



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

TIAGO ABREU TAVARES DE SOUSA

ANÁLISE DE INTERFACE PLC

Campina Grande, Paraíba
Março de 2011

TIAGO ABREU TAVARES DE SOUSA

ANÁLISE DE INTERFACE PLC

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Informação

Orientador:

Professor Alexandre Cunha Oliveira, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Março de 2011

TIAGO ABREU TAVARES DE SOUSA

ANÁLISE DE INTERFACE PLC

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Informação

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Alexandre Cunha Oliveira, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à Deus e minha família, pai, mãe e irmãos, que sempre torceram por mim, apoiando e oferecendo tudo que precisei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por todas as graças que recebo e sempre recebi, mesmo não sendo merecedor.

Agradeço também à minha mãe, Maria Auxiliadora, e a meu pai, José Tavares, por terem esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, sempre sendo exemplo de luta e honestidade.

Agradeço também a toda minha família, alicerce que sempre me sustentou, estimulou e orientou.

Agradeço ao Professor Alexandre, pela maneira respeitosa e amigável que trata seus orientandos, bem como pela disposição em ajudar mesmo que atarefado.

Agradeço aos colegas de curso, com quem enfrentei muitas noites e feriados de estudo, e em especial aos colegas de laboratório, Vinícius e Pierre, que muitas vezes pararam suas atividades para me ajudar.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje, de forma especial a amigos e irmãos que fiz no EJC e na PJ, ambos do Catolé.

*“Quem não vive para servir,
não serve para viver.”*

Gandhi.

RESUMO

Para comunicar dispositivos sem a instalação de novos cabos a alternativa mais barata e simples é o uso de comunicação pela rede elétrica, ou PLC (*powerline communication*), neste trabalho criamos uma interface simples para gerenciar este tipo de comunicação. Com a interface criada qualquer dispositivo pode interagir em uma rede PLC através de uma porta serial, seja este computador, controlador, sensor ou atuador. Entre as tecnologias PLC existentes, será avaliada a tecnologia “*LonWorks*” que é utilizada pelo modem PL3120 (Echelon), escolhido para integrar a interface. As funcionalidades e limitações do modem PL3120, e seu processador Neuron, responsável pela execução do protocolo nas redes “*LonWorks*” serão discutidas de modo a subsidiar na compreensão do funcionamento da interface. Na avaliação da interface, três figuras de mérito serão utilizadas para caracterização da interface PLC:

1. Tempo mínimo entre transmissões de pacotes;
2. Confiabilidade do canal de comunicação;
3. Robustez a ruído.

Palavras-chave: PLC, LonWorks, Variáveis de rede.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Principais problemas encontrados na transmissão de dados pela rede elétrica.	1
Figura 2. Exemplo de sistema distribuído. (DUQUE, 2001).....	2
Figura 3. Propagação dos símbolos nas três fases (VA, VB e VC) no protocolo X-10.(DUQUE, 2001).	3
Figura 4. Pacote de dados do protocolo X-10.	4
Figura 5. Implementação das estruturas de dados em um pacote CEBus. Esta estrutura.....	5
Figura 6. Frequencias utilizadas pela tecnologia Dual Carrier Frequency.....	6
Figura 7. Exemplo de conexões de NetWork Variables (NV's) de diferentes dispositivos.....	9
Figura 8. Modulação digital.(PINHO, 2005).....	10
Figura 9. Sinal modulado em BPSK. (LANGTON, 2005) (5).....	11
Figura 10. Alocação da memória compartilhada. (PL3120-3150 Databook).	14
Figura 11. Acesso a ULA/Memória em um único ciclo de clock no sistema de mirror clock.	14
Figura 12. Dispositivo de monitoramento de temperatura e hora em tempo real.	17
Figura 13. Escalonador (scheduler) definido no fimrware do Neuron. (Neuron C Progamers Guide, 2003) (6).....	18
Figura 14. Foto do circuito utilizado na interface.	19
Figura 15. Bloco funcional UFBT_TCC, com duas NVs de 30bytes, sendo uma entrada e uma saída e uma propriedade de configuração de rede.	20
Figura 16. Esquema da rede com referência de posicionamento dos modens PLC, emissor na posição 0m e receptor na posição 250m.	25
Figura 17. Espectros dos sinais presentes na rede elétrica, o sinal original natural da rede sem ruído sem e com transmissão. Imagem com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.....	26
Figura 18. Carga de 5Ω para teste de performance de transmissão sugerido pela Echelon.....	26

