

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ALEXANDRE BARATELLA LUGLI**

**UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE  
TOPOLOGIA E TRÁFEGO PARA REDES ETHERNET INDUSTRIAIS.**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.**

**Área de concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais.**

**Orientador(a): Dra. Profa. Lúcia Regina Horta Rodrigues Franco.**

**Dezembro de 2007  
Itajubá - MG**

## AGRADECIMENTOS

*Gostaria de agradecer em especial à minha esposa Thays, à empresa Sense Eletrônica, na figura do Sr. Sérgio Augusto Bertoloni pelo apoio e ajuda nos momentos decisivos deste trabalho, aos meus pais Silvana e José Roberto e meu irmão Arthur pela ajuda nos momentos difíceis que passei até chegar aqui e aos meus grandes amigos Humberto Figueiredo de Carvalho, Edson Beraldo Júnior e Otávio de Souza Martins Gomes pela ajuda técnica neste trabalho.*

*À minha orientadora, Profa. Dra. Lúcia Regina Horta Rodrigues Franco, pela paciência e atenção em suprir minhas lacunas de conhecimento e experiência, na análise e correção do texto da dissertação, bem como nas informações e conselhos que auxiliaram na elaboração do modelo final e sua realização prática.*

*E finalmente a Deus que, ao me presentear com características pessoais essenciais, me delegou a capacidade de utilizá-las em proveito de minha evolução pessoal e de toda a humanidade.*

*A TODOS, A MINHA ETERNA GRATIDÃO.*

*Dezembro – 2007*

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico carinhosamente este trabalho à minha esposa e à minha mãe, pela persistência e coragem que elas me passaram para enfrentar os grandes desafios deste trabalho. Obrigado!*

## RESUMO

A arquitetura do protocolo TCP/IP é uma das redes mais difundidas para comunicação à longa, média e curtas distâncias envolvendo computadores. Assim, tentando uma padronização das redes industriais, há alguns anos, tal padrão foi implementado também no meio industrial.

O trabalho explora esta tecnologia, porém voltada para os ambientes industriais. A grande dificuldade do usuário final de redes industriais é iniciar o processo produtivo da sua planta, devido a erros de projetos e dificuldades na configuração do sistema. Várias pessoas encontram dificuldades em dimensionar física e logicamente tais redes. Um erro nessa etapa significa muita perda de tempo e de custo com a planta parada e com o baixo desempenho da rede, ocasionando em perdas de tempos e altos custos para reparos da planta da industrial.

O objetivo do trabalho é propor uma ferramenta computacional, independente da tecnologia de rede em questão (todas as redes Ethernet industriais utilizam arquitetura TCP/IP e camada física padronizada IEEE802.3), onde o usuário possa realizar uma série de testes para possibilitar a conexão e instalação dos elementos da rede com o menor tempo e custo possível. Foram realizadas diversas simulações e comparações a fim de testar e validar a ferramenta computacional.

Essa ferramenta computacional implementada pode ser utilizada por qualquer pessoa afim com a área de redes industriais, auxiliando e evitando grandes perdas no projeto de plantas industriais.

Palavras Chaves: Redes Industriais, Ethernet, Simulação, Meio Físico, Análise Física e Análise Lógica.

## ABSTRACT

The standard protocol TCP/IP is one of the most wild spread architectures for long, average and short distances involving computers. So, for trying the industrial networks standardization, there are some years, it was also implemented in the industrial way.

The work explores this technology, however gone back to the industrial atmospheres. The industrial networks final user has great difficulty to accomplish the start up of its plant, due to mistakes of projects and difficulties in the configuration of the system. Many people have physically and logically difficulties in projecting such industrial networks. An error in this stage means a lot of waste of time and cost with the stopped plant and with the bad operation of the network, having a low efficiency of the system.

The subject of the work is to propose a software tool, independent on the network in subject (all industrial Ethernet networks use architecture TCP/IP and physical layer standardized IEEE802.3), where the user can accomplish a lot of tests to make possible the connection and installation of the elements of the network with the smallest time and cost. Several simulations and comparisons were fulfilled in order to test and to validate the accomplished software.

The software tool can be used by anybody from the industrial networks area, helping and avoiding great problems in the industrial start up.

Key Words: Industrial Networks, Ethernet, Simulation, Physical Layer, Physical Analysis and Logical Analysis.

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Resumo dos tipos de comunicação para rede Ethernet/IP. ....	18
Tabela 2 – Comparativo H1/HSE. ....	19
Tabela 3 – Características físicas das redes Ethernet industriais. ....	20
Tabela 4 – Principais funções dos elementos do software. ....	29
Tabela 5 – Atenuação do cabo Ethernet industrial em função da frequência. ....	37
Tabela 6 – Comparativo entre as rede industriais.....	60

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo do tempo utilizado para cada módulo, bytes de entrada.....	33
Equação 2 - Cálculo do tempo utilizado para cada módulo, bytes de saída.....	33
Equação 3 – Cálculo do tempo utilizado total (todos os módulos de campo).....	33
Equação 4 – Cálculo do tempo disponível. ....	33
Equação 5 – Porcentagem de cada módulo em relação ao tempo total disponível. ....	34

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

- ARP – Address Resolution Protocol
- AS-i – Actuator Sensor Interface
- CAN – Controller Área Network.
- CBA – Component Based Automation
- CIP – Control Information Protocol
- CPU – Central Processing Unit
- CRC – Cyclic Redundancy Check
- CSMA/CD – Carrier Sense with Multiple Access and Collision Detect
- DARPA – Defense Advance Research Projects Agency
- dB – Unidade de Decibel
- DC/DC – Direct Current/Direct Current
- DP – Decentralized Periphery
- EDS – Electronic DataSheet
- ENIP – Protocolo de rede Ethernet / Industrial Protocol
- EPA – Ethernet for Plant Automation
- EPL – Ethernet PowerLink
- FLEX I/O – módulo de campo para redes industriais fabricado pela empresa Rockwell
- FSK – Frequency Shift Keying
- FTP – File Transfer Protocol
- Gbps –  $10^9$  bits transmitidos em um segundo.
- GSD – General Station Description
- HSE – High Speed Ethernet
- HTTP – Hyper Text Transfer Protocol
- ICMP – Internet Control Message Protocol
- IGMP – Internet Group Management Protocol
- IEC – International Electric Committee
- IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
- IHM – Interface Homem-Máquina
- I/O – Input/Output
- IP – Internet Protocol
- IP67 – Índice de proteção número 67 (a prova de submersão em água até 30 centímetros)

IRT – Isochronous Real Time

ISO – International Standards Organization

Kbps –  $10^3$  bits transmitidos em um segundo

Km – Unidade de Quilômetros

m – Unidade de metros

MAC – Media Access Control

Mbps –  $10^6$  bits transmitidos em um segundo

ms –  $10^{-3}$  segundos

nF –  $10^{-9}$  Faradays

Non-RT – Non Real Time

ODVA – Open Device Vendors Association

OSI – Open System Interconnection

PD – Powered Device

pF –  $10^{-12}$  Faradays

PLC – Programable Logic Controller

PoE – Power over Ethernet

PSE – Power Sourcing Equipments

PSK – Phase Shift Keying

QAM – Quadrature Amplitude Modulation

RARP – Reverse Address Resolution Protocol

RFC – Request for Comments

RJ – Registered Jack, número 45

SNMP – Simple Network Management Protocol

SRT – Soft Real Time

TCP – Transport Control Protocol

TCP/IP – pilha de protocolos para comunicação a longa, média ou pequena distância

UDP – User Datagram Protocol

UML – Unified Modeling Language

us –  $10^{-6}$  segundos

Vac – Tensão no modo alternado

Vcc – Tensão no modo contínuo

WWW – World Wide Web

XML – Extensible Markup Language

$\Sigma$  – Somatório

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Classificação e divisão dos Fieldbuses. ....	2
Figura 2 – Arquitetura industrial típica. ....	3
Figura 3 – Conector RJ 45 industrial e cabo blindado para rede Ethernet industrial. ....	4
Figura 4 – <i>Switch</i> Ethernet industrial com prioridade de transmissão. ....	5
Figura 5 – Possíveis configurações para sistema Poe. ....	6
Figura 6 – PSE comercializado no mercado. ....	7
Figura 7 – Modelo OSI da ISO. ....	8
Figura 8 – Arquitetura TCP/IP. ....	9
Figura 9 – Quadro Ethernet. ....	10
Figura 10 – Quadro IP. ....	11
Figura 11 – Quadro TCP (a) e UDP (b). ....	12
Figura 12 – Arquitetura TCP/IP para Profinet. ....	13
Figura 13 – Proxy Profinet/Profibus DP e Profinet/Interbus S. ....	14
Figura 14 – Comparativo de tempos da rede Profinet. ....	15
Figura 15 – Quadro Profinet IO. ....	16
Figura 16– Arquitetura TCP/IP para Ethernet/IP. ....	18
Figura 17 – Exemplo de uma aplicação em HSE em uma fábrica em Singapura. ....	20
Figura 18 – Topologia para uma rede Ethernet industrial qualquer. ....	21
Figura 19 – Estudo de caso 1: Relatório de visita técnica. ....	23
Figura 20 – Estudo de caso 2: Relatório de visita técnica. ....	23
Figura 21 – Tela do software <i>Segment Design Tool</i> . ....	24
Figura 22 – Software do controlador mestre Ethernet/IP. ....	25
Figura 23 – Software do módulo de campo Ethernet/IP. ....	25
Figura 24 – Comparação entre UDP e TCP para Ethernet industrial. ....	27
Figura 25 – Diagrama de hierarquia de classes. ....	30
Figura 26 – Parâmetros de configuração do controlador mestre. ....	31
Figura 27 - Parâmetros de configuração dos módulos de campo. ....	32
Figura 28 – Simulação final para exemplo citado acima. ....	34
Figura 29 – Porcentagem de cada módulo em relação ao tempo total disponível. ....	35
Figura 30 – Excesso de tráfego na rede. ....	36
Figura 31 – Configuração da parte física da rede Ethernet. ....	38

Figura 32 – Cenário para simulação 1.....	41
Figura 33 – Gráfico dos tempos para cenário 1.....	42
Figura 34 – Relatório da rede para primeira simulação.....	43
Figura 35 – Tela do mestre controlador ODVA. ....	43
Figura 36 – Tela do módulo de campo ODVA. ....	44
Figura 37 – Tela do analisador de rede para simulador ODVA. ....	45
Figura 38 – Cenário e resultado para simulação 2.....	47
Figura 39 - Cenário e resultado para simulação 2 com alteração da taxa de transmissão.....	48
Figura 40 – Visualização de cada módulo após alteração da taxa de transmissão.....	49
Figura 41 – Cenário e resultado para simulação 2 com alteração do tempo de varredura. ....	51
Figura 42 – Relatório da rede para segunda simulação.....	52
Figura 43 – Cenário e resultado para simulação 3 – <i>Switches</i> de 4 portas.....	53
Figura 44 – Cenário e resultado para simulação 3 – <i>Switch</i> de 8 portas. ....	55
Figura 45 – Cenário 3 – valor inválido de distância.....	56
Figura 46 – Cenário 3 – mensagem de erro para distância inválida.....	56
Figura 47 – Tela inicial do analisador Profibus DP. ....	57
Figura 48 – Características da rede Profibus DP proposta. ....	57
Figura 49 – Análise lógica da rede Profibus DP proposta. ....	58
Figura 50 – Tela inicial do analisador Devicenet. ....	59
Figura 51– Características da rede Devicenet proposta. ....	59
Figura 52 – Análise lógica da rede Devicenet proposta. ....	60

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Histórico da Ethernet Industrial.....	1
1.2	Evolução da arquitetura TCP/IP.....	3
1.3	Características do padrão TCP/IP no meio industrial.....	4
2	A ARQUITETURA TCP/IP – DIVISÃO EM CAMADAS.....	8
2.1	Divisão de camadas na arquitetura TCP/IP.....	8
2.1.1	Camada de Rede.....	9
2.1.2	Camada de Inter-Rede.....	10
2.1.3	Camada de Transporte.....	11
3	ETHERNET INDUSTRIAL: PROTOCOLOS.....	13
3.1	Profinet.....	13
3.1.1	Profinet IO.....	15
3.2	Ethernet/IP.....	17
3.3	HSE – High Speed Ethernet.....	18
3.4	O meio físico IEEE802.3 para redes Ethernet industriais.....	20
4	NECESSIDADE DE UMA FERRAMENTA PARA ETHERNET INDUSTRIAL.....	22
4.1	Trabalhos já realizados.....	24
4.2	Tempos de atraso na rede Ethernet industrial.....	26
5	SOLUÇÃO PROPOSTA.....	27
5.1	Filosofia de desenvolvimento do software.....	28
5.2	Funcionalidades necessárias no software.....	28
5.3	Diagramas de classes chaves do software.....	29
5.4	Funções de cada elemento e cálculo de ocupação da rede.....	30
5.5	Análise da parte física da rede.....	37
5.6	Tratamento de exceções no software ao nível do usuário.....	38
6	RESULTADOS.....	40
6.1	Resultados Obtidos.....	40
6.1.1	Primeira simulação.....	40
6.1.2	Segunda simulação.....	45
6.1.3	Terceira simulação.....	52
6.1.4	Quarta simulação.....	56
6.2	Conclusões dos resultados.....	61

6.3	Dificuldades encontradas.....	62
7	CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES.....	64
8	TRABALHOS FUTUROS.....	65
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
APÊNDICES.....		73
A	Codificação das classes do software.....	73
B	Codificação dos cálculos do software.....	75
C	Codificação da <i>thread</i> do software.....	77
D	Documentação UML.....	78
ANEXOS		
A	Exemplo de GSDML.....	79
B	Tabela do Campo Frame ID para Profinet IO.....	80
C	Exemplo de EDS.....	81

# 1 INTRODUÇÃO

O padrão TCP/IP é uma das arquiteturas em redes mais difundidas para comunicação a longa, média e curta distância envolvendo computadores. Surgiu em meados dos anos 70, criado por Vinton G. Cerf e Robert E. Khan <sup>[1][56]</sup>, não parando mais de crescer. <sup>[1]</sup>

O protocolo Ethernet é um dos protocolos que fazem parte da arquitetura TCP/IP e foi criado por Robert M. Metcalfe, também na década de 70 <sup>[1][57]</sup>.

Esse padrão criou uma revolução na comunicação a longa distância e hoje é amplamente utilizado nas redes Internet ou Intranet espalhadas por todo o mundo. <sup>[1]</sup>

A dissertação explora parte desta tecnologia voltada para os ambientes industriais, chamada de “Ethernet industrial”, que utiliza a padronização de protocolos TCP/IP. Procura, também, desenvolver soluções via software para facilitar e auxiliar os usuários dessa nova tecnologia aplicada à área industrial, utilizando recursos de simulação e análise dos resultados dessas simulações.

Uma ferramenta computacional foi construída para auxiliar no projeto de infraestrutura e desenvolvimento de uma rede, verificando o meio físico (cabos, distância, taxa de transmissão, etc), taxa de ocupação da rede (quantidade de informações transmitidas na rede) e verificação de erros relativos à parte física ou lógica da rede. Estas funções descritas acima foram realizadas sem um único elemento na rede, apenas utilizando recursos computacionais de simulações.

Esta dissertação está dividida da seguinte maneira: conceitos teóricos (capítulos um, dois e três), descrição do problema (capítulo quatro), solução proposta do problema através de testes e simulações (capítulo cinco), resultados obtidos (capítulo seis e sete), trabalhos futuros (capítulo oito) e referências bibliográficas (capítulo nove).

## 1.1 Histórico da Ethernet Industrial

O padrão TCP/IP surgiu no meio industrial há cerca de oito anos. Porém, somente nos últimos quatro anos é que se tornou comercialmente utilizado em ambientes industriais. <sup>[2][3]</sup>

A grande utilidade de seu uso se deve à necessidade de interligar todos os níveis da Cadeia de Suprimentos (*Supply Chain*) envolvendo um único e exclusivo padrão de rede, o TCP/IP. Assim, o nível de gerência ou vendas teria acesso ao chão de fábrica (sensor ou atuador) em tempo real, dando uma grande agilidade na produção e aumentando-a,

efetivamente. <sup>[4]</sup> Porém, na arquitetura tradicional isso não é possível devido aos diferentes tipos de padrões de protocolos existentes no mercado. <sup>[23]</sup>

Há cerca de dez anos, o nível administrativo já possuía o padrão TCP/IP, porém o nível de chão de fábrica possuía outros protocolos denominados *Fieldbuses*. <sup>[4]</sup> A figura 1 ilustra esses principais protocolos. Esses protocolos de chão de fábrica foram se difundindo, devido ao custo benefício de se ter uma rede industrial se comparado ao sistema tradicional. <sup>[23]</sup> Hoje, há vários protocolos no mercado, os principais são: Profibus, Devicenet, CAN, Fieldbus Foundation, Modbus, AS-i, Sercos, entre outros. <sup>[4]</sup>

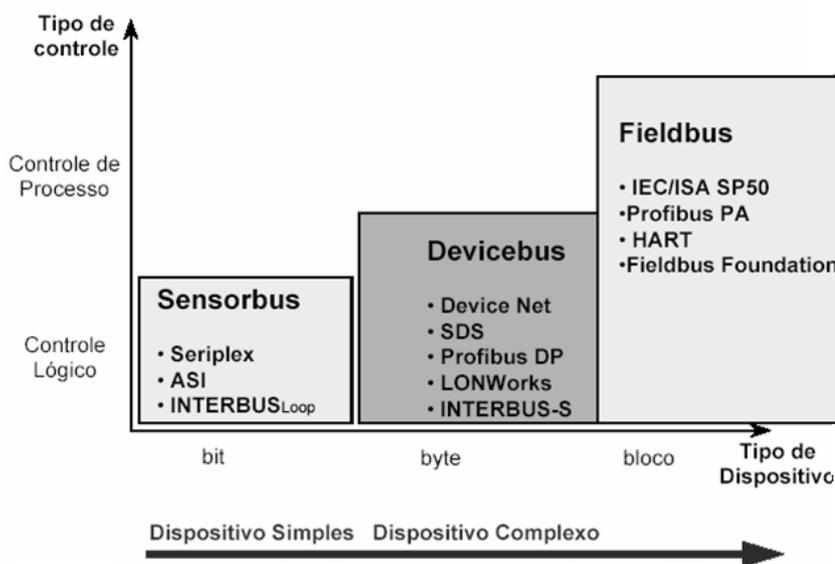


Figura 1 – Classificação e divisão dos Fieldbuses. <sup>[23]</sup>

Cada um desses protocolos elaborou uma maneira de enviar seus dados do chão de fábrica aos níveis mais altos da hierarquia industrial (vide figura 2). Seja no nível de supervisão, seja por um PLC ou até por uma interface proprietária de cada fabricante. <sup>[4]</sup>

Surgiu, então, a idéia de uniformizar o chão de fábrica. Nesse instante, nasceu a Ethernet industrial. Sua idéia inicial era de uniformizar toda a Cadeia de Suprimentos, porém, cada fabricante desenvolveu seu próprio aplicativo e a idéia inicial não foi totalmente implementada, ainda havendo protocolos específicos trabalhando com o TCP/IP, devido aos diferentes tipos de aplicações existentes. <sup>[4]</sup>

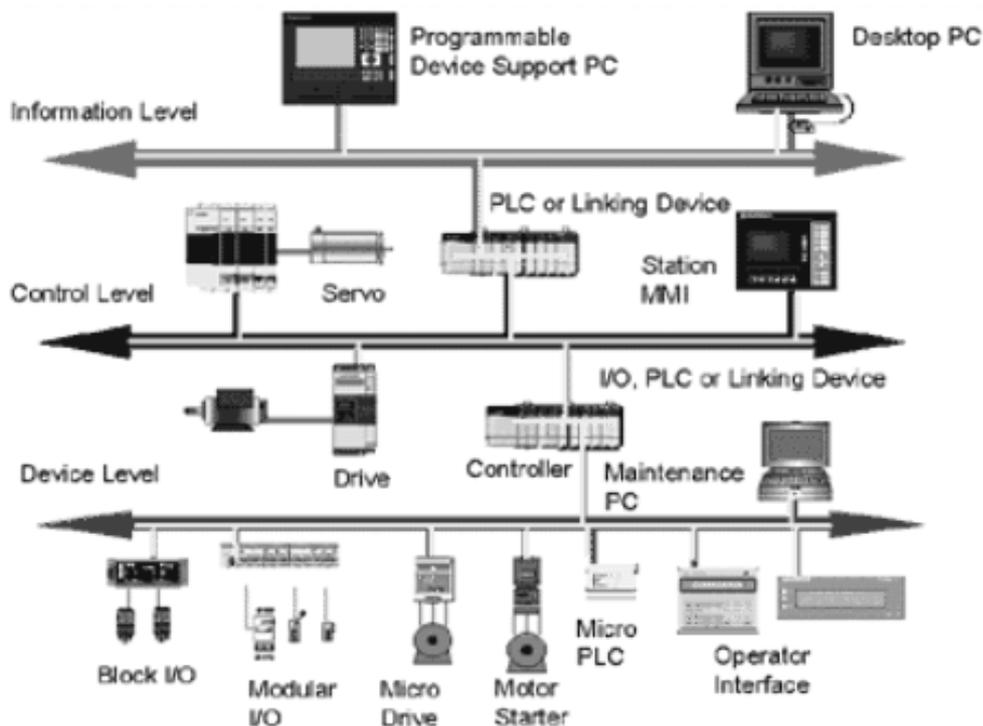


Figura 2 – Arquitetura industrial típica. [4]

A figura acima mostra todos os níveis da hierarquia da automação industrial. Basicamente existem três diferentes níveis: *Device Level* (nível de elementos de campo – sensores e atuadores), *Control Level* (nível de controle de processo – PLC's ou PC's industriais) e *Information Level* (nível de informação ao usuário – gerência e manufatura).

## 1.2 Evolução da arquitetura TCP/IP

A arquitetura TCP/IP sofreu diversas modificações com o transcorrer do tempo. Todas as suas camadas foram afetadas com a evolução da tecnologia e dos meios de comunicação, como cabos, conectores, velocidades de transmissão das mensagens. [1]

O protocolo de camada física IEEE802.3 (Ethernet) evoluiu significativamente ao longo dos anos. Os primeiros meios de transmissão eram os pares metálicos grossos, cuja atenuação era muito grande. Depois surgiram os cabos coaxiais e em seguida os pares trançados. [5] Hoje, o mais comum é encontrarmos aplicações com fibra óptica ou sem fio (*wireless*). A fibra óptica, apesar do custo elevado em relação ao par trançado, possui atenuação muito pequena e capacidade para trafegar grandes quantidades de dados. [14] Outro fator importante na camada física é a conexão do hardware da rede. Houve, com o passar do tempo, uma evolução grande dos tipos, tamanhos e qualidade das conexões do hardware de

rede. Atualmente, o conector RJ 45 domina totalmente o mercado. Com a evolução do meio físico, as taxas de transmissões também aumentaram significativamente. De 10Mbps, passaram para 100Mbps e hoje já estão em torno do 10Gbps, contudo a largura de banda não é suficiente para dar velocidade a determinadas aplicações, como por exemplo, jitter muito altos. Dependendo do tipo de aplicação é necessário tempos de respostas bem definidos e invariáveis. <sup>[5][14][16]</sup>

As técnicas de modulação são outro fator decisivo na evolução do padrão TCP/IP. Primeiro surgiu a técnica FSK (*modulação pela frequência*), depois a PSK (*fase do sinal transmitido*) e por último o QAM (*modulação por amplitude e fase do sinal*). <sup>[13][16]</sup>

### 1.3 Características do padrão TCP/IP no meio industrial

Para a aplicação da arquitetura TCP/IP no meio industrial, vários fatores devem ser considerados e analisados. Alguns deles são citados abaixo.

