Delta\phi_d = W.T_d$$

Equação 5.8 - Equação da perturbação na resposta de fase devido ao atraso

Onde W é a frequência e T_d é o tempo de atraso

Os resultados das equações 5.7 e 5.8 influenciam no sistema de controle diminuindo a margem de fase do sistema o que poderia, em caso extremo, levar a instabilidade. Considerando a importância da amostragem para o sistema tanto em seu aspecto de influência

no erro quanto na estabilidade, o trabalho desenvolvido em [5] considerou a curva de desempenho dos sistemas contínuos, discretos e NCS conforme a Figura 20 a seguir.

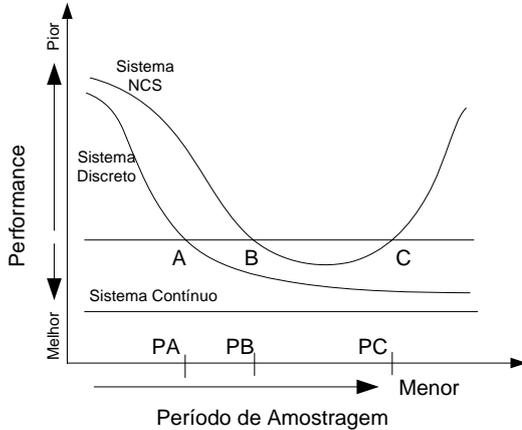


Figura 20 - Desempenho comparativo de controle contínuo, discreto e NCS

Na Figura 20, os pontos PA, PB e PC são os períodos de amostragem relativos do limiar entre desempenho aceitável e não aceitável. No trabalho de [5] é feita uma aproximação dos valores dos pontos PB e PC os quais servem de guia para a escolha da amostragem de um sistema NCS. As equações a seguir, Equação 5.9, mostram o desenvolvimento para encontrar o valor de PB, sendo $\Delta\phi^d$ valor da perturbação na fase para um sistema discreto genérico, $\Delta\phi_s^d$ o valor da perturbação na fase para um sistema discreto com atrasos, $\Delta\phi_d$ o valor da perturbação na fase relativo ao tempo de atraso e W_{bw} a largura de banda do sistema .

$$\Delta\phi^d = \Delta\phi_s^d + \Delta\phi_d$$

$$\frac{W.T_s}{2} = \frac{W.T_s^d}{2} + W.T_d$$

$$T_s = T_s^d + 2.T_d$$

$$T_s^d = T_s - 2.T_d$$

Equação 5.9 - Desenvolvimentos para encontrar valor de PB

Utilizando a regra $20 \leq \frac{W_s}{W_{bw}} \leq 40$ (W_s igual à frequência de amostragem) onde para

escolha de amostragem em sistema discreto [5]:

$$PB = T_s^d = \frac{T_{bw}}{20} - 2.T_d$$

Equação 5.10 - Equação final do valor de PB

Conseqüência direta da Equação 5.10 é que dado um certo atraso devido à rede o intervalo de amostragem deverá ser menor para compensar. Não é difícil compreender este fato porque ao se diminuir os períodos de amostragem os tempos como de transmissão, espera e processamento tornam-se relevantes e devem, portanto, ser considerados. Em [5] considera a aproximação do ponto PC conforme a Equação 5.11 abaixo:

$$PC = \frac{T_{proc} + T_{tt}}{0,69}$$

Equação 5.11 - Equação de PC

Sendo $T_{proc} = \sum_{i=1}^n T_{proc}^i$ o tempo de processamento nos Nós e $T_{tt} = \sum_{i=1}^{2n} T_{tx}^i$, tempo de transmissão das mensagens (ambos para o caso de regime *Polling* de transmissão).

Com os valores de PB e PC já se tem o ponto de partida para a definição da amostragem do sistema.

Dada a relação entre amostragem e a utilização do meio de transmissão, existem estudos que visam minimizar o tráfego. Em [4] sugere-se uma forma de reduzir a utilização do meio de transmissão através do uso de bandas-mortas nos sinais de campo, ou seja, os dispositivos seriam configurados de forma que só enviariam seus estados para o controlador se os mesmos variassem além da banda-morta pré-estabelecida. É, portanto, intuitivo que a utilização do meio seria diminuída.

Em contrapartida ao se utilizar banda-morta o erro no sistema aumentaria já que aquilo que o controlador está reconhecendo do campo não é exatamente o valor real e sim o último valor que o sensor enviou. Na Figura 21 a seguir são mostrados dois gráficos que segundo [4] representariam a ação da banda-morta no sistema de controle.

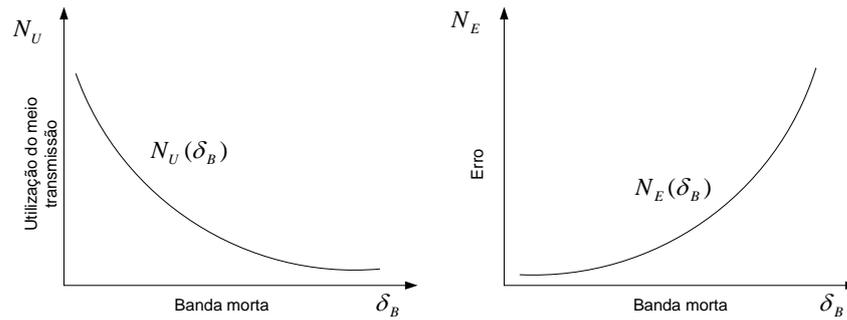


Figura 21 - Relação utilização meio X banda morta e erro X banda morta

Pelos gráficos fica evidente que existe uma relação entre banda morta, erro do sistema de controle (desempenho) e utilização do meio e que o aumento de banda morta é de certa forma prejudicial para o sistema, pois o erro aumenta. A forma sugerida por [4] é que se encontre um ponto de equilíbrio da equação abaixo, Equação 5.12.

$$P = W_1 N_U(\delta_B) + W_2 N_E(\delta_B)$$

Equação 5.12 - Equação de desempenho considerando erro e banda morta

Sendo W_1 peso para a função de utilização do meio e W_2 peso para a função do erro no sistema.

Para os sistemas em geral um importante resultado é que para uma dada taxa de amostragem onde o tráfego no meio torna-se relevante e os atrasos também, pode-se escolher dispositivos e colocá-los na condição de transmissão com banda-morta o que causaria redução no tráfego e diminuição dos atrasos e de certa forma a piora no desempenho do sistema (erro) devido à banda-morta poderia ser menor que o ganho devido à redução geral dos atrasos. Nas simulações feitas em [4] o uso de banda-morta mostrou que a estabilidade do sistema continua praticamente a mesma e que a alternativa de uso de banda-morta é robusta para situações onde há incerteza e distúrbios na planta.

6 Metodologia proposta para Avaliação de desempenho

No capítulo 3 foram mostrados diversos aspectos relativos a características de redes tanto naquilo que se refere as suas características físicas de transmissão quanto o seu impacto no sistema de controle e formas de avaliá-lo. A análise de desempenho da rede quando utilizada em sistema de controle tem papel importante por fornecer a base para identificação de problemas e também proposição de mudanças.

Existem duas situações distintas quanto à avaliação: uma consiste em avaliar um sistema que já está implantado e a outra consiste em prever os resultados de desempenho para um sistema ainda não implantado. A primeira situação é mais fácil de ser trabalhada, pois é possível obter dados reais do que acontece no sistema, já na segunda é necessário que sejam feitas simulações em computador ou testes em menor escala para auxiliar na obtenção dos resultados.

Para avaliar é necessário se utilizar índices e também informações do sistema que está sendo avaliado. Como primeiro passo, este trabalho propõe que as mensagens trocadas através da rede de comunicação sejam classificadas quanto a criticidade, tamanho da informação, requisitos temporais e processo de transmissão, conforme a Tabela 6 a seguir.

Quanto à(o):	Classificação
Grau de criticidade	Críticas
	Não Críticas
Tamanho da mensagem	Bit
	Palavra
	Grupo de Palavras
Requisito temporal	Atraso máximo
	Varição máxima do atraso
Processo de transmissão	<i>Polling</i>
	Cíclico
	<i>Strobe</i>
	Por eventos

Tabela 6 – Classificação das mensagens

Esta classificação permite estruturar a avaliação considerando qual é a situação atual do sistema a ser avaliado e quais são os pontos de maior relevância. Como exemplo imagine a situação onde em uma determinada rede estejam trafegando mensagens classificadas como críticas e não críticas com processo de transmissão do tipo *Polling*. No caso de existirem problemas resultantes de atrasos na troca de mensagens a primeira análise feita que identificou diferentes tipos de mensagens trafegando no mesmo meio pode ser a base para que sejam tomadas ações do tipo modificação do tempo de *Polling* das mensagens não críticas.

Além disso, para se comparar diferentes tipos de redes é necessário seguir a classificação da Tabela 6 porque nas situações onde se fazem escolhas é importante que se tenha conhecimento dessas características de modo a entender a causa básica das diferenças entre elas bem como na medida do possível efetuar as comparações em situações semelhantes.

O índice mais básico e talvez o mais importante para a avaliação do desempenho de rede em um sistema tipo NCS é aquele que identifica os atrasos provocados no envio de mensagens. O atraso total e individual, por exemplo, são valores importantes de serem obtidos e após obtê-los pode-se verificar o comportamento dos mesmos, por exemplo, se estes são constantes, limitados ou ilimitados. A seguir são apresentados diversos indicadores de desempenho e mais especificamente na Equação 6.1 é apresentada a fórmula proposta em [3,6,7] para o cálculo dos atrasos.

$$A_{total} = \sum_{i \in N_{nós}} \sum_{j=1}^{M^{(i)}} T_{atraso}^{(i,j)}$$

Equação 6.1 - Equação do tempo total de atraso

Onde $T_{atraso}^{(i,j)}$ é o tempo de atraso da comunicação entre Nó i e o Nó j , $M^{(i)}$ é o conjunto dos Nós com os quais o Nó i troca informações e $N_{nós}$ é o número de Nós do sistema.

Quando se faz a avaliação do impacto no sistema de controle, normalmente se estudam as malhas de controle específicas onde existem uma ou mais variáveis que são controladas e por isto o tempo de atraso parcial da troca de mensagem entre um Nó i e um Nó j deve ser avaliado para identificar se esta malha seria estável e com desempenho adequado (no caso de sistema a ser implantado). Para o caso de sistemas já em funcionamento esta avaliação permite identificar as condições da malha de controle de forma a subsidiar a análise de melhorias no sistema.

O índice da Equação 6.1, nos casos de redes com característica de transmissão determinística, possui um limite superior de tempo de atraso e o mesmo normalmente é constante (ex.: redes do tipo passagem de *token*). Já ao se analisar redes do tipo Ethernet o tempo de atraso pode apresentar característica aleatória podendo até haver descarte de pacotes. Estas diferenças são fatores que devem ser considerados no momento do projeto do sistema.

Paralelamente, o registro histórico do tempo de atraso é ferramenta auxiliar na detecção de problemas em dispositivos pertencentes ao sistema de controle tipo NCS como, por exemplo, dispositivos de campo, conversores, controladores lógicos programáveis e o próprio meio de transmissão.

É fato que o tempo de atraso na troca de mensagens sofre influência direta do tempo de bloqueio da transmissão e através das fórmulas mostradas anteriormente pode-se concluir que para a DeviceNet e ControlNet o tempo de atraso é limitado e para a Ethernet não é.

A utilização do meio de transmissão é também um índice de avaliação a ser considerado, visto que afeta diretamente o acesso ao meio no momento da transmissão da mensagem variando de acordo com o tipo de protocolo da rede em questão. Em [5,6,7] é proposta a seguinte fórmula, Equação 6.2, para avaliar a utilização do meio.

$$Util = \frac{\sum_{i \in N_{nós}} \sum_{j=1}^{M(i)} (T_{tx}^{(i,j)} + T_{retx}^{(i,j)})}{T \max}$$

Equação 6.2 - Equação de utilização do meio de transmissão

Onde $T_{tx}^{(i,j)}$ é o tempo de transmissão da mensagem do Nó i para o Nó j , $T_{retx}^{(i,j)}$ é o tempo de retransmissão da mensagem do Nó i para o Nó j , $N_{nós}$ é o número de Nós do sistema e $M(i)$ é o conjunto de Nós com os quais o Nó i troca mensagens.

Para redes determinísticas o índice utilização do meio não é muito crítico porque a utilização maior do meio mantendo reserva de parte do tempo para tarefas de manutenção da rede faz com que a transmissão continue sendo determinística entre os Nós pertencentes ao NCS. Um exemplo seria a rede do tipo *passagem de token* denominada de ControlNet.

Quando a rede possui protocolo baseado em algum tipo de prioridade e dentro de certas condições [8], os tempos de atraso podem apresentar limite superior. Nestes tipos de redes o

tempo de atraso é profundamente afetado pela utilização do meio uma vez que *Nós* de menor prioridade só poderão transmitir quando o meio estiver livre e em caso de transmissão simultânea poderão perder a resolução da colisão. Redes baseadas no protocolo CAN (ex. Devicenet) são um exemplo.

Já na Ethernet face ao seu método de acesso ao meio, a utilização do meio de transmissão influencia diretamente nos tempos de atraso e em certas situações pode haver perda de pacotes. Em [5,7] estudos indicam que a Ethernet apresenta desempenho inferior (atrasos maiores) comparados à Controlnet quando o índice *utilização do meio de transmissão* é elevado.

Estudos realizados por [17] revelam que existe um limite na taxa de pacotes descartados na qual o sistema ainda continua estável. Sendo assim, a taxa de descarte de pacotes no sistema deve ser considerada um índice de desempenho de rede e sua avaliação auxilia o estudo da estabilidade e confiabilidade do sistema. Segue, então, na Equação 6.3 abaixo, a fórmula de cálculo da taxa de descarte de pacotes.

$$Taxa_{Descarte} = 1 - \frac{\sum Pa\ cot\ es_{eff}}{\sum Pa\ cot\ es_{total}}$$

Equação 6.3 - Equação da taxa de descarte de pacotes

Onde o valor acima é avaliado dentro de um período de tempo, $Pa\ cot\ es_{eff}$ é o número de pacotes enviados e efetivamente recebidos e reconhecidos pelo destinatário e $Pa\ cot\ es_{total}$ é o número total de pacotes enviados. A situação ideal é aquela onde a taxa de descarte se aproxime de zero.

Para se quantificar a característica relacionada à fragmentação da transmissão de mensagens o índice *eficiência de codificação* do protocolo é um bom indicador, pois não adianta termos uma rede duas vezes mais rápida que outra se a sua eficiência de codificação é inferior que a metade daquela rede mais lenta. O tempo de transmissão será pior e a utilização do meio não será mais eficiente. Para avaliar este item em [1,2] é proposta a seguinte fórmula, Equação 6.4.

$$E_{codificação} = \frac{\sum TB_{efetivo}}{\sum TB_{total}}$$

Equação 6.4 - Equação de eficiência da codificação

Onde $TB_{efetivo}$ é o total de bits enviados que efetivamente representam informação e TB_{total} é o total de bits enviados. Deve ser calculado para vários tamanhos de mensagens.

Vale ressaltar que o índice *eficiência da codificação* não é uma característica fixa para uma determinada rede, porque varia com o tamanho da mensagem e com o protocolo da rede. A partir de valores calculados, pode-se optar pelo uso de rede mais eficiente mesmo que o seu custo seja maior devido ao fato de a mensagem não ser fragmentada e o tempo total de atraso inferior. Da mesma forma poderia ocorrer situação inversa onde a *overhead* na transmissão seria tão grande em virtude da utilização de uma rede com maior velocidade que a opção pela rede de menor velocidade também atenderia e com um custo inferior.

No tempo de atraso existe, conforme ilustrado na Figura 6, tempo relativo ao processamento da mensagem tanto no *Nó* de envio quanto no *Nó* de recebimento. Estes tempos são difíceis de serem avaliados tanto teoricamente quanto praticamente, mas são fundamentais nos momentos em que se deseja diminuir os tempos de atraso no sistema porque ao ignorá-los pode-se cometer o erro de atribuir os atrasos somente a rede sendo que o maior causador pode ser os dispositivos em questão. A fórmula de avaliação é mostrada a seguir, Equação 6.5.

$$Percentual_{processamento} = \frac{(TComp_{origem} + TComp_{destino})}{TTotal_{tx}}$$

Equação 6.5 - Equação da proporção de tempo de processamento

Onde $TComp_{origem}$ é o tempo gasto com processamento na origem, $TComp_{destino}$ é o tempo de processamento no *Nó* destino e $TTotal_{tx}$ é o tempo total da gasto na transmissão entre os dois *Nós*.