Figura 19. Espectro do sinal transmitido, do sinal da rede com ruído e do sinal da rede sem ruído (utilizando função Max Hold). Imagem com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.	28
Figura 20. Caracterização da rede quanto à posição da fonte de ruído (lâmpadas eletrônicas).	29
Figura 21. Influência do número de lâmpadas como fonte de ruído na comunicação. ...	30
Figura 22. Espectros do sinal da rede variando o número de lâmpadas eletrônicas como fonte de ruído (utilizando função Max Hold). Imagens com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz..	30
Figura 23. Espectro do sinal da rede com lâmpadas eletrônicas como fonte de ruído (utilizando função Clear Write). Imagem com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.....	31
Figura 24. Espectro do sinal transmitido e do sinal da rede com e sem ruído gerado por lâmpada fluorescente (utilizando função Max Hold). Imagem com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.	32
Figura 25. Caracterização da rede quanto à posição da fonte de ruído (lâmpadas fluorescentes).....	33
Figura 26. Espectros do sinal da rede variando o número de lâmpadas fluorescentes como fonte de ruído (utilizando função Max Hold). Imagens com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.	33
Figura 27. Espectro do sinal na rede com a o ruído gerado por lâmpadas fluorescentes e seus reatores, na posição de 150m do emissor, causa não identificada (utilizando função Max Hold). Imagem com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.	34
Figura 28. Espectro do sinal da rede com lâmpadas fluorescentes e seus reatores como fonte de ruído (utilizando função Clear Write apenas para o ruído na rede). Imagem com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.	34
Figura 29 (a) Ruído gerado por um inversor ligado a um motor de 6A (função Clear Write) (b) Espectro do sinal transmitido para fins de comparação. Ambos estão configurados para 10dB/divisão.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Codificação dos símbolos no protocolo CEBus. (DUQUE, 2001).....	4
Tabela 2. Comparação entre modems da Echelon.(PL3120-3150 Databook).	12
Tabela 3. Testes feitos com cargas de 5Ω apresentadas em (PL3120-3150 Databook).....	27
Tabela 4. Testes realizados ao meio-dia dos dias 13 e 14 de Janeiro de 2011, utilizando como fonte de ruídos lâmpadas 11W, f.p. $\geq 0,5$, $i = 72\text{mA}$	27
Tabela 5. Testes realizados no dia 14 de Janeiro de 2011, às 18h, utilizando como fonte de ruídos lâmpadas 11W, f.p. $\geq 0,5$, $i = 72\text{mA}$	28
Tabela 6. Testes com lâmpadas fluorescentes e seus reatores. Testes realizados nos dias 15, 16 e 17 de Janeiro de 2011.....	31

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo.....	vii
Lista de Ilustrações	viii
Lista de Tabelas	x
Sumário	xi
1 Introdução	1
1.1 Técnicas de transmissão de dados em rede elétrica	3
1.1.1 X-10	3
1.1.2 CEBus	4
1.1.3 LonWorks	5
1.2 Fundamentos da modulação para transmissão de dados na rede elétrica	9
1.3 O modem PL3120	11
1.3.1 Arquitetura do Processador Neuron	12
1.3.2 A linguagem Neuron C.....	15
1.3.3 Escalonamento de Tarefas (<i>Scheduler</i>).....	17
2 A Interface PLC	19
2.1 O Neuron	19
2.2 Os PICs.....	21
3 Procedimentos Experimentais	23
3.1 Materiais Utilizados	23
3.2 Descrição do Cenário de Testes.....	23
3.3 Apresentação dos Dados e Análise dos Resultados	24
3.3.1 Cargas de 5Ω	26
3.3.2 Lâmpadas Eletrônicas.....	27
3.3.3 Lâmpadas Fluorescente	31
3.3.4 Inversor	34
4 Conclusão.....	36
Bibliografia	38

1 INTRODUÇÃO

Desde 1920 a “American Telephone and Telegraph Company” tem registro de patentes que mostram sistemas para transmissão e recepção de sinais de comunicação em redes AC trifásicas, mas só na década de 70 recebeu a atenção dos pesquisadores europeus e asiáticos.