- Padronização dos diversos protocolos do mercado. Isso acabou não ocorrendo devido à utilização de hardwares específicos por parte de alguns fabricantes e também a aplicações específicas de cada rede; <sup>[6]</sup>

- Interoperabilidade entre os diversos equipamentos dos diferentes fabricantes; <sup>[4]</sup>

- Aumento da quantidade de dados trafegados pela rede (até mil quatrocentos e setenta e dois bytes de informação útil) e diminuição do tempo de ciclo (algumas redes podem operar com ciclos de algumas dezenas de microssegundos); <sup>[22]</sup>

- Robustez dos equipamentos. Isso se refere à temperatura de operação, classe de proteção, segurança intrínseca, umidade relativa do ar, etc. A seguir, segue um exemplo de um conector RJ 45 industrial, que opera de - 40°C a + 80°C, IP67, Harting (uso na rede Profinet) e um cabo utilizado para Ethernet industrial (quatro e oito vias, ambos com blindagem); <sup>[7]</sup>



Figura 3 – Conector RJ 45 industrial e cabo blindado para rede Ethernet industrial. <sup>[7]</sup>

- Determinismo da rede. A arquitetura TCP/IP utiliza-se da técnica CSMA/CD (*Carrier Sense with Multiple Access and Collision Detect*) para controlar e acessar o meio de transmissão. Essa técnica consiste na detecção de colisão no meio de transmissão, ou seja, quando mais de uma estação deseja transmitir dados, ao mesmo tempo, no barramento. <sup>[1] [14]</sup> Neste caso, apenas uma delas conseguirá transmiti-los, sendo que a outra terá que esperar um tempo pré-determinado até tentar outra transmissão. Caso não consiga, o dispositivo esperará mais uma vez e assim sucessivamente. Nota-se que não há certeza de que a informação será transmitida num tempo determinado (o que é essencial para o ambiente industrial). Em um ambiente industrial, a espera de um dado, como, por exemplo, um alarme de incêndio ou a detecção de um objeto, pode ser fatal. Não se pode esperar tanto tempo para o dado ser transmitido. <sup>[17]</sup> Assim, para se transformar essa arquitetura em determinística foi necessário a implantação de um *switch* especial com portas independentes entre si e com capacidade de programar prioridades e tempos de espera das mensagens. <sup>[1] [22]</sup> Deste modo, o *switch* determina o tempo de varredura para cada porta. <sup>[22]</sup>



Figura 4 – *Switch* Ethernet industrial com prioridade de transmissão. <sup>[8]</sup>

A grande desvantagem deste padrão na área industrial, no início, foi à questão da comunicação e alimentação dos módulos. <sup>[9] [10]</sup> Havia a necessidade de se ter dois cabos separados para um elemento da rede (comunicação de dados e alimentação). <sup>[10] [11]</sup> Hoje, há vários estudos e implementações utilizando um padrão chamado de *Power over Ethernet (Poe)* <sup>[9]</sup>. Nesse tipo de comunicação, o canal transmissor e receptor podem trafegar dados simultaneamente no meio de transmissão, utilizando o conceito de modulação em amplitude sobreposto ao nível contínuo de alimentação dos módulos de campo. Assim, o sinal de comunicação sofreria uma modulação para ser transmitido ou recebido por um elemento da rede. A norma *IEEE 8002.3af* <sup>[10]</sup> regulamenta todo este conceito de PoE.

Esta norma descreve que a alimentação deve estar entre 44Vcc e 57Vcc (48Vcc é a tensão nominal) e a potência do sinal deve ser, no máximo, de 15.4W (máximo de 350mA para a tensão de alimentação de 44Vcc,  $0,35A * 44V = 15,4W$ ).<sup>[11]</sup>

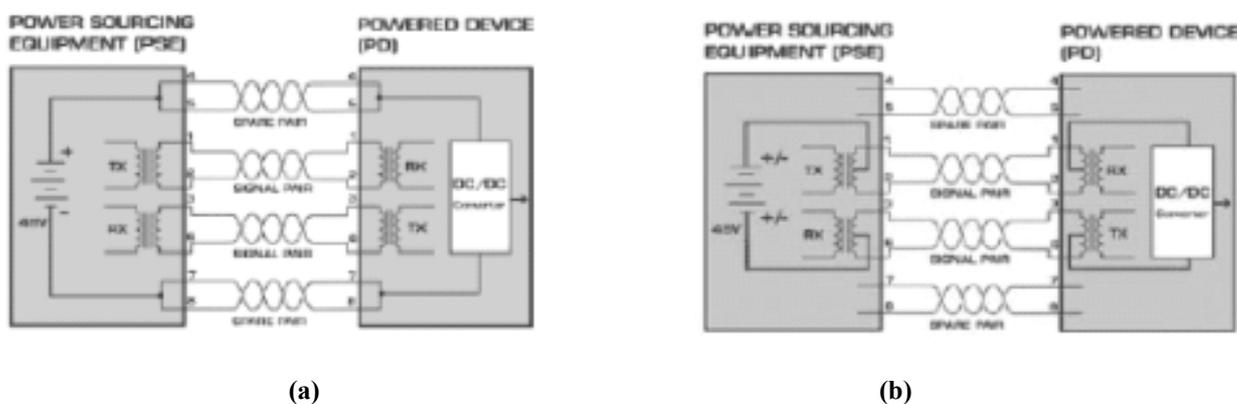


Figura 5 – Possíveis configurações para sistema PoE.<sup>[11]</sup>

O grande objetivo para o uso desta tecnologia é a comunicação *full-duplex* (onde se dobra a taxa de transmissão, pois ocorre comunicação simultânea nos dois sentidos, recepção e transmissão simultaneamente).<sup>[9]</sup> Na figura 5 (a), a configuração é para a operação no modo *full-duplex*. Nesse modo, os canais de transmissão e recepção estão separados fisicamente no cabo da rede (dois pares) e a alimentação de 48Vcc em outros dois pares.<sup>[10] [11]</sup> Normalmente, não se utiliza tensão de 48Vcc na automação, sendo mais comum o uso de tensões de 24Vcc ou 12Vcc. Assim, é necessário o uso de um conversor DC/DC para transformar o sinal de 48Vcc para outro qualquer. A grande desvantagem dessa configuração é a necessidade de polaridade nos terminais de alimentação, a fim de diferenciar os sinais, em modulação em amplitude, positivos e negativos.<sup>[11]</sup>

Na figura 5 (b), a configuração é para a operação no modo *half-duplex* (comunicação em dois sentidos, recepção e transmissão, mas não simultaneamente). Nesse modo, o cabo é comum tanto para a alimentação quanto para a comunicação, não necessitando de uma polaridade específica nos terminais. É necessária uma modulação em amplitude sobre a alimentação para não interferir no sinal de comunicação trafegado no cabo.<sup>[11]</sup> O sinal de comunicação trafega apenas em um sentido, devido o mesmo meio transmitir e receber o sinal. O grande problema dessa configuração é garantir o isolamento mínimo requerido entre a alimentação e a comunicação, que pela *IEEE 802.3af* é de 1500Vac.<sup>[11][12]</sup>

Atualmente, já há a comercialização de equipamentos PSE (*Power Sourcing Equipments*) que são responsáveis pela geração da tensão e da corrente de alimentação para os

dispositivos de campo PD (*Powered Device*) responsáveis pela conversão da tensão principal em outro nível desejado (conversor DC/DC). A figura 6 ilustra um PSE que pode ser encontrado no mercado. [Erro! Indicador não definido.]



**Figura 6 – PSE comercializado no mercado.** [Erro! Indicador não definido.]

## 2 A ARQUITETURA TCP/IP – DIVISÃO EM CAMADAS

O objetivo deste capítulo é enfatizar o funcionamento e organização da arquitetura TCP/IP, destacando suas principais características, camadas e protocolos. A arquitetura TCP/IP foi desenvolvida pela DARPA e, inicialmente, o grande objetivo era interligar as diferentes tecnologias de redes existentes no mundo, seja de altas e baixas velocidades ou grandes e pequenas distâncias. <sup>[13]</sup> <sup>[14]</sup> A regulamentação de toda a arquitetura TCP/IP (protocolos, aplicativos e funcionalidades) está descrita em documentos chamados de RFC (*Request for Comments*) que podem ser acessados por qualquer pessoa via Internet. <sup>[15]</sup>

### 2.1 Divisão de camadas na arquitetura TCP/IP

Para entender melhor o funcionamento, a interoperabilidade e o objetivo de cada protocolo de rede, a ISO (*International Standards Organization*) padronizou várias camadas e interligação entre elas. Esse modelo se chamou OSI (*Open System Interconnection*). <sup>[1]</sup> <sup>[13]</sup> <sup>[14]</sup> <sup>[16]</sup>

A figura 7 mostra todas as sete camadas propostas pelo modelo OSI. O uso de todas as camadas não é obrigatório aos sistemas de comunicações, mas sua hierarquia e protocolos devem ser mantidos. <sup>[1]</sup> <sup>[5]</sup>

No início da criação das redes via satélite ou rádio, o modelo OSI tornou-se pouco eficiente. Isso ocorreu porque os dados de informação eram muito menores dos que os dados de controle da rede. Logo, gastavam-se muitos bits de controle para poucos bits de dados efetivamente úteis. Esta arquitetura também não previa outros tipos de serviços, como transmissão de voz e imagem pela rede. <sup>[1]</sup> <sup>[13]</sup> <sup>[17]</sup>

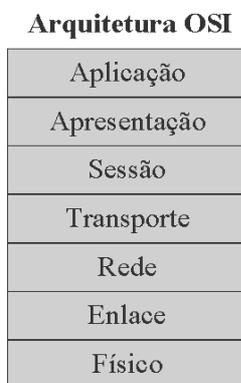
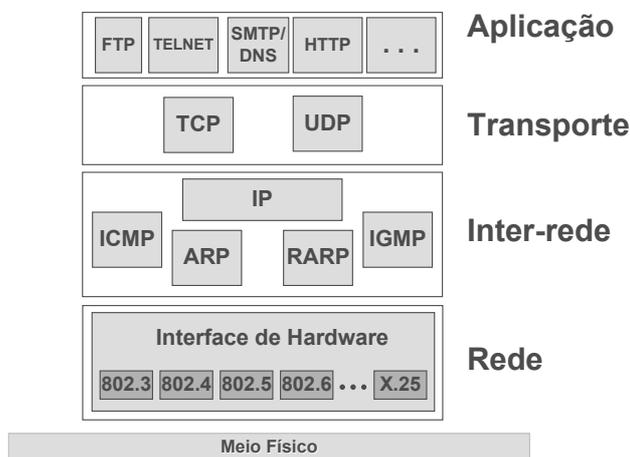


Figura 7 – Modelo OSI da ISO. <sup>[1]</sup>

Com todas essas lacunas, Cerf e Khan <sup>[56]</sup> desenvolveram uma outra arquitetura mais eficiente, o modelo TCP/IP, cujo objetivo inicial era interconectar várias redes espalhadas pelo mundo ao mesmo tempo, podendo fornecer serviços de dados, voz e imagem. <sup>[1][4]</sup>

A figura 8 mostra a divisão da arquitetura TCP/IP camada a camada. <sup>[18]</sup>



**Figura 8 – Arquitetura TCP/IP.** <sup>[1]</sup>

A camada de rede define o meio físico e o tipo de enlace utilizados na rede TCP/IP. Vários protocolos e padrões foram desenvolvidos e certificados nessa camada, sendo que o padrão Ethernet tornou-se o mais difundido (*IEEE 802.3*). <sup>[1]</sup>

A camada de Inter-redes é responsável pelo encaminhamento dos pacotes em qualquer rede, garantindo que sejam transmitidos independentemente do destino. O protocolo mais difundido dessa camada é o IP, porém há outros que auxiliam seu trabalho. <sup>[1]</sup>

A camada de transporte é responsável pela conexão de dois elementos e garantia de transmissão dos dados. Dois protocolos operam nessa camada, o TCP ou o UDP. <sup>[1]</sup>

A camada de aplicação do usuário contém protocolos de alto nível. Esses protocolos fornecem serviços ao usuário, como o HTTP, FTP, WWW e SNMP. <sup>[1][5]</sup>

### 2.1.1 Camada de Rede

A camada de rede é a primeira camada da arquitetura TCP/IP. Ela é responsável por toda a interconexão do meio físico com a rede e pela adequação das informações na rede (camada de enlace). <sup>[1][5]</sup>

O IEEE produziu várias normas para esta camada. O conjunto das normas ficou conhecido como IEEE 802. Dentro desse conjunto, várias outras normas foram desenvolvidas com base no meio físico e no tipo de enlace desejado. <sup>[18]</sup>

A indústria optou pelos padrões IEEE 802.3, chamado de Ethernet. <sup>[22]</sup> Nesse padrão, o acesso ao meio é realizado pelo protocolo CSMA/CD, porém o meio físico pode ter várias maneiras de ser implementado, como: fibra óptica, par trançado e cabo coaxial, por exemplo. Para os protocolos de camada de rede, o importante é o meio físico, o acesso ao meio de transmissão, a estrutura do pacote de dados e os elementos que realizam o controle da transmissão dos dados. <sup>[1][22]</sup>

A figura 9 mostra o quadro de um dos protocolos da camada de redes, o Ethernet, que é utilizado na indústria. <sup>[22]</sup> Ele possui um total de oito bytes de preâmbulo, quatorze bytes de cabeçalho, quarenta e seis a mil e quinhentos bytes de dados e quatro bytes de verificação de erro. <sup>[1]</sup>

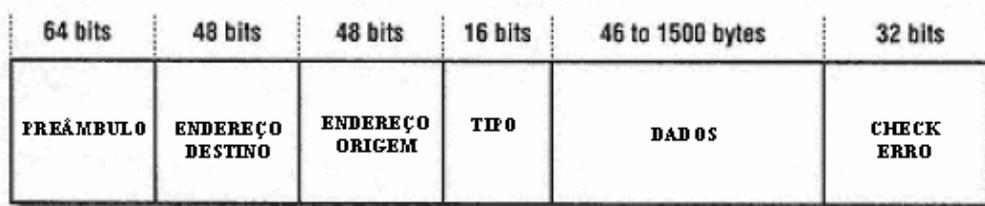


Figura 9 – Quadro Ethernet. <sup>[1][5]</sup>

### 2.1.2 Camada de Inter-Rede

A camada de inter-rede é responsável pela transmissão dos dados de uma origem até um destino através da computação de pacotes, podendo ser da mesma rede ou não. Assim, essa camada tem a função de mover dados entre uma mesma rede (Intranets) ou em redes diferentes (Internet). <sup>[14][18]</sup>

O principal protocolo que está nessa camada é o IP. Sua tarefa é fornecer a melhor forma de transportar os dados da origem até o destino, sem se preocupar com a confirmação de recebimento, chamado de serviço não orientado a conexão. <sup>[1][14]</sup> Assim, a garantia de entrega das mensagens é realizada pelas camadas superiores. <sup>[1][14]</sup> Além dele, outros protocolos auxiliam no controle de fluxo ou no endereçamento dos quadros trafegados pela rede, como: ARP e RARP (utilizados junto com o protocolo de rede Ethernet para identificar os endereços de rede), ICMP (protocolo de controle do fluxo das mensagens) e IGMP (protocolo de controle do roteamento das mensagens). <sup>[1][14]</sup>

O quadro IP utiliza o endereçamento no formato decimal para a representação dos quatro bytes de endereço entre a rede e o host (elemento conectado à rede, por exemplo, um computador), por exemplo: 192.168.10.2. O quadro consiste de duas partes: o cabeçalho e a informação. O cabeçalho possui uma parte fixa de vinte bytes e uma parte opcional de tamanho variável de quatro bytes (total de vinte e quatro bytes de cabeçalho).<sup>[1][18]</sup> O restante dos bytes são as informações a serem trafegadas na rede. No cabeçalho é possível determinar o endereço de origem e destino, o comprimento e verificação de erro das mensagens e controle dessas informações, entre outros serviços.<sup>[1][14]</sup> A figura 10 ilustra as funcionalidades do protocolo IP.

+	0 - 3	4 - 7	8 - 15	16 - 18	19 - 31
0	Versão	Tamanho do cabeçalho	Tipo de Serviço (ToS) (agora DiffServ e ECN)	Comprimento (pacote)	
32	Identificador			Flags	Offset
64	Tempo de Vida (TTL)		Protocolo	Checksum	
96	Endereço origem				
128	Endereço destino				
160	Opções				
192	Dados				

Figura 10 – Quadro IP.<sup>[1][5]</sup>

### 2.1.3 Camada de Transporte

Nessa camada existem basicamente dois protocolos que são utilizados: o UDP (não orientado a conexão) e o TCP (orientado a conexão). A principal função desta camada é estabelecer uma conexão entre as duas portas que irão trocar dados.<sup>[19]</sup>

Para a indústria, ambos os protocolos podem ser utilizados, dependendo da aplicação e dos requisitos de urgência de transmissão de um determinado dado.<sup>[4][33]</sup> O TCP é utilizado para configuração e parametrização dos elementos da rede, devido a sua lentidão e confirmação de envio da informação. Já o UDP é utilizado para troca de informações entre os elementos da rede, devido a sua rapidez no transporte das mensagens.<sup>[4][33]</sup>

O TCP opera no modo orientado à conexão, ou seja, porta de destino e porta de origem, contendo verificação de erros, multiplexação de dados (pode transmitir vários dados de diferentes mensagens ao mesmo tempo) e controle de fluxo (ajusta o tempo de transmissão de acordo com a quantidade de dados). O UDP opera no modo sem conexão, não havendo confirmação de recebimento da mensagem e contendo oito bytes de cabeçalho. <sup>[19]</sup>

A figura 11 ilustra os cabeçalhos do TCP e UDP, respectivamente.

+	Bits 0 - 3	4 - 9	10 - 15	16 - 31
0	Porta na origem		Porta no destino	
32	Número de sequência			
64	Número de confirmação (ACK)			
96	Offset	Reservados	Flags	Janela Window
128	Checksum		Ponteiro de urgência	
160	Opções (opcional)			
	Padding (até 32)			
224	Dados			

(a)

Porta origem	Porta destino
Comprimento da mensagem	Checksum

(b)

Figura 11 – Quadro TCP (a) e UDP (b). <sup>[1] [13]</sup>

### 3 ETHERNET INDUSTRIAL: PROTOCOLOS

Vários fabricantes criaram seus próprios padrões de redes Ethernet industriais, cada um diferindo do outro em termos de aplicação ao usuário e na utilização ou não de determinadas camadas do padrão TCP/IP. Alguns deles possuem hardwares dedicados do fabricante, o que os tornam pouco competitivos para aplicação industrial. [3][4]

Os quatorze protocolos para Ethernet industrial são: Profinet, Ethernet/IP, HSE, Modbus/TCP, EPA, EPL, EtherCAT, IEC 61850, JetSync, P-Net, Sercos III, SynqNet, TCnet e Vnet/IP. [20]

#### 3.1 Profinet

O Profinet é uma rede padronizada pela Associação Profibus Internacional como uma das quatorze redes de Ethernet industrial. [21] A norma que regulamenta o Profinet é a IEC61158-5 e IEC61158-6, sendo o décimo protocolo incluso nessa norma (*Type 10*). [22]

Basicamente, há dois tipos de redes Profinet: Profinet IO e Profinet CBA. O Profinet IO é utilizado em aplicações em tempo real (rápidas) e o Profinet CBA é utilizado em aplicações onde o tempo não é crítico, por exemplo, na conversão para rede Profibus DP. [22]

A figura 12 ilustra como o Profinet definiu suas camadas baseadas na arquitetura TCP/IP. [20]

**PROFINET E MODELO ISO/OSI**

ISO/OSI		
7b	PROFINET IO Services PROFINET IO Protocol	PROFINET CBA acc. to IEC 61158 Type 10
7a		DCOM Connection oriented RPC
6		empty
5		
4	UDP(RFC 768)	TCP(RFC 793)
3	IP (RFC 791)	
2	Real-Time Enhancements acc. To IEC 61784-2 IEEE802.3, Full-Duplex, IEEE802.1Q, Priority Tagging	
1	IEEE 802.3 100 Base TX , 100 Base FX	

Figura 12 – Arquitetura TCP/IP para Profinet. [20]

Nota-se pela figura acima que o Profinet pode ter três formas distintas de operação, sendo duas delas para tempo real e uma para não tempo real. [23]

A primeira maneira baseia-se na arquitetura TCP/IP pura, utilizando Ethernet na camada um e dois, o IP na camada três e o TCP ou UDP na camada quatro. Essa arquitetura é chamada de *Non-real time (Non-RT)*, pois seu tempo de processamento aproxima-se dos 100ms. A grande aplicação nesse tipo de comunicação é de configuração da rede ou na comunicação com os Proxis, utilizando o Profinet CBA. Os Proxis são conversores de um determinado protocolo em outro (por exemplo, de Profinet para Profibus DP ou de Profinet para Interbus S), conforme mostrado na figura 13. [23]

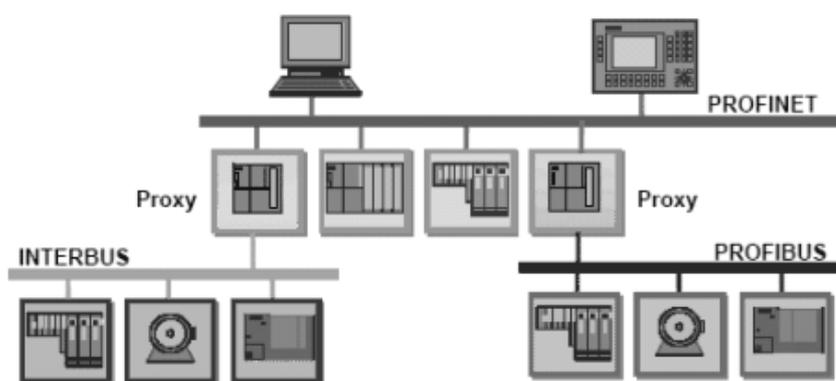


Figura 13 – Proxy Profinet/Profibus DP e Profinet/Interbus S. [24]

A segunda maneira baseia-se no chamado *Soft Real Time (SRT)*, caracterizando-se por ser um canal que interliga diretamente a camada da Ethernet à aplicação. Com a eliminação de vários níveis de protocolo, há uma redução no comprimento das mensagens transmitidas, necessitando de menos tempo para transmitir os dados na rede. Podem-se utilizar os dois tipos de Profinet, CBA e IO, nesse caso. [23]

A terceira maneira baseia-se no conceito de *Isochronous Real Time (IRT)*, para aplicações em que o tempo de resposta é crítico e deve ser menor do que 1ms. Uma aplicação típica deste conceito é o controle de movimento de robôs, quando o tempo de atualização dos dados deve ser pequeno. Utiliza-se apenas o Profinet IO para esse caso. [23]

A figura 14 ilustra os conceitos do *Non-Real-Time* (aplicações com tempos de varredura em torno de 100ms), *Soft Real Time* (aplicações com tempos de varredura em torno de 10ms) e *Isochronous Real Time* (aplicações com tempos de varredura menores do que 1ms).