Em resultados experimentais realizados em [5,7] para dispositivos comunicando em DeviceNet encontraram-se valores de tempo de processamento de 150 microssegundos até 10 ms dependendo do dispositivo. Isto confirma que o tempo de processamento pode ser relevante.

Pelas fórmulas mostradas anteriormente, Equações 6.1 a 6.5, verifica-se que índices relacionados ao tráfego e o protocolo são essenciais no sistema NCS.

Visando identificar um índice que representasse não só a utilização do meio, mas também incluísse informações sobre a forma como a transmissão está sendo efetuada, é proposta neste trabalho a fórmula da Equação 6.6 a seguir.

Denominando pacote o que é enviado por um *Nó i* qualquer e subpacote como as informações destinadas a um *Nó* qualquer. Segue:

$N^{(i)}$ - número de pacotes enviados pelo *Nó i*.

$N_{sub}^{(i,j)}$ - número de subpacotes (informações) enviadas pelo *Nó i* destinadas ao *Nó j*, considerando otimizada a organização das informações.

$N^{nós}$ - número de *Nós* do sistema.

$$Eficácia_{Transmissão} = \frac{\sum_{i=0}^{N^{nós}} \sum_{j=0}^{N^{nós}} N_{sub}^{(i,j)}}{\sum_{i=0}^{N^{nós}} N^{(i)}}$$

Equação 6.6 - Equação da eficácia da rede

No momento em que, para determinada rede, a função da Equação 6.6 apresenta o seu valor máximo indica que a rede estaria sendo utilizada de forma maximizada, ou seja, atendendo a todas as necessidades de troca de informação com o menor número de pacotes. Outro fato a ser considerado é que a Equação 6.6 também é influenciada pelo tamanho limite de pacote da rede, forma de transmissão adotada (ex.: *Polling*, *Strobe* e etc.) e pelo protocolo de comunicação utilizado na camada de aplicação.

Finalmente, a partir dos valores obtidos pelas equações 6.1 a 6.6 torna-se possível analisar e verificar se determinada rede é adequada ou não a um sistema de controle digital e também identificar se a mesma está sendo utilizada dentro de sua melhor capacidade. Índices como atrasos, ocupação da rede, e eficácia, são bons indicadores do comportamento da rede e no momento em que se descobre a origem de eventuais desvios em cada um dos itens de avaliação, pode-se buscar otimizar o sistema e até mesmo identificar possíveis causas de erros elevados e instabilidade no sistema de controle. Os índices Atraso, Utilização, Número de Colisões, Pacotes Recebidos/s e Eficácia são os utilizados nas análises.

Toda avaliação não deve ser feita analisando os resultados das fórmulas isoladamente e sim observando o conjunto meio-físico, equipamento e sistema.

7 Simulação e Resultados

Para o projeto de sistemas tipo NCS [3, 4,5,6,7,8,14,17], é importante que seja conhecido o comportamento do sistema de controle, os seus requisitos de amostragem e tempo de resposta e os equipamentos que farão parte do controle de sistema.

Perguntas como: Qual o atraso resultante pelo uso da rede? Qual a melhor forma de se fazer a troca de informações? Qual arquitetura utilizar? Qual taxa de troca de informações em um *Nó*? São perguntas cujas respostas são a base para o planejamento do sistema.

Neste capítulo é feita uma introdução sobre o processo de simulação e a seguir são apresentados resultados de simulações feitas com a rede Ethernet, ControlNet e CAN considerando as características apresentadas no Capítulo 6 dessa dissertação. Os resultados das simulações mostrados neste capítulo estão dentro do intervalo de confiança de 80% conforme obtido do software OPNET.

7.1 Modelo de Simulação Rede Ethernet

A simulação é feita com o software OPNET cuja base de simulação são as *Finite State Machines* (FSM). Neste software já estão disponíveis formatos de pacotes padrão, mas caso necessário podem ser criados pacotes específicos, conforme o protocolo de comunicação exige. Camadas seguindo a filosofia do modelo OSI também estão disponíveis e podem ser criadas também.

Com o intuito de permitir esta simulação, foram adaptados os modelos de estações Ethernet existentes no software de forma que elementos do tipo *Mestre* e *Escravo* de processos de comunicação tipo *Polling* e *Strobe* pudessem ser utilizados. Existe nas simulações o modelo *aleatório* que consiste em uma estação cujo destinatário do pacote por ela transmitido é um *Nó* aleatório dentre os endereços de *Nós* existentes.

O software também permite a utilização de diferentes meios de transmissão bem como de diferentes taxas de transmissão. Estatísticas (ex.: utilização, flags de envio, colisões e etc.) são disponibilizadas e à medida que for necessário também podem ser criadas.

A simulação aqui desenvolvida considera como rede básica a Ethernet 10Mbps e o tamanho de pacote utilizado nas trocas de dados de 1500 bytes.

7.1.1 Modelo de geração de pacotes

Para a geração de pacotes nos *Nós* que não são escravos foi utilizada a FSM conforme abaixo.

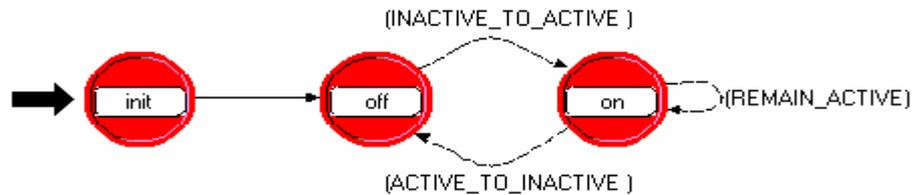


Figura 22 - Bursty Source FSM

A permanência no estado OFF está configurada com a propriedade de obedecer a uma distribuição uniforme no intervalo 0,1 a 0,2 segundos, já a permanência no estado ON (estado onde determinado dispositivo produz pacotes de acordo com uma dada taxa) está configurada para obedecer a uma distribuição uniforme no intervalo 0,2 a 1 segundo.

A diferença entre os diversos cenários de simulação apresentados nas seções seguintes está na geração de pacotes no estado ON, sendo que esta obedece a uma distribuição exponencial com a média 500ms, 50ms e 5ms.

Para os caso de *Nós* escravos, ou seja, nos modos de transmissão *Strobe* e *Polling*, existe um mestre que faz a requisição e o mesmo deverá ser atendido, o modelo de FSM é conforme ilustrado na Figura 23.

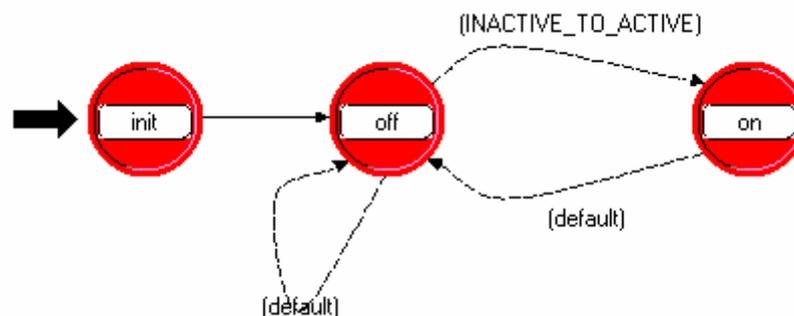


Figura 23 - FSM do gerador de pacote dos *Nós* escravos

A diferença entre o modelo da Figura 23 e o modelo da Figura 22, é que ocorre a geração de apenas um pacote quando no estado ON e a transição do estado OFF para ON ocorre somente quando o *Nó* em questão recebe um pacote de informação que tenha como destino o endereço do mesmo. Assim, conforme a FSM da Figura 23 o *Nó* identifica quem está solicitando a informação para ele e logo em seguida envia pacote para o endereço origem do *Nó* requisitante.

7.1.2 Modelo de um *Nó* de rede

Cada *Nó* é composto de vários processos interconectados entre si através de *links* reais ou *links* estatísticos. A Figura 24 a seguir mostra o modelo genérico de um *Nó*.

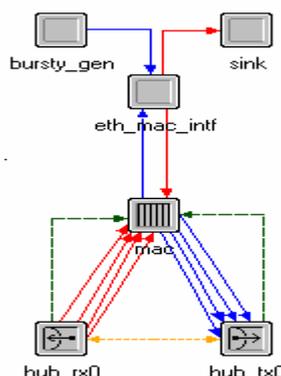


Figura 24 - Modelo genérico de um *Nó*

Do modelo descrito se pode fazer as variantes necessárias para atender as simulações, bastando alterar parâmetros de cada processo e até mesmo alterando alguns dos processos do modelo. Para a realização dessa simulação foram adaptados Processos e *Nós*.

7.1.3 Arquitetura de rede

As simulações foram executadas considerando arquitetura semelhante à mostrada na Figura 25 (vários *Nós* conectados através de um *switch*). As arquiteturas diferentes utilizadas são aquelas cujo meio de transmissão é coaxial e meio UTP com HUB.

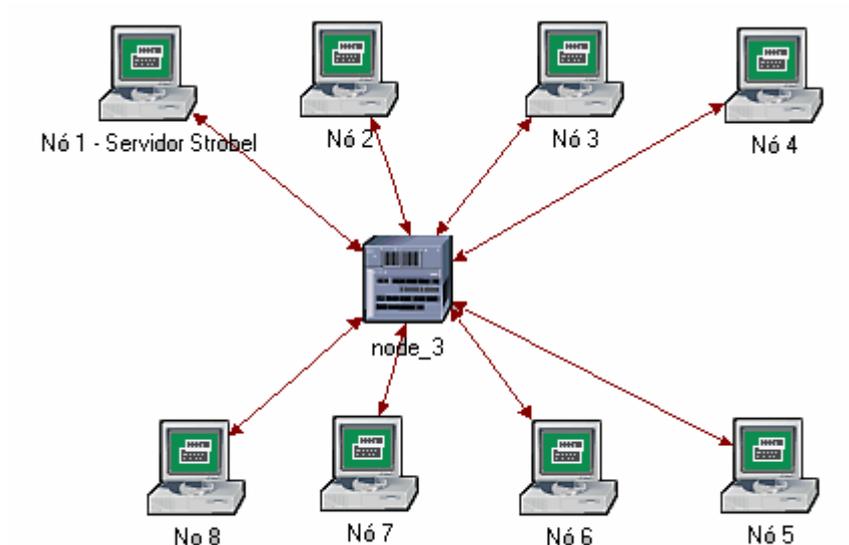


Figura 25 - Arquitetura básica rede

Inúmeras variações quanto ao número de equipamentos e divisões de rede podem ser feitas no simulador bastando incluir os *Nós* e demais equipamentos, mas restringimos a arquiteturas simples as quais permitem análises mais objetivas.

7.1.4 Análise dos resultados

Considerando que foram executadas simulações nas quais houve variação do modo de transmissão das mensagens, variação do tempo de geração de pacotes e variação do meio físico de transmissão, faz-se necessário determinar forma de análise padrão para os diversos gráficos obtidos. Dentre os gráficos são evidenciados aqueles que mostram resultados mais relevantes.

A tabela seguinte mostra as condições simuladas para o caso Ethernet.

Meio Físico de Transmissão	Forma de Transmissão	Taxa de Geração de pacotes
Coaxial	Polling	500 ms
	Aleatória	50 ms
	Strobe	5ms
UTP com HUB	Polling	500 ms
	Aleatória	50 ms
	Strobe	5ms
UTP com Switch	Polling	500 ms
	Aleatória	50 ms
	Strobe	5ms

Tabela 7 – Condições executadas nas simulações com Ethernet

7.1.4.1 Análise do Índice *Utilização*

O gráfico do Índice de Utilização em virtude da natureza da variável deve ser analisado pelo seu valor médio ao longo do tempo e também pelo seu valor máximo. Quando o comportamento da variável é, de certa forma, estável (não há tendências crescentes ou decrescentes), a rede pode ser considerada como tendo a capacidade de transmissão dentro de seus limites.

O objetivo nas simulações foi identificar o limite máximo aceitável para tal variável, ou seja, o momento em que ocorre exceção da regra de comportamento estável e pelas simulações executadas o resultado para o limite máximo a ser atingido pela variável é de 40 %. A partir deste valor os demais índices de análise de desempenho da rede não apresentam valores aceitáveis.

Outro fator identificado nos gráficos do índice Utilização é que o modo de transmissão afeta diretamente o desempenho. Nos casos onde a transmissão está organizada (modo *Polling*), o índice Utilização e os demais coletados apresentam valores adequados. Na Tabela 8 a seguir estão os principais resultados da análise dos gráficos das Figuras 26, 27, 28, 38, 39, 40, 50, 51 e 52.

Meio	Tendência	Média	Conclusão
Coaxial	Estável para 500 ms	< 4 %	Aceitável todos os modos de transmissão
	Estável para 50 ms	< 20 %	Aceitável todos os modos de transmissão
	Estável para 5 ms	< 40 % p/ <i>Polling</i> > 90 % demais	Aceitável somente para modo <i>Polling</i> .
UTP com HUB	Estável para 500 ms	< 5 %	Aceitável todos os modos de transmissão
	Estável para 50 ms	< 20%	Aceitável todos os modos de transmissão
	Estável para 5 ms	<40 % p/ <i>Polling</i> > 90 % demais	Aceitável somente para modo <i>Polling</i> .
UTP com Switch	Estável para 500 ms	< 0,005 %	Aceitável todos os modos de transmissão
	Estável para 50 ms	< 0,05 %	Aceitável todos os modos de transmissão
	Estável para 5ms	< 0,5%	Aceitável todos os modos de transmissão

Tabela 8 - Resumo dos resultados do índice Utilização para simulação Ethernet

Os resultados mostrados na Tabela 8 indicam que ao se promover a organização da troca de informações é possível liberar capacidade da rede que está sendo utilizada e, indiretamente, melhorando outros índices como o índice *atraso* o qual será explorado a seguir. Em sistemas de controle industriais é comum que haja vários CLP's trocando dados entre si, com a IHM e ao se identificar situação semelhante à desta simulação pode-se optar por otimizar as trocas de informações utilizando o modo *Polling* nos casos onde sejam aplicáveis. É importante ressaltar que este índice possui comportamento mediano estável, ou seja, o mesmo não apresenta variações acima daquelas registradas historicamente sem que seja consequência da inclusão de *Nós* ou alteração nas trocas de dados. Salvo as situações anteriores, a alteração do índice utilização é indicativo de algum problema no meio de transmissão ou nos dispositivos nele conectados.

7.1.4.2 Análise do Índice *Atraso*

A taxa de geração de pacotes impacta para o sistema NCS diretamente no índice *Utilização* e conseqüentemente afeta o comportamento do atraso da troca de mensagens entre os *Nós*. Buscando avaliar esta relação foram efetuadas simulações cujos resultados estão nas Figuras 29, 30, 31, 41, 42, 43, 53, 54 e 55 as quais representam o comportamento do índice *Atraso* compreendendo o atraso total do pacote recebido no *Nó* 4 para os três processos de transmissão (*Polling*, *Strobe* e *aleatório*).

Pela análise dos gráficos pode-se observar que quando o sistema está pré-configurado para a geração de pacotes em 500ms e 50ms o índice *Atraso* apresenta tendência estável e com valores não superiores a 1,3 ms para gerações citadas anteriormente. O valor encontrado é compatível com o tempo de transmissão em rede Ethernet de 10 Mbps de um pacote de 1500 bytes (aprox. $1500 \times 8 \times 10^{-7}$, não considerando o *header* do pacote), isto leva a conclusão que neste caso o meio de transmissão com utilização baixa (fato confirmado pelas Figuras 29, 30, 31, 41, 42, 43, 53, 54 e 55) faz com que os atrasos que poderiam acontecer resultantes da espera para a retransmissão possam ser desprezíveis quando comparados ao total de tempo de transmissão.