Essa tecnologia, hoje conhecida como Comunicação por Rede Elétrica, ou *Power Line Communcation* (PLC), permite o tráfego de dados na rede a taxas elevadas, de forma que existem estudos e até projetos em funcionamento para utilizar este meio para internet banda larga, a exemplo do Projeto Barreirinhas no Maranhão, no qual o Ministério das Comunicações e empresas associadas criaram uma “Vila Digital” em 2007, a cidade conta com 150 pontos de acesso gratuito à internet banda larga, esses pontos são escolas, postos de saúde, órgãos públicos, residências e pequenas empresas (1).

Neste processo, a rede elétrica é apenas um meio físico de transmissão do sinal, qualquer ponto de comunicação deverá ter um adaptador de redes PLC, ou modem PLC, que fará a ponte entre a tomada elétrica e o dispositivo comunicante.

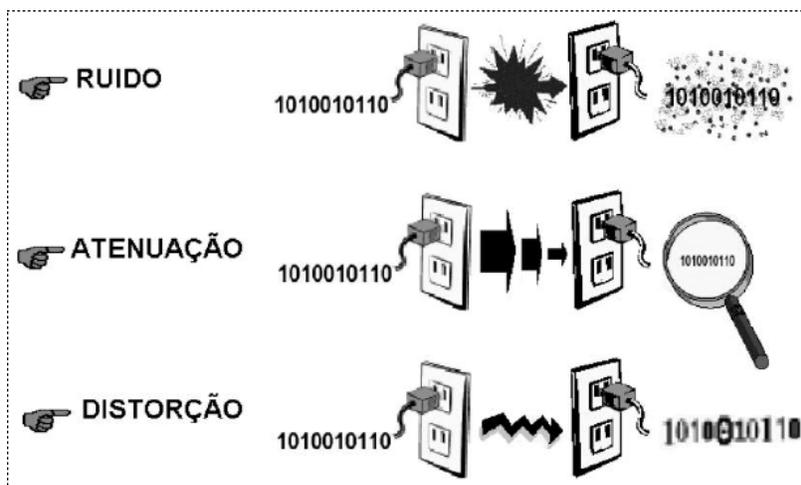


Figura 1. Principais problemas encontrados na transmissão de dados pela rede elétrica. (DUQUE, 2001).

A idéia é basicamente modular o sinal a ser transmitido com uma portadora de frequência elevada (80kHz ou maior), de forma que este sinal possa coexistir com o sinal de potência da rede elétrica (50 - 60Hz). Porém esse também é um dos principais

problemas da transmissão de dados nesse meio: a rede de energia elétrica, e seus componentes (transformadores, capacitores, linhas de transmissão, motores, etc.) é projetada para funcionar com equipamentos que operam na frequência 60 Hz, ou seja, a rede elétrica é projetada para fornecer potência, e não para transmitir dados (2), o que causa principalmente os problemas apresentados na Figura 1.

A superação desses problemas torna a rede elétrica um potencial meio de comunicação, tendo como vantagem o fato da mesma estar previamente instalada. Dessa forma, evita-se a instalação de mais cabos de comunicação, podendo ampliar o número de dispositivos comunicantes, com a incorporação da tecnologia PLC. Hoje, a principal aplicação do PLC são sistemas distribuídos.

Um exemplo seria o sistema de aquecimento, ventilação e ar-condicionado de um edifício comercial (DUQUE, 2001), esses sistemas precisam de muitos sensores e atuadores espalhados no prédio para que os dutos de ar sejam abertos ou fechados e equipamentos ligados ou desligados corretamente, porém o uso de cabos específicos para comunicação, tanto com sensores como com atuadores seria muito custoso, uma alternativa é o uso de uma rede PLC.