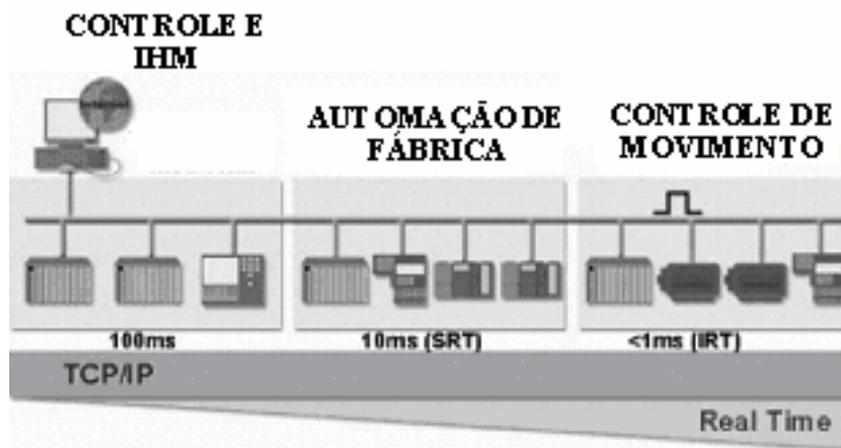


Figura 14 – Comparativo de tempos da rede Profinet. [23]

### 3.1.1 Profinet IO

O Profinet IO é, na realidade, uma extensão do protocolo Profibus DP. Ele opera diretamente com os elementos de campo, realizando leituras de sensores, atualizações dos sinais de saída e controle de diagnósticos da rede. A rede Ethernet industrial Profinet IO descreve um modelo de dispositivo que é baseado em características essenciais do Profibus DP, incluindo canais para cada elemento alocado na rede. [25] As características dos dispositivos de campo são descritas via GSD em uma base XML. [25][26]

O arquivo GSDML (GSD em uma base de programação XML) acompanha todos os elementos da rede Profinet IO e descreve as principais características de cada um deles. O mesmo deve ser fornecido pelo fabricante do equipamento (Anexo A). [22]

Para se conseguir um tempo de resposta utilizando o Profinet IO na configuração IRT (*Isochronous Real Time*), é necessário um hardware específico que consiga processar as informações nesse tempo (para o caso do IRT). Assim, a Siemens desenvolveu o ERTEC 400 que é um processador voltado às aplicações em Profinet. [27]

O quadro da rede Profinet IO é mostrado na figura 15 e segue a mesma estrutura do campo Ethernet falado anteriormente. A grande diferença está no campo Frame ID. Nesse campo é possível distinguir se o quadro é IRT, SRT ou Non-RT, de acordo com os dois bytes do campo (Anexo B). [22] Cada valor deste campo, define a maneira como as mensagens serão trafegadas na rede, por exemplo: de 0000h a 00FFh, quadro IRT, de 8000h a FBFFh, quadro SRT e de FC00h a FE02h, quadro Non-RT. De acordo com a figura abaixo, a quantidade

mínima de bytes do quadro Profinet IO é de setenta e dois bytes, contando cabeçalho, informação e verificação de erro. [22]

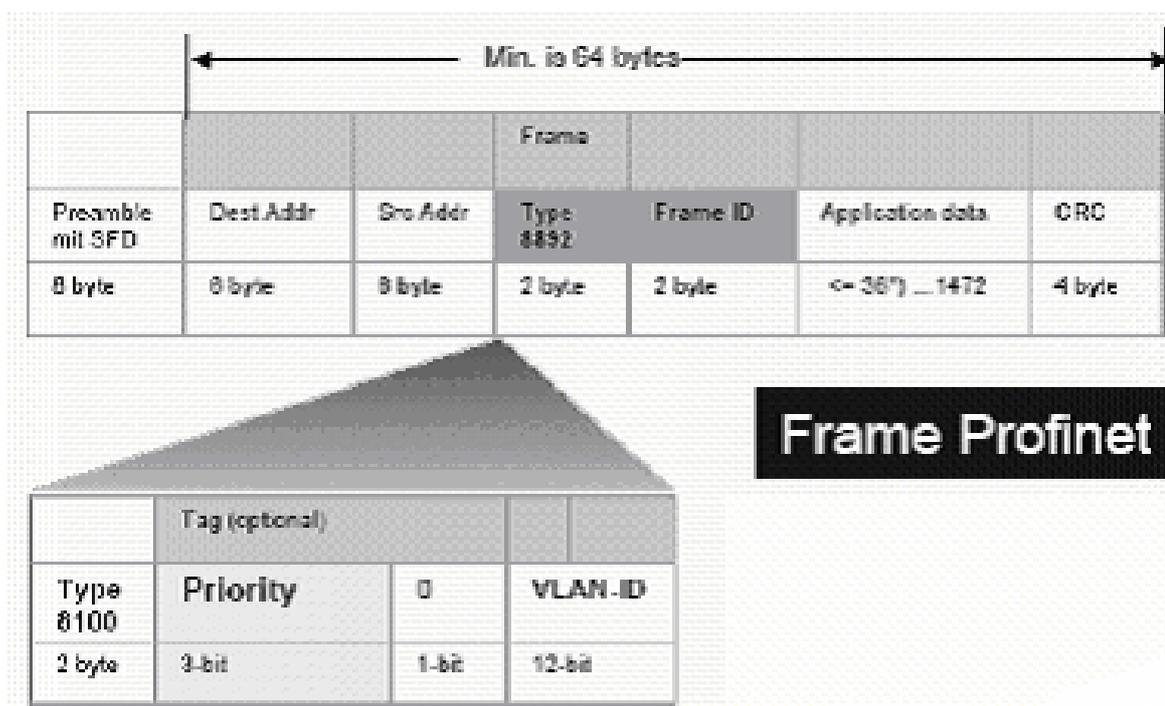


Figura 15 – Quadro Profinet IO. [22]

O preâmbulo são bits auxiliares que identificam o início da transmissão. Servem para sincronizar o elemento que deseja transmitir seus dados com o *clock* da rede. O padrão para cada byte é AAh (10101010). [22]

Os endereços de origem e destino identificam quem está transmitindo e quem está recebendo as informações. Esses endereços são conhecidos como endereços MAC e possuem quarenta e oito bits (seis bytes) de comprimento. [22] O endereço MAC é o endereço físico do elemento de rede. Os três primeiro bytes são destinados à identificação do fabricante, os três posteriores são fornecidos pelo fabricante para identificação do módulo na rede Profinet. [22]

O campo Tipo e Frame ID identificam o tipo de informação a ser transmitida e o tamanho do campo de dados. [22] O campo de dados pode variar de trinta e seis a mil quatrocentos e setenta e dois bytes. No quadro Ethernet IEEE802.3, a variação do campo de dados é de quarenta e seis a mil e quinhentos bytes (cabeçalho e informação). Essa diferença é justamente para aplicações IRT, com a diminuição do campo de dados e, conseqüentemente, do tempo de reposta da rede. [22]

A verificação de erro é do tipo CRC, onde se tem um polinômio de grau trinta e dois para efetuar a operação matemática de verificação de erro na mensagem transmitida. [22]

Outro ponto a ser destacado é o atraso da rede com relação ao *switch*. O *switch* gera um pequeno atraso na rede que será abordado mais adiante. [28]

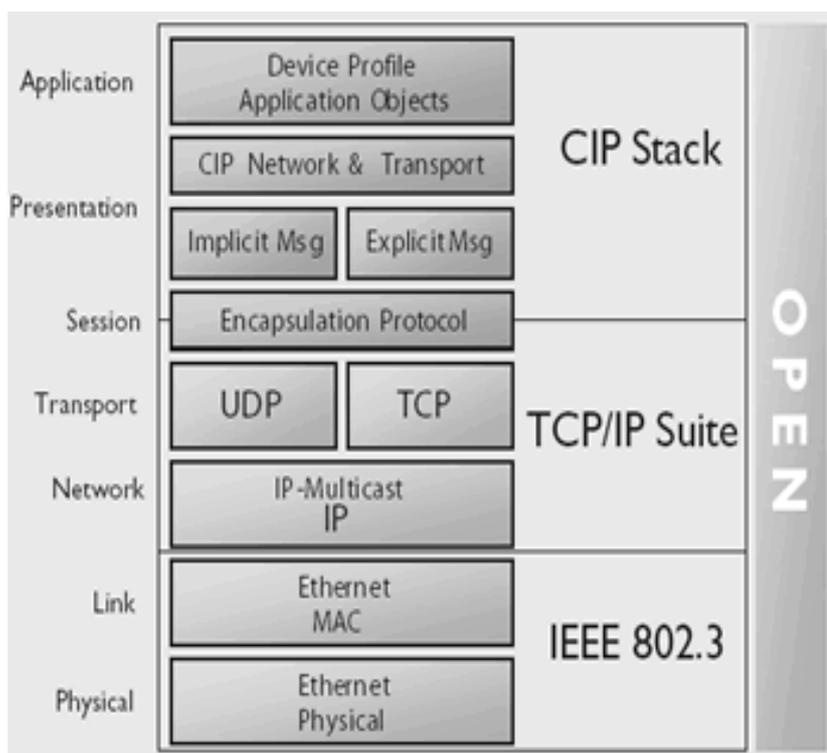
É importante levar em consideração esse tempo na hora de calcular o ciclo de varredura da rede ou no atraso que um elemento pode causar se houver muitos *switches* na rede. [25] [29]

### 3.2 Ethernet/IP

O Ethernet/IP é uma rede Ethernet industrial padronizada pela ODVA e baseia-se na arquitetura encapsulada do TCP/IP. O termo IP significa “*Industrial Protocol*” e não deve ser confundido com o protocolo IP descrito anteriormente. [4]

Enquanto o Profinet possui três tipos de comunicação e duas redes distintas (Profinet IO e Profinet CBA), o Ethernet/IP segue exatamente o modelo TCP/IP. [33]

Porém, é válido ressaltar que há dois tipos diferentes de operação. Uma delas é o TCP utilizando a camada de aplicação definida anteriormente. Outro método é utilizar o UDP (que possui um quadro menor) para transportar os dados até a CIP (*Control Information Protocol*), uma camada de aplicação específica da ODVA. Na CIP há protocolos específicos para inversores de frequência, posicionadores de válvulas, elementos pneumáticos, I/O’s discretos, entre outros. A figura 16 ilustra a divisão em camadas da rede Ethernet/IP. [30]



**Figura 16– Arquitetura TCP/IP para Ethernet/IP.** <sup>[30]</sup>

O uso de cada comunicação (TCP ou UDP) depende muito da aplicação do usuário. Assim, as transmissões podem ser: <sup>[31][32]</sup>

**Explícitas:** Utiliza o TCP e a camada CIP da ODVA. Aplicado na troca de informações entre PLC's e IHM's (tempo de ciclo de 100ms ou maior) ou para configuração de elementos da rede à longa distância (por exemplo, um *set-point* de um transmissor de pressão). Tais tarefas não são críticas, ou seja, não requerem um baixo tempo de processamento. <sup>[31][32]</sup>

**Implícitas:** Utiliza o UDP e a camada CIP da ODVA. Aplicado para comunicações entre I/O's (tempo de ciclo em torno de 10ms), quando o tempo de resposta deve ser o menor possível. Essa tarefa deve ser cíclica, requerendo um baixo tempo de processamento. <sup>[31][32]</sup>

Tipos de Transmissão	Tipo de Mensagem	Descrição	Exemplo
Informação	Explícito	Transferência de Dados Não Crítica	Leitura / Escrita via instrução de mensagem
Dados I/O	Implícito	Dados de Tempo-Real	Dados de Controle em tempo-real de um Dispositivo Remoto I/O
Sincronização em Tempo-Real	Implícito	Sincronização em Tempo-Real	Troca de Dados em Tempo-Real entre dois processadores

**Tabela 1 – Resumo dos tipos de comunicação para rede Ethernet/IP.** <sup>[33]</sup>

A camada de aplicação CIP desenvolvida pela ODVA não se comunica com a camada de aplicação do Profinet, por exemplo. Assim, não há interoperabilidade entre as diversas redes Ethernet. <sup>[3][33]</sup>

O conceito de EDS, utilizado na rede Devicenet, continua válido para o Ethernet/IP (Anexo C). Conforme a norma da ODVA <sup>[31]</sup>, os estudos realizados mostram que o método Cíclico é o que possui melhor desempenho para troca de dados implícitos, utilizando o UDP como transporte. Assim, grande parte dos dados trafegados na rede Ethernet/IP utiliza Ethernet nas camadas um e dois, IP na camada três e UDP na camada quatro. <sup>[31]</sup>

### 3.3 HSE – High Speed Ethernet

O HSE também é uma tecnologia aplicada a Ethernet industrial, desenvolvida pela Fieldbus Foundation. <sup>[34]</sup>

A Fieldbus Foundation incorporou a rede Ethernet dentro de sua especificação. Esta rede não visa substituir a rede Fieldbus Foundation (também chamada de H1), mas estender seu espectro de aplicação para interligar dispositivos como PLC's a sistemas de supervisão. Esta rede utiliza UDP/IP sobre a camada de enlace Ethernet. <sup>[34][35]</sup>

A rede HSE suporta todas as funcionalidades das camadas de enlace de dados da especificação H1, possibilitando o sincronismo de uma ligação em cascata entre malhas localizadas entre segmentos H1 independentes. <sup>[35]</sup> A interligação entre uma rede H1 e rede HSE pode ser feita através de um *linking device*, que converte o dado de diversos segmentos H1 em mensagens HSE, utilizando a arquitetura TCP/IP. <sup>[36]</sup>

A tabela 2 mostra um comparativo entre os sistemas H1 e HSE, evidenciando suas diferenças e principais características. <sup>[37]</sup>

	H1	HSE
Velocidade	31.25 kbps	100 Mbps
Distância	1900 m	100 m
Dois fios	Sim	Não
Multidrop	Sim	Não
Alimentação pelo barramento	Sim	Não
Segurança Intrínseca	Sim	Não
Redundância do meio	Não	Sim
Determinístico	Sim	Sim

**Tabela 2 – Comparativo H1/HSE.** <sup>[37]</sup>

A rede HSE pode operar no modo *multicast* (um dado pode ser aproveitado por vários elementos da rede), podendo ser usado por vários receptores em uma única comunicação. Este é um caso típico na automação em que um dado do sensor de leitura é frequentemente usado em mais de um lugar. <sup>[34][36]</sup>

O HSE possui quatro tipos básicos de categorias de dispositivos: <sup>[34]</sup>

*Host Device (HD)*: é a estação de trabalho (Computador).

*Link Device (LD)*: é um nó HSE para conectar um ou mais segmentos H1 ao HSE.

*Gateway Device (GD)*: é um nó HSE para conectar uma ou mais redes de outros fabricantes à rede HSE.

*Ethernet Device (ED)*: é um nó HSE com condições de conexão direta às aplicações de controle e medição de equipamentos de campo. <sup>[34]</sup>

A figura 17 ilustra uma aplicação industrial em Singapura, utilizando uma rede HSE e os dispositivos listados acima.

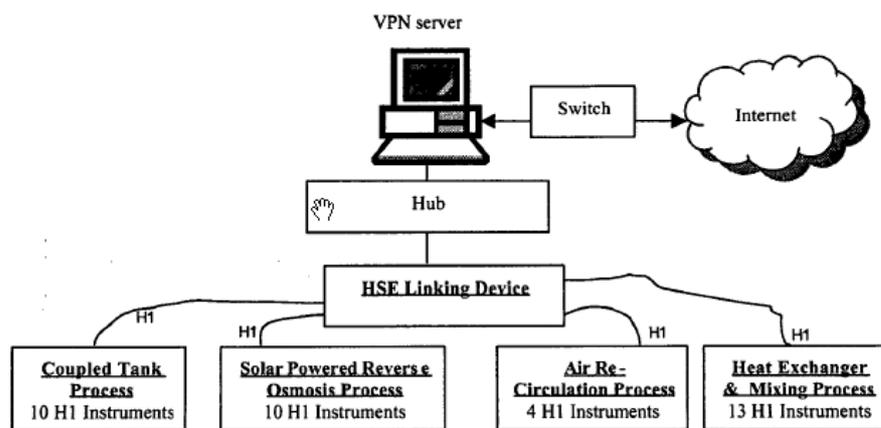


Figura 17 – Exemplo de uma aplicação em HSE em uma fábrica em Singapura. [34]

### 3.4 O meio físico IEEE802.3 para redes Ethernet industriais

Para o meio físico, pode ser utilizada a seguinte configuração para qualquer uma das redes Ethernet industriais: [22]

Tipo de cabo	Velocidade da rede	Distância máxima sem repetidor	Número máximo de elementos
Par trançado blindado 10BASE-T	10Mbps	100 metros	1024
Par trançado blindado 100BASE-T	100Mbps	100 metros	1024
Par trançado blindado 1000BASE-T	1000Mbps	100 metros	1024
Fibra óptica 10BASE-FL	10Mbps	2000 metros	1024
Fibra óptica 100BASE-FL	100Mbps	2000 metros	1024

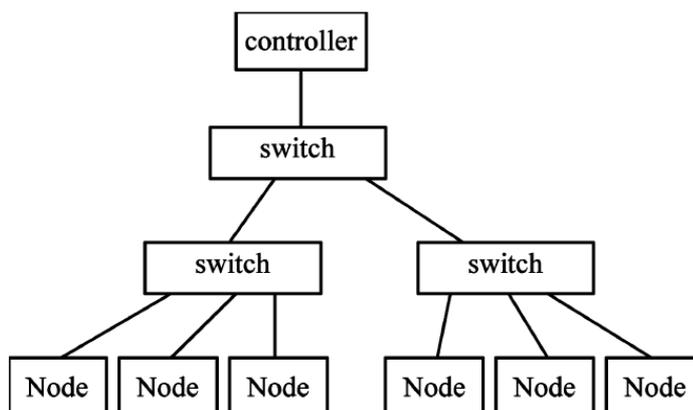
Tabela 3 – Características físicas das redes Ethernet industriais. [22]

Para a configuração utilizando par trançado blindado, o cabo possui dois pares (quatro vias), categoria 5 (com *Shield*). [33] Há a possibilidade de utilização de repetidores

(*hubs* industriais) ou *switches* industriais que podem aumentar a distância da rede para até 500 metros (utilizando par trançado).<sup>[22] [33]</sup>

Já para a configuração utilizando fibra óptica é possível utilizar repetidores ópticos e, dependendo do tipo de fibra utilizada (monomodo ou multimodo), pode-se chegar a distâncias de dezenas de quilômetros, colocando vários repetidores em cascata durante o percurso do sinal óptico.<sup>[22] [33]</sup>

A topologia da rede é, comumente, projetada em estrela, utilizando o mestre (*controller*) como elemento central da rede, os *switches* industriais especiais para derivar e interligar os elementos da rede e os módulos de campo (*nodes*) onde são conectados os sensores e atuadores.<sup>[32] [38]</sup> A figura 18 ilustra uma topologia típica para uma rede Ethernet industrial.<sup>[32] [38]</sup>



**Figura 18 – Topologia para uma rede Ethernet industrial qualquer.**<sup>[32]</sup>

## **4 NECESSIDADE DE UMA FERRAMENTA PARA ETHERNET INDUSTRIAL**

As dificuldades encontradas pelos usuários estão no momento da definição dos elementos da rede e suas configurações, assim como toda a verificação do meio físico da rede.

Atualmente, a dificuldade na utilização das redes industriais é a interoperabilidade entre os equipamentos dos diversos fabricantes. <sup>[22]</sup> Há uma variedade enorme de equipamentos, cabos, conectores e outros elementos aplicados a uma mesma rede industrial.

É muito comum um usuário escolher uma tecnologia que melhor lhe sirva naquele momento e tornar-se dependente dela depois.

Quando, então, ele realiza o projeto de sua planta industrial, há vários problemas que são muito comuns de ocorrer, mas que não são percebidos na fase de projeto, devido à falta de informação e recursos de simulação da rede em questão.

Tais problemas são:

- Um grande tempo para partida da planta industrial devido a um erro na parte física da rede (comprimentos ou características elétricas do cabo inválidas).

- Os custos com consultorias e reparos da planta são altos, pois os equipamentos já estão instalados.

- Parte lógica da rede mal dimensionada (tempo de varredura inadequado para o processo produtivo em questão).

- O conhecimento da tecnologia empregada não é discutido.

Os textos abaixo ilustram esses problemas citados acima na prática para uma rede industrial instalada na prática. Alguns estudos de casos são evidenciados através de relatórios reais elaborados por uma empresa do segmento de redes industriais na visita técnica a um cliente. <sup>[39]</sup>

**7.1 Rede 1:**

Problemas :

- apresentava ruído no sinal de comunicação (pico de tensão negativo entre CANH e CANL) e tensão de modo comum (entre V- e GND) com valor de 1,8v.
- tráfego de dados na rede elevado, maior que 95%.
- sensor duplo do nó 25 com defeito, porém não estava gerando problemas na rede.

Causas :

- o curto-circuito necessário entre V- e GND se localizava no device box junto ao PLC, sendo que o recomendado pela ODVA é que o mesmo seja próximo à fonte de alimentação da rede.
- o tráfego estava elevado devido ao SCAN time do scanner estar muito baixo (10mS) e pelo fato de haver mais de 4000 bits de transmissão a cada 10mS.
- retiramos o sensor e analisamos no laboratório da Assistência Técnica, concluindo que se trata de uma falha no microcontrolador da peça.

**Figura 19 – Estudo de caso 1: Relatório de visita técnica.** <sup>[39]</sup>

Nessa parte do relatório do estudo de caso um, é notório perceber que as causas dos problemas são provenientes da parte física (conexão inadequada da rede - problema um) e lógica (tempo de varredura da rede muito pequeno, 95% - problema dois). Tudo poderia ser evitado se o usuário pudesse, de alguma maneira, simular ou prever alguns desses problemas, antes de ter qualquer equipamento conectado na rede. Como os equipamentos já estavam instalados, toda e qualquer mudança é muito trabalhosa e onera altos custos de consultoria.

A seguir há outro estudo de caso, relativo a um outro cliente e o problema é, praticamente, o mesmo.

**3.1 Rede 2:**

Problemas:

- Apresentava perda de comunicação no nó 37, devido a distância da rede estar acima do especificado por norma (norma 500 metros e distância medida 550 metros).
- Tráfego de dados na rede elevado, maior que 98%.
- Apresentava perda de comunicação no nó 55, devido a distância da rede estar acima do especificado por norma (norma 500 metros e distância medida 600 metros).

Causas:

- Erro no projeto e acréscimo de tubulação externa, que aumentou a distância da rede.
- O tráfego estava elevado devido ao tempo de SCAN do PLC estar muito baixo (15ms).

**Figura 20 – Estudo de caso 2: Relatório de visita técnica.** <sup>[39]</sup>

No estudo de caso dois, é possível notar que novamente os problemas são provenientes de erros na parte física (distância incorreta da rede) ou lógica (tempo de varredura muito pequeno para a rede instalada, 98%). Esse estudo de caso gerou um custo muito alto na resolução do problema da parte física da rede, pois os cabos já estavam conectados aos equipamentos, sendo necessário alterar todo o projeto físico da rede.

Assim, os problemas relativos à parte física ou lógica da rede são muito comuns de ocorrer no meio industrial brasileiro. Outros estudos de casos poderiam ser citados nesse trabalho, porém a grande maioria evidencia os problemas citados acima.

Assim, seria de grande utilidade ao usuário ter um ambiente gráfico para simulação de sua rede e verificação dos parâmetros configurados. Esse procedimento de simulação pode evitar futuros transtornos (como mostrado nos relatórios acima) e perdas de tempo na partida da sua planta industrial. Vários problemas relativos à parte física ou lógica da rede em questão poderiam ser detectados na simulação, evitando altos custos de cabos e ineficiência da rede.

No capítulo seis, é evidenciado todo o desenvolvimento, testes funcionais e resultados de uma ferramenta de simulação aplicada às redes Ethernet industriais para solução dos problemas citados nos estudos de casos.

#### 4.1 Trabalhos já realizados

Alguns trabalhos realizados já propuseram de alguma maneira a solução do problema acima. Porém a solução não está totalmente resolvida do ponto de vista do usuário.

O primeiro trabalho é um software da empresa *Emerson Process Management* [40]. Esse software denomina-se “*Segment Design Tool*” e simula apenas o meio físico para a rede Fieldbus Foundation [35], não se importando com a parte lógica da rede. A seguir, há uma simulação de um elemento controlador e um elemento de campo sendo interligados por um cabo com distância total de 101 metros.

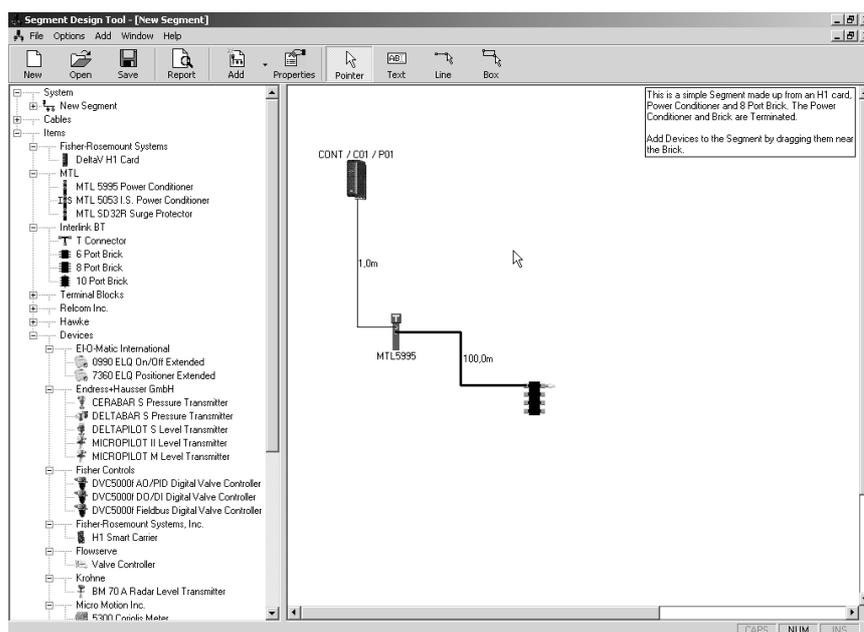


Figura 21 – Tela do software *Segment Design Tool*. [40]

O segundo trabalho, simula a comunicação para rede Ethernet/IP da ODVA [33] e tem como função a transmissão de dados entre o controlador mestre e os módulos de campo. Esses softwares possibilitam a verificação da comunicação e da configuração dos parâmetros do controlador via protocolo UDP ou TCP, como falado anteriormente, ler as entradas dos sensores e atuar nas saídas dos atuadores. As figuras 22 e 23 mostram o software do controlador mestre e do módulo de campo. [33]

Esses softwares serão detalhados adiante para comparação dos resultados obtidos entre a ferramenta proposta e a norma Ethernet industrial. O aplicativo do controlador mestre lê e envia informações ao módulo de campo, que possui dois bytes de entrada (dezesesseis chaves) e dois bytes de saída (dezesesseis lâmpadas) via UDP. Os círculos inferiores mostram os parâmetros do controlador mestre e do módulo de campo que são trafegados via TCP.

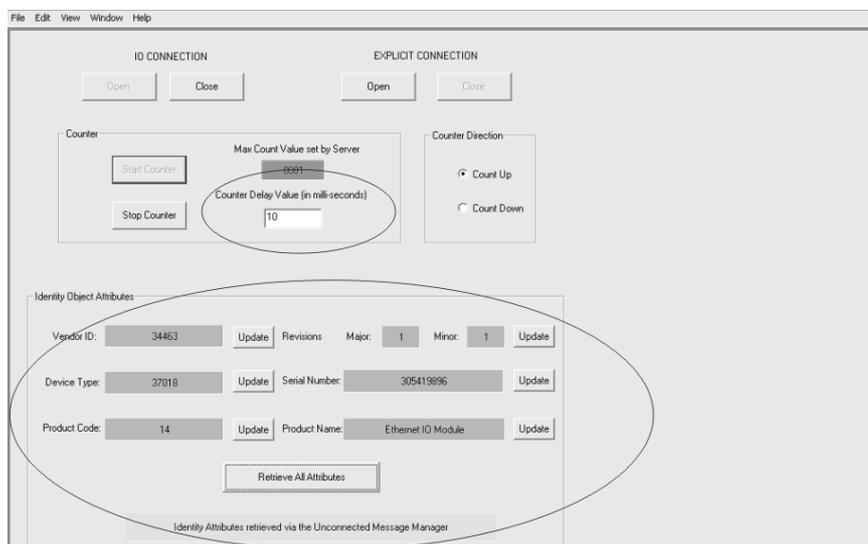


Figura 22 – Software do controlador mestre Ethernet/IP. [33]

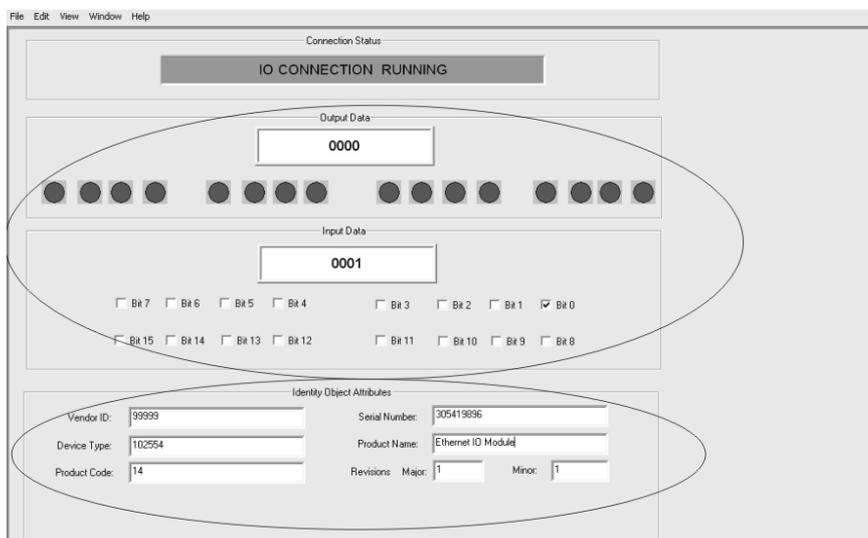


Figura 23 – Software do módulo de campo Ethernet/IP. [33]

## 4.2 Tempos de atraso na rede Ethernet industrial

Outro aspecto a ser considerado são os tempos de atraso na comunicação entre controlador mestre e os módulos de campo.