Ao se analisar os gráficos para a geração de pacotes em 5ms, percebe-se que tanto o modo *Strobe* quanto o *Aleatório* apresentam o índice *Atraso* totalmente crescente, indicando a impossibilidade do uso desta rede para troca de informações quando se utiliza Meio Coaxial ou HUB. Este fato é resultante do índice *Utilização* do meio elevado que ocasiona excessiva quantidade de colisões (fato este mostrado nos próximos gráficos) e retransmissões. Neste caso o sistema de controle estará sendo afetado e ações como segmentação do meio e redução do índice *Utilização* serão necessárias para re-estabelecer o sistema para a condição normal. Um exemplo onde tal situação poderia acontecer é o caso onde um determinado dispositivo do sistema NCS apresentasse problema e enviasse continuamente, sem controle, pacotes de informação.

Entretanto, no modo de transmissão tipo *Polling* o índice *Atraso* alcança no máximo 1,9 ms, conseqüência da menor quantidade de mensagens sendo trocadas entre os *Nós* da rede e organização da troca de dados. É possível, portanto, concluir que ao se ter o índice *Utilização* em patamares mais baixos a transmissão com taxas de geração de pacotes em 5ms é possível. O limite sugerido na literatura [13] para o índice *Utilização* é de 35%.

7.1.4.3 Análise do índice *Número de Colisões*

Devido à característica do protocolo de acesso ao meio da rede Ethernet é fato que nos casos de redes de equipamentos há a probabilidade de haver detecção de colisões e conseqüentemente necessidade de retransmissão de pacotes. O número de colisões, conforme confirmado a seguir, está relacionado ao índice Utilização.

Pela análise dos gráficos a seguir mostrados nas Figuras 32, 33, 34, 44, 45 e 46 pode-se observar que quando o sistema está pré-configurado para a geração de pacotes em 500ms e 50ms o índice *Número de Colisões* (estatística relativa ao *Nó 4*) apresenta valores tendência estável e com valores não superiores a 15 (não estão incluídas as Figuras relativas à simulação com Switch porque não há ocorrência de colisões). Os valores encontrados são compatíveis com a realidade encontrada nas simulações anteriores, pois os índices *Atraso* e *Utilização* também mostram que a rede não estaria com sua capacidade comprometida e, por conseqüência, causando o menor distúrbio possível no sistema em que ela estivesse inserida. Pelos gráficos pode-se também verificar que o modo de transmissão *Strobe* é o que apresenta maior número de colisões. Tal fato é explicável porque neste modo são feitas requisições onde todos os *Nós* deverão responder ao mesmo tempo.

Ao se analisar os gráficos para a geração de pacotes em 5ms, percebe-se que tanto o modo *Strobe* quanto o *aleatório* apresentam o índice *Número de Colisões* com valores duas a três vezes superiores àqueles encontrados nas simulações com taxas inferiores. O reflexo das colisões está exemplificado nos valores de atraso encontrados nas Figura 29, 30, 31, 41, 42 e 43.

Apenas no caso em que o modo de transmissão é do tipo *Polling* com a geração de pacotes em 5ms o índice *Número de Colisões* apresenta valores aceitáveis para os meios de Transmissão Coaxial e UTP-HUB. Este fato também é confirmado pelos índices de atraso e utilização anteriores.

Para sistemas industriais a avaliação do índice *Número de Colisões* é de grande valia porque fornece rapidamente um diagnóstico da capacidade utilizada da rede principalmente ao se considerar que este índice, ao contrário do índice *Atraso*, é mais fácil de ser medido. Torna-se, portanto, evidente que existe um compromisso para a transmissão de forma que ao se optar por ausência de regra para a transmissão tipo *aleatório* ou tipo *Strobe* existe o benefício de ser mais fácil a programação, porém quando há necessidade de elevada taxa de atualização os mesmos apresentam desempenho inferior ao modo *Polling*.

7.1.4.4 Análise do Índice *Pacotes/s*

Os índices discutidos nas seções 7.1.4.1, 7.1.4.2 e 7.1.4.3 estão diretamente relacionados à rede propriamente dita, mas também é importante que seja avaliado o impacto nos *Nós* pertencentes à rede de controle. O índice *Pacotes/s* de um determinado *Nó* (neste caso *Nó 4*) é uma alternativa para a necessidade acima e como mostrado a seguir é complemento para as análises acima feitas.

Quando se trabalha com o processo de transmissão tipo *Strobe*, por característica da comunicação o valor do índice *Pacotes/s* é em média mais elevado do que para os modos *Polling* e *aleatório* (ver Figuras 35, 36, 37, 47, 48, 49, 56, 57, 58). Assim, no modo *Strobe* é exigido no equipamento que está recebendo os pacotes uma capacidade de processamento maior do que para os outros modos. Este fator aliado à taxa de transmissão desejada é relevante porque no momento da escolha de um dispositivo este fato deve ser considerado para especificar a capacidade de processamento do mesmo.

Ao se comparar os gráficos é possível notar que o modo *Polling* apresenta o menor índice *Pacotes/s* para o *Nó 4* o que vem ao encontro dos resultados alcançados nos índices *Utilização* e *Atraso*, ou seja, menor quantidade de pacotes trafegando e conseqüentemente menor utilização do meio.

Geralmente, no momento em que se especifica equipamentos existe preocupação sobre a velocidade de comunicação dos mesmos, mas normalmente não é considerada a capacidade do *Nó* na forma do índice *Pacotes/s* o que para os casos de sistemas com elevado número de requisições poderá acontecer que certa parte das mesmas não sejam atendidas e estas requisições apenas contribuem para degradação do desempenho geral do sistema de controle.

7.1.4.5 Avaliação da Eficácia

Conforme a Equação 6.6, a partir do momento em que se conhece as necessidades de troca de informações entre *Nós* da rede pode-se avaliar a eficácia do processo de transmissão. A tabela 9 a seguir mostra o resultado do índice Eficácia.

Processo de transmissão	índice	Conclusão
Polling	Considerando o <i>Nó</i> como o <i>Nó</i> de referência para o cálculo têm-se: $\frac{n^{\circ} \text{informações}}{n^{\circ} \text{totalMensagens}} = \frac{1}{1+1} = 0,5$	A eficácia da transmissão quando comparada ao modo <i>Strobe</i> é menor, mas a rede de um modo geral apresenta melhor desempenho.
Strobe	$\frac{n^{\circ} \text{informações}}{n^{\circ} \text{totalMensagens}} = \frac{n^{\circ} \text{nós}}{n^{\circ} \text{nós} + 1} \cong 1$	A eficácia da transmissão quando comparada ao modo <i>Polling</i> é superior, mas deve ser analisado o seu uso baseado nos esclarecimentos efetuados em 7.1.2 a 7.1.4.

Tabela 9 - Resumo do índice Eficácia

Assim, o índice Eficácia pode ser considerado apenas naquelas situações onde os limites da rede não estão superados. Situações onde vários *Nós* necessitam comunicar entre si não foram simuladas neste trabalho e estas certamente levariam a índices de Eficácia diferentes dos aqui encontrados.