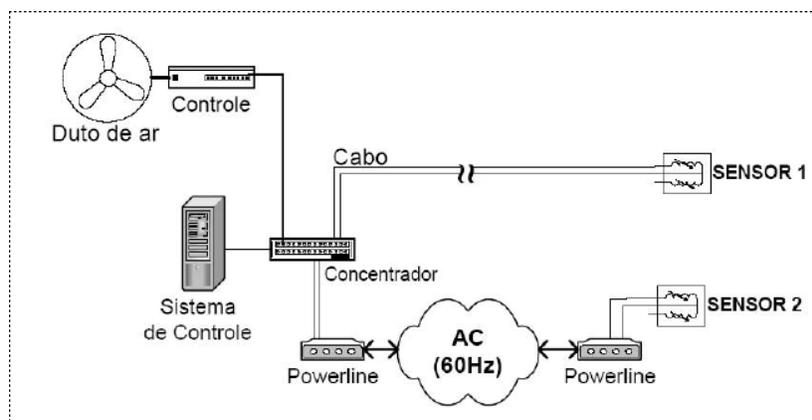


Figura 2. Exemplo de sistema distribuído. (DUQUE, 2001).

O sistema distribuído da Figura 2 retrata o exemplo citado. Neste trabalho procuramos desenvolver uma interface que possa ser utilizada, por exemplo, no sensor 2 da figura, em sistemas que precisem transmitir baixas quantidades de dados, inicialmente pensado para possibilitar a comunicação entre Filtros Ativos de Potência Shunt.

1.1 TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO DE DADOS EM REDE ELÉTRICA

Algumas das mais difundidas tecnologias de transmissão pela rede elétrica serão apresentadas aqui.

1.1.1 X-10

Essa tecnologia, apesar de ser uma das mais antigas e limitadas, é suficiente para sistemas em que são aceitáveis atrasos e pouca confiabilidade, pois não faz controle de acesso eficiente. Sua principal vantagem é a simplicidade, o que faz com que seja também a mais difundida.

Nessa tecnologia os símbolos (bits) são modulados por amplitude em portadoras de 120KHz, e enviados apenas quando ocorre uma passagem do sinal fundamental de rede (60Hz) pelo zero, com um atraso máximo de 50 μ s. Para garantir que o sinal se propagará nas três fases o símbolo também será enviado mais duas vezes, uma atrasada de 60° elétricos e outra de 120°, como retratado na Figura 3.

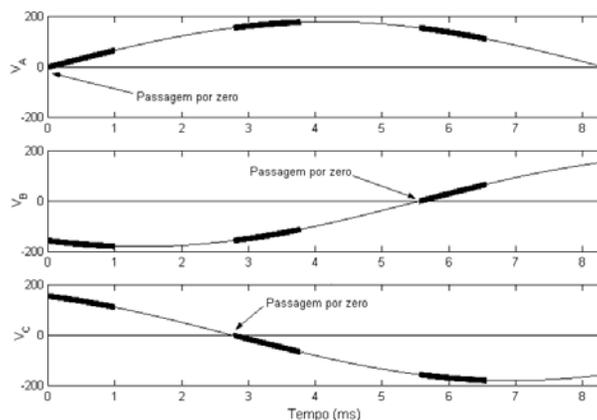


Figura 3. Propagação dos símbolos nas três fases (V_A , V_B e V_C) no protocolo X-10.(DUQUE, 2001).

Esse protocolo utiliza modulação por amplitude, ou seja, a presença do sinal de 120kHz representa o bit “um” e a ausência representa o bit “zero”.

Um pacote de dados no protocolo X-10 tem 22bits, ou seja, é enviado em 11 ciclos de tensão, porém é necessário um silêncio de 3 ciclos entre pacotes na rede. A Figura 4 mostra a composição de um desses pacotes.

endereço de origem e o restante de dados. Antes de ser enviado o pacote é encapsulado entre um preâmbulo e um código de verificação de erros, como pode ser visto na Figura 5.

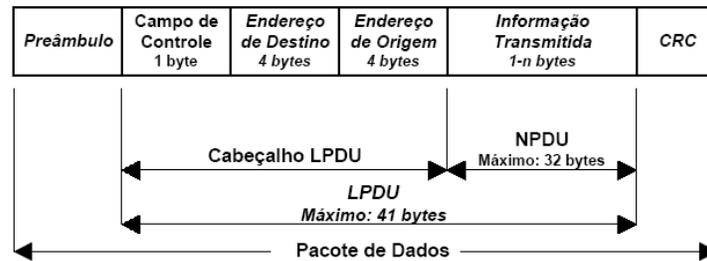


Figura 5. Implementação das estruturas de dados em um pacote *CEBus*. Esta estrutura de pacote só é válida para os meios PowerLine e RF. (DUQUE, 2001).