Basicamente, os tempos envolvidos na comunicação são: <sup>[41]</sup><sup>[42]</sup>

- Tempo de envio da informação.
- Tempo de resposta da informação.
- Tempo de latência (atraso na distribuição da informação pelo *hub* ou *switch* e processamento da informação nos elementos da rede). <sup>[41]</sup><sup>[42]</sup>

Os dois primeiros tempos dependem da quantidade de informação que se deseja trafegar e da taxa de transmissão da rede. Já o terceiro tempo pode variar ligeiramente dependendo do número de *switches* ou *hubs* entre os elementos que estão trocando informação e da capacidade de processamento desses elementos. De acordo com HELD <sup>[5]</sup>, POPP e WEBBER <sup>[22]</sup> e XI <sup>[41]</sup>, é possível realizar uma aproximação desse tempo para 9,6us entre cada elemento que está trocando informação na rede. Esse valor é um valor médio, calculado empiricamente pelos autores e pode ser chamado de *dead time* (tempo morto). <sup>[5]</sup><sup>[22]</sup>  
[41]

## 5 SOLUÇÃO PROPOSTA

Para solucionar os problemas listados no capítulo anterior, foi desenvolvida uma ferramenta de simulação com o objetivo de eliminar os problemas da parte física e lógica da rede Ethernet industrial. Como as redes Ethernet industrial seguem um mesmo padrão de encapsulamento das informações, a solução se preocupa apenas com o tráfego de informações dos I/O's na rede (Ethernet, IP e UDP), não se importando com as configurações à distância e a parametrização dos módulos (Ethernet, IP e TCP), pois são dados trafegados raramente na rede (somente na configuração inicial do equipamento, por exemplo, uma configuração de 4-20mA de uma entrada analógica).

A figura 24 ilustra os conceitos do UDP e TCP aplicados à Ethernet industrial.

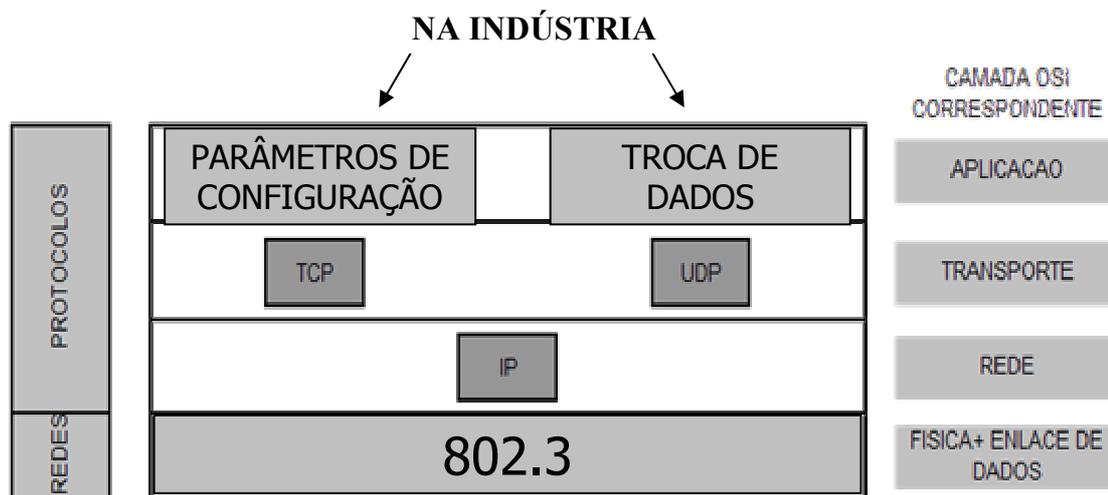


Figura 24 – Comparação entre UDP e TCP para Ethernet industrial. <sup>[33]</sup>

Outra característica do software é que ele não considera a programação do usuário, importando-se, único e exclusivamente, com os dados lidos e escritos na rede. O programa aplicativo pode conter uma única linha ou até milhares de linhas, tornando-se difícil de mensurar o tempo gasto para executar as funções pertinentes ao controlador mestre.

Como exposto anteriormente, algumas redes, como o Profinet (IRT ou SRT), por exemplo, utilizam hardwares dedicados para saltar da camada Ethernet diretamente para a camada de aplicação do usuário. Essa aplicação específica também não será considerada pelo simulador devido à particularidade de sua aplicação em sistemas industriais reais.

## 5.1 Filosofia de desenvolvimento do software

Para o desenvolvimento do software foi utilizada a filosofia de orientação a objeto, devido a facilidade na identificação e codificação das diversas classes da ferramenta, sendo sua implementação planejada para o ambiente *Borland Builder C++*.<sup>[43][44]</sup>

Os princípios da orientação a objeto foram levados em consideração para o desenvolvimento desse trabalho.

A orientação a objetos é considerada a maneira mais natural de se analisar o mundo. Logo, ela permite construir sistemas computacionais melhores e de maneira mais simples. Isto se deve ao fato de apresentar características essenciais como: abstração, agregação, encapsulamento, herança e polimorfismo.<sup>[45][46]</sup>

- Abstração: preservar a liberdade de se tomar decisões preservando, tanto quanto possível, os comprometimentos prematuros.

- Agregação: é o relacionamento nos quais os objetos, que representam os componentes, são associados a um outro objeto, o qual representa a estrutura inteira.

- Encapsulamento: é o ato de ocultar do usuário as informações que não são de seu interesse. Deste modo, a comunicação entre objetos é realizada sem a necessidade de se preocupar com a complexidade interna de cada classe.

- Herança: está relacionada com a hierarquia e as relações entre os objetos. Ela permite associar classes descendentes de uma classe superior, implementando, assim, métodos e atributos que se diferenciam da classe pai.

- Polimorfismo: processos que executam funções semelhantes em componentes diferentes devem ser chamados pelo mesmo nome. É a habilidade de duas ou mais classes responderem à mesma solicitação, cada uma a seu modo. Conceito de permitir uma única interface para múltiplas funções.<sup>[45][46]</sup>

## 5.2 Funcionalidades necessárias no software

Para a implementação do software, foi necessária a criação de quatro elementos básicos da rede: o controlador mestre, o *switch*, o módulo de campo e o cabo categoria 5.

O controlador mestre é o elemento chave na rede, assim, toda configuração necessária para o funcionamento da simulação será iniciada a partir deste dispositivo. O *switch* se apresenta apenas como repetidor e derivador do sinal de forma determinística e com

capacidade de programação de prioridades em suas portas. O módulo de campo representa qualquer módulo que se deseja acoplar à rede para ligação dos sensores e atuadores.

Na ferramenta computacional proposta, o cabo Ethernet é o elemento que conecta os elementos da rede entre si. Portanto, é o elemento que realmente determina quem faz parte da rede e sua respectiva limitação física (distância).

Resumindo, têm-se as seguintes configurações disponíveis para o usuário e elementos de rede:

Elemento	Configuração disponível para o usuário
Controlador mestre	Taxa de transmissão, tempo de varredura e número máximo de módulos de campo na rede.
<i>Switch</i>	Número de portas (quatro ou oito portas).
Módulo de campo	Quantidade de bytes de entrada e quantidade de bytes de saída, além do endereço IP do módulo na rede simulada.
Cabo Ethernet	Distância início-fim de um trecho, capacitância e resistência do trecho analisado.

**Tabela 4 – Principais funções dos elementos do software.**

### 5.3 Diagramas de classes chaves do software

Para a sistematização correta dos elementos da rede e da construção do software foi necessário o uso de classes computacionais, a fim de determinar as características de cada elemento no auxílio à implementação do código fonte do software.

- Classe *CEthernetDevices*: A classe *CEthernetDevices* é a classe base para criação dos elementos da rede, com exceção do cabo Ethernet que não deriva desta classe, mas tem um dos seus objetos utilizado internamente nesta classe. Essa classe foi definida como base, pois apresenta todos os métodos e variáveis comuns aos elementos de rede, tais como: métodos de localização na tela, identificação do dispositivo, imagem, tamanho da tela, etc.

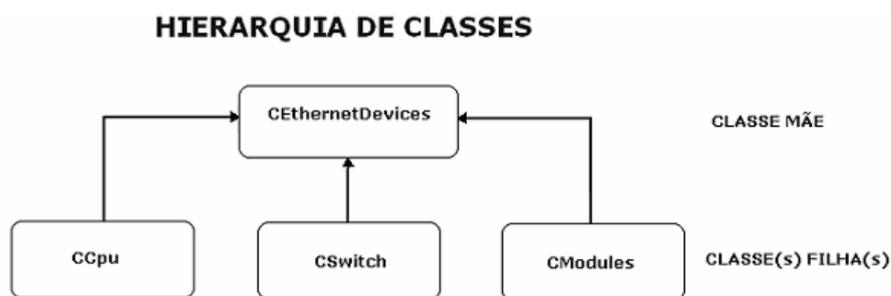
- Classe *CCpu*: A classe *CCpu* é a classe que se identifica ao elemento controlador mestre na rede. Esta classe contém todos os métodos derivados da classe base *CEthernetDevices* e mais os métodos específicos para manuseio do controlador mestre.

- Classe *CSwitch*: A classe *CSwitch*, também derivada de *CEthernetDevices*, apresenta apenas variáveis relacionadas ao controle de seleção do *switch* (quatro ou oito portas).

- Classe CModules: A classe CModules, acompanhando toda a tendência do software, também é derivada de CEthernetDevices e apresenta variáveis e métodos internos para gerenciamento de cada módulo de campo inserido na rede (endereço IP e quantidade bytes de entrada e saída).

- Classe TCable: A classe TCable não é derivada de CEthernetDevices. Essa classe opera de forma independente das outras e tem por função realizar a conexão entre dois elementos distintos na rede.

A seguir, a figura 25 ilustra a hierarquia entre as classes e suas ligações entre si. Para facilitar a implementação, as classes CCpu, CSwitch e CModules derivam da classe mãe CEthernetDevices.



**Figura 25 – Diagrama de hierarquia de classes.**

No apêndice A, há a codificação das classes listadas acima no *Borland Builder C++*.

No apêndice D, segue toda a documentação UML gerada para a codificação da ferramenta computacional proposta, utilizando o diagrama de classes para representação, a fim de facilitar a codificação e implantação da ferramenta. A UML é uma linguagem visual que auxilia no desenvolvimento de um software orientado a objeto. <sup>[47]</sup> <sup>[48]</sup> Ela utiliza uma forma de modelamento padronizado para classes, objetos e diagramas de decisão de estados a fim de facilitar a codificação, implementação e teste das idéias propostas. <sup>[47]</sup> <sup>[48]</sup>

#### **5.4 Funções de cada elemento e cálculo de ocupação da rede**

Para melhor entendimento, o software está basicamente dividido em duas grandes aplicações: a primeira refere-se à parte lógica da rede (cálculo do tempo de ocupação da rede em relação ao tempo de varredura) e a segunda refere-se à parte física da rede (conexão entre os elementos, cálculo de capacitância e resistência de cabo).

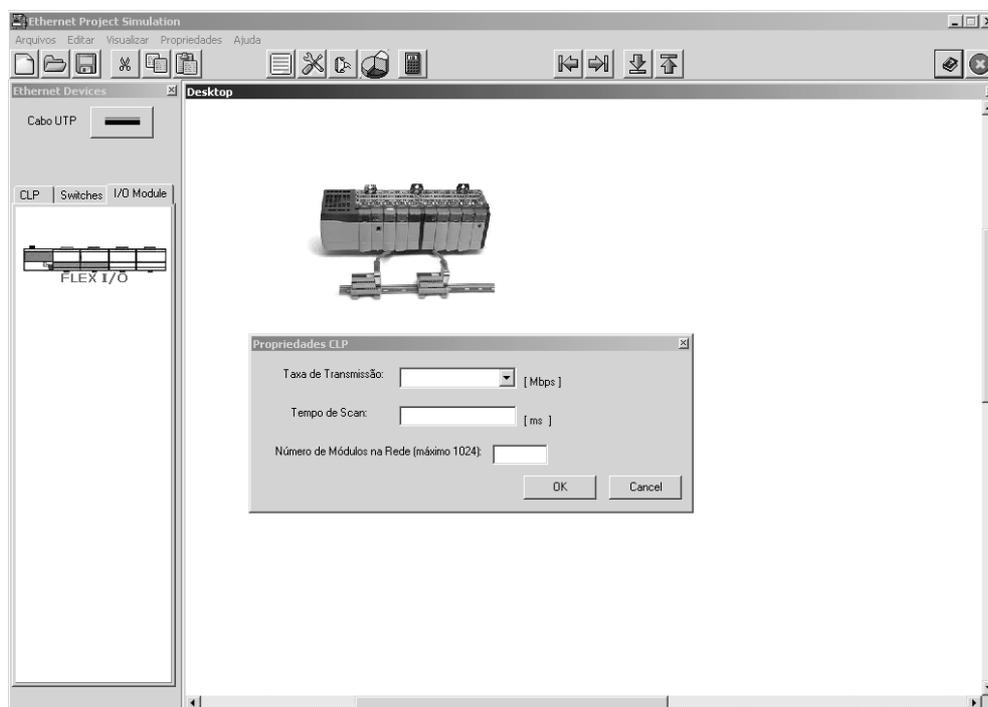
Para realizar a análise lógica da rede simulada, é necessário que alguns parâmetros estejam configurados, para que seja possível calcular a medida da ocupação de tempo de cada módulo na rede.

Assim, para o controlador mestre tem-se:

- Taxa de transmissão da rede: 10Mbps, 100Mbps ou 1Gbps.
- Tempo de varredura (*scan*) da rede: valor em ms.
- Quantidade de módulos de campo a serem inseridos na rede.

As figuras utilizadas na ferramenta para o controlador mestre, os *switches* e os módulos de campo foram retiradas dos arquivos da Rockwell. [58]

A tela de configuração desses parâmetros está ilustrada abaixo na figura 26.



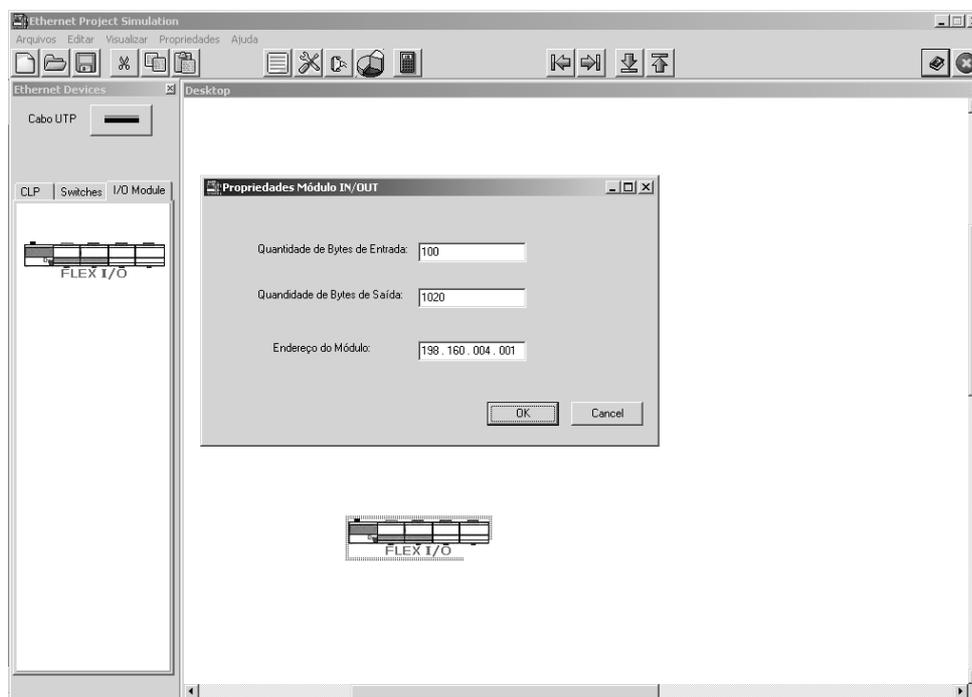
**Figura 26 – Parâmetros de configuração do controlador mestre.**

O controlador mestre é responsável por toda a comunicação, programação e controle da rede Ethernet industrial. O tempo de varredura é um importante parâmetro que indica quanto tempo é necessário para o controlador mestre ler todas as entradas da rede, executar o software aplicativo do usuário e atualizar todas as saídas. [32] [33] Uma rede Ethernet industrial só pode possuir um controlador mestre. [32] [33]

Para o módulo de campo, os parâmetros são os seguintes:

- Quantidade de bytes de entrada e saída.
- Endereço IP do módulo na rede.

Esses parâmetros dimensionam cada módulo de campo inserido na rede Ethernet industrial proposta. O número máximo de bytes efetivos para entrada ou para saída é de mil quatrocentos e setenta e dois, como visto anteriormente.



**Figura 27 - Parâmetros de configuração dos módulos de campo.**

Para realização do cálculo de ocupação do tempo de todos os módulos de campo em relação ao tempo de varredura, deve-se ter em mente as seguintes condições:

Quadro Ethernet:

- 64 bits preâmbulo = 8 bytes
- 48 bits de Endereço de destino = 6 bytes
- 48 bits de Endereço fonte = 6 bytes
- 16 bits de Tipo = 2 bytes
- 32 bits de FSC = 4 bytes (detecção de erros)
- Total de bytes do quadro = 26 Bytes

Quadro IP:

- Cabeçalho IP = 20 bytes

Quadro UDP:

- Cabeçalho UDP = 8 bytes (endereço destino e fonte)

Logo, a quantidade total de bytes de cabeçalho é de cinqüenta e quatro bytes. Como a quantidade de bytes de informação deve estar entre quarenta e seis e mil quatrocentos e setenta e dois bytes (quadro Ethernet entre setenta e dois e mil quinhentos e vinte e seis bytes) e levando-se em consideração o dead time de 9,6us, já explicado anteriormente, devem-se fazer duas considerações distintas: <sup>[22]</sup><sup>[33]</sup>

1 - Se a quantidade de bytes de entrada ou a quantidade de bytes de saída for maior ou igual a dezoito ( $\geq 18$ ), então se faz o cálculo de seguinte forma:

$$\text{Tempo\_utilizado\_módulo\_input} = \frac{[(\text{quantidade bytes entrada} + 54) * 8]}{\text{Taxa\_transmissão}}$$

**Equação 1 – Cálculo do tempo utilizado para cada módulo, bytes de entrada.**

$$\text{Tempo\_utilizado\_módulo\_output} = \frac{[(\text{quantidade bytes saída} + 54) * 8]}{\text{Taxa transmissão}}$$

**Equação 2 - Cálculo do tempo utilizado para cada módulo, bytes de saída.**

$$\text{Tempo\_utilizado\_total} = \sum[\text{Tempo\_utilizado\_módulo\_output} + \text{Tempo\_utilizado\_módulo\_input} + (\text{quantidade\_módulos} \times 9,6 \times 10^{-6})]$$

**Equação 3 – Cálculo do tempo utilizado total (todos os módulos de campo).**

$$\text{Tempo\_disponível} = \text{Tempo\_varredura} - \text{Tempo\_utilizado\_total}$$

**Equação 4 – Cálculo do tempo disponível.**

Exemplo 1:

Controlador mestre – 10Mbps, 1ms, 2 módulos de campo;

Módulo campo 192.168.010.002 – 100 bytes de entrada e 100 bytes de saída;

Módulo de campo 192.168.010.004 – 50 bytes de entrada e 50 bytes de saída.

Dead\_time = 9,6us

Tempo\_utilizado\_módulo\_192.168.010.002\_INPUT = 123,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_192.168.010.002\_OUTPUT = 123,2us

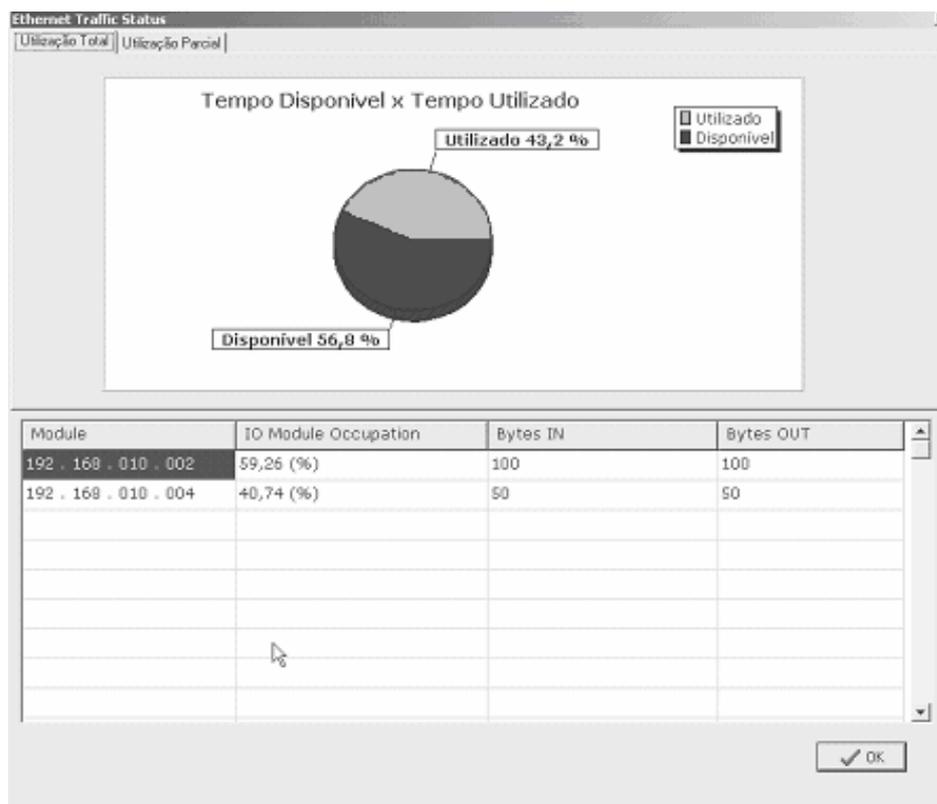
Tempo\_utilizado\_módulo\_192.168.010.004\_INPUT = 83,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_192.168.010.004\_OUTPUT = 83,2us

Tempo\_utilizado\_total = 432us

$$\text{Tempo\_disponível} = 0,001 - 0,000432 = \mathbf{568us}$$

A figura 28 ilustra o exemplo proposto acima já implementado para o software. A parte cinza claro indica a porcentagem do tempo utilizado em relação ao tempo de varredura (no caso, 1ms), 43,2% ou 432us. A parte cinza escuro indica o tempo livre para alocar outros novos módulos de campo na rede, 56,8% ou 568us.