7.1.5 Cenário 1 – Resultados das simulações com meio coaxial

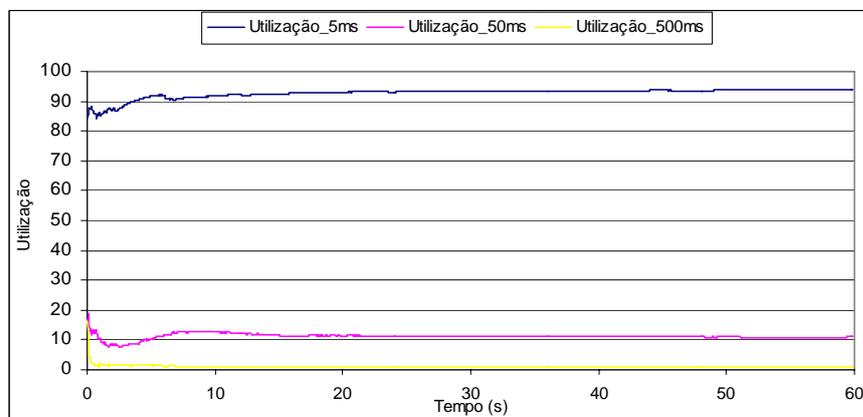


Figura 26 - Utilização com processo transmissão *Strobe*

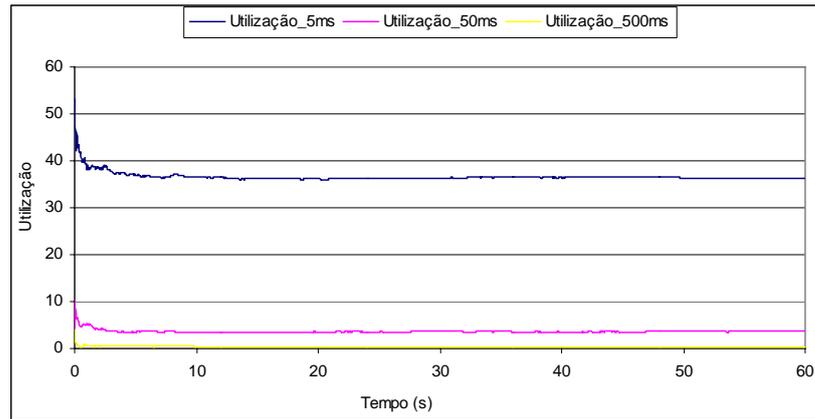


Figura 27 - Utilização com processo de transmissão *Polling*

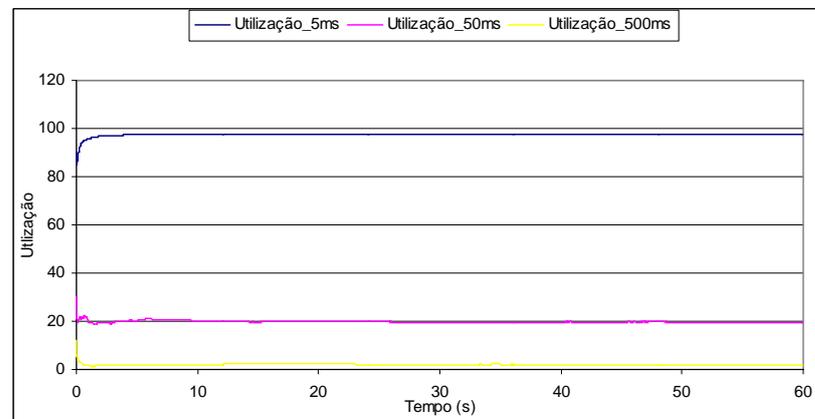


Figura 28 - Utilização com processo transmissão aleatório

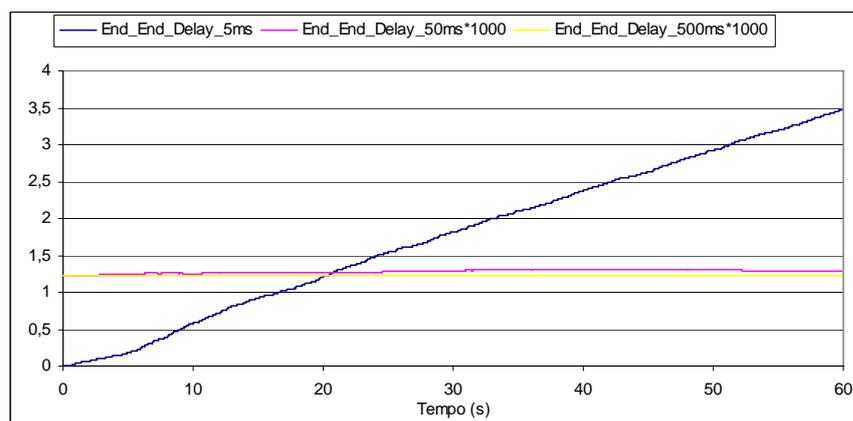


Figura 29 - Atraso processo transmissão *Strobe*

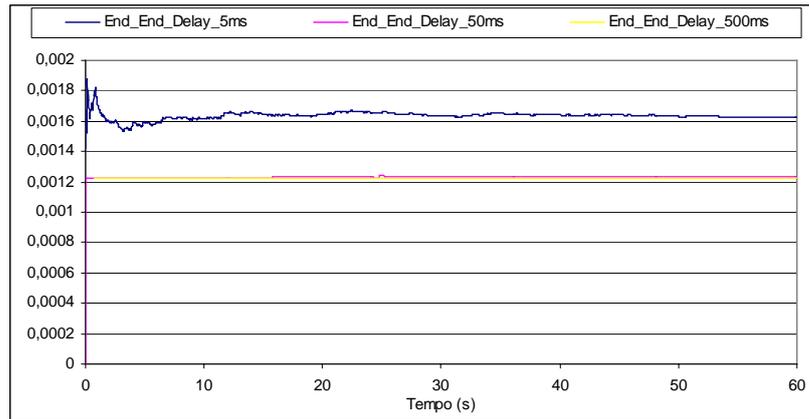


Figura 30 - Atraso processo transmissão *Polling*

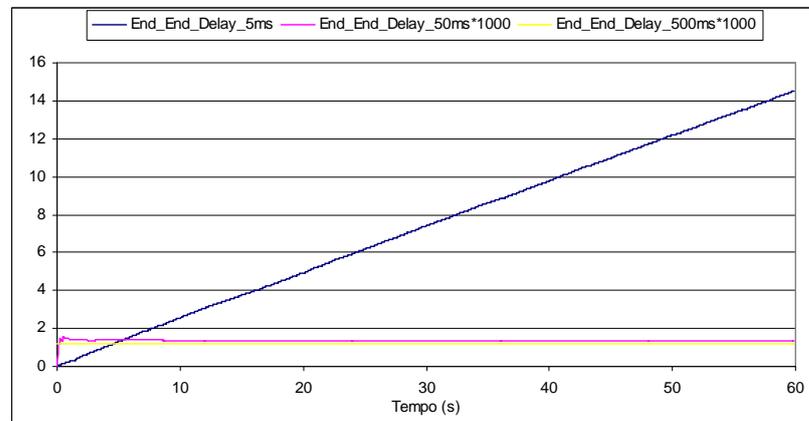


Figura 31 - Atraso processo de transmissão aleatório

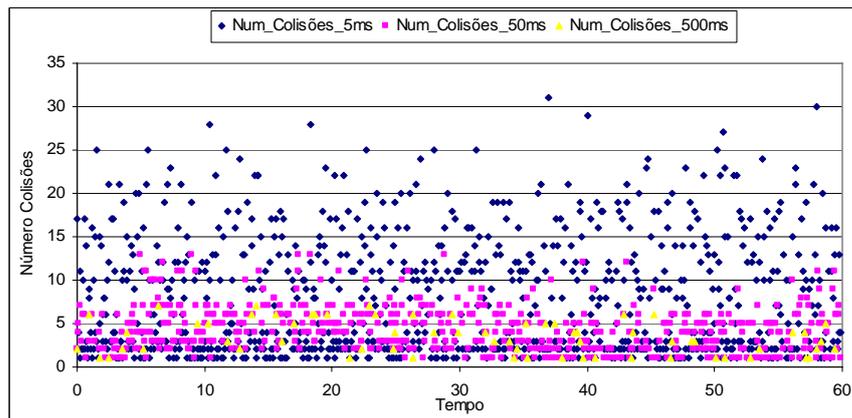


Figura 32 - Núm. Colisões processo transmissão *Strobe*

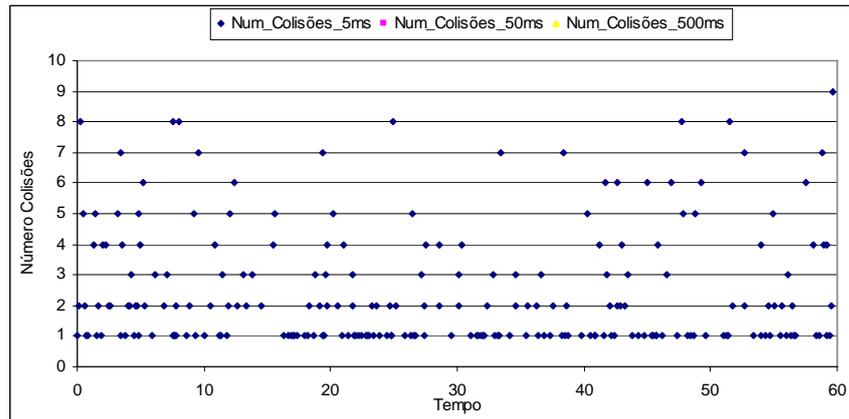


Figura 33 - Núm. colisões processo transmissão *Polling*

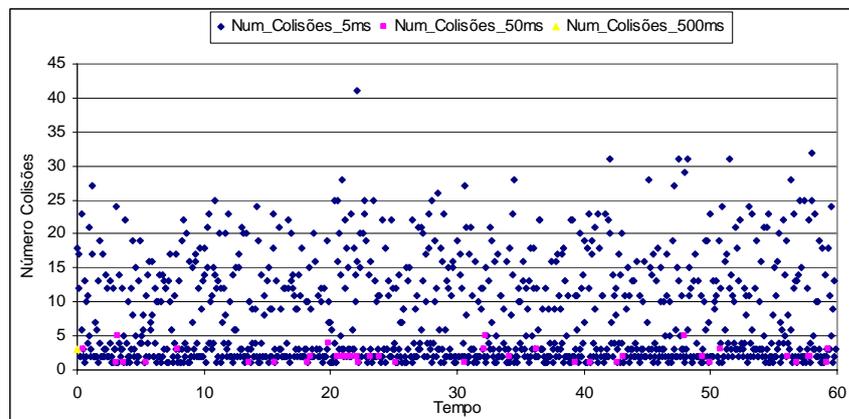


Figura 34 - Núm. colisões processo de transmissão aleatório

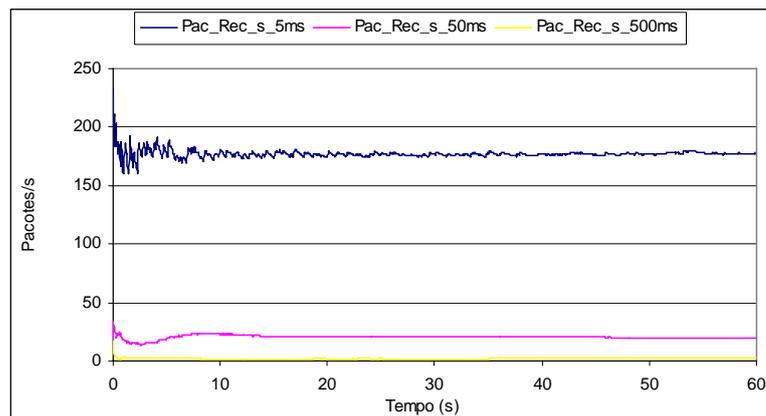


Figura 35 - Pacotes recebidos *Nó 4* processo transmissão *Strobe*

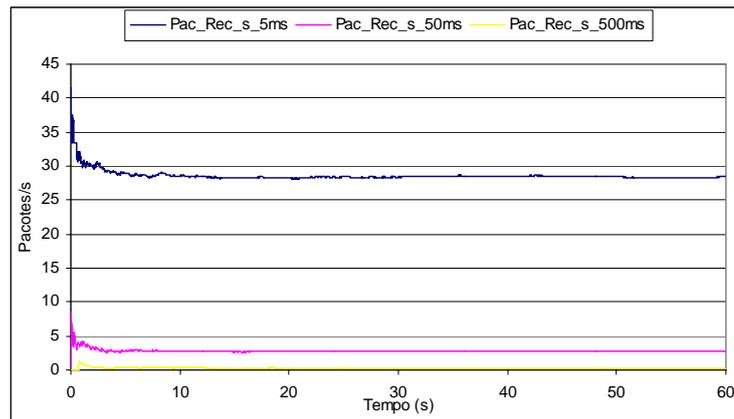


Figura 36 - Pacotes recebidos *Nó 4* processo transmissão *Polling*

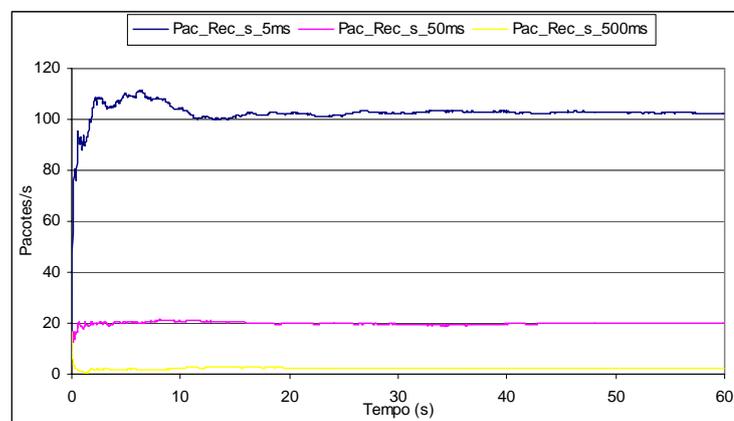


Figura 37 - Pacotes recebidos *Nó 4* processo transmissão aleatório

7.1.6 Cenário 2 – Resultados das simulações com meio UTP e HUB

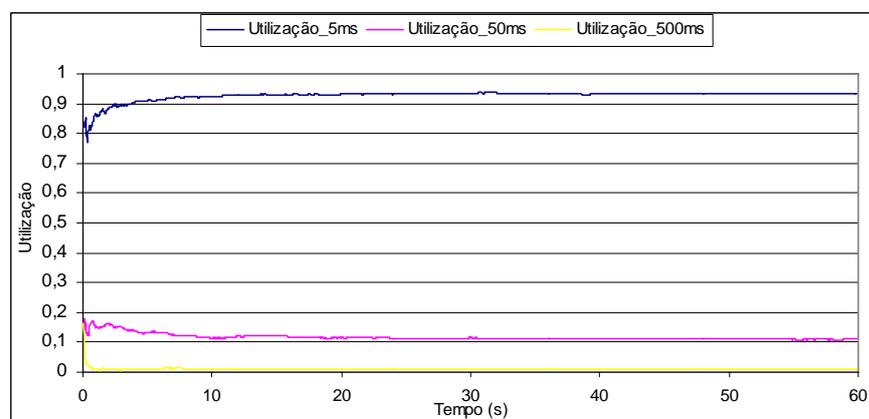


Figura 38 - Utilização processo transmissão *Strobe*

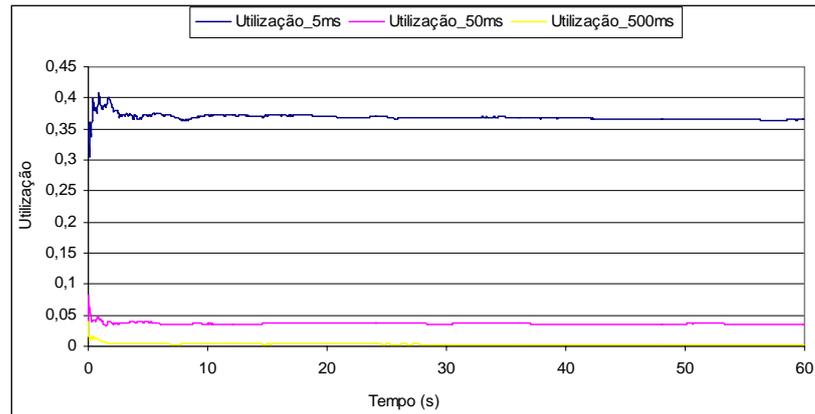


Figura 39 - Utilização processo transmissão *Polling*

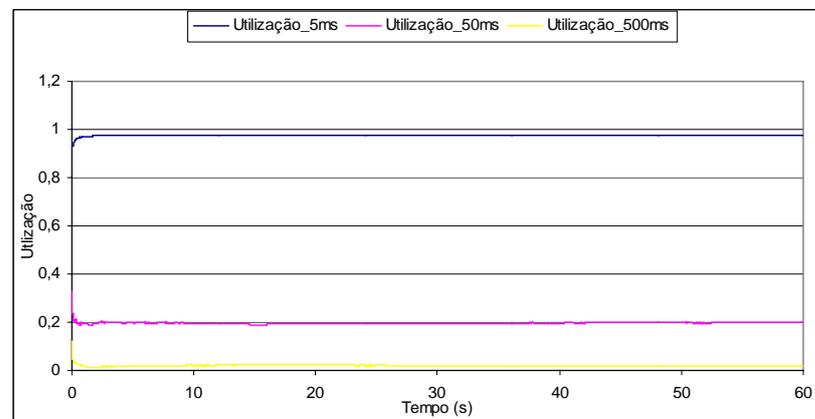


Figura 40 - Utilização processo transmissão aleatório

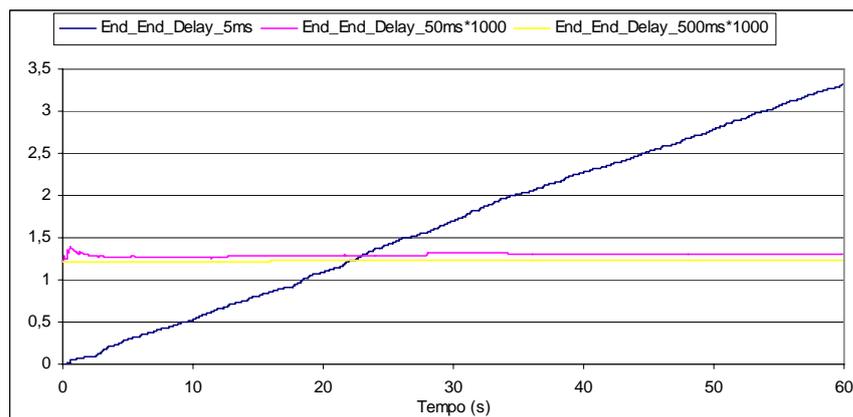


Figura 41 - Atraso processo de transmissão *Strobe*

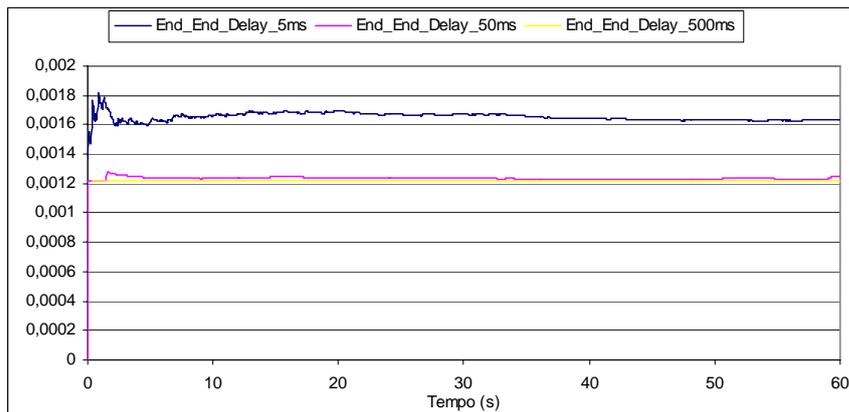


Figura 42 - Atraso processo de transmissão *Polling*

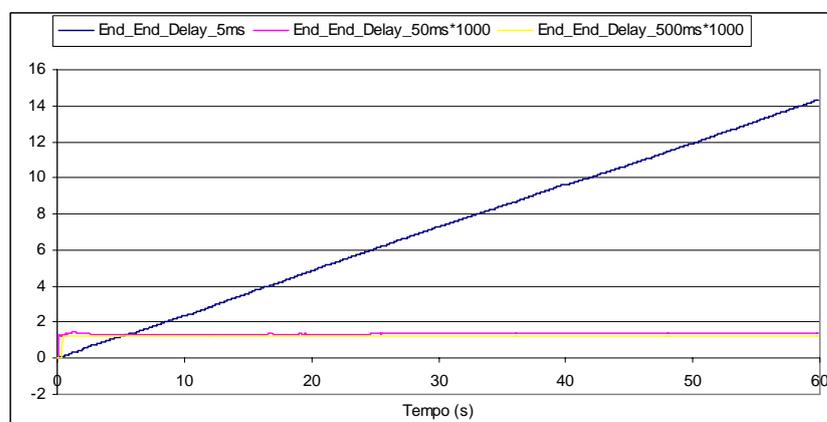


Figura 43 - Atraso processo de transmissão aleatório

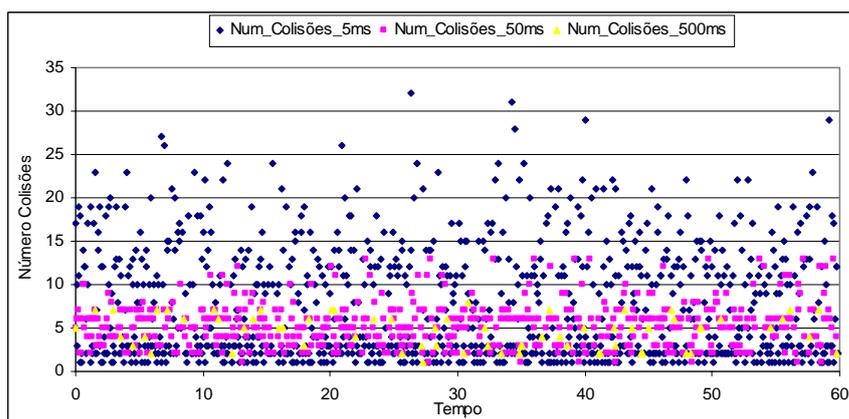


Figura 44 - Número colisões processo transmissão *Strobe*

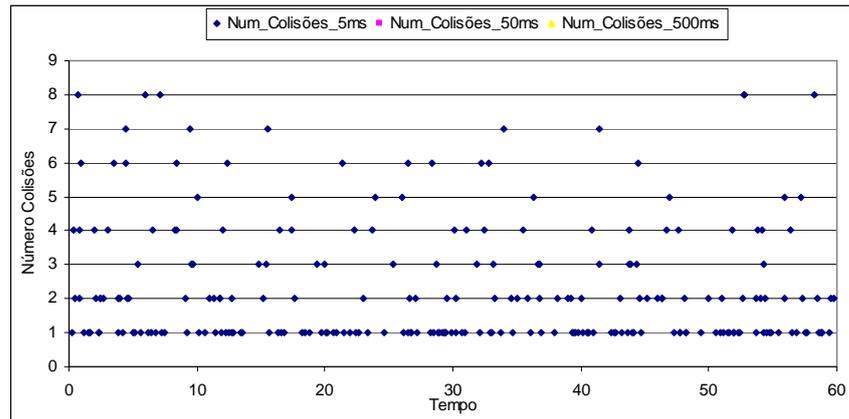


Figura 45 - Número colisões processo transmissão *Polling*

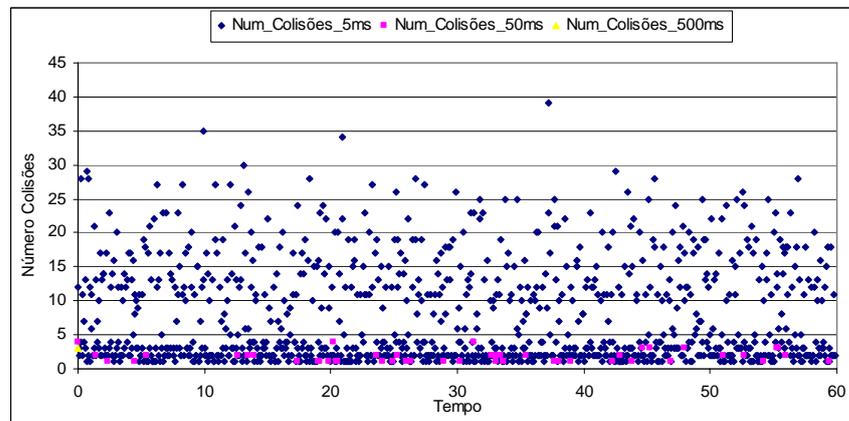


Figura 46 - Número colisões processo transmissão aleatório

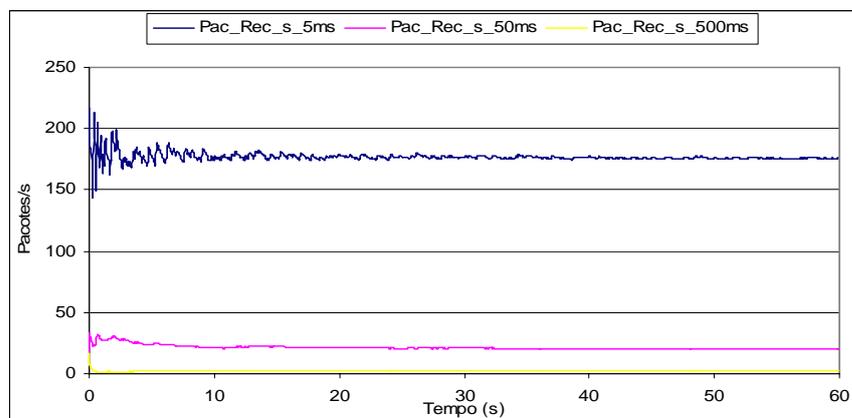


Figura 47 - Pacotes recebidos *Nó 4* processo transmissão *Strobe*

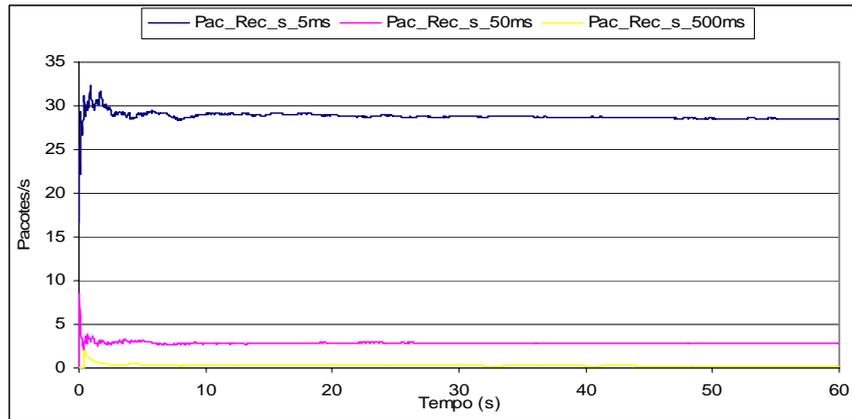


Figura 48 - Pacotes recebidos *Nó 4* processo transmissão *Polling*

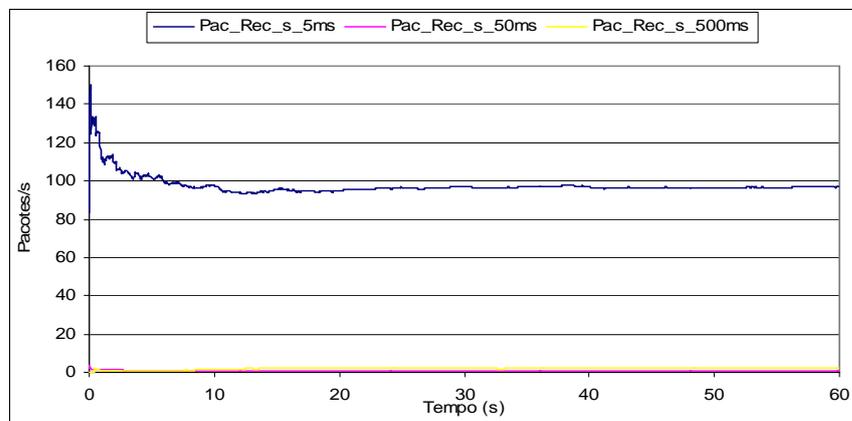


Figura 49 - Pacotes recebidos *Nó 4* processo transmissão aleatório

7.1.7 Cenário 3 – Resultados das simulações com meio UTP e Switch

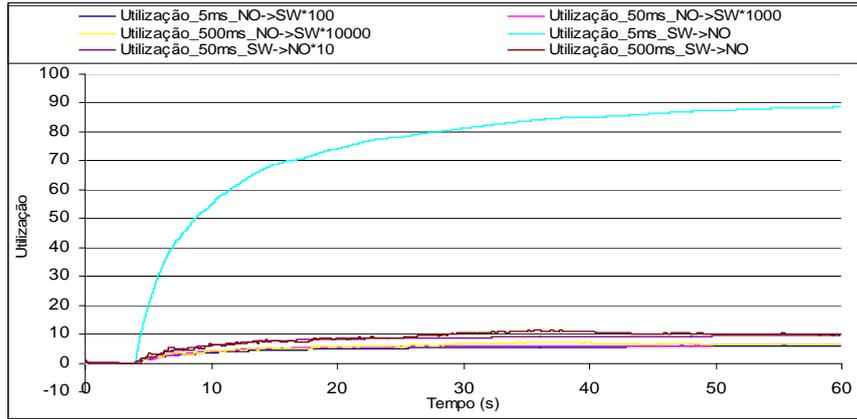


Figura 50 - Utilização processo transmissão *Strobe*

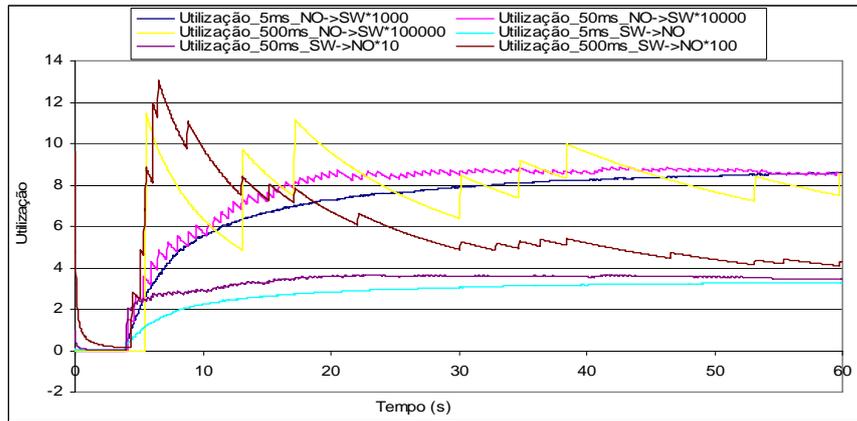


Figura 51 - Utilização processo transmissão *Polling*