1.1.3 LONWORKS

O protocolo LonWorks, também conhecido como LonTalk, submetido pela Echelon ao IEE possibilita uma comunicação entre dispositivos sem o conhecimento da topologia da rede, dos nomes, dos endereços, ou mesmo das funcionalidades dos dispositivos da rede. Esse protocolo será mais detalhado por ser o protocolo utilizado pelo modem escolhido.

Apesar de se basear no uso de modulação por frequência única para a transmissão de pacotes, o padrão LonWorks utiliza a tecnologia de Dual Carrier Frequency (DCF), que possibilita a alternância entre duas frequências, escolhidas para sofrer menor perturbação da rede. Os protocolos que a tecnologia DCF utiliza são o CENELEC EN50065-1 e o EIA-709.2, que permitem a comunicação de dados a uma taxa de 5400 bps (2).

Com essa tecnologia o protocolo se torna mais tolerante a ruídos na rede, pois pacotes são inicialmente enviados em uma frequência primária, se não houver confirmação de recebimento é utilizada a frequência secundária. Se a não confirmação continuar ocorrendo os pacotes são transmitidos alternando a frequência da portadora entre a primária a secundária. As frequências utilizadas são 75kHz e 86kHz para a banda A do protocolo CENELEC e 115kHz e 132kHz para a banda C, ver Figura 6.

O protocolo LonWorks é estruturado em pacotes e camadas, e provê uma comunicação par a par e independente do meio. O protocolo ISO (*International Standards Organization*) OSI (*Open Systems Interconnect*) serviu como modelo para o

LonWorks, porém, diferente do ISO OSI, a Echelon definiu um protocolo para sistemas de controle de requerimento específico:

- A *camada física*: define a transição dos bits no canal de comunicação. A camada física garante que o bit enviado será recebido corretamente por todos os destinatários. O protocolo LonWorks é independente do meio, pois múltiplos protocolos de camada física são suportados, ou seja, o protocolo de camada física que mais se adéque ao meio escolhido pode ser utilizado.

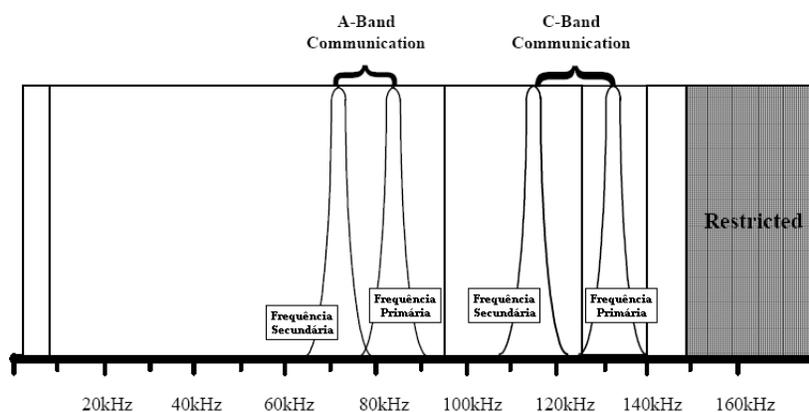


Figura 6. Frequências utilizadas pela tecnologia *Dual Carrier Frequency*. (PL3120-3150 Databook).

- A *camada de enlace*: define os métodos de acesso ao meio e codificação de dados para garantir uso eficiente de um único canal de comunicação. Os bits da camada física são agrupados em data frames. A camada de enlace define quando um data frame pode ser enviado e define como eles são recebidos, detectando erros de transmissão.
- A *camada de rede*: define como os pacotes de mensagens são roteados do dispositivo emissor para os destinatários. Essa camada define nomes e endereços dos dispositivos para garantir a correta entrega de pacotes. Essa camada também define o roteamento se os dispositivos estiverem em canais diferentes.
- A *camada de transporte*: garante a entrega dos pacotes de mensagens. Mensagens podem ser trocadas utilizando um serviço *acknowledgment* (confirmação) e reenvio. A camada de transporte também define como

mensagens duplicadas são detectadas e rejeitadas, em caso de acknowledgment perdido.