**Figura 28 – Simulação final para exemplo citado acima.**

Há a opção de se visualizar a influência de cada módulo separadamente na rede. Neste caso, cada módulo tem uma porcentagem diferente em relação ao tempo utilizado total, dependendo da quantidade de informação a ser transmitida.

$$\text{Porcentagem\_módulo} = \frac{(\text{Tempo\_utilizado\_módulo\_output} + \text{Tempo\_utilizado\_módulo\_input} + 9,6 \times 10^{-6})}{\text{Tempo\_utilizado\_total}}$$

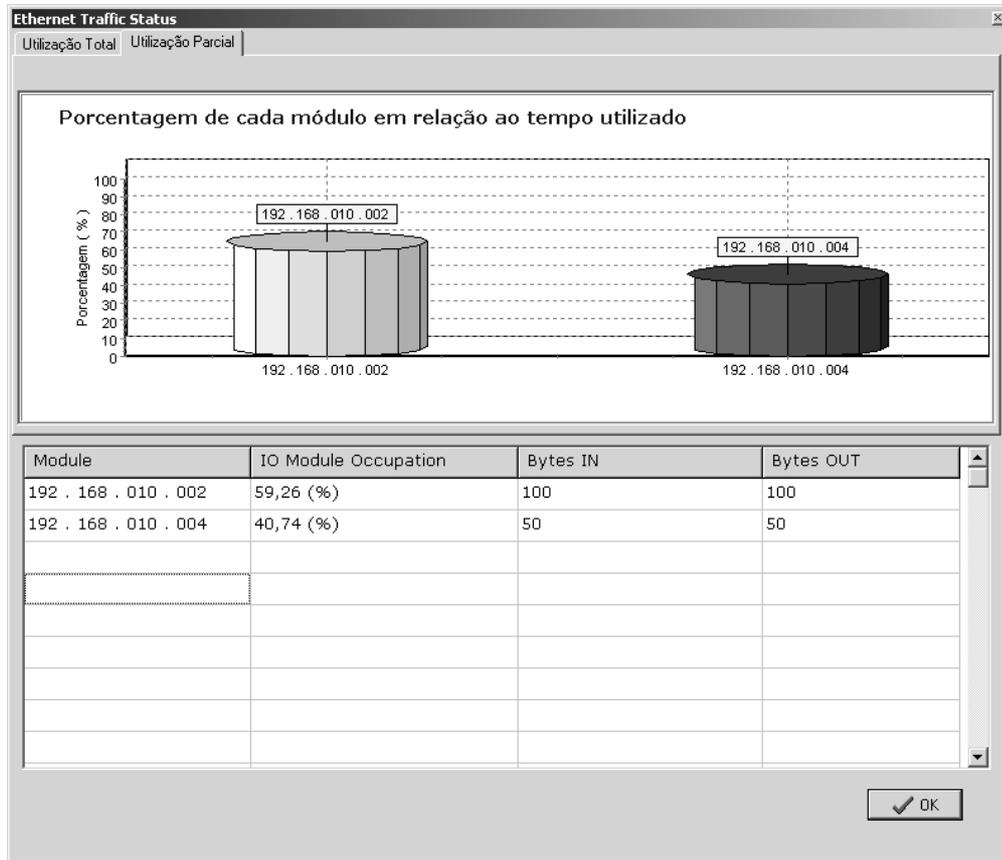
**Equação 5 – Porcentagem de cada módulo em relação ao tempo total disponível.**

Para o caso acima, a porcentagem para cada módulo em relação ao tempo total utilizado é:

$$\text{Tempo\_utilizado\_total} = 412,8 \times 10^{-6} + (2 \times 9,6 \times 10^{-6}) = 432\mu\text{s}$$

$$\text{Porcentagem\_módulo\_192.168.010.002} = (123,2 + 123,2 + 9,6) / 432 = 59,26\%$$

$$\text{Porcentagem\_módulo\_192.168.010.004} = (83,2 + 83,2 + 9,6) / 432 = 40,74\%$$



**Figura 29 – Porcentagem de cada módulo em relação ao tempo total disponível.**

Caso a quantidade de bytes de entrada ou saída aumente, o tempo utilizado também aumenta e se aproxima de 1ms, que é o tempo de varredura.

Exemplo 2: Alteração dos bytes de ambos os módulos para 400 e 110, respectivamente.

Controlador mestre – 10Mbps, 1ms, 2 módulos de campo;

Módulo campo 192.168.010.002 – 400 bytes de entrada e 400 bytes de saída;

Módulo de campo 192.168.010.004 – 110 bytes de entrada e 110 bytes de saída.

Dead\_time = 9,6μs

Tempo\_utilizado\_módulo\_192.168.010.002\_INPUT = 363,2μs

Tempo\_utilizado\_módulo\_192.168.010.002\_OUTPUT = 363,2μs

Tempo\_utilizado\_módulo\_192.168.010.004\_INPUT = 131,2μs

Tempo\_utilizado\_módulo\_192.168.010.004\_OUTPUT = 131,2μs

Tempo\_utilizado\_total = 1,008ms

$\text{Tempo\_disponível} = 0,001 - 1,008 = - 0,008\text{us}$  (não existe)

Para o caso acima, o tempo utilizado extrapolou o tempo de varredura do controlador mestre e não há comunicação. Os módulos não conseguem se comunicar com o controlador mestre, pois a quantidade de informação é muito grande para o tempo de varredura de 1ms, programado pelo controlador mestre.

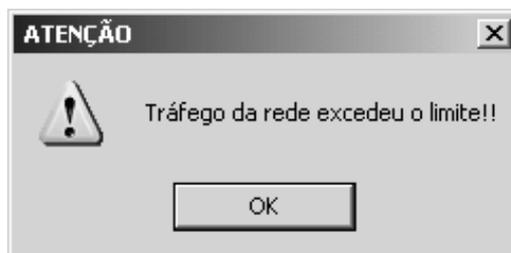


Figura 30 – Excesso de tráfego na rede.

2 - Se quantidade de bytes de entrada ou quantidade de bytes de saída for menor que dezoito ( $<18$ ), então a quantidade total de bytes é de setenta e dois, que é a mínima permitida em um quadro Ethernet. Esse número dezoito é obtido pelo seguinte raciocínio:

Quantidade mínima de bytes do quadro Ethernet = 72

Bytes de cabeçalho Ethernet = 26

Sobra para dados = 46

Bytes do cabeçalho UDP = 8

Bytes do cabeçalho IP = 20

Total de bytes de cabeçalho = 28

Restante de bytes livres para dados =  $46 - 28 = 18$

Assim, se o tamanho dos bytes de dados for menor que dezoito, será necessário acrescentar bits de enchimento, para se ter, no mínimo, os setenta e dois bytes do quadro Ethernet. <sup>[1][22]</sup>

Os cálculos acima não se alteram, porém a quantidade total (cabeçalho e informação juntos) de bytes de entrada e de saída é sempre de setenta e dois bytes. Logo:

$\text{Tempo\_utilizado\_módulo\_INPUT} = 57,6\text{us}$

$\text{Tempo\_utilizado\_módulo\_OUTPUT} = 57,6\text{us}$

No apêndice B há a parte do código fonte no *Borland Builder C++* relacionada aos cálculos mencionados acima.

## 5.5 Análise da parte física da rede

Para realizar a análise física da rede proposta pelo software, é necessário um conceito computacional para a integração harmoniosa das várias partes do programa. Esse conceito é chamado de *thread*.<sup>[44]</sup>

A *thread* nada mais é do que um recurso da plataforma *Borland Builder* em que um processo (software principal) pode dividir duas ou mais tarefas (software para traçar o cabo entre os elementos da rede e o programa principal para manipulação dos elementos da rede).<sup>[43] [44]</sup>

Assim, é possível mover os elementos conectados, sem interferir nos cálculos dos tempos e nas funções principais do software.<sup>[49]</sup> O software possui apenas uma *thread*, logo é chamado de um sistema *monothread*.<sup>[49]</sup>

De acordo com a tabela 3, para os sistemas que utilizam par trançado blindado, a distância máxima de cada segmento é de cem metros.<sup>[22]</sup> Para a rede Ethernet industrial é necessário utilizar *switches* ou *hubs* industriais entre o controlador mestre e os módulos de campo, a fim de aumentar a distância e garantir o determinismo da mesma.<sup>[22] [25] [38]</sup> Porém, deve-se levar em consideração os pequenos atrasos causados pelos *switches* no processamento das informações e não colocar módulos críticos em relação ao tempo de varredura interligados à muitos *switches*<sup>[22] [25] [38]</sup>. As distâncias independem da taxa de transmissão configurada para a rede: 10Mbps, 100Mbps ou 1Gbps.<sup>[22]</sup>

Também é importante notar a capacitância e a resistência do cabo à medida que a metragem aumenta.<sup>[50]</sup> Ambos os parâmetros são críticos em sistemas de comunicação a dois fios e podem prejudicar o sinal trafegado no cabo.<sup>[22]</sup>

Para a rede Ethernet industrial as características principais do cabo são:<sup>[50]</sup>

- 1 – Resistência elétrica do cabo:  $R = 115$  ohms por quilômetro
- 2 – Capacitância entre os condutores:  $C = 65$  pF por metro
- 3 – Frequência máxima: 1,5GHz
- 4 – Impedância característica:  $Z_0 = 100$  ohms
- 5 – Temperatura de operação:  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $+70^{\circ}\text{C}$  (IP67)
- 6 – Tabela de atenuação do cabo em função da frequência (em dB / Km)

Frequency (MHz)	1	4	10	16	20	31.25	62.5	100
typ. value (dB/100m)	1,6	3,2	5,2	6,9	7,8	10,5	15	19,5
(dB/100ft)	(0,5)	(1,0)	(1,6)	(2,1)	(2,4)	(3,2)	(4,6)	(5,9)

Tabela 5 – Atenuação do cabo Ethernet industrial em função da frequência.<sup>[50]</sup>

Com esses valores, é possível o usuário configurar sua rede virtual e verificar se houve excessos na distância em algum trecho da rede. Além disso, é possível verificar, em cada trecho, os valores de resistência elétrica e capacitância de acordo com as características acima.

A figura 31 ilustra uma rede configurada com um *switch* e dois módulos de campos conectados ao mestre controlador.

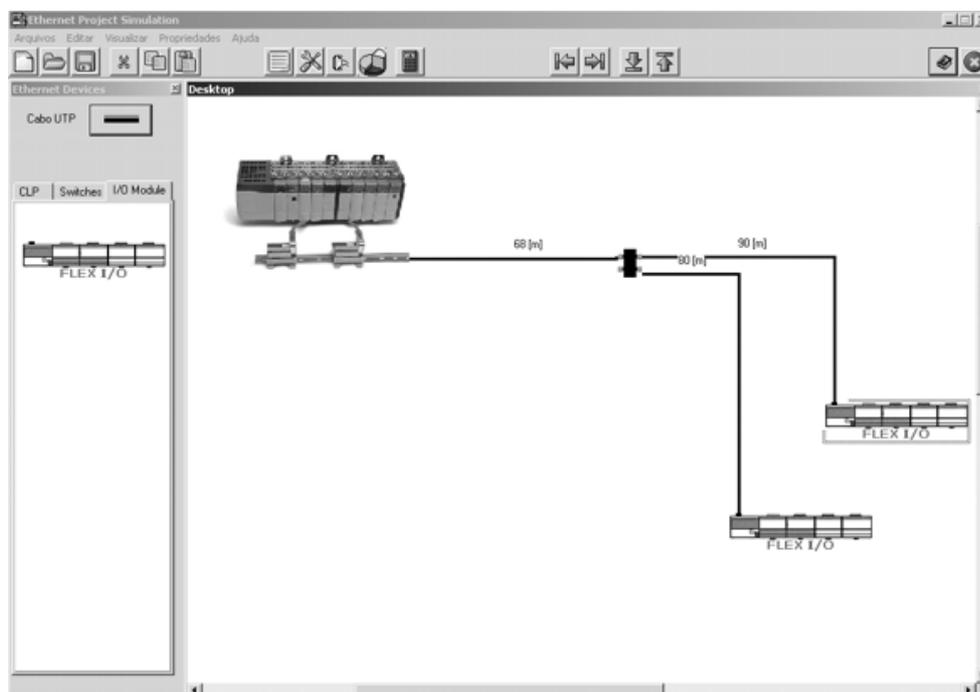


Figura 31 – Configuração da parte física da rede Ethernet.

As distâncias entre cada trecho não podem exceder cem metros para o uso do par trançado blindado, conforme mostrado anteriormente na tabela 3. O primeiro trecho foi configurado com sessenta e oito metros, o segundo com noventa metros e o terceiro com oitenta metros.

No apêndice C há a parte do código referente à criação do cabo Ethernet industrial na ferramenta proposta, utilizando o conceito de *thread*.

## 5.6 Tratamento de exceções no software ao nível do usuário

O tratamento de exceções <sup>[44]</sup> <sup>[45]</sup> nada mais é do que a realização de várias travas dentro da ferramenta proposta, impossibilitando o usuário de operar com valores irreais dentro das simulações realizadas. Assim, valores impossíveis na prática são desconsiderados pelas simulações, evitando a possibilidade de simulações imperfeitas ou incorretas. <sup>[44]</sup> <sup>[45]</sup>

A seguir há uma lista de alguns tratamentos de exceções realizados na ferramenta proposta para impossibilitar que o usuário configure a rede de maneira incorreta:

- 1 – Tentativa de inserção de um módulo de campo sem ter um controlador mestre na simulação;
- 2 – Tempo de varredura negativo no controlador mestre;
- 3 – Número de módulos de campo menor do que zero ou maior do que mil e vinte e quatro no controlador mestre;
- 4 – Quantidade de informação de entrada ou saída menor do que zero ou maior do que mil quatrocentos e setenta e dois bytes;
- 5 – Endereço IP inválido do módulo de campo;
- 6 – Distância de cabo inválida, menor do que zero ou maior do que cem metros por trecho;
- 7 – Tentativa de inserção de dois controladores mestres na simulação;
- 8 – Tentativa de inserção de quantidades superiores de módulos de campo em relação às definidas no controlador mestre.

## 6 RESULTADOS

Esse capítulo é dedicado aos resultados práticos do software e comparação com sistemas reais a fim de validar o software.

Os resultados são obtidos através de várias simulações, envolvendo situações práticas diferentes.

Já a comparação foi realizada utilizando um software da ODVA <sup>[33]</sup> para rede Ethernet/IP. Esse software apresenta um controlador mestre e um módulo de campo que trocam informações entre si. <sup>[33]</sup>

### 6.1 Resultados Obtidos

Para análise dos resultados do software, são necessárias várias situações de montagem e configuração da rede, adequadas ao cotidiano do usuário e descritas a seguir em três situações diferentes. A quarta situação é um comparativo entre a rede Ethernet industrial e as redes encontradas no mercado atual brasileiro (Profibus DP e Devicenet), a fim de analisar os resultados de uma determinada aplicação nas três redes propostas.

#### 6.1.1 Primeira simulação

O objetivo da primeira simulação é validar o software do ponto de vista operacional. Para isso, é necessário o uso do simulador de controlador mestre e módulo de campo da ODVA para comparação dos resultados. <sup>[33]</sup>

Para realizar a comparação e validação do software, segue abaixo as condições da primeira simulação.

Elementos na rede simulada: Controlador mestre, *switch* com quatro portas e um módulo de campo.

Controlador mestre – 10Mbps, 10ms, 1 módulo de campo, *switch* de 4 portas;

Módulo campo 200.010.040.006 – 2 bytes de entrada e 2 bytes de saída;

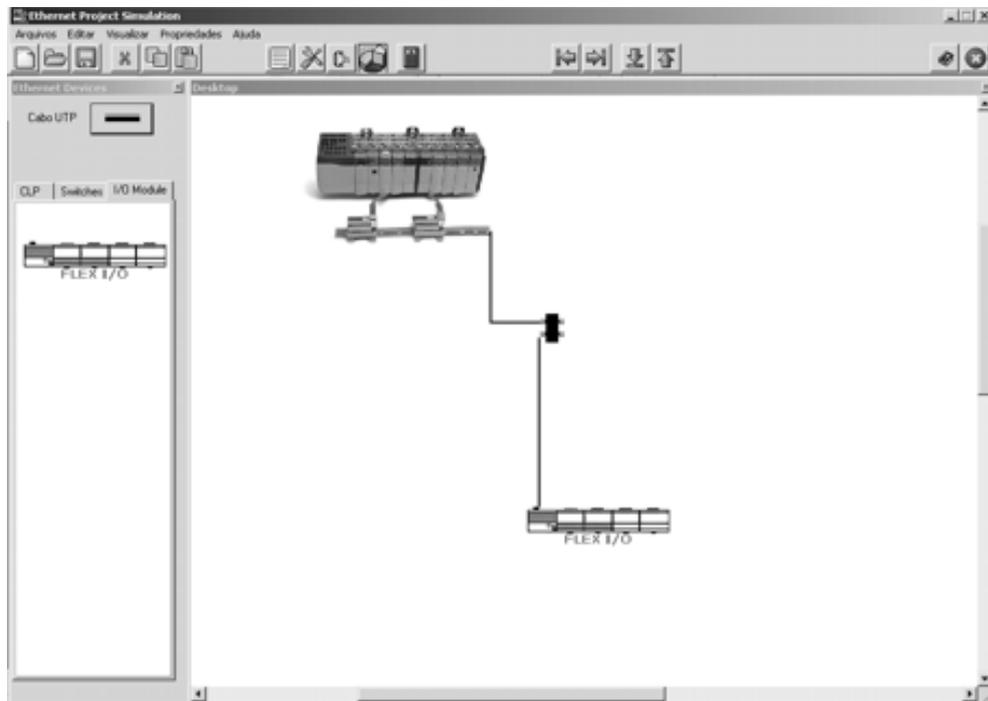
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.006\_INPUT = 57,6us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.006\_OUTPUT = 57,6us

Dead\_time = 9,6us

Tempo\_utilizado\_total = **124,8us ou 1,25% de 10ms**

$$\text{Tempo\_disponível} = 0,01 - 0,0001248 = \mathbf{9,875\text{ms}} \text{ ou } \mathbf{98,75\% \text{ de } 10\text{ms}}$$



**Figura 32 – Cenário para simulação 1.**

Na figura 33, há o gráfico contendo a porcentagem do tempo ocupado e do tempo disponível para as condições listadas acima.

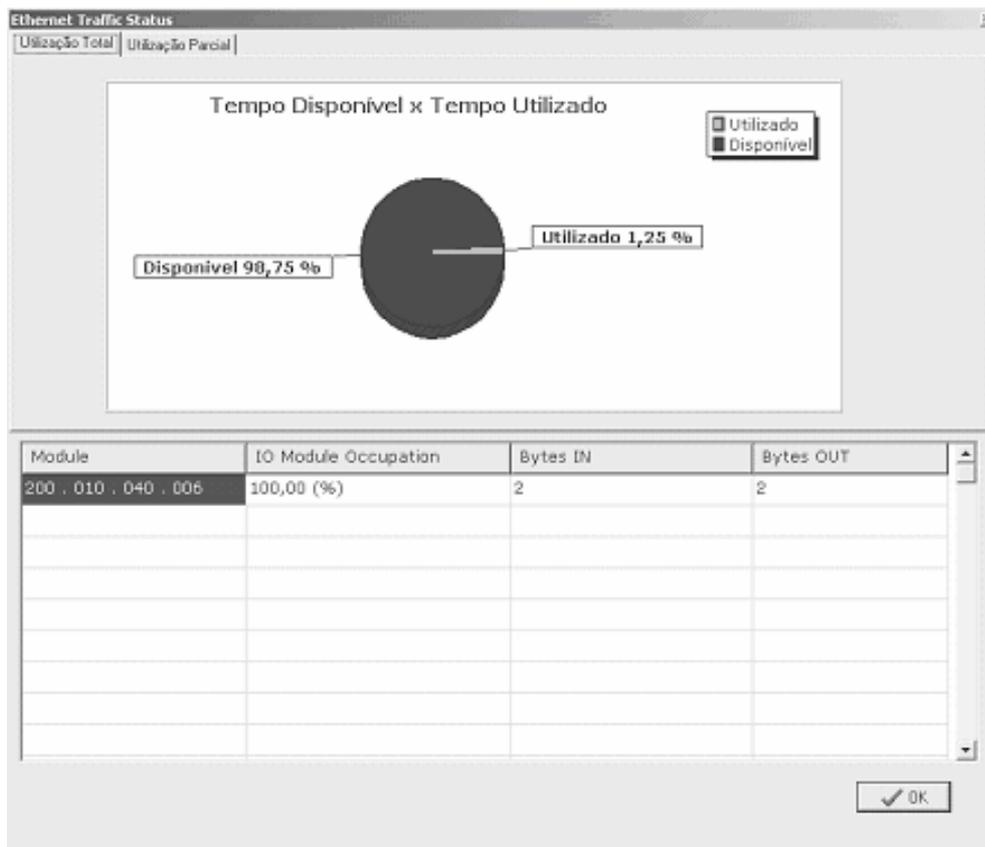
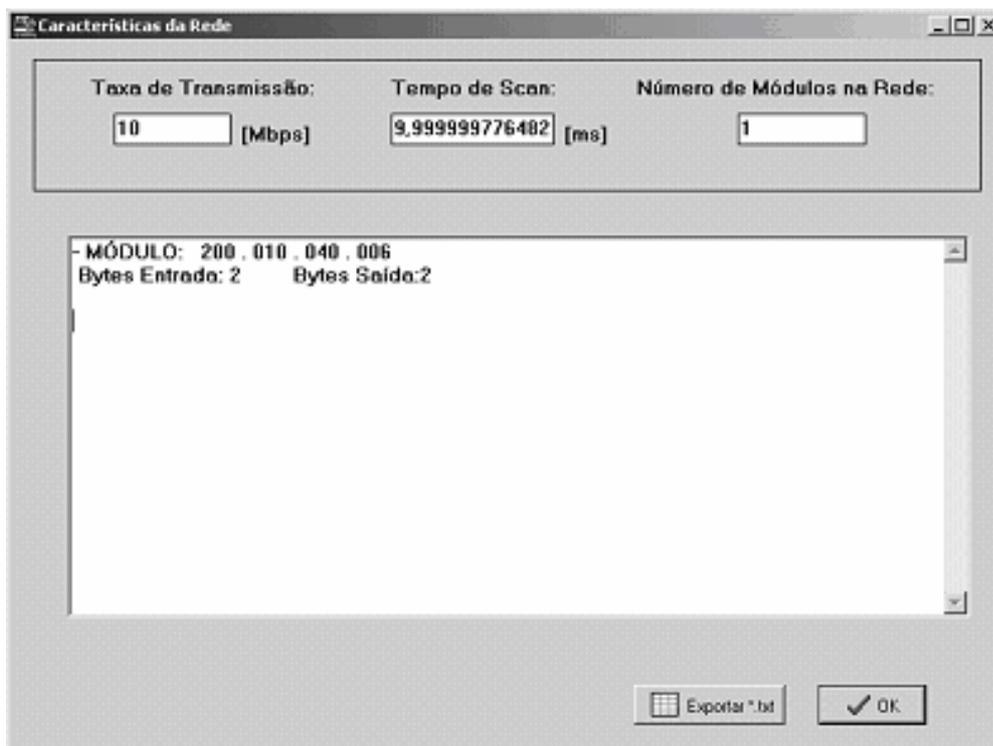


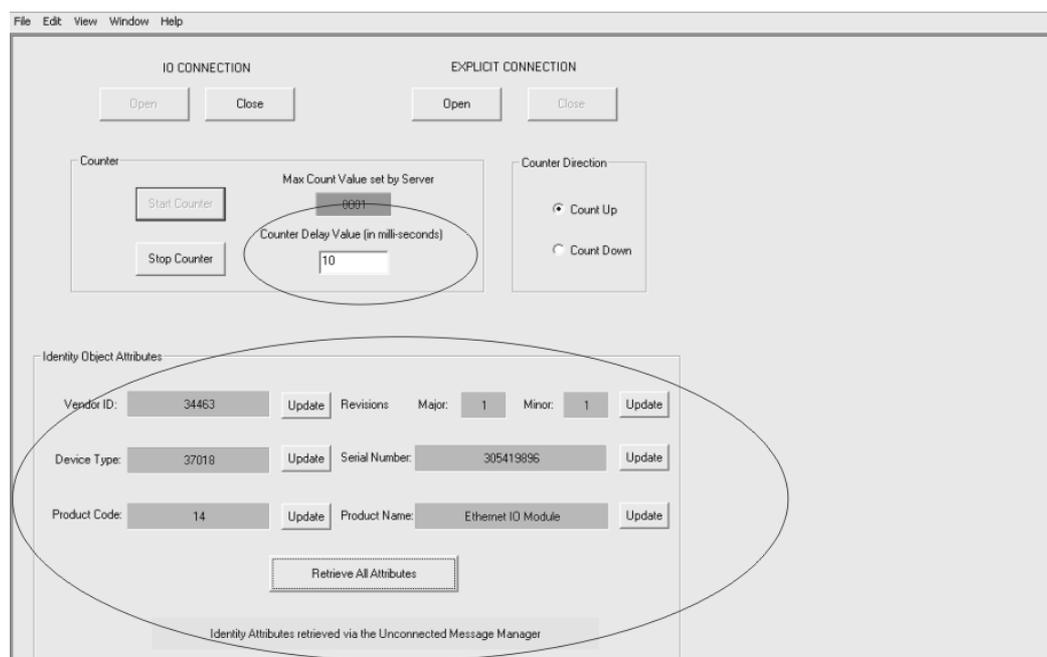
Figura 33 – Gráfico dos tempos para cenário 1.

A figura 34 mostra um relatório retirado do simulador com as principais características da rede simulada nessa primeira simulação. Há a opção de exportar tal arquivo para uma base de dados tipo texto (txt).