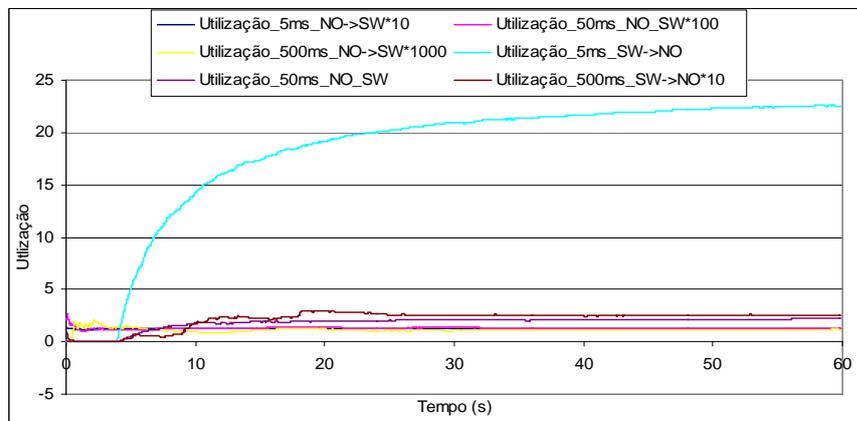


Figura 52 - Utilização processo transmissão aleatório

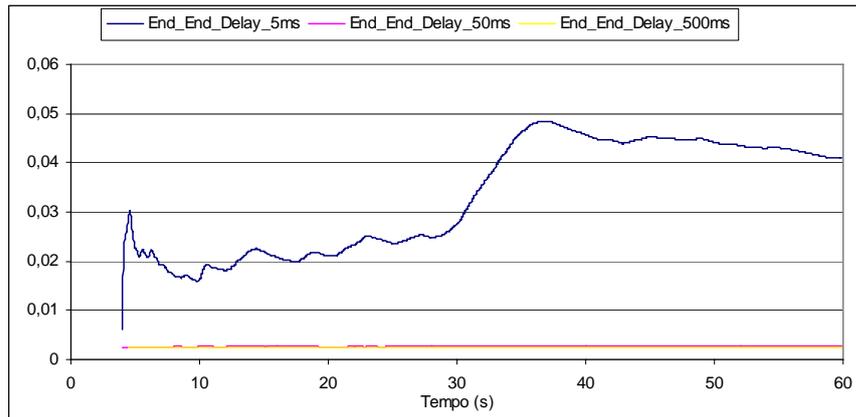


Figura 53 - Atraso processo transmissão *Strobe*

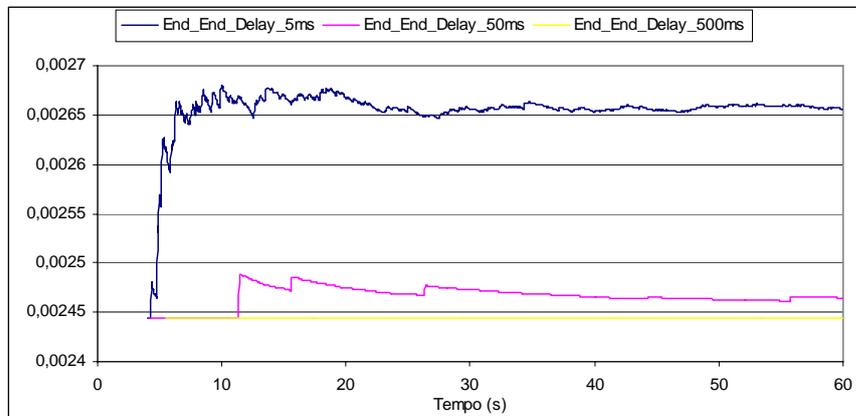


Figura 54 - Atraso processo de transmissão *Polling*

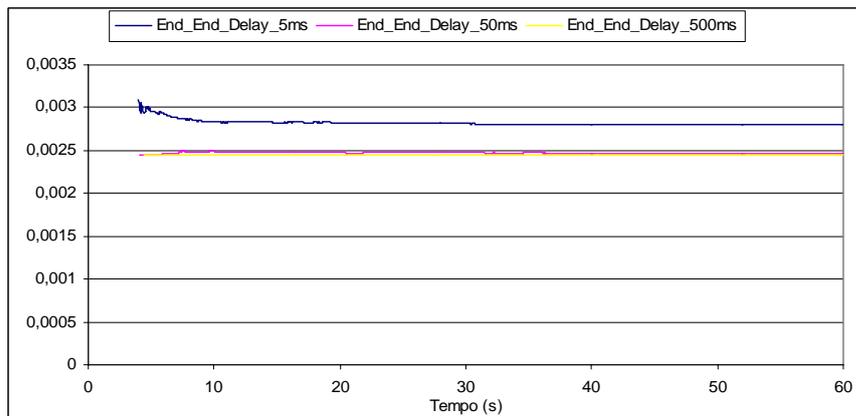


Figura 55 - Atraso processo de transmissão aleatório

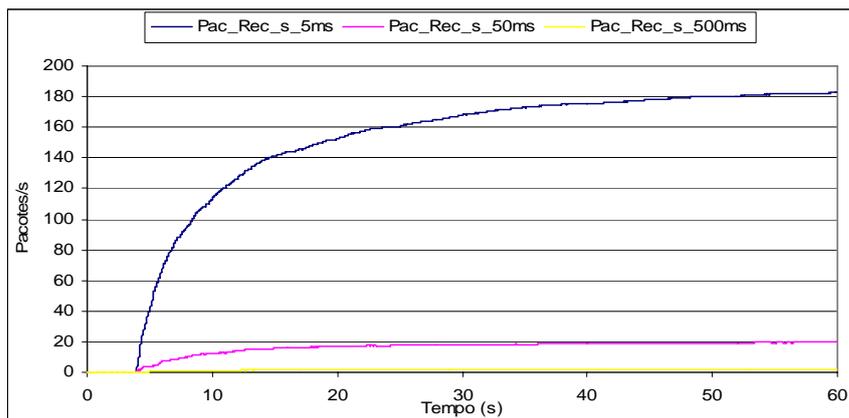


Figura 56 - Pacotes recebidos Nó 4 processo transmissão *Strobe*

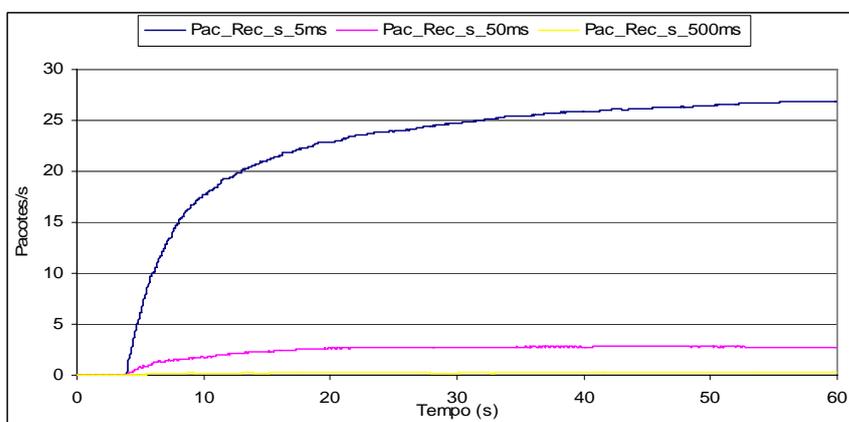


Figura 57 - Pacotes recebidos Nó 4 processo transmissão *Polling*

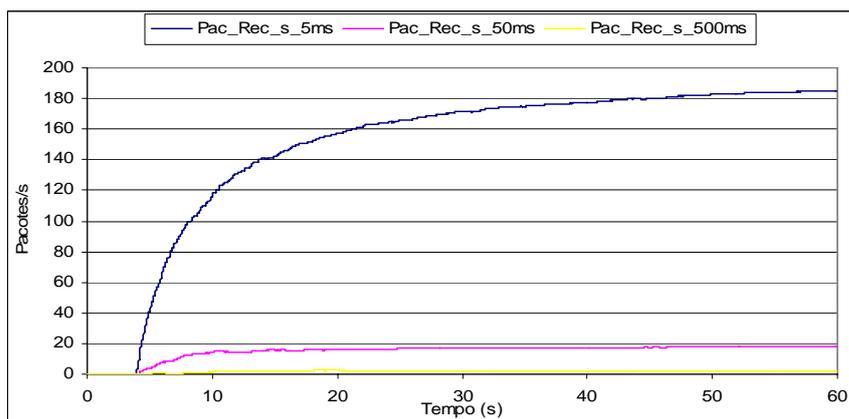


Figura 58 - Comparativo entre os cenários de simulação Ethernet

Pela análise dos cenários as diferenças encontradas são basicamente em função dos equipamentos existentes para a transmissão e conclui-se que o meio coaxial se equivale ao

meio UTP quando se utiliza um HUB, dado que os índices são semelhantes. Assim, no momento de análise de instalações já existentes, com o intuito de efetuar melhorias ou identificar fonte de problemas para o sistema, é fácil entender que o Atraso e Utilização do meio são características marcantes e que tem conseqüências diretas para o sistema de controle [1,2,3,4,5,6]. Estes índices estão com suas características bem representadas pelas simulações das Seções 5.1.4, 5.1.5 e 5.1.6. No cenário com switch (Seção 5.1.6), são perceptíveis os ganhos para o sistema tanto quanto para o índice *Utilização*, quanto para o índice *Atraso*, os valores de utilização tornam-se bastante reduzidos e os valores de atraso tornam-se admissíveis para as taxas de 5ms independente do processo de transmissão.

A Rede Ethernet mostra que pode apresentar bom desempenho desde que seja otimizado o processo de comunicação bem como escolhidas faixas apropriadas de geração/requisição de informações de dispositivos no sistema.

A simulação, por considerar pacotes de 1500 bytes, atende a boa parte das aplicações encontradas e é possível extrapolar com boa representatividade os resultados para tamanhos de pacote maiores bastando efetuar proporções.

7.2 Modelo de Simulação Rede CONTROLNET

Outra rede comumente utilizada em Sistemas de Controle Digital é a rede ControlNet. A simulação é efetuada de forma semelhante à descrita na Seção 7.1, tendo as diferenças a seguir:

- a) Rede Básica do tipo Controlnet
- b) Velocidade de transmissão 5.000kbps.
- c) Tamanho de pacote de 500 bytes.

Com o intuito de permitir esta simulação, foram adaptados e criados os modelos de estações Controlnet de forma que elementos do tipo *Mestre* e *Escravo* de processo de comunicação tipo *Polling* pudessem ser utilizados. Os modelos *Aleatório* e *Strobe* não foram criados para esta rede em virtude da mesma não possuir tal característica (ver seção 4.3).