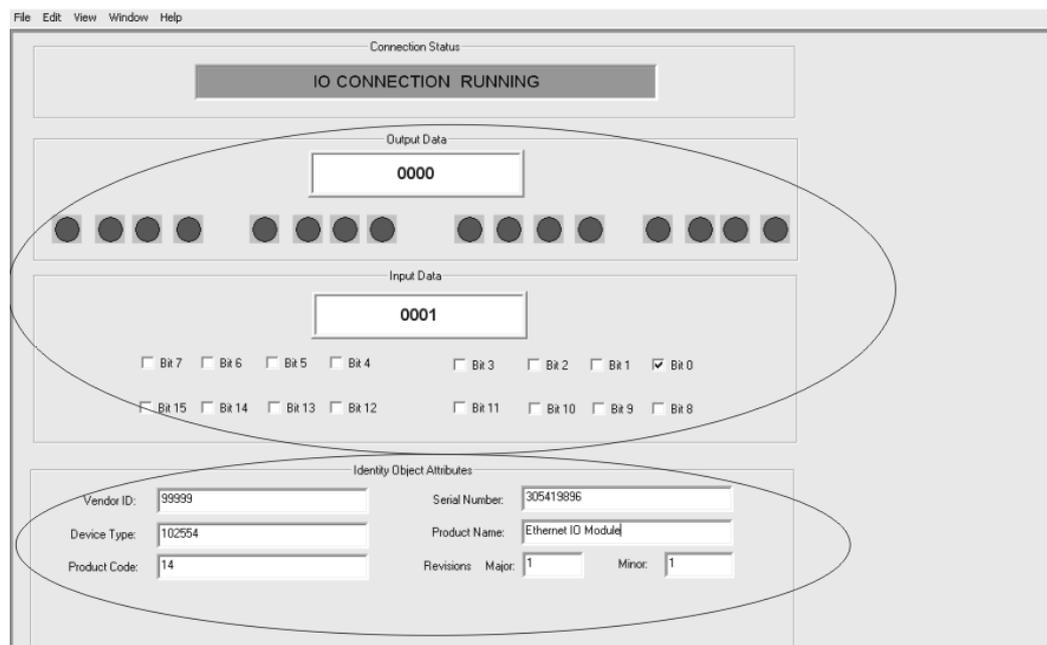


**Figura 34 – Relatório da rede para primeira simulação.**

Para validar o uso da ferramenta proposta, a seguir é mostrado o software da ODVA [33] realizando a comunicação nas mesmas condições da ferramenta proposta. Esses dois módulos de software representam o mestre controlador e o módulo de campo. O módulo de campo é composto por dois bytes de entrada (dezesesseis chaves liga/desliga) e dois bytes de saída (dezesesseis lâmpadas verdes). Há também parâmetros do módulo de campo que podem ser lidos pelo mestre controlador via protocolo TCP, conforme já mencionado anteriormente. Esses parâmetros são: *vendor ID*, *Device type*, *Product code*, *Serial number*, *Product name* e *Revision*. Eles podem ser configurados no módulo de campo e lidos no mestre controlador. O programa aplicativo é um contador em anel para acender as lâmpadas em uma seqüência já pré-determinada em um tempo estabelecido pelo usuário.

**Figura 35 – Tela do mestre controlador ODVA. [33]**

Dentro do círculo inferior está o conjunto de parâmetros lidos do módulo de campo e no círculo superior está o tempo para a atualização do contador das lâmpadas do módulo de campo.



**Figura 36 – Tela do módulo de campo ODVA.** <sup>[33]</sup>

O círculo superior mostra as lâmpadas e as chaves de entrada e no círculo inferior os parâmetros do módulo de campo.

Como as condições são bem parecidas com a da primeira simulação (dois bytes de I/O, 10Mbps de taxa de transmissão e tempo de varredura de 10ms), através de um analisador de rede, é possível visualizar os pacotes trafegados e o tempo para se enviar e receber cada mensagem. Na figura 36, há uma captura de alguns pacotes utilizando o analisador de rede Ethernet *Ethereal*, disponível na Internet. <sup>[51]</sup>

É possível notar na área circulada que o tempo de atualização das mensagens é de cerca de 125us para as condições listadas acima (campo *Time*). Na coluna *Protocol*, é possível verificar de que se trata de um protocolo para Ethernet industrial (ENIP, Ethernet/IP). Há também os endereços de destino e origem das informações (controlador mestre e módulo de campo) e as informações trafegadas na parte inferior da figura 37.

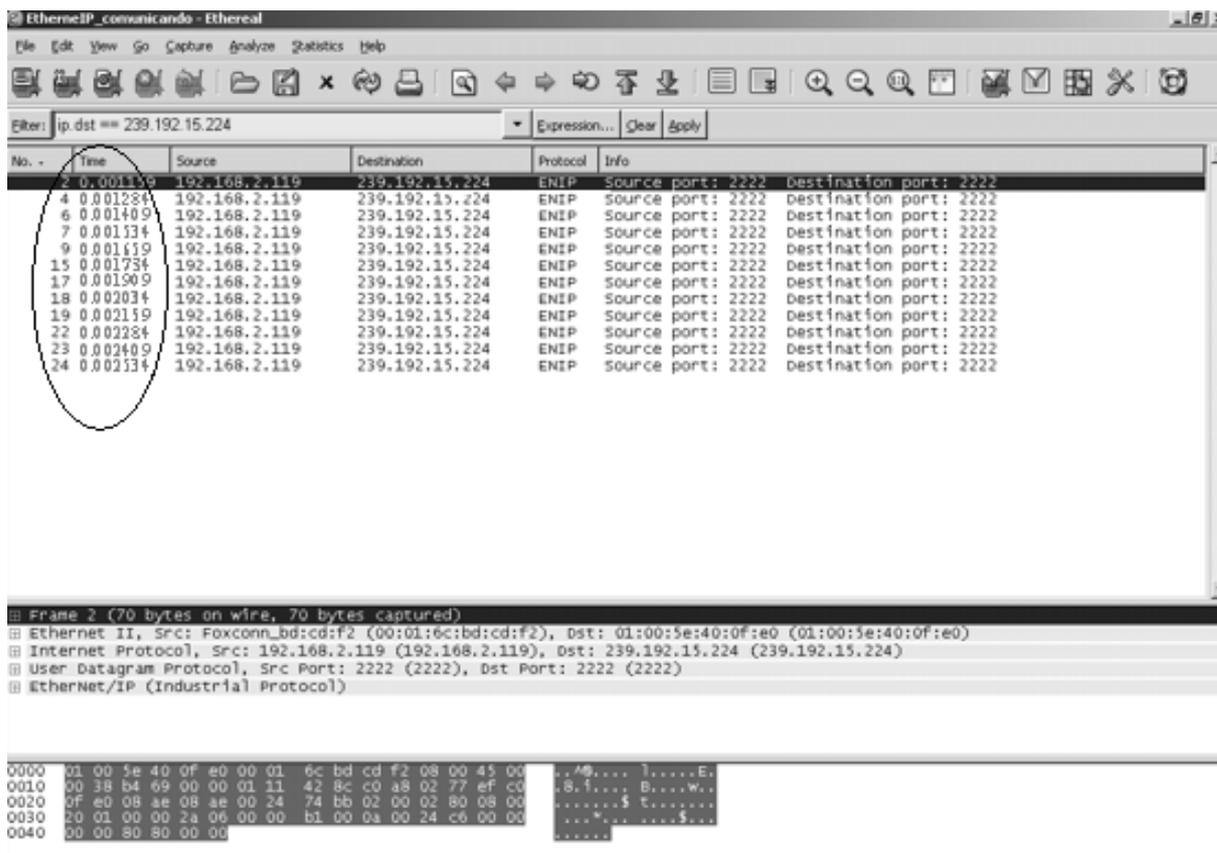


Figura 37 – Tela do analisador de rede para simulador ODVA. [51]

A importância dessa simulação é a comparação dos tempos envolvidos entre o software proposto e o software da associação ODVA para rede Ethernet/IP. O tempo de atualização das mensagens está em torno de 125us, que foi calculado e mostrado no software proposto (Figura 33 – Gráfico dos tempos para cenário 1.).

Assim, é possível validar o desenvolvimento do software, realizando a comparação com um sistema real da associação certificadora da rede em questão (ODVA). O software proposto está de acordo com um sistema real.

### 6.1.2 Segunda simulação

O objetivo da segunda simulação é analisar uma rede com maiores números de elementos e verificar a parte lógica da rede (tempo de varredura).

Para realizar a simulação da rede, segue abaixo as condições da segunda simulação.

Elementos na rede simulada: Controlador mestre, quatro *switches* com quatro portas cada um e nove módulos de campo.

Controlador mestre – 10Mbps, 10ms, 9 módulos de campo, *switches* de 4 portas;  
Módulo campo 200.010.040.002 – 1000 bytes de entrada e 1000 bytes de saída;  
Módulo campo 200.010.040.003 – 900 bytes de entrada e 900 bytes de saída;  
Módulo campo 200.010.040.004 – 800 bytes de entrada e 800 bytes de saída;  
Módulo campo 200.010.040.005 – 700 bytes de entrada e 700 bytes de saída;  
Módulo campo 200.010.040.006 – 1400 bytes de entrada e 1000 bytes de saída;  
Módulo campo 200.010.040.007 – 1000 bytes de entrada e 1400 bytes de saída;  
Módulo campo 200.010.040.008 – 600 bytes de entrada e 600 bytes de saída;  
Módulo campo 200.010.040.009 – 500 bytes de entrada e 1000 bytes de saída;  
Módulo campo 200.010.040.010 – 400 bytes de entrada e 400 bytes de saída;  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.002\_INPUT = 843,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.002\_OUTPUT = 843,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.003\_INPUT = 763,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.003\_OUTPUT = 763,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.004\_INPUT = 683,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.004\_OUTPUT = 683,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.005\_INPUT = 603,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.005\_OUTPUT = 603,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.006\_INPUT = 1,163ms  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.006\_OUTPUT = 843,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.007\_INPUT = 843,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.007\_OUTPUT = 1,163ms  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.008\_INPUT = 523,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.008\_OUTPUT = 523,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.009\_INPUT = 443,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.009\_OUTPUT = 843,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.010\_INPUT = 363,2us  
Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.010\_OUTPUT = 363,2us  
Dead\_time = 9 \* 9,6us = 86,4us  
Tempo\_utilizado\_total = **12,944ms**

Assim, como o tempo disponível é maior do que o tempo de varredura, não há comunicação. Nesse caso, não é possível trocar dados entre o controlador mestre e os módulos de campo. A figura 38 mostra a mensagem de tráfego acima do permitido.

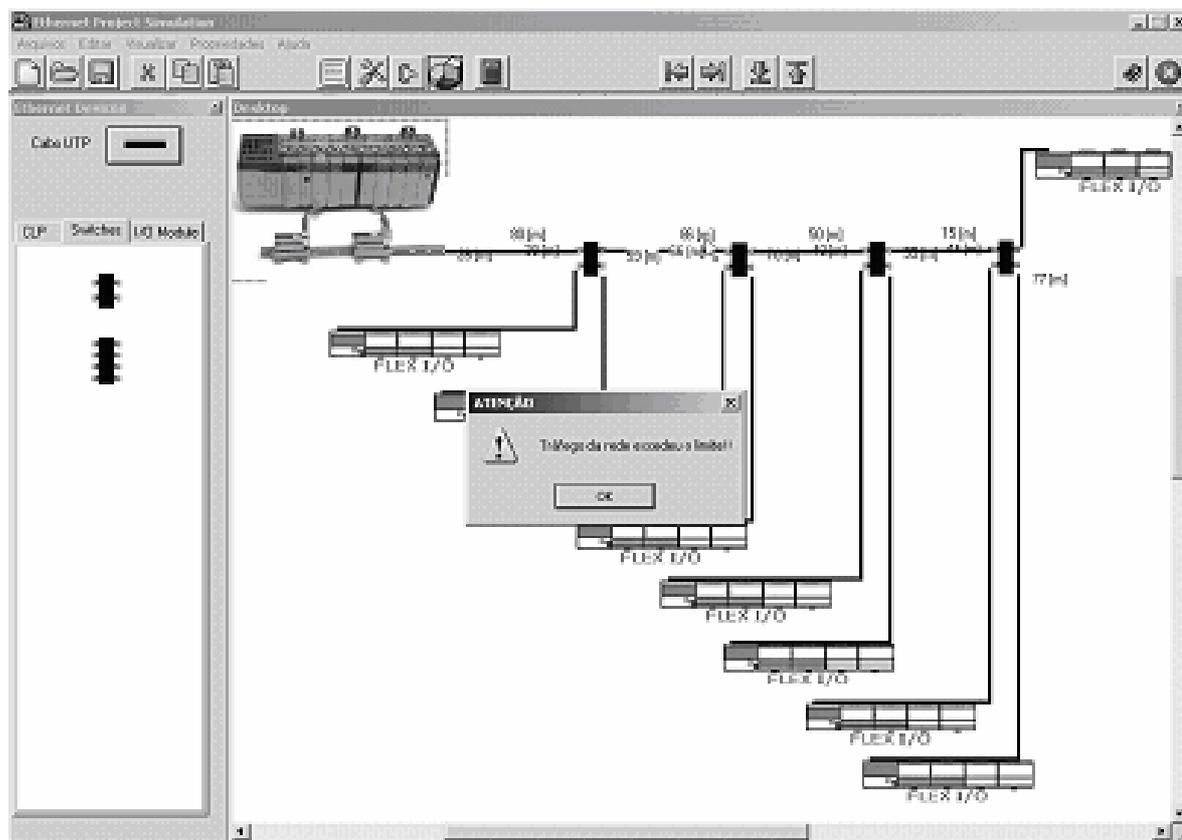


Figura 38 – Cenário e resultado para simulação 2.

Para resolver o problema, sem alterar os tempos e os módulos envolvidos na simulação, é possível aumentar a taxa de transmissão da rede para 100Mbps. Como visto na tabela 3, a taxa de 100Mbps não influencia na distância de cada segmento da rede Ethernet industrial.

Logo, tem-se:

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.002\_INPUT = 84,32us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.002\_OUTPUT = 84,32us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.003\_INPUT = 76,32us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.003\_OUTPUT = 76,32us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.004\_INPUT = 68,32us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.004\_OUTPUT = 68,32us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.005\_INPUT = 60,32us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.005\_OUTPUT = 60,32us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.006\_INPUT = 116,32us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.006\_OUTPUT = 84,32us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.007\_INPUT = 84,32us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.007\_OUTPUT = 116,32us  
 Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.008\_INPUT = 52,32us  
 Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.008\_OUTPUT = 52,32us  
 Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.009\_INPUT = 44,32us  
 Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.009\_OUTPUT = 84,32us  
 Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.010\_INPUT = 36,32us  
 Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.010\_OUTPUT = 36,32us  
 Dead\_time = 9 \* 9,6us = 86,4us  
 Tempo\_utilizado\_total = **1,372ms ou 13,72% de 10ms (tempo de varredura)**

O problema está resolvido com a simples alteração da taxa de transmissão da rede. A figura 39 evidencia os tempos utilizado e disponível e a lista de todos os módulos de campo que estão configurados na rede.

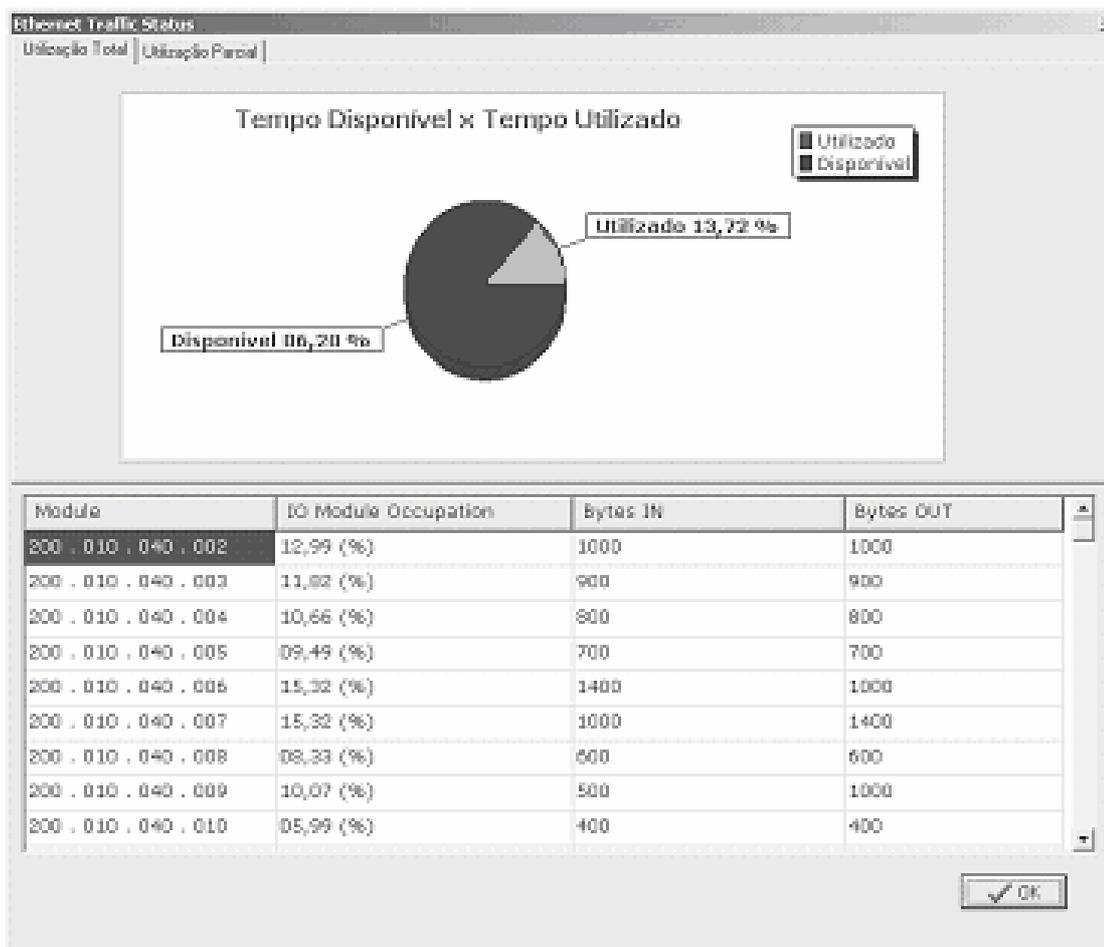
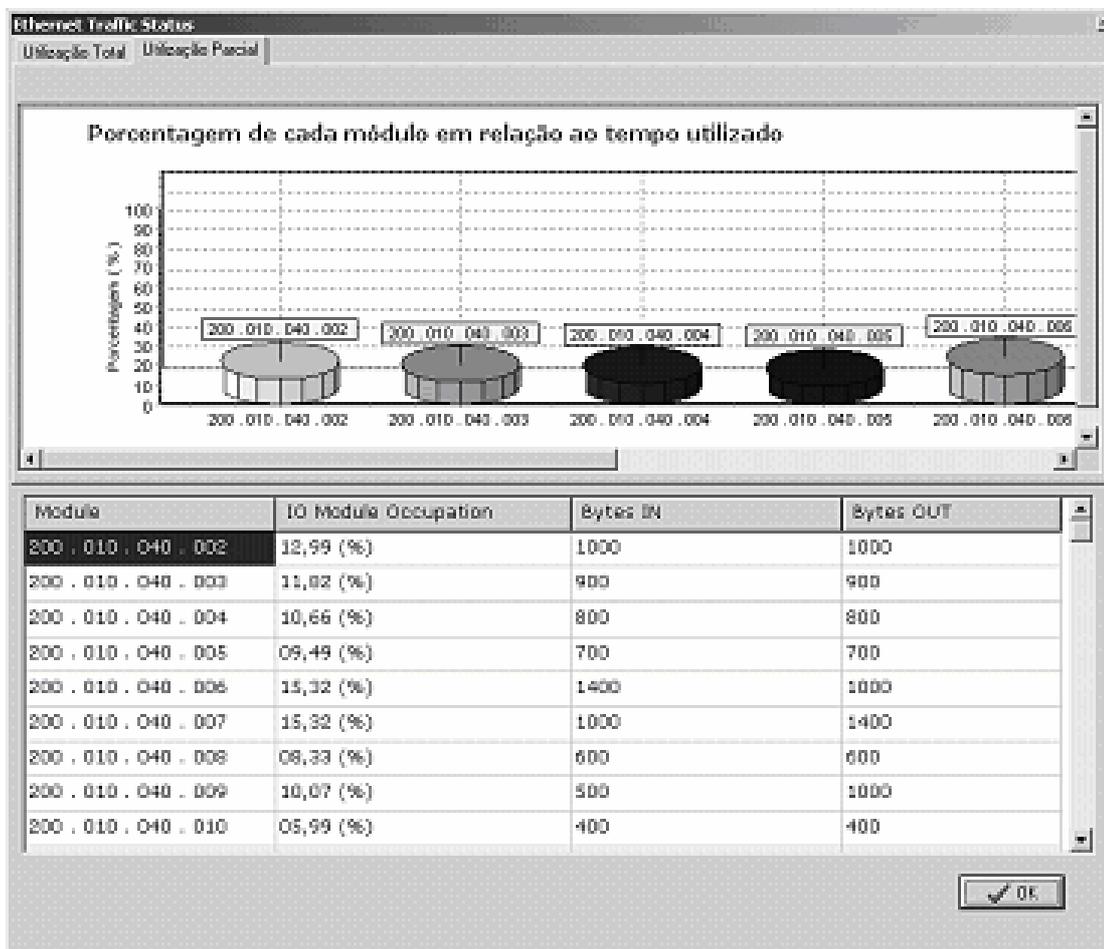


Figura 39 - Cenário e resultado para simulação 2 com alteração da taxa de transmissão.

É possível visualizar a participação de cada módulo de campo de forma individual nesse tempo disponível de 1,372ms. A figura 40 mostra a participação de cada módulo de campo no tempo utilizado.



**Figura 40 – Visualização de cada módulo após alteração da taxa de transmissão.**

Ainda para a simulação dois, nota-se que os módulos de campo 200.010.040.008, 200.010.040.009 e 200.010.040.010 estão conectados ao quarto *switch*, após o controlador mestre.

Caso o usuário não deseje alterar a taxa de transmissão da rede, pode-se alterar o tempo de varredura. Nesse caso, a taxa continua em 10Mbps e o tempo de varredura é de 20ms, logo:

- Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.002\_INPUT = 843,2us
- Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.002\_OUTPUT = 843,2us
- Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.003\_INPUT = 763,2us
- Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.003\_OUTPUT = 763,2us
- Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.004\_INPUT = 683,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.004\_OUTPUT = 683,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.005\_INPUT = 603,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.005\_OUTPUT = 603,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.006\_INPUT = 1,163ms

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.006\_OUTPUT = 843,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.007\_INPUT = 843,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.007\_OUTPUT = 1,163ms

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.008\_INPUT = 523,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.008\_OUTPUT = 523,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.009\_INPUT = 443,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.009\_OUTPUT = 843,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.010\_INPUT = 363,2us

Tempo\_utilizado\_módulo\_200.010.040.010\_OUTPUT = 363,2us

Dead\_time = 9 \* 9,6us = 86,4us

Tempo\_utilizado\_total = **12,944ms ou 64,72% de 20ms (novo tempo de varredura)**

Contudo, é importante destacar que o sistema assim utilizado torna-se mais lento e opera-se sob um tempo de 20ms de varredura dos módulos de campo. Essa não é uma solução muito satisfatória, pois os tempos de resposta de cada módulo de campo são alterados. A figura 41 evidencia o gráfico dos tempos utilizado e disponível para um tempo de varredura de 20ms e taxa de transmissão de 10Mbps.

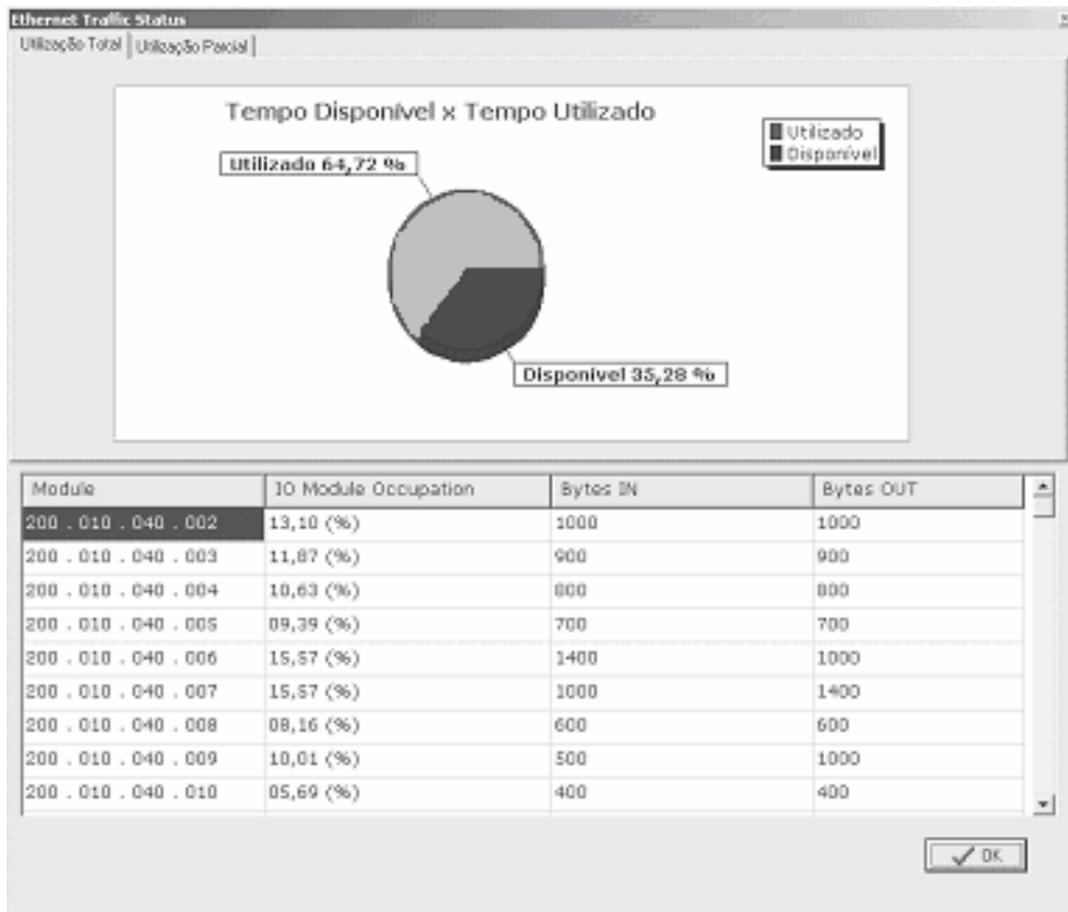


Figura 41 – Cenário e resultado para simulação 2 com alteração do tempo de varredura.