7.2.1 Modelo de geração de pacotes

Para a geração de pacotes nos *Nós* que não são escravos foi utilizada a FSM conforme Figura 59.

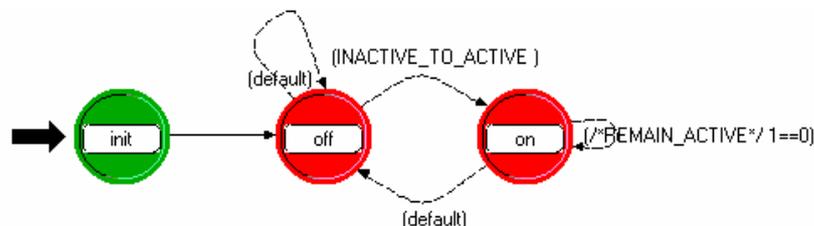


Figura 59 - Bursty Source FSM

A permanência no estado OFF está configurada com a propriedade de obedecer a um período igual a 0,5s, 0,06s e 0,008s, enquanto a permanência no estado ON (estado onde determinado dispositivo produz pacotes de acordo com uma dada taxa) é apenas para enviar os *tokens* virtuais para cada um dos *Nós* presentes na rede.

Para os caso de *Nós* escravos, ou seja, no modo de transmissão *Polling*, existe um mestre que faz a requisição e o mesmo deverá ser atendido, o modelo de FSM é conforme ilustrado na Figura 60.

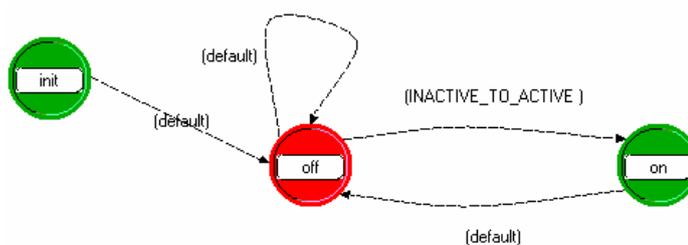


Figura 60 - FSM do gerador de pacote dos *Nós* escravos

A diferença entre o modelo da Figura 60 e o modelo da Figura 59, é que ocorre a geração de apenas um pacote quando no estado ON e a transição do estado OFF para ON ocorre somente quando o *Nó* em questão recebe o *token* virtual que libera o *Nó* para comunicar.

7.2.2 Modelo de um *Nó* de rede

Cada *Nó* é composto de vários processos interconectados entre si através de *links* reais ou *links* estatísticos. A Figura 61 a seguir mostra o modelo genérico de um *Nó*.

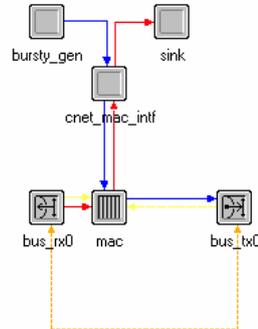


Figura 61 - Modelo genérico de um *Nó*

7.2.3 Arquitetura de rede

As simulações foram executadas considerando arquitetura semelhante à mostrada na Figura 62 (vários *Nós* conectados através de um cabo coaxial).

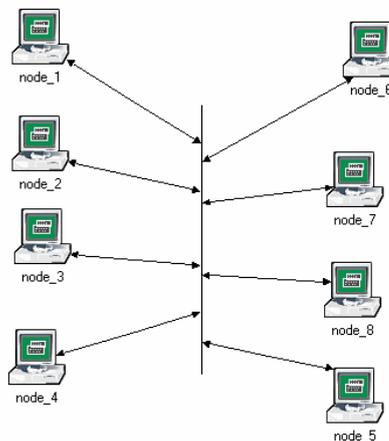


Figura 62 - Arquitetura básica rede

Inúmeras variações quanto ao número de equipamentos e divisões de rede podem ser feitas no simulador, bastando incluir os *Nós* e demais equipamentos. Este trabalho se restringiu à arquiteturas simples as quais permitem análises mais objetivas.

7.2.4 Análise dos resultados

Considerando que foram executadas simulações nas quais houve variação do tempo de geração de pacotes faz-se necessário determinar uma forma de análise padrão para os gráficos obtidos. Dentre os gráficos são evidenciados aqueles que mostram resultados mais relevantes.

A Tabela 10 a seguir mostra as condições simuladas para o caso ControlNet.

Meio Físico de Transmissão	Forma de Transmissão	Network Update Time (NUT)	Número de Nós
Coaxial	Polling	500 ms 50 ms 10 ms	6

Tabela 10- Condições executadas nas simulações com Controlnet

7.2.4.1 Análise do Índice *Utilização*

O gráfico do Índice de Utilização, em virtude da natureza da variável, deve ser analisado pelo seu valor médio ao longo do tempo e também pelo seu valor máximo. Quando o comportamento da variável é, de certa forma, estável (não há tendências crescentes ou decrescentes) a rede pode ser considerada como tendo a capacidade de transmissão dentro de seus limites.

Outro fator identificado nos gráficos do índice Utilização é que o modo de transmissão afeta diretamente o desempenho e nos casos onde a transmissão está organizada (passagem de *token*) são aqueles que o índice Utilização e os demais coletados apresentam valores adequados. Na Tabela 11 a seguir estão os principais resultados da análise dos gráficos da Figura 63.

Meio	Tendência	Média	Conclusão
Coaxial	Estável para 500 ms	< 1 %	Aceitável
	Estável para 50 ms	< 9%	Aceitável
	Estável para 10 ms	< 60 %	Aceitável

Tabela 11 - Resumo dos resultados do índice Utilização para simulação ControlNet

Os resultados mostrados na Tabela 11 indicam que a rede ControlNet por ser do tipo passagem de *token* permite ter alta utilização do meio sem degradação da mesma o que será comprovado pela análise do índice atraso. Em sistemas de controle industriais é comum que haja vários CLP's trocando dados entre si, com a IHM e ao se identificar situação semelhante à desta simulação. É importante ressaltar que este índice possui comportamento estável, ou seja, o mesmo não apresenta variações sem que sejam consequência da inclusão de *Nós* ou alteração nas trocas de dados, sendo que salvo as situações anteriores à alteração do índice é indicativo de algum problema no meio de transmissão ou nos dispositivos nele conectados.

7.2.4.2 Análise do Índice Atraso

A taxa de geração de pacotes impacta para o sistema NCS diretamente no índice *Utilização* e, conseqüentemente, afeta o comportamento do atraso da troca de mensagens entre os *Nós*. Buscando avaliar esta relação foram efetuadas simulações cujos resultados estão na Figura 64 a qual representa o comportamento do índice *Atraso* compreendendo o atraso total do pacote recebido no *Nó* 1.

Pela análise dos gráficos pode-se observar que quando o sistema está pré-configurado para a o NUT de 500ms, 50ms e 8 ms o índice *Atraso* apresenta tendência estável e com valores iguais a 0,927 ms para gerações citadas anteriormente. O valor encontrado é compatível com o tempo de transmissão em rede ControlNet de 5 Mbps de um pacote de 4056 bits (aprox. $4056 \times 0.2 \times 10^{-6}$)

Ao se analisar os gráficos percebe-se que para todos os NUT simulados o índice *Atraso* é igual indicando que quando se utiliza rede do tipo passagem de *token* o atraso é constante e conhecido. Este fato juntamente com o índice *Utilização* elevado indica que a ControlNet é muito estável e robusta.

O modo de transmissão *Polling* mostrado para a rede Ethernet é o único que se assemelha ao modo de transmissão da Rede ControlNet. Os demais modos *Strobe* e *aleatório* podem somente ser encapsulados dentro de uma rede ControlNet, mas mesmo assim os mesmos apresentarão características da rede tipo passagem de *token*.

7.2.4.3 Análise do Índice *Pacotes/s*

Os índices discutidos nas seções 7.2.4.1, 7.2.4.2 estão diretamente relacionados à rede propriamente dita, mas também é importante que seja avaliado o impacto nos *Nós* pertencentes à rede de controle. O índice *Pacotes/s* de um determinado *Nó* (neste caso *Nó 4*) é uma alternativa para esta necessidade e como é mostrado a seguir é complemento para as análises anteriores.

A rede ControlNet tem a característica de não possuir destinatário para os pacotes, ou seja, a informação é recebida por todos o *Nós*, e assim o índice *Pacotes/s* é elevado. Assim, semelhante ao modo *Strobe* para Ethernet, na rede ControlNet é exigido do equipamento que está recebendo os pacotes capacidade de processamento. Este fator, aliado à taxa de transmissão desejada, é relevante porque no momento da escolha de um dispositivo este fato deve ser considerado para especificar a capacidade de processamento do mesmo.

Ao se analisar o gráfico da Figura 65 juntamente aos das Figuras 63 e 64 é possível notar que apesar do elevado número de pacotes recebidos o atraso é constante e utilização elevada o que confirma a excelente capacidade da rede ControlNet.

7.2.4.4 Análise do Índice Colisões

O índice Colisões não é possível de existir na rede ControlNet em função de sua característica de transmissão.

7.2.4.5 Análise do Índice Eficácia

A rede ControlNet em virtude de trabalhar como o modelo produtor-consumidor pode apresentar mais de um resultado de Eficácia, pois uma determinada informação enviada por um *Nó* da rede poderá ser consumida por mais de um *Nó*. Pelo fato de não existir na

transmissão ControlNet um *Nó* Mestre e também não existir envio de pacote para solicitação de informação o índice Eficácia é sempre no mínimo igual a 1.

Ao se comparar a Eficácia da ControlNet com a Ethernet juntamente com os outros índices de avaliação de desempenho pode-se concluir que a ControlNet mostra-se superior quando utilizada dentro dos limites de tamanho de pacote e de transmissão.

7.2.5 Resultados das simulações com Rede ControlNet e meio coaxial

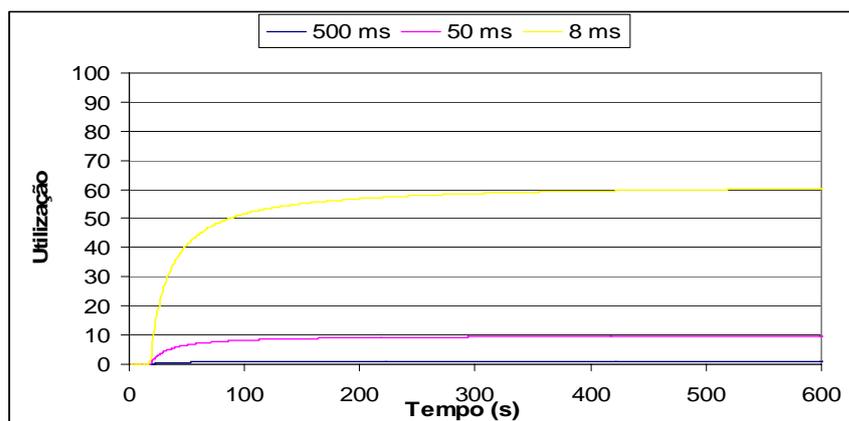


Figura 63 - Índice Utilização para rede ControlNet

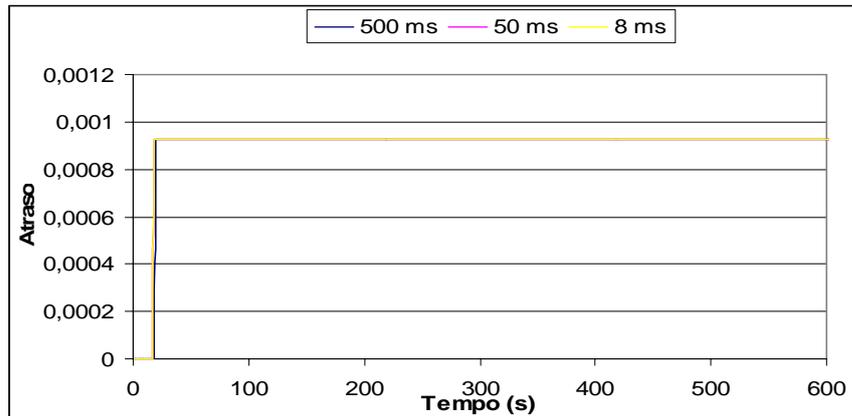


Figura 64 - Índice Atraso para rede ControlNet

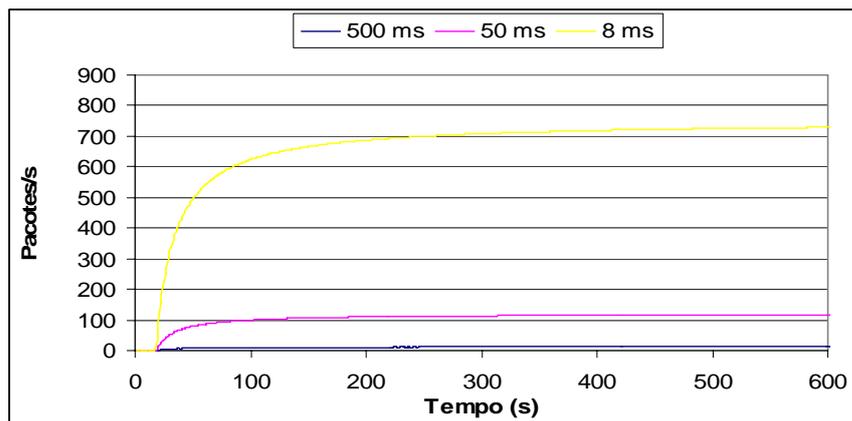


Figura 65 - Índice Pacotes/s para rede ControlNet

7.3 Modelo de Simulação Rede CAN

Outra rede utilizada em Sistemas de Controle Digital é a rede CAN. A simulação é efetuada de forma semelhante à descrita na Seção 7.1, tendo as diferenças a seguir:

- d) Rede Básica do tipo CAN
- e) Velocidade de transmissão 125kbps.
- f) Tamanho de pacote de 8 bytes.

Com o intuito de permitir esta simulação, foram criados os modelos de estações CAN de forma que elementos do tipo *Mestre* e *Escravo* de processo de comunicação tipo *Polling* e *Strobe* pudessem ser utilizados. O modelo *aleatório* não foi criado para esta rede.

7.3.1 Modelo de geração de pacotes

Para a geração de pacotes nos *Nós* que não são escravos foi utilizada a FSM conforme a Figura 66.

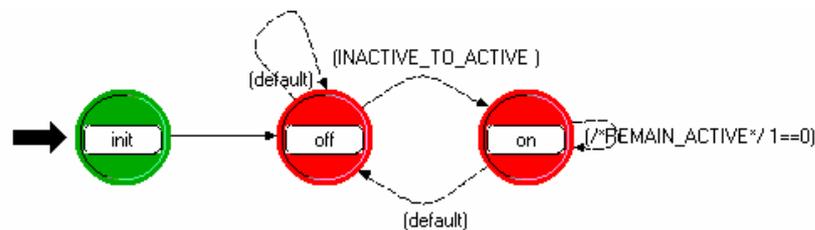


Figura 66 - Bursty Source FSM

A permanência no estado OFF está configurada com a propriedade de obedecer a um período igual a 0,5s, 0,05s, 0,01s e 0,005s, enquanto a permanência no estado ON (estado onde determinado dispositivo produz pacotes de acordo com uma dada taxa) é apenas para enviar os *tokens* virtuais para cada um dos *Nós* presentes na rede.

Para os casos de *Nós* escravos, ou seja, no modo de transmissão *Polling*, existe um mestre que faz a requisição e o mesmo deverá ser atendido, o modelo de FSM é conforme ilustrado na Figura 67.

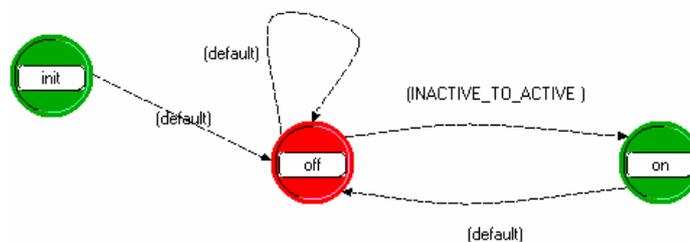


Figura 67 - FSM do gerador de pacote dos *Nós* escravos

A diferença entre o modelo da Figura 66 e o modelo da Figura 67, é que ocorre a geração de apenas um pacote quando no estado ON, a transição do estado OFF para ON ocorre somente quando o *Nó* em questão tem prioridade para se comunicar.

7.3.2 Modelo de um Nó de rede

Cada *Nó* é composto de vários processos interconectados entre si através de *links* reais ou *links* estatísticos. A Figura 68 a seguir mostra o modelo genérico de um *Nó*.

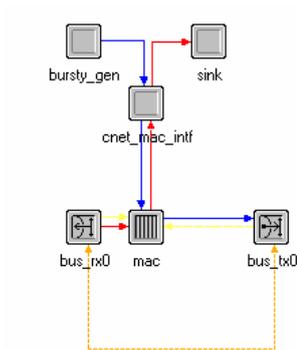


Figura 68 - Modelo genérico de um *Nó*

7.3.3 Arquitetura de rede

As simulações foram executadas considerando arquitetura semelhante à mostrada na Figura 69 (vários *Nós* conectados através de um cabo coaxial).

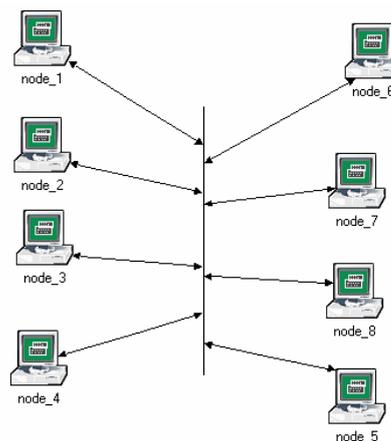


Figura 69 - Arquitetura básica rede

7.3.4 Análise dos resultados

Considerando que foram executadas simulações nas quais houve variação do tempo de geração de pacotes faz-se necessário determinar forma de análise padrão para os gráficos obtidos. Dentre os gráficos são evidenciados aqueles que mostram resultados mais relevantes.

A Tabela 11 abaixo mostra as condições simuladas para o caso CAN.

Forma de Transmissão	Taxa de Geração de pacotes
Polling	500 ms
	50 ms
	5ms
Strobe	500 ms
	50 ms
	10 ms

Tabela 12 - Condições executadas nas simulações com rede CAN

É importante ressaltar que o modelo de simulação da rede CAN desenvolvido nesta simulação é o que mais se aproxima do funcionamento teórico, uma vez que esta rede possui a característica de na ocorrência de colisão um dos *Nós* que estão transmitindo terá preferência para continuar a transmitir e o outro deverá finalizar a transmissão. Esta característica é complexa de ser simulada na ferramenta OPNET em virtude da modelagem de simulação por Finit Machine States.

7.3.4.1 Análise do índice *Utilização*

O gráfico do Índice de Utilização em virtude da natureza da variável deve ser analisado pelo seu valor médio ao longo do tempo e também pelo seu valor máximo. Quando o comportamento da variável é, de certa forma, estável (não há tendências crescentes ou decrescentes), a rede poderá ser considerada como tendo a capacidade de transmissão dentro de seus limites.

O objetivo nas simulações foi identificar o comportamento do índice Utilização para algumas configurações de comunicação. Outro fator identificado nos gráficos do índice

Utilização é que o modo de transmissão afeta diretamente o desempenho e que nos casos onde a transmissão está organizada (modo *Polling*) são aqueles que o índice Utilização e os demais coletados apresentam valores menores. Na Tabela 13 a seguir estão os principais resultados da análise dos gráficos das Figuras 70 e 71.

Modo Transmissão	Tendência	Média	Conclusão
Polling	Estável para 500 ms	< 0,32 %	Aceitável
	Estável para 50 ms	< 3,25 %	Aceitável
	Estável para 5 ms	< 32 %	Aceitável
Strobe	Estável para 500 ms	< 1,36 %	Aceitável
	Estável para 50 ms	< 13,59%	Aceitável
	Estável para 10 ms	< 69,96 %	Aceitável

Tabela 13 - Resultados do índice Utilização para simulação CAN

O fato que diferencia a rede CAN das demais é que a mesma transmite pacotes bem menores que os das redes Ethernet e Controlnet, porém a velocidade é bem menor, isto é, 125kbps (ao final tanto a Ethernet transmitindo 1000 bytes e a CAN transmitindo 8 bytes apresentam quase o mesmo tempo de transmissão). Outro ponto é a inexistência de perda de transmissão, ou seja, no momento da colisão um dos *Nós*, continuará transmitindo sem nenhum distúrbio. Isto permite que a utilização atinja níveis maiores (ex.: 69%) sem que haja prejuízo da comunicação.

A conseqüência do índice Utilização elevado é indiretamente evidenciada através do próximo índice a ser analisado (*Atraso*), mas a partir do momento em que o mesmo se aproximar de 100% algum(s) *Nós* deixarão de transmitir em função da prioridade de transmissão de *Nós* com endereços mais baixos.

7.3.4.2 Análise do Índice Atraso

Buscando avaliar as características do índice *Atraso* para a rede CAN foram efetuadas simulações cujos resultados estão nas Figuras 72, 73, 74, 75, 76 e 77 as quais representam o comportamento do índice *Atraso* compreendendo o atraso total do pacote recebido no *Nó* 1 para dois processos de transmissão (*Polling*, *Strobe*).

Pela análise dos gráficos das Figuras 72, 73 e 74 pode-se observar que quando o sistema está pré-configurado em modo *Polling* para a geração de pacotes em 500ms, 50ms e 5ms o índice *Atraso* apresenta tendência estável e com valores não superiores a 1,2 ms para gerações citadas anteriormente. O valor encontrado é compatível com o tempo de transmissão em rede CAN de 125 kbps de um pacote de 8 bytes + 44 bits de cabeçalho (aprox. $(8 \cdot 8 + 44) / [125 \times 10^3] = 108 / [125 \times 10^3]$), isto leva a conclusão que no caso de transmissão do tipo *Polling* os atrasos de cada *Nó* são praticamente iguais e constantes.

Ao se analisar os gráficos para a geração de pacotes em 500ms, 50ms e 5ms, percebe-se que para o modo *Strobe* o índice *Atraso* apresenta comportamento diferente do modo *Polling*, porém estável.

Este fato é resultante do modo *Strobe* requisitar resposta de todos os *Nós* ao mesmo tempo fazendo com que a prioridade de transmissão dos *Nós* de endereços mais baixos atue, provocando maiores atrasos para os *Nós* de menor prioridade. Tal fato é confirmado pelos gráficos das Figuras 75, 76 e 77.

Vale ressaltar que apesar da diferença entre os valores de atraso os mesmos são praticamente constantes para um mesmo *Nó*. Assim, para o modo *Strobe*, desde que não seja atingida a utilização de 100% do meio, a transmissão de informações ocorrerá, tendo como consequência apenas atrasos diferenciados para cada *Nó*.

Este resultado é importante na aplicação em sistemas de controle visto que se existe algum equipamento em um NCS cuja informação transmitida cause degradação no desempenho do sistema é preferível que o dispositivo tenha o menor endereço de rede possível.

7.3.4.3 Análise do Índice *Pacotes/s*

Os índices discutidos nas seções 7.3.4.1, 7.3.4.2 estão diretamente relacionados à rede propriamente dita. O índice *Pacotes/s* de um determinado *Nó* (neste caso *Nó* 4) é uma alternativa para a necessidade acima e como será visto a seguir é complemento para as análises acima feitas.

A rede CAN tem a característica de não possuir destinatário para os pacotes, ou seja, a informação é recebida por todos os *Nós*, e assim o índice *Pacotes/s* é elevado, porém não é comum a comunicação peer-to-peer entre dispositivos que não sejam um *Mestre* e um

Escravo. Assim, semelhante ao modo *Strobe* para Ethernet, é exigido do equipamento que está recebendo os pacotes capacidade de processamento.

Ao se analisar o gráfico das Figuras 78 e 79 juntamente com as Figuras 72, 73, 74, 75, 76 e 77 é possível notar que apesar do elevado número de pacotes recebidos os atrasos são constantes o que confirma a excelente capacidade da rede CAN.

7.3.4.4 Análise do Índice *Eficácia*

A rede CAN, de forma semelhante à ControlNet, pode apresentar mais de um resultado de *Eficácia*, pois uma determinada informação enviada por um *Nó* da rede poderá ser consumida por mais de um *Nó*. Ao se considerar que para rede CAN normalmente existe um *Mestre* fazendo solicitações tem-se então duas *eficácias*: A primeira é para o modo *Polling* onde pela requisição de um *Nó Mestre* se obtém a resposta de um *Escravo* levando, portanto, ao índice *Eficácia* igual a 1. Já para o modo *Strobe* existe um *Nó Mestre* que faz uma solicitação e recebe resposta de $n-1$ *Nós* da rede e, portanto, a *eficácia* é de $n-1$.

Ao se comparar a *Eficácia* da rede CAN com a Ethernet juntamente com os outros índices de avaliação de desempenho pode-se concluir que a CAN mostra-se superior quando utilizada dentro dos limites de tamanho de pacote e de transmissão.