A seguir, na figura 42, há o relatório gerado pelo software com as principais características da rede simulada para o tempo de varredura para 20ms. Como dito anteriormente, esse relatório pode ser exportado para uma base de dados tipo texto (txt).

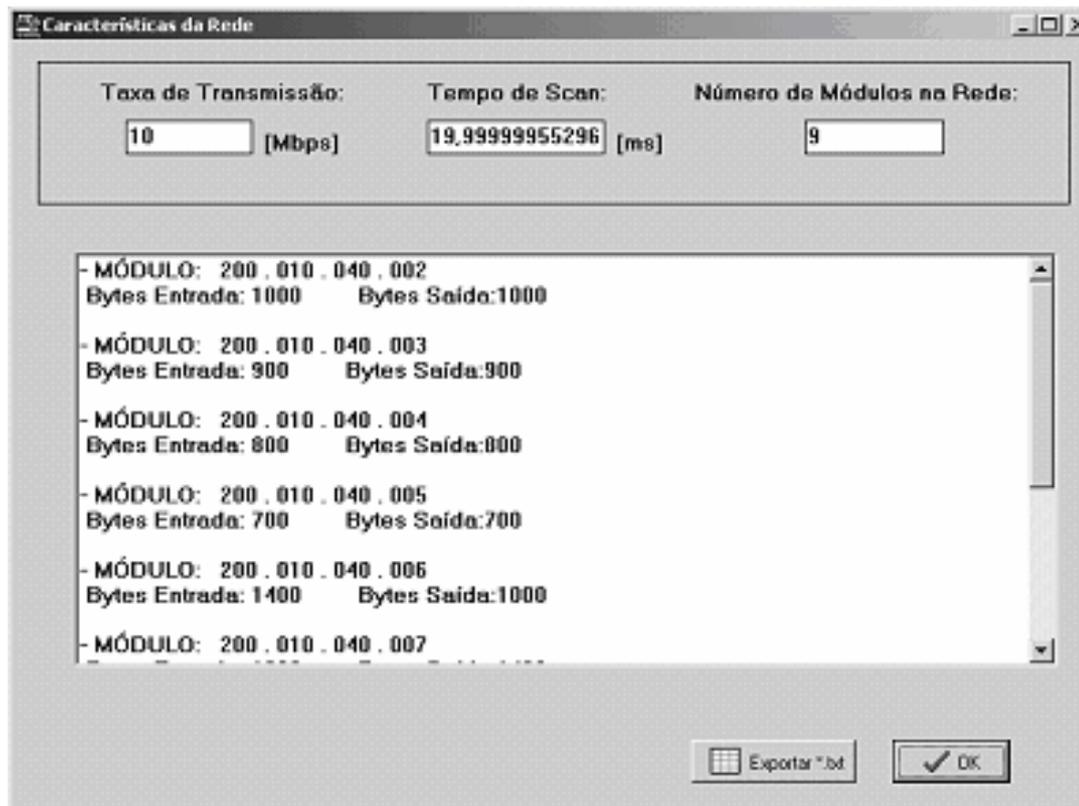


Figura 42 – Relatório da rede para segunda simulação.

### 6.1.3 Terceira simulação

A terceira simulação é similar à segunda, porém a análise agora é relativa à parte física da rede. As condições são as mesmas, mestre controlador, quatro *switches* e nove módulos de campo. Cada trecho está configurado para uma determinada distância, conforme visto na figura abaixo. Ao passar o *mouse* sobre o cabo, é possível visualizar a capacitância e a resistência elétrica de cada trecho analisado. Também há um tratamento de exceção (trava) para o usuário operar apenas com valores válidos de distância (entre zero e cem metros) para cada trecho. A rede está ilustrada a seguir na figura 43.

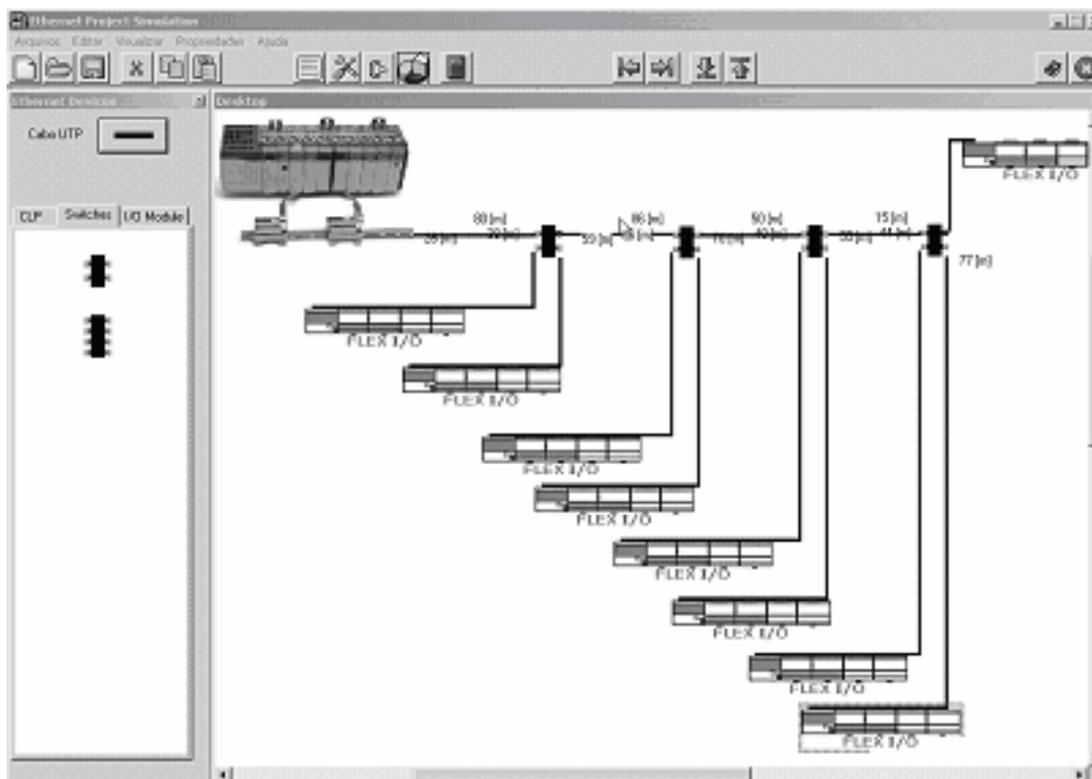


Figura 43 – Cenário e resultado para simulação 3 – *Switches* de 4 portas.

Assim, têm-se as seguintes distâncias para a terceira simulação:

Distância\_mestre\_switch 1 = 80m

Distância\_switch 1\_switch 2 = 86m

Distância\_switch 2\_switch 3 = 50m

Distância\_switch 3\_switch 4 = 15m

Distância\_módulo\_200.010.040.002\_switch 1 = 26m

Distância\_módulo\_200.010.040.003\_switch 1 = 38m

Distância\_módulo\_200.010.040.004\_switch 2 = 59m

Distância\_módulo\_200.010.040.005\_switch 2 = 66m

Distância\_módulo\_200.010.040.006\_switch 3 = 70m

Distância\_módulo\_200.010.040.007\_switch 3 = 40m

Distância\_módulo\_200.010.040.008\_switch 4 = 55m

Distância\_módulo\_200.010.040.009\_switch 4 = 44m

Distância\_módulo\_200.010.040.010\_switch 4 = 77m

As características elétricas (capacitância e resistência elétrica) da rede para cada trecho da terceira simulação estão evidenciadas abaixo.

Capacitância\_Resistência\_mestre\_switch 1:

Capacitância: 5200 [pF] - Resistência: 9,2 [ohms]

Capacitância\_Resistência\_switch 1\_switch 2:

Capacitância: 5590 [pF] - Resistência: 9,89 [ohms]

Capacitância\_Resistência\_switch 2\_switch 3:

Capacitância: 3250 [pF] - Resistência: 5,75 [ohms]

Capacitância\_Resistência\_switch 3\_switch 4:

Capacitância: 975 [pF] - Resistência: 1,725 [ohms]

Capacitância\_Resistência\_módulo\_200.010.040.002\_switch 1:

Capacitância: 1690 [pF] - Resistência: 2,99 [ohms]

Capacitância\_Resistência\_módulo\_200.010.040.003\_switch 1:

Capacitância: 2470 [pF] - Resistência: 4,37 [ohms]

Capacitância\_Resistência\_módulo\_200.010.040.004\_switch 2:

Capacitância: 3835 [pF] - Resistência: 6,785 [ohms]

Capacitância\_Resistência\_módulo\_200.010.040.005\_switch 2:

Capacitância: 4290 [pF] - Resistência: 7,59 [ohms]

Capacitância\_Resistência\_módulo\_200.010.040.006\_switch 3:

Capacitância: 4550 [pF] - Resistência: 8,05 [ohms]

Capacitância\_Resistência\_módulo\_200.010.040.007\_switch 3:

Capacitância: 2600 [pF] - Resistência: 4,6 [ohms]

Capacitância\_Resistência\_módulo\_200.010.040.008\_switch 4:

Capacitância: 3575 [pF] - Resistência: 6,325 [ohms]

Capacitância\_Resistência\_módulo\_200.010.040.009\_switch 4:

Capacitância: 2860 [pF] - Resistência: 5,06 [ohms]

Capacitância\_Resistência\_módulo\_200.010.040.010\_switch 4:

Capacitância: 5005 [pF] - Resistência: 8,855 [ohms]

Há a possibilidade, ainda, de se ter uma rede formada por *switches* de oito portas ao invés de quatro. As condições de simulação foram alteradas para os valores a seguir.

Controlador mestre – 10Mbps, 10ms, 6 módulos de campo, *switch* de 8 portas;

Distância\_mestre\_switch = 80m

Distância\_módulo\_200.010.040.002\_switch = 26m

Distância\_módulo\_200.010.040.003\_switch = 38m

Distância\_módulo\_200.010.040.004\_switch = 59m

Distância\_módulo\_200.010.040.005\_switch = 66m

Distância\_módulo\_200.010.040.006\_switch = 70m

Distância\_módulo\_200.010.040.007\_switch = 40m

As características elétricas são as mesmas apresentadas acima até o módulo 200.010.040.007, pois as distâncias não foram alteradas (alteração da topologia da rede apenas e exclusão de três módulos de campo).

A figura 44 ilustra a rede formada por um *switch* de oito portas, controlador mestre e seis módulos de campo.

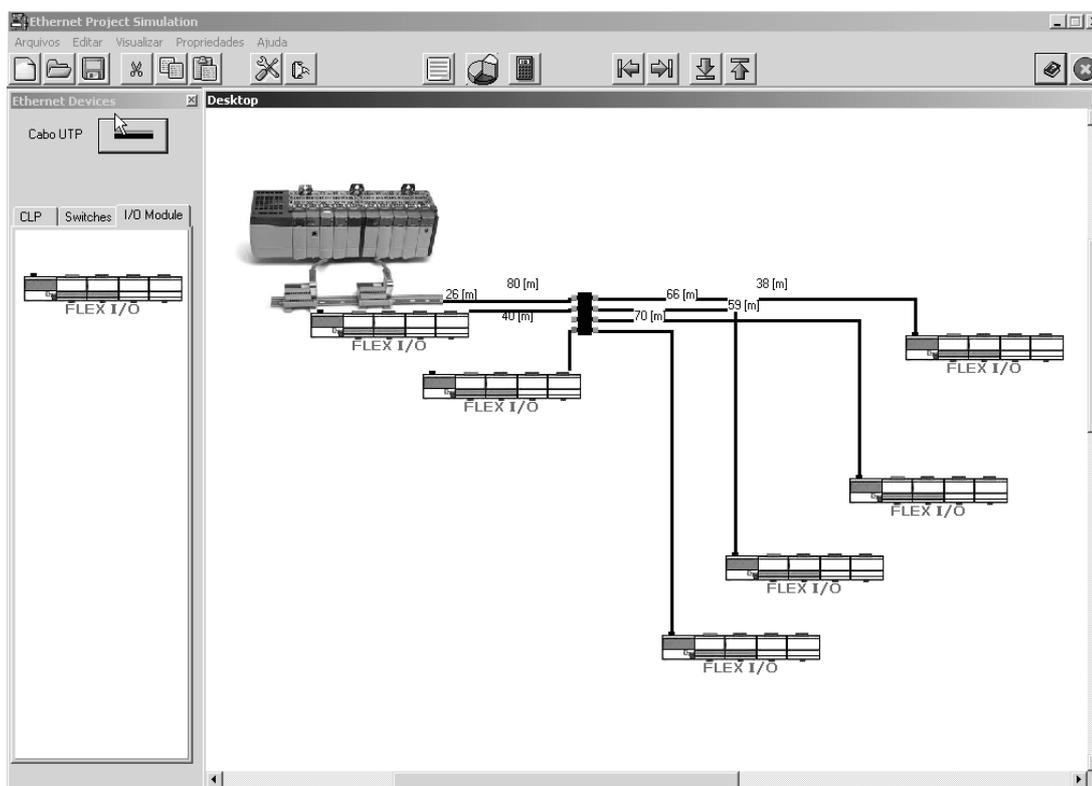


Figura 44 – Cenário e resultado para simulação 3 – *Switch* de 8 portas.

Caso alguma distância não esteja de acordo com os valores normalizados, há uma mensagem para o usuário mostrando que o trecho está configurado de forma errônea. Abaixo, nas figuras 45 e 46, segue um exemplo de uma distância inválida de dois mil e quinhentos metros.



Figura 45 – Cenário 3 – valor inválido de distância.

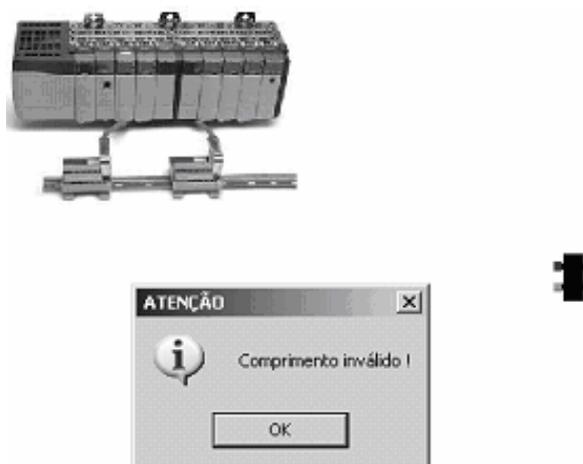


Figura 46 – Cenário 3 – mensagem de erro para distância inválida.

#### 6.1.4 Quarta simulação

O objetivo da quarta simulação é realizar um comparativo entre a rede Ethernet industrial e as redes industriais do mercado brasileiro em relação ao tempo de varredura para uma mesma quantidade de informação trafegada na rede.

Essa simulação não valida ou testa as funcionalidades do software, servindo apenas como informação adicional ao leitor.

A quantidade de informação para esse comparativo é a mesma da primeira simulação, ou seja, dois bytes de entrada e dois bytes de saída. Para aquele caso, um controlador mestre operando à 10Mbps, um módulo de campo (200.010.040.006) e um *switch* de quatro portas, o tempo utilizado foi de, aproximadamente, 125us.

Para rede Profibus DP <sup>[52]</sup> e utilizando um analisador de protocolo específico, pode-se medir tal tempo para as seguintes condições: mestre (endereço dois), módulo de campo (endereço quarenta e seis) contendo dois bytes de entrada e dois bytes de saída, taxa de transmissão de 500Kbps e tempo de varredura de 10ms.

As telas de análise do analisador *PROFI-MON-MOBIL* <sup>[53]</sup> estão mostradas abaixo nas figuras 47 e 48.

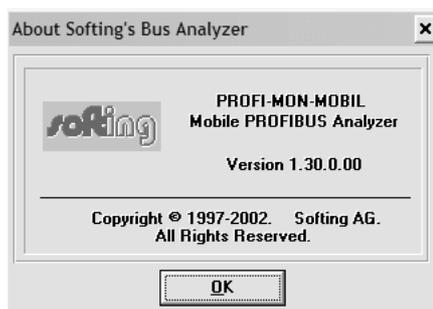


Figura 47 – Tela inicial do analisador Profibus DP. <sup>[53]</sup>

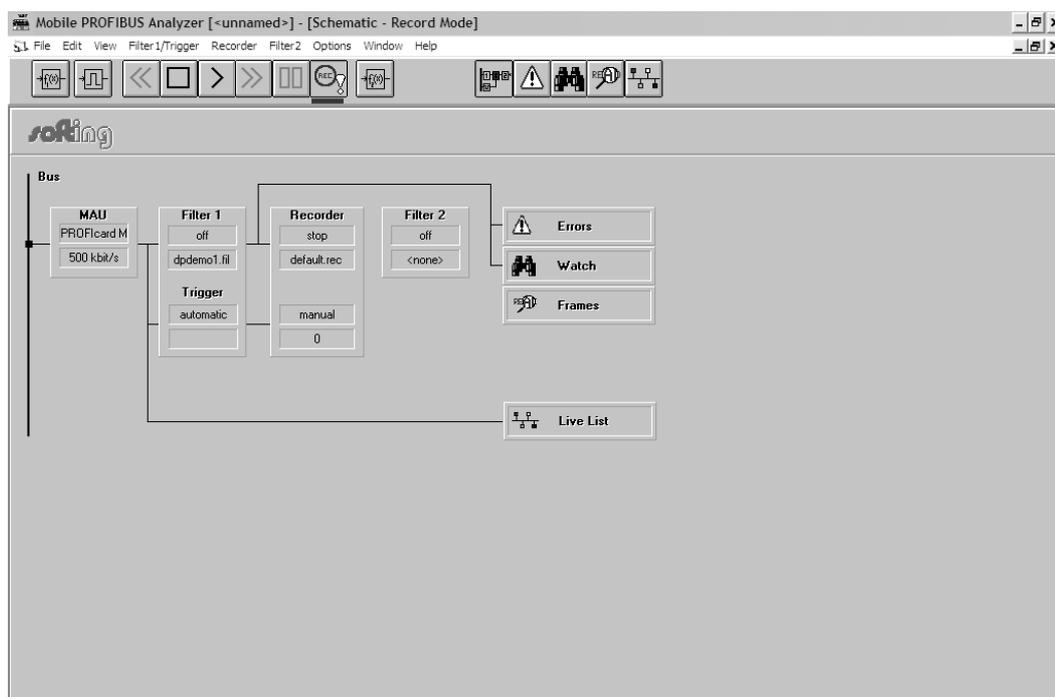


Figura 48 – Características da rede Profibus DP proposta. <sup>[53]</sup>

A lista de troca de informações entre mestre e módulo de campo para análise do tempo utilizado está a seguir na figura 49.

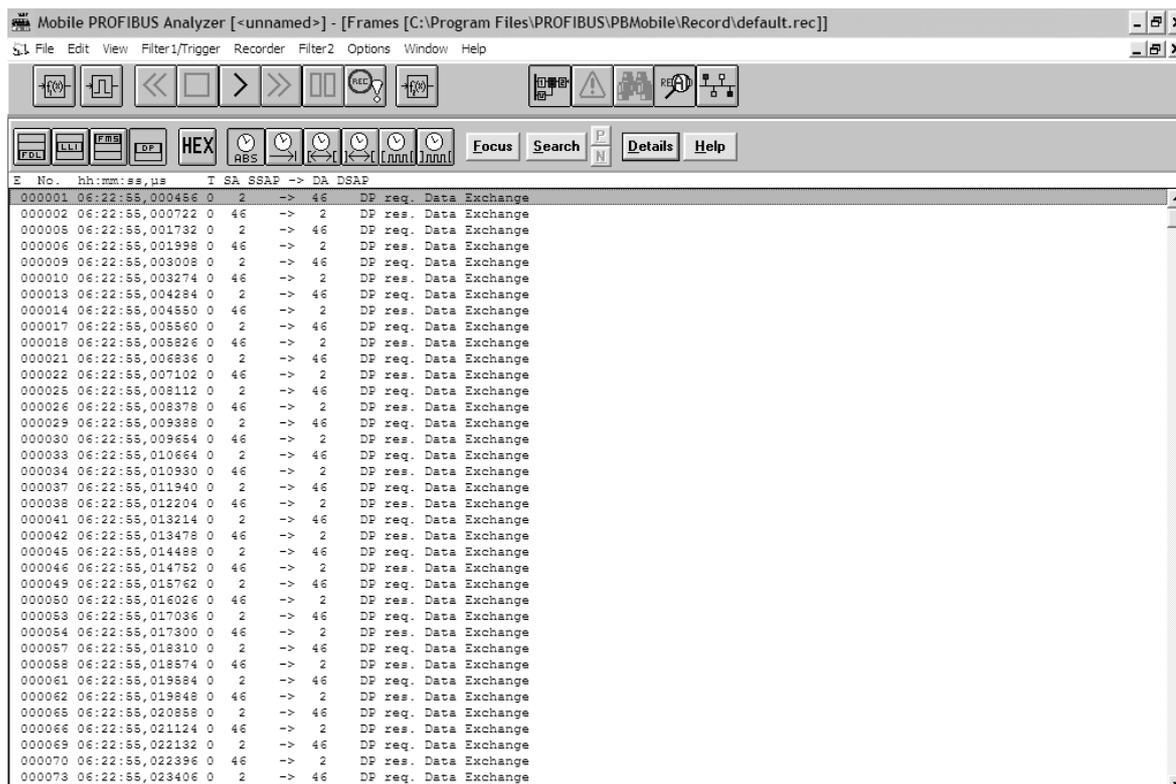


Figura 49 – Análise lógica da rede Profibus DP proposta. [53]

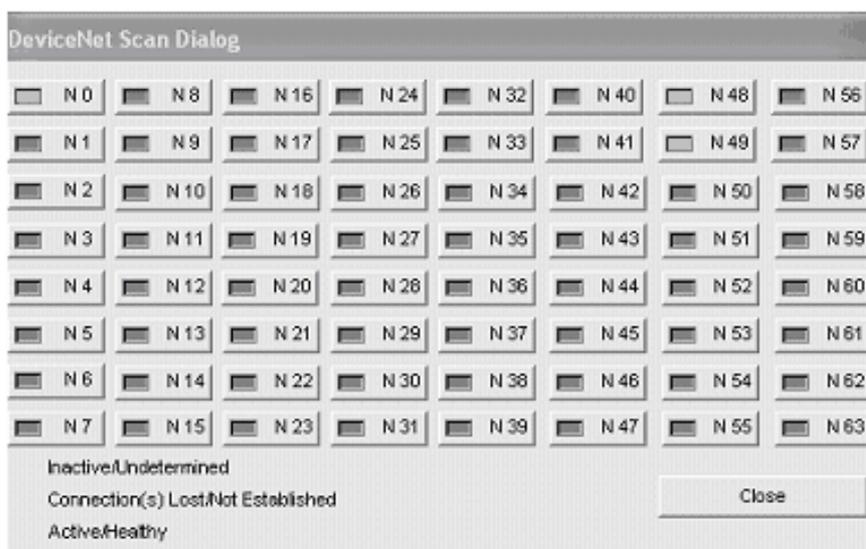
Com o auxílio do analisador *PROFI-MON-MOBIL*, o tempo utilizado é de 1,276ms (12,76% do tempo de varredura) para a quantidade de informação citada acima. Logo, há 8,724ms (87,24%) de tempo disponível para futura expansão da rede.

Para rede Devicenet [54] e utilizando um outro analisador de protocolo, pode-se medir tal tempo para as seguintes condições: mestre (endereço zero), módulos de campo (endereço quarenta e oito e quarenta e nove) contendo um byte de entrada e um byte de saída cada módulo, taxa de transmissão de 125Kbps e tempo de varredura de 69,3ms.

As telas de análise do analisador *X-Analyzer* [55] estão mostradas abaixo, nas figuras 50 e 51.



**Figura 50 – Tela inicial do analisador Devicenet. [55]**



**Figura 51– Características da rede Devicenet proposta. [55]**

A lista de troca de informações entre mestre e módulos de campo para análise do tempo utilizado está a seguir na figura 52.

Com o auxílio do analisador *X-Analyser*, o tempo utilizado é de 12,111ms (17,5% do tempo de varredura) para a quantidade de informação citada acima. Logo, há 57,189ms (82,5%) de tempo disponível para futura expansão da rede.

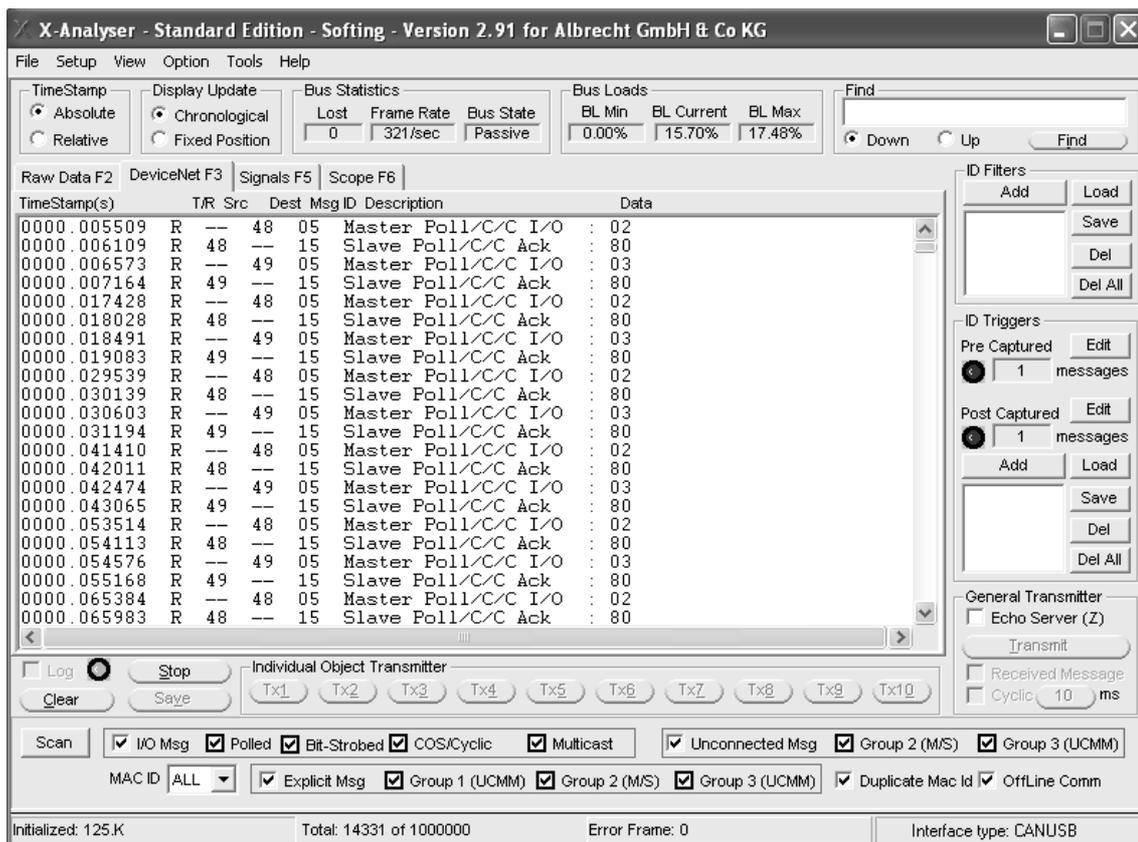


Figura 52 – Análise lógica da rede Devicenet proposta. [55]

A seguir há uma tabela comparativa entre as três redes analisadas acima.

	Ethernet industrial	Profibus DP	Devicenet
Quantidade de módulos de campo	1	1	2
Quantidade de bytes de entrada e saída	2 IN + 2 OUT	2 IN + 2 OUT	2 IN + 2 OUT
Taxa de transmissão	10Mbps	500Kbps	125Kbps
Tempo de varredura	10ms	10ms	69,3ms
Tempo utilizado	125us	1,276ms	12,111ms
Tempo disponível	9,875ms	8,724ms	57,189ms
% de tempo livre	98,75%	87,24%	82,5%
Distância máxima sem repetidor	100 metros	400 metros [52]	500 metros [54]

Tabela 6 – Comparativo entre as rede industriais.

Para as análises realizadas acima, o tempo de processamento do software aplicativo do usuário não foi considerado, somente a parte relativa à comunicação entre o mestre controlador e os módulos de campo é que estão representadas.

Pode-se perceber que a rede Ethernet industrial é a mais rápida em relação ao tempo utilizado, podendo adicionar maiores quantidades de informação em uma futura expansão da

rede. Contudo, é a que possui a menor distância, pois opera com a maior taxa de transmissão. As quantidades de entradas e saídas são as mesmas para os três casos (dois bytes de entrada e dois bytes de saída), diferindo apenas a parte lógica das redes (taxa de transmissão e tempo de varredura).

## 6.2 Conclusões dos resultados

Na primeira simulação o software comportou-se bem próximo ao sistema real da ODVA, de acordo com as medidas de tempo, o tempo de varredura permaneceu em torno de 125us para os dois casos (ODVA e simulador). A medida de tempo foi realizada utilizando um analisador de rede (*Ethereal*<sup>[51]</sup>) nas mesmas condições da rede simulada pelo software. A solução proposta está de acordo com o simulador da ODVA, conforme verificado nos tempos de varredura da primeira simulação.

A segunda simulação mostrou-se eficaz para o usuário ter a possibilidade de alterar os parâmetros de sua rede conforme seu processo produtivo. A primeira vista, o sistema proposto não realizaria a comunicação entre controlador mestre e os módulos de campo, pois o tempo utilizado pelos módulos era maior do que o tempo de varredura da rede. Contudo, foram realizadas outras simulações a fim de se corrigir o problema da falta de comunicação da rede. Para isso, alterou-se a taxa de transmissão (não afetando o sistema em si) e, em seguida, o tempo de varredura (afetando toda a rede, pois o sistema torna-se mais lento para a comunicação entre o controlador mestre e os módulos de campo).

Então, de acordo com essa simulação é possível perceber que:

- O problema da falta de comunicação foi solucionado de duas maneiras distintas: alterando-se a taxa de transmissão e o tempo de varredura.

- As simulações e alterações não afetaram fisicamente a rede simulada.

- O tempo e o custo da simulação são pequenos se comparados a uma rede em operação com esse tipo de problema. Para uma rede em operação, seria necessário configurar toda a rede com os elementos já instalados e o processo produtivo estaria todo parado (perda de capital por falta de produção), gerando grande desconforto por parte do usuário e do fabricante.

- Os conceitos básicos da tecnologia da rede Ethernet industrial, como distâncias de cabos, elementos na rede e taxa de ocupação, foram discutidos e o usuário pôde compreender os seus conceitos básicos através das simulações realizadas.

Assim, os problemas citados no capítulo cinco, página trinta e quatro, foram simulados e previstos antes de se ter qualquer elemento instalado ou configurado na rede Ethernet industrial.

A terceira simulação evidenciou a parte física da rede Ethernet industrial. A rede foi configurada para cada trecho e os valores elétricos foram mostrados automaticamente pelo simulador. O limite de distância para cada trecho da rede é de cem metros. Caso esse limite seja excedido, uma mensagem de aviso é mostrada para o usuário. Há a opção de alterar a topologia da rede utilizando *switches* de quatro ou oito portas. Nesse caso, o usuário tem a possibilidade de visualizar a melhor topologia física para montagem de sua rede Ethernet industrial.

A quarta simulação mostra um comparativo entre a Ethernet industrial e as redes industriais do mercado a fim de enriquecer o trabalho realizado evidenciar os tempos envolvidos em cada um dos sistemas. Para uma mesma quantidade de dados de entrada e saída (dois bytes), cada uma das redes se comportou de uma maneira, com relação ao tempo utilizado. A tabela 6 ilustra as características e os resultados para as três redes analisadas: Ethernet industrial (através do software), Profibus DP (através de um analisador de protocolo) e Devicenet (através de um outro analisador de protocolo). A rede Ethernet é a que possui menor tempo utilizado, porém é a que possibilita uma menor distância total da rede.

Então, com as simulações realizadas, pôde-se perceber:

- A validação do desenvolvimento do software comparado ao da ODVA (simulação um).
- A resolução dos problemas de tráfego com o auxílio do software (simulação dois).
- A verificação de como a rede está fisicamente disposta sem ter nenhum elemento instalado em campo, evitando grande perda de tempo para reparos e altos custos na alteração do projeto físico da rede (simulação três).
- A comparação dos resultados de uma determinada aplicação simulada, com relação a outras redes industriais do mercado (simulação quatro).

### **6.3 Dificuldades encontradas**

Muitas dificuldades foram encontradas neste trabalho. O ponto de partida foi encontrar alguma aplicação que realmente fosse útil aos usuários de automação industrial. Através de visitas técnicas reais e experiências práticas, verificou-se a grande necessidade de um maior

conhecimento da tecnologia utilizada, com um baixo tempo e custo para implantação do sistema proposto.

Com a idéia já amadurecida, a outra dificuldade foi escolher uma linguagem de programação e uma plataforma que realmente atendesse as expectativas e pudesse solucionar o problema proposto. A primeira tentativa foi utilizar a plataforma *Visual C++*, porém os recursos gráficos (operação com imagens e geração de gráficos) são muito escassos nessa plataforma e de difícil codificação. A segunda tentativa foi utilizar a plataforma *Delphi*, porém os recursos de cálculos são limitados e a codificação para integrar a parte gráfica à parte de cálculo seria muito difícil. Por fim, na terceira tentativa, utilizou-se a plataforma *Borland Builder C++*, que é uma mistura ideal de recursos gráficos e rapidez em cálculo.

Assim, essa plataforma foi adotada. A partir daí, várias dificuldades em implementação do código foram surgindo, sendo mais significativo, o aprendizado dos comandos e funções específicas da plataforma *Borland Builder C++*.

A primeira dificuldade na codificação foi a criação do gráfico dos tempos utilizados e disponíveis, além do gráfico individual de cada módulo de campo alocada na rede.

A segunda dificuldade na codificação foi codificar toda a parte gráfica (imagens do controlador mestre, dos *switches* e dos módulos de campo) e entrelaçar um elemento a outro, realizar função de movimento, de propriedades, de apagar um elemento e de inserir um novo.

A terceira dificuldade na codificação foi a implantação do cabo na rede. Foi necessário utilizar o conceito de *thread* para possibilitar o movimento dos elementos com a rede já desenhada e realizar o desenho do cabo sem comprometer a velocidade de processamento do software e as outras funções já codificadas.

Por último, foi necessário realizar as seguintes averiguações:

- Testes funcionais no software para verificar seu funcionamento;
- Comparação com um sistema real para aceitação dos resultados;
- Realização de inúmeros tratamentos de exceções para impossibilitar o usuário de operar com valores irreais dentro do software (retirar as possibilidades do usuário entrar com valores irreais para simulação, por exemplo, tempo de varredura negativo).

## 7 CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

Com o auxílio das simulações e do software, é possível que o usuário tenha dados concretos do seu sistema, ainda na fase de projeto, tanto na parte física (distância e cabos) quanto na parte lógica da rede (tempos de comunicação). Assim, no momento da instalação e configuração da rede, muitos problemas relativos ao projeto já foram discutidos e simulados, minimizando o tempo de partida e os custos da planta industrial.

No trabalho realizado, a visualização, as características e as simulações dos elementos da rede foram atendidas de acordo com as redes Ethernet industriais do mercado, conforme se verificou nos resultados da primeira simulação. As simulações mostram claramente quais são as opções que o usuário possui com relação à quantidade de informação que se deseja trafegar em sua rede em função do tempo para transmissão e recepção das mensagens.

A validação do software proposto com relação a um sistema real (software da ODVA para rede Ethernet/IP) também pôde ser verificada, tornando-o uma importante ferramenta para o usuário simular e configurar a parte física e lógica da sua rede Ethernet industrial sem a necessidade de nenhum elemento ligado fisicamente.

Os problemas listados no capítulo quatro, parte física e lógica da rede, conhecimento da tecnologia e previsão de futuros problemas, foram resolvidos, analisados e previstos, através da segunda e terceira simulações e mostrados nas conclusões dos resultados do software.

Outra contribuição ao usuário de redes industriais é o fato do software não se prender a um único padrão de rede Ethernet industrial, como por exemplo, uma aplicação muito específica envolvendo Profinet IRT, por exemplo. Pode ser utilizado independente do padrão que o usuário irá determinar para o funcionamento do seu processo industrial, pois as redes Ethernet industriais operam com camada Ethernet, IP e UDP para tráfego de informação de I/O.

Assim, não importa o tipo de rede Ethernet industrial a ser implementado após a simulação (Ethernet/IP, Profinet ou HSE), desde que não opere com TCP (parametrização à distância dos elementos da rede) ou com aplicações muito peculiares, como é o caso do Profinet IRT.

## 8 TRABALHOS FUTUROS

Para a continuação do trabalho realizado, é possível implementar algumas funções extras para maior auxílio ao usuário.

- Implementação de funções para comunicação via TCP para configurações de parâmetros dos módulos de campo e medição de tempo de resposta dessas mensagens de parâmetros.

- Possibilidade de simulação para outros protocolos utilizados no mercado atual brasileiro, como por exemplo, Profibus, Devicenet, Foundation Fieldbus, AS-i, entre outros. Nesse caso, o usuário poderia escolher qual seria o protocolo ideal para sua planta industrial através das simulações realizadas nos diversos protocolos de mercado.

- Possibilidade da implementação de uma função extra para conexão do computador com uma rede Ethernet industrial real externa. Nesse caso, o software serviria como um analisador da rede já instalada, realizando as medidas de tráfego e distância, validando o processo produtivo e a rede em questão. Assim, seria possível analisar uma rede simulada e, futuramente, comissionar (testar) uma rede real implementada em campo.

Com essas funções implementadas, o usuário de redes Ethernet industriais teria a opção de simular, conectar o software a uma rede real instalada para averiguação dos parâmetros simulados e comparar a simulação entre os diversos protocolos do mercado, a fim de escolher o mais adequado à sua aplicação fabril.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TANENBAUM, Andrew S. **Redes de Computadores**, São Paulo, Editora Campus, 3º ed., 1997, 923p.
- [2] FELSER, Max; SAUTER Thilo. **The Fieldbus War: History or Short Break Between Battles**. IEEE Article, 4<sup>th</sup> IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, Vasteras, Sweden, August 28-30, 2002, 73-80p.
- [3] FELSER, Max; SAUTER Thilo. **Standardization of Industrial Ethernet – the Next Battlefield?** IEEE Article, 6<sup>th</sup> IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, Vasteras, Sweden, 2004, 413-421p.
- [4] BROOKS, Paul. **Ethernet/IP – Industrial Protocol**. IEEE Article, Rockwell Automation’s European Market Manager, Belgium, 2001, 505-514p.
- [5] HELD, Gilbert. **Ethernet Networks**, London, Wiley Editor, 2<sup>nd</sup> ed., 2000, 458p.
- [6] Site da Internet: Harting, soluções para conexão em redes, visitado em 02/2007.  
[www.harting.com/br/pt/en/countries/br/products/etherin/index.pt.html](http://www.harting.com/br/pt/en/countries/br/products/etherin/index.pt.html)
- [7] Site da Internet: Associação Profinet Internacional. Catálogo de produtos e fabricantes, visitado em 02/2007.  
[www.profibus.com/pn/technology/description/](http://www.profibus.com/pn/technology/description/)
- [8] Site da Internet: Sixnetio, Equipamentos para Ethernet industrial, visitado em 11/2006.  
[www.sixnetio.com/html\\_files/products\\_and\\_groups/switch\\_ring.htm](http://www.sixnetio.com/html_files/products_and_groups/switch_ring.htm)
- [9] Site da Internet: MADREN Frank. **Power over Ethernet – The Last Frontier in Industrial Communications Standards** - PoE articles. President GarrettCom, 26<sup>th</sup> May 2006, visitado em 11/2006.  
[www.poweroverethernet.com/articles.php?article\\_id=354](http://www.poweroverethernet.com/articles.php?article_id=354)

---

[10] Site da Internet: Texas Instruments – PoE solutions, visitado em 12/2006.

[www.ti.com/poe](http://www.ti.com/poe)

[11] Site da Internet: MORGAN, Tony. **Power over Ethernet - The Reality of Designing a Powered Device** - PoE articles. Senior Applications Engineer, Silver Telecom, 10<sup>th</sup> July 2006, visitado em 11/2006.

[www.poweroverethernet.com/articles.php?article\\_id=370](http://www.poweroverethernet.com/articles.php?article_id=370)

[12] Site da Internet: PICARD, Jean. **Application Note on Electrical Transient Immunity for Power over Ethernet** - PoE articles. Texas Instrument Manager, 8<sup>th</sup> September 2006, visitado em 12/2006.

[www.poweroverethernet.com/articles.php?article\\_id=380](http://www.poweroverethernet.com/articles.php?article_id=380)

[13] SOARES, Luiz Fernando; LEMOS, Guido; COLCHER, Sérgio. **Redes de Computadores: das LANs, MANs e WANs às Redes ATM**, São Paulo, Editora Campus, 2<sup>o</sup> ed., 2000, 705p.

[14] COMER, Douglas E. **Internetworking with TCP/IP – Vol I – Principles, Protocols and Architecture**, USA, Prentice-Hall International Editor, 4<sup>th</sup> ed., 2000, 750p.

[15] ROSE, Marshall T. **The Open Book: a Practical Perspective on OSI**, USA, Prentice-Hall International Editor, 1<sup>st</sup> ed., 1990, 400 pages.

[16] SOUZA, Linderberg B. **Redes de Computadores: Dados, Voz e Imagem**, São Paulo, Editora Érica, 5<sup>o</sup> ed., 1999, 484p.

[17] THOMESSE, Jean-Pierre. **Fieldbus Technology in Industrial Automation**. IEEE Article, Nancy University, France, 2005, 1073-1101p.

[18] Site da Internet: POSTEL, Jon. **RFC 791 – Internet Protocol, DARPA Internet Program Protocol Specification**. University of Southern Califórnia, USA, September 1981, visitado em 03/2007.

<ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/rfc791.txt>

---

[19] Site da Internet: **Transmission Control Protocol – RFC 793**. University of Southern Califórnia, USA, September 1981, visitado em 04/2007.

[www.ibiblio.org/pub/docs/rfc/rfc793.txt](http://www.ibiblio.org/pub/docs/rfc/rfc793.txt)

[20] Site da Internet: LARSSON, Lars. **Fourteen Industrial Ethernet solutions under the spotlight**. The Industrial Ethernet Books, Issue 28, September 2005, visitado em 04/2007.

[www.ethernet.industrial-networking.com/articles/articledisplay.asp?id=854](http://www.ethernet.industrial-networking.com/articles/articledisplay.asp?id=854)

[21] Site da Internet: Associação Profibus Internacional – Divisão Profinet. Visitado em 04/2007.

[www.profibus.com/pn/](http://www.profibus.com/pn/)

[22] POPP, Manfred; WEBBER, Carl. **The Rapid Way to PROFINET**. PROFIBUS Nutzeorganisation, order 4182, 2004, 244p.

[23] Site da Internet: Siemens AG Internacional. Curso Web de Profinet, visitado em 05/2007.

[www.sitrain.com/modules/profinet\\_en/times/index\\_1024.htm](http://www.sitrain.com/modules/profinet_en/times/index_1024.htm)

[24] JASPERNEITE, J.; FELD J. **PROFINET: An Integration Platform for heterogeneous Industrial Communication Systems**. IEEE Article, Phoenix Contact and Siemens, Germany, 2005, 815-822p.

[25] PROFIBUS Working Group. **PROFINet, Architecture Description and Specification**. Norma Profinet elaborada pela Associação PROFIBUS Internacional, Version 1.0, August 2001.

[26] PROFIBUS Working Group. **GSDML Specification for PROFINET IO**. Norma Profinet elaborada pela Associação PROFIBUS Internacional, Version 2.10, August 2006.

[27] Site da Internet: Treinamento Siemens, visitado em 10/2006.

[www.sitrain.com/modules/profinet\\_en/times/index\\_1024.htm](http://www.sitrain.com/modules/profinet_en/times/index_1024.htm)

- 
- [28] SKEIE, T.; et al. **ETHERNET in Substation Automation**. IEEE Article, IEEE Control Systems Magazine, Switzerland, June 2002, 43-51p
- [29] FERRARI, A. et al. **Response Time Evaluation of PROFINET Networks**. IEEE Article, IEEE ISIE, Dubrovnik, Croatia, June 2005, 1371-1376p.
- [30] Site da Internet: Revista eletrônica – Industrial Ethernet, visitado em 01/2007.  
[www.ethernet.industrial-networking.com/articles/articledisplay.asp?id=1165](http://www.ethernet.industrial-networking.com/articles/articledisplay.asp?id=1165)
- [31] ODVA Profile File, **Network Infrastructure for Ethernet/IP: Introduction and Considerations**. ODVA Publication PUB00035R0, January 2007, 118p.
- [32] DECOTIGNIE J. D. **Ethernet-Based Real-Time and Industrial Communications**. IEEE article, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, N° 06, June 2005, 1102-1117p.
- [33] Ethernet/IP Specification Release 1.0 - June, 2001. Norma Ethernet/IP elaborada pela ODVA.  
[www.odva.org](http://www.odva.org)
- [34] HOON P. S.; et al. **Foundation Fieldbus – HSE Implementation**, IEEE Article, Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Intelligent Control, Canada, October 2002, 777-782p.
- [35] Site da Internet: Organização Foundation Fieldbus Internacional, Technical Overview, visitado em 01/2007.  
[www.fieldbus.org](http://www.fieldbus.org)
- [36] Site da Internet: Revista eletrônica – Industrial Ethernet, visitado em 12/2006.  
[www.ethernet.industrial-networking.com/ieb/articledisplay.asp?id=854](http://www.ethernet.industrial-networking.com/ieb/articledisplay.asp?id=854)
- [37] FILHO C. S. **Foundation Fieldbus**, Apostila para treinamento, Departamento de Engenharia Eletrônica, UFMG, Cap. 4, 2004.

---

[38] YOUN, G.; et al. **Ring Topology-based Redundancy Ethernet for Industrial Networks**. IEEE article, International Joint 2006 Conference, Korea, October 2006, 1404-1407p.

[39] Site da Internet: Empresa Sense Eletrônica, relatório técnico de visita a cliente, 10/2006.  
[www.sense.com.br](http://www.sense.com.br)

[40] Site da Internet: Empresa Emerson Process Management, software de simulação: **Segment Design Tool**, 05/2006.  
[www.emersonprocess.com/home/](http://www.emersonprocess.com/home/)

[41] XI, B.; et al. **Use of Ethernet for Industrial Control Networks**. IEEE article, Department of Automation Wuhan University, China, 2006, 1-4p.

[42] MOYNE, J. R., TILBURY, D., M. **The Emergence Industrial Control Networks for Manufacturing Control, Diagnostics, and Safety Data**. IEEE article, Proceedings of IEEE, Vol. 95, Number 1, January 2007, 29-47p.

[43] Site da Internet: Borland Builder – Plataforma de programação em linguagem C++, visitado em 06/2006.  
[www.borland.com](http://www.borland.com)

[44] ALMEIDA, W. M. **Conhecendo o C++ Builder 6**, São Paulo, Editora Bookman, 2ª ed., 2003, 324p.

[45] DEITEL, H. M.; DEITEL, P. J. **C++: Como Programar**, São Paulo, Editora Novatec, 3ª ed., 2001, 1098p.

[46] Site da Internet: Fórum Dicas BCB para auxílio em conceitos de programação e códigos fontes, visitado em 05/2007.  
[www.dicasbcb.com.br](http://www.dicasbcb.com.br)

[47] GUEDES, G. T. A. **UML: Uma Abordagem Prática**, São Paulo, Editora Novatec, 2ª ed., 2006, 320p.

- 
- [48] PENDER, T. **UML: a Bíblia**, São Paulo, Editora Campus, 2º ed., 2004, 752p.
- [49] MACHADO, F. B. e MAIA, L. P. **Arquitetura de Sistemas Operacionais**, São Paulo, Editora LTC, 4º ed., 2007, 328p.
- [50] Site da Internet: Fabricante de cabo para rede Profinet e Ethernet/IP, **Lapp Cable – Section 8, Bus Cables & Industrial Ethernet Cables**, visitado em 04/2007.  
[www.lappusa.com](http://www.lappusa.com)
- [51] Site da Internet: **Ethereal [online] – A network protocol analyzer**, visitado em 06/2006.  
[www.ethereal.com](http://www.ethereal.com)
- [52] Site da Internet: Associação Profibus Internacional – Divisão Profibus. Visitado em 01/2007.  
[www.profibus.org](http://www.profibus.org)
- [53] Site da Internet: **PROFI-MON-MOBIL – MÓbile PROFIBUS Analyzer**, visitado em 08/2005.  
[www.softing.com](http://www.softing.com)
- [54] Devicenet Specification Release 3.0 - February, 2007. Norma Devicenet elaborada pela ODVA, revisão 3.  
[www.odva.org](http://www.odva.org)
- [55] Site da Internet: **X-Analyser – A Devicenet and CAN analyzer**, visitado em 12/2006.  
[www.warwickcontrol.com](http://www.warwickcontrol.com) e [www.x-analyser.com](http://www.x-analyser.com)
- [56] CERF, V. G., KHAN, R., E. **A Protocol for Packet Network Intercommunication**. IEEE article, from IEEE Trans on Comms, Vol. Comm-22, 1974, 1-13p.
- [57] Site da Internet: **Definição do protocolo de comunicação Ethernet**, visitado em 10/2007.  
[www.en.wikipedia.org/wiki/Ethernet](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Ethernet)

---

[58] Site da Internet: Empresa Rockwell Automation, figuras dos elementos da ferramenta proposta, 05/2006.

[www.ab.com](http://www.ab.com)