7.3.5 Resultados das simulações com Rede CAN

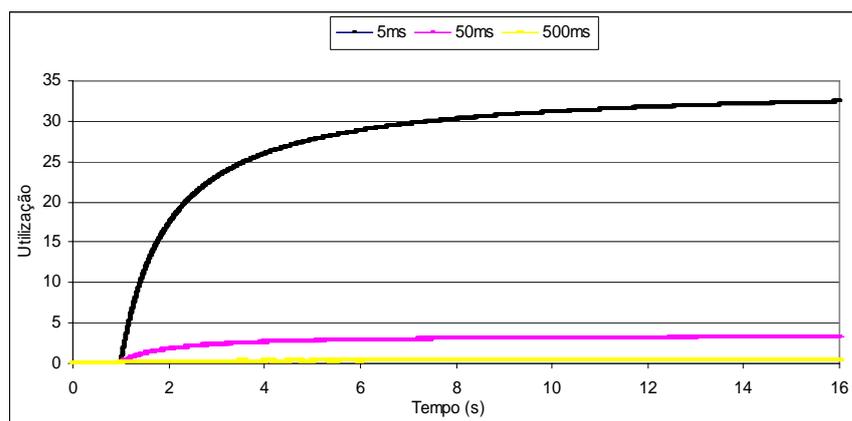


Figura 70 - Utilização processo transmissão *Polling*

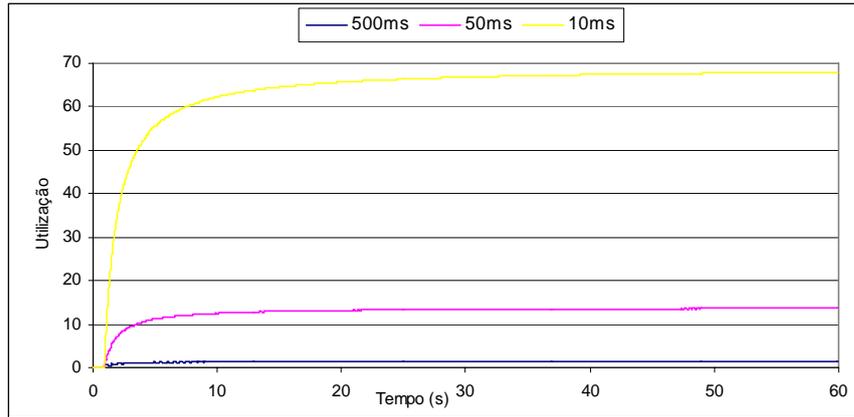


Figura 71 - Utilização processo transmissão *Strobe*

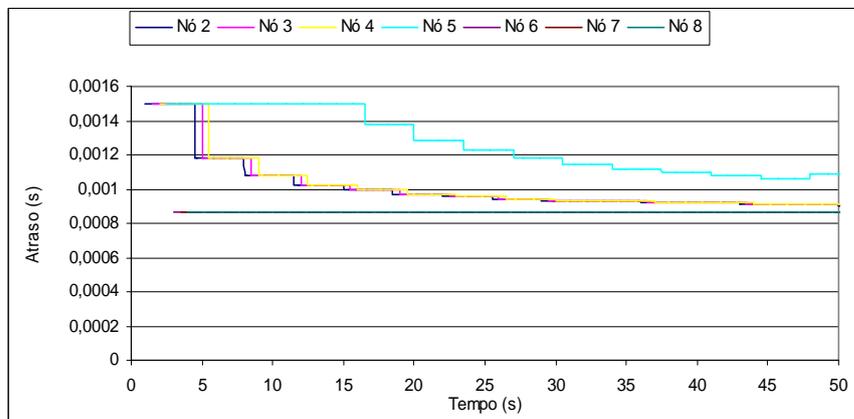


Figura 72 - Atraso processo transmissão *Polling 500ms*

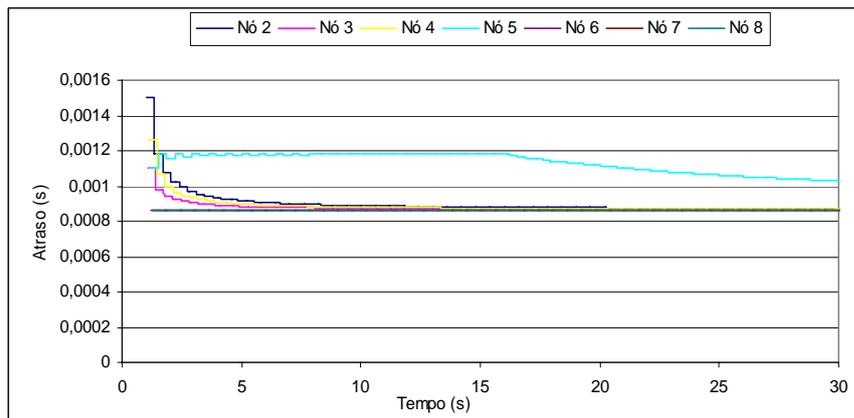


Figura 73 - Atraso processo transmissão *Polling 50ms*

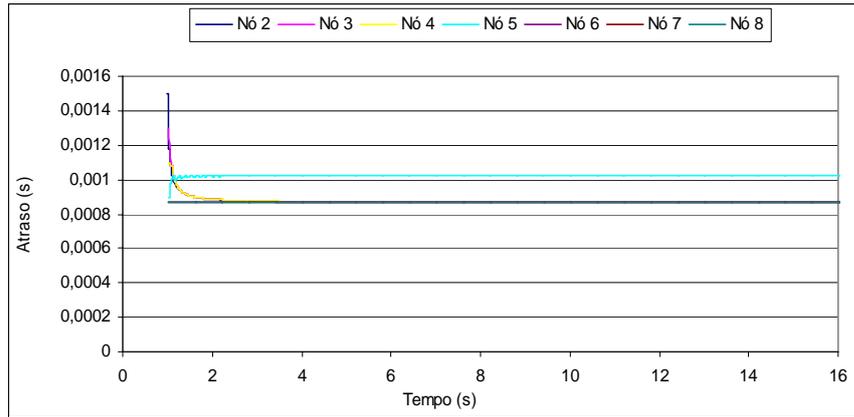


Figura 74 - Atraso processo transmissão Polling 5ms

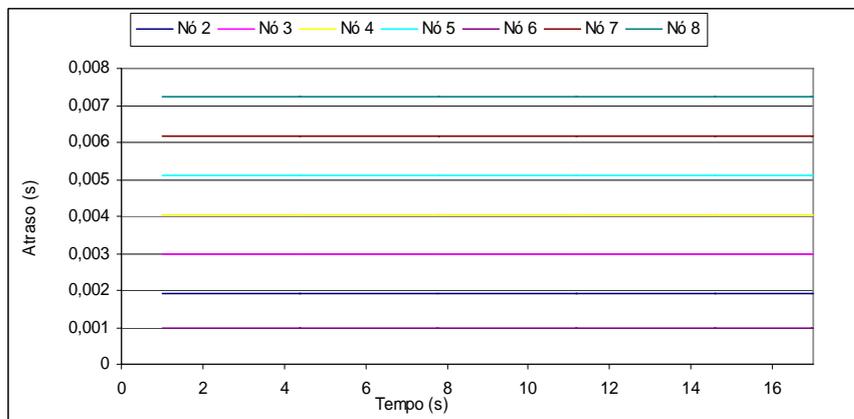


Figura 75 - Atraso processo transmissão Strobe 500ms

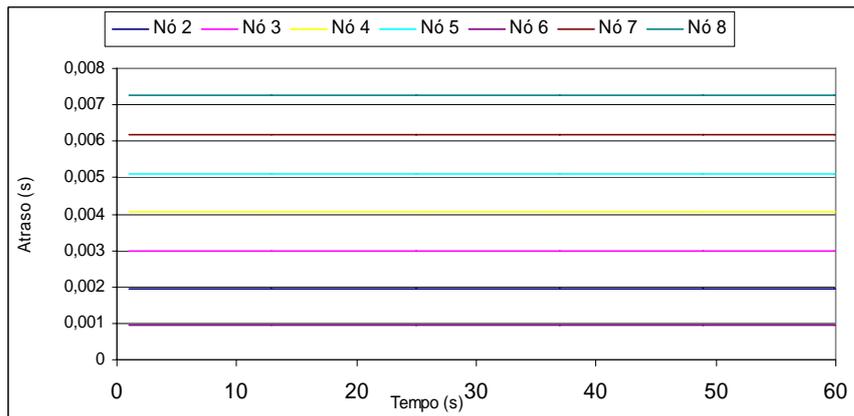


Figura 76 - Atraso processo transmissão Strobe 50ms

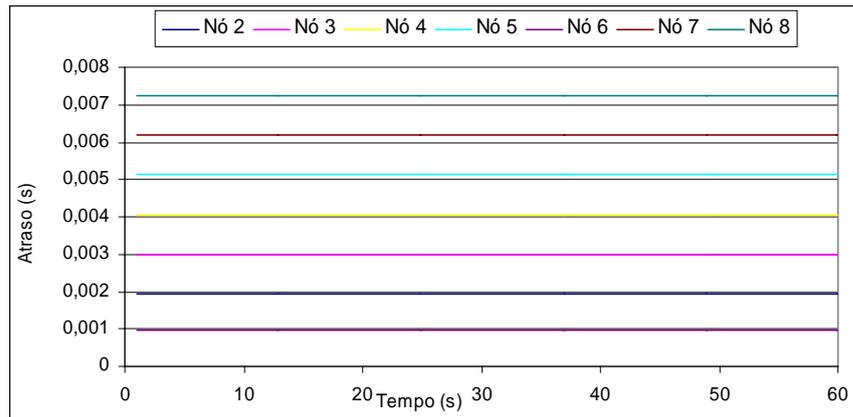


Figura 77 - Atraso processo transmissão Strobe 10ms

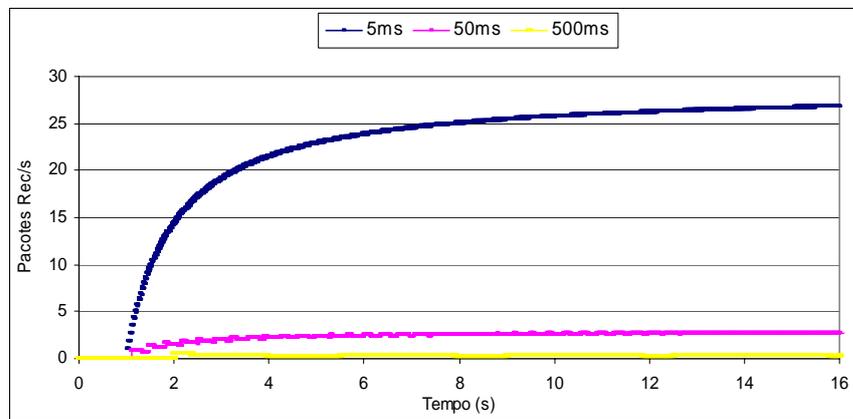


Figura 78 - Pacotes recebidos Nó 4 processo transmissão Polling

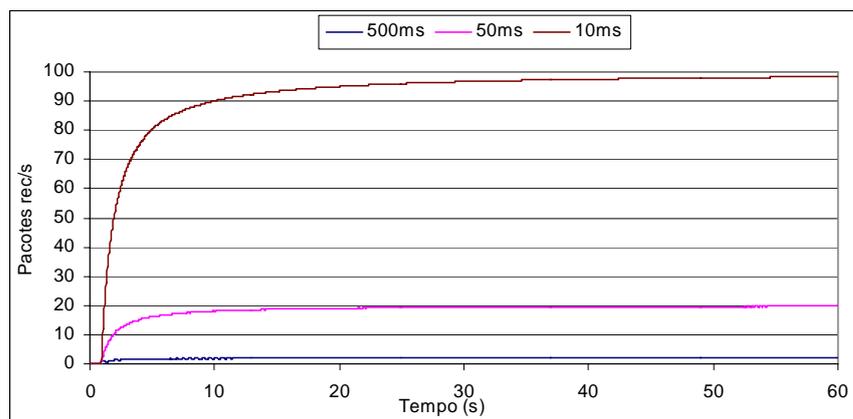


Figura 79 - Pacotes recebidos Nó 4 processo transmissão Strobe

8 Conclusão

O processo de decisão durante o desenvolvimento da engenharia de sistemas de controle vem, a cada dia, necessitando de maiores detalhes em virtude de várias opções de equipamentos, arquiteturas e redes.

Sistemas do tipo NCS estudados neste trabalho são um exemplo. Na literatura são encontrados desenvolvimentos teóricos bastante complexos no sentido de modelar sistemas e de se construir um controlador para o mesmo.

È importante ressaltar que as alternativas tecnológicas disponíveis são em muitos casos restritas e por isso faz-se necessário obter maiores informações sobre o que está disponível no mercado.

Neste trabalho foram utilizadas as redes Ethernet, ControlNet e CAN, amplamente utilizadas no mercado em configurações de sistemas de controle normalmente encontradas nas instalações industriais. Foram elaborados dois artigos [1] e [2] os quais serviram de base para a composição do trabalho, sendo importante ressaltar a contribuição do artigo “Tomada de Decisão no Planejamento da Utilização de Redes em Sistemas de Controle Digitais Baseado em Resultados de Simulações” que foi publicado na revista especializada da ISA – The Instrumentation Systems and Automation Society.

Dentre os resultados e análises das simulações obtidos se podem destacar:

Ethernet

- Identificação do impacto dos modos de transmissão (*Polling*, *Strobe* e Aleatório) no desempenho da rede Ethernet e, por conseguinte, a compreensão das vantagens e desvantagens de cada modo. Foram comprovadas nas análises as vantagens da utilização do modo *Polling* de transmissão o qual pela organização da troca de informações permite que a rede seja utilizada dentro de sua melhor capacidade de transmissão.
- Identificação do comportamento da rede Ethernet quando sua infra-estrutura se compõe de meio coaxial, hub e switch para três modos de transmissão e taxas de geração de pacotes. Pela análise dos índices de desempenho pode-se afirmar que a utilização de switch na infra-estrutura de rede é a situação ideal para ser utilizada em novos sistemas tipo NCS ou mesmo para aqueles casos onde seja identificada a baixa eficiência do sistema.

- Verificação do comportamento da rede Ethernet quanto submetida a extremos quanto à geração de pacotes (ex.: geração de pacotes em 5ms). Pode-se concluir que a rede Ethernet apesar da alta velocidade de transferência de dados acaba tendo o seu desempenho prejudicado nesta situação em virtude do método de acesso ao meio (CSMA/CD) o qual insere característica não determinística no seu comportamento.
- Obtenção dos índices *Atraso*, *Pacotes/s*, *Utilização*, *Número de Colisões* e *Eficácia* para diferentes configurações. Os índices obtidos são bases reais para auxiliar a avaliação de projetos de sistemas NCS dado que por eles é possível identificar quais tipos de redes e em qual tipo de configuração são possíveis de aplicadas diretamente em sistemas de controle. Também é confirmada a relação existente entre o índice *Atraso* e o índice *Utilização*.
- Identificação de que o índice *Eficácia* tem representatividade para a verificação do desempenho da rede Ethernet quando a mesma está submetida a condições limites.
- Diante das situações analisadas pode-se confirmar a capacidade da rede Ethernet e as suas limitações para quando se pretende fazer o uso da mesma em sistemas de controle. A rede Ethernet de maneira geral pode ser utilizada em sistemas NCS desde que se observem os seus limites de transmissão.

ControlNet

- Identificação do comportamento estável dos índices *Atraso*, *Utilização*, *Pacotes/s* e *Eficácia* para a rede ControlNet quando submetida a diferentes condições de geração de pacotes (NUT igual a 500ms, 50ms e 10ms).
- Comprovação da eficiência para a troca de informações pela rede ControlNet mesmo quando submetida a tráfego elevado (indiretamente utilização do meio elevado). Pode-se concluir através das análises dos índices *Atraso* e *Utilização* que esta rede não apresenta queda de desempenho, tendo, portanto, um excelente *throughput* inclusive para condições de alta transferência de dados.
- Confirmação pelos índices apresentados e pela comparação dos resultados obtidos da rede Ethernet que quando método de acesso ao meio é baseado em passagem

de *token* a rede apresenta excelente desempenho, como, por exemplo, atrasos constantes e independentes da utilização do meio.

- Confirmação pelo índice *Eficácia* da rede ControlNet que o modelo produtor/consumidor é bastante eficaz na troca de dados (valor maior que 1).
- Comprovação de que a rede ControlNet é adequada para a aplicação em sistemas NCS, podendo este conceito ser estendido para outras redes com característica do tipo passagem de *token*.

CAN

- Identificação do comportamento estável dos índices *Utilização*, *Atraso* e *Pacotes/s* da rede CAN quando submetida a diferentes condições de geração de pacotes (500, 50, 10 e 5ms) e modos de transmissão (*Polling* e *Strobe*).
- Confirmação de que para a rede CAN o modo de transmissão do tipo *Strobe* não apresenta impactos como os verificados na rede Ethernet. A consequência direta desse modo é o aparecimento de diferentes atrasos, porém os mesmos são constantes para cada endereço de *Nó* de rede. Isto é resultado da priorização da transmissão de para aqueles *Nós* de menor endereço.
- Confirmação de que a rede CAN apresenta comportamento estável quando submetida a tráfego elevado (utilização do meio elevada), porém sem que haja grande perda de desempenho, significando que o índice *Atraso* não é demasiadamente afetado pela condição de tráfego elevado.
- Identificação da excelente capacidade da rede CAN de trabalhar com utilização do meio elevada. Tal fato é resultante do método de resolução de transmissões simultâneas, onde não existe perda da transmissão de informação e sim priorização.
- Confirmação pelo índice *Eficácia* da rede CAN que o modelo produtor/consumidor é bastante eficaz na troca de dados (valor maior que 1).
- Confirmação de que rede CAN é viável para ser utilizada em sistemas NCS cuja troca de informações seja da ordem de poucos bytes principalmente pelo fato dos atrasos serem estáveis.

Pelas informações contidas neste trabalho, o leitor será capaz de julgar alternativas no projeto de sistemas, pois os conceitos aqui descritos são aplicáveis diretamente às redes simuladas neste trabalho e também poderão ser utilizados naqueles casos de redes diferentes bastando que sejam obtidas informações sobre o processo de comunicação desta rede e assim fazer as comparações com os casos semelhantes aqui apresentados.

Como sugestão de pesquisa para trabalhos futuros pode-se citar, por exemplo, simulação de arquiteturas mais complexas (ex.: um NCS que utiliza diferentes tipos de redes), desenvolvimento de ábacos para identificação de desempenho de rede através de simulações cujas variáveis simuladas tenham vários valores, simulação de NCS com redes do tipo Profibus ou outras redes de mercado, modificação do núcleo da Ethernet de forma a aumentar sua capacidade de transmissão, simulação Ethernet 100 Mbps e 1Gbps, simulação de sistemas NCS onde sejam modeladas informações como tempo interno de processamento dos dispositivos, avaliação do desempenho de dispositivos aplicáveis a um NCS sob o ponto de vista de forma de processamento interno, atrasos, capacidade de processamento (ex.: PLC, computadores, dispositivos de nível zero), viabilidade da modificação do núcleo da mensagem CAN para permitir transmissão de pacotes maiores de dados, levantamento de dados reais de desempenho de plantas tipo NCS em funcionamento e identificação possíveis de melhorias de desempenho, avaliação do desempenho de NCS cuja infra-estrutura seja baseada em sistema de comunicação sem fio (wireless), avaliação do desempenho do conjunto drivers de comunicação e computador e alternativas de melhorar o desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Souza, Fabio; Garcia, Anilton. “Planejamento e Avaliação da Utilização de Redes em Sistemas de Controle Digitais”, 3º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação, Novembro 2003, Expo Center Norte, Revista Intech n° 57 fl. 38.
- [2] Souza, Fabio; Garcia, Anilton. “Tomada de Decisão no Planejamento da Utilização de Redes em Sistemas de Controle Digitais Baseado em Resultados de Simulações”, 4º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação, Novembro 2004, Expo Center Norte, Revista InTech n°68 fl. 14 a 35.
- [3] F.-L. Lian, J. Moyne, and D. Tilbury, "Network design consideration for distributed control systems". IEEE Transactions on Control Systems Technology, March, 2002.
- [4] P. Otanez, J. Moyne, and D. Tilbury, "Using deadbands to reduce communication in networked control systems". Proceedings of the 2002 American Control Conference, May, 2002.
- [5] F.-L. Lian, "Analysis, Design, Modeling, and Control of Networked Control Systems". PhD thesis, University of Michigan, May 2001.
- [6] F.-L. Lian, J. Moyne, and D. Tilbury, "Analysis and Modeling of Networked Control Systems; MIMO case with multiple time delays". Proceedings of 2001 American Control Conference, 2001.
- [7] F.-L. Lian, J.R. Moyne, and D.M. Tilbury, "Performance evaluation of control networks: Ethernet, Control-Net, and DeviceNet". IEEE Control Systems Magazine, February 2001, pages 66-83.
- [8] J. K. Yook, D. M. Tilbury, N. R. Soparkar†, "A Design Methodology for Distributed Control Systems to Optimize Performance in the Presence of Time Delays". Proceedings of the American Control Conference, pages 1959–1964, 2000.

- [9] J. K. Yook, D. M. Tilbury, N. R. Soparkar†, "Trading Computation for Bandwidth: Reducing Communication in Distributed Control Systems Using State Estimators". Japan-USA Symposium on Flexible Automation, July23-26, 2000,.
- [10] Wei Zhang, Michael S. Branicky, and Stephen M. Phillips, "Stability of Networked Control Systems Stability of Networked Control Systems", IEEE Control Systems Magazine, pages 84-99, February 2001.
- [11] John Yook, Dawn Tilbury, Kalyani Chervela*, Nandit Soparkar*, "Decentralized, Modular Real-Time Control for Machining Applications", Proceedings of the American Control Conference, pages 844–849, 1998.
- [12] J. Nilsson, "Real Time Control Systems with Delays". PhD Thesis, Lund Institute of Technology, 1998.
- [13] Paul Otanez, "Performance Optimization of Networked Control Systems", April 17, 2002.
- [14] Wei Zhen , Xie Jian-ying, "Online Delay-Evaluation Control for Networked Control Systems". Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control Las Vegas, Nevada USA, pages 1649-1650, vol. 2, December 2002.
- [15] Winston Fong and Jim Rodgerson, "The Viability of Ethernet for Automation & Control". Department of Electrical and Electronic Engineering Manukau Institute of Technology Auckland.
- [16] Seok-Kyu Kweon and Kang G. ShinQin Zheng, "Statistical Real-Time Communication over Ethernet for Manufacturing Automation Systems", Mitsubishi Electric Research Laboratory, Cambridge – MA.
- [17] Wei Zhang, "Stability Analisis of Networked Control Systems" . PhD Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Case Western Reserve University, August 2001.

[18] Feng-Li Lian, James Moyne, Dawn Tilbury, "Time Delay Modeling and Sample Time Selection for Networked Control Systems". Proceedings of ASME-DSC, Vol. XX 2001, International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 11-16.

[19] Paul Otanez, Jonathan Parrotta, James Moyneb, and Dawn Tilbury, "Analysis of Distributed Control Networks for Reconfigurable Machining Systems". University of Michigan, Department of Mechanical Engineering and Department of Electrical and Computer Science.

[20] Benajmim C. Kuo, "Automatic Control Systems", Seventh Edition, Prentice Hall, 1999.