- *A camada de seção*: adiciona controle à troca de dados pelas camadas inferiores. Ela define um protocolo de autenticação que possibilitam os destinatários da mensagem determinarem se o emissor é autorizado a enviar essa mensagem.
- *A camada de apresentação*: define uma codificação para os dados da mensagem, adicionando estrutura para a troca de dados nas camadas inferiores. As mensagens devem ser codificadas como variáveis de rede (*network variables*) ou mensagens de aplicação (*application messages*).
- *A camada de aplicação*: possibilita uma compatibilidade da troca de aplicação com dados nas camadas inferiores. Isso é garantido através de uma semântica de interpretação de dados comum aos dispositivos. Essa camada também define um protocolo de transferência de arquivos.

Todo dispositivo no canal recebe todos os pacotes transmitidos e verifica o destino do pacote. Quando um pacote é entregue a um dispositivo destino, o mesmo é processado para verificar se ele tem dados para o programa de aplicação do dispositivo ou se é um pacote de gerenciamento da rede, e se for o caso responde com um *acknowledgment*.

O protocolo LonWorks implementa um conceito novo de variáveis de rede (*network variables* – NV). Uma variável de rede encapsula um dado (temperatura, estado de uma lâmpada, posição do atuador) que um dispositivo espera receber (NV de saída) ou deve enviar a outro dispositivo (NV de entrada).

Durante a instalação da rede, o firmware se encarrega de executar um processo chamado *binding*, que se encarrega de configurar o firmware com o endereço lógico dos outros dispositivos ou grupos de dispositivos, de forma que o programa de aplicação não precisa de nenhuma informação do dispositivo que lhe enviou uma NV de entrada ou do que se destina sua NV de saída.

O processo *binding* cria uma conexão virtual entre duas NV's de dispositivos diferentes, sendo uma de saída e uma de entrada, dessa forma, toda atualização que ocorrer na NV de entrada de um dispositivo será refletido na NV de saída do outro, isso ocorre através de uma conexão “fio virtual”, como se cada NV se comunicasse por um fio diferente.

Duas NV's só podem ser conectadas se forem do mesmo tipo, por exemplo, as duas de temperatura. Isso impossibilita a conexão equivocada, por exemplo de uma variável de saída do tipo temperatura e uma variável de entrada do tipo pressão (3).

Exemplo:

Em um sistema de iluminação ambiente, por exemplo, mesmo a variação da iluminação incidente das janelas não deve variar a iluminação total do ambiente, ou seja, a potência fornecida às lâmpadas deve ser ajustada. Para são necessários dispositivos do tipo sensor luminoso e dispositivos do tipo atuador para lâmpadas

Os dispositivos do tipo sensor devem ter uma variável de rede de saída para controlar as lâmpadas (*nvoLControl*) e uma de entrada com a realimentação da lâmpada (*nviLampFb*), com o nível luminoso emitido e até mesmo se a lâmpada está queimada. Os dispositivos do tipo atuador devem possuir uma variável de entrada do sinal de controle (*nviLControl*) uma variável de saída para a realimentação do sensor (*nvoLampFb*). As possíveis conexões implementadas pelo processo *binding* neste caso estão apresentadas na Figura 7. Uma conexão pode envolver mais de um dispositivo de cada tipo, mas deve haver pelo menos um de cada, pois mesmo que estejam conectadas as NV's *nvoLampFb* dos dispositivos atuadores 1 e 2 não se comunicam, pois ambas são de saída. Em um mesmo meio também pode haver restrições de comunicação. Por exemplo, o dispositivo sensor 1 se comunica apenas com o dispositivo atuador 3, mas como os atuadores 1 e 2 estão na mesma conexão qualquer dispositivo que se comunicar com um se comunicará com o outro.

Uma restrições impostas pelo firmware é o fato de não ser possível conectar as variáveis *nviLampFb* e *nvoLControl*, pois mesmo que uma seja de saída e outra de entrada elas não são do mesmo tipo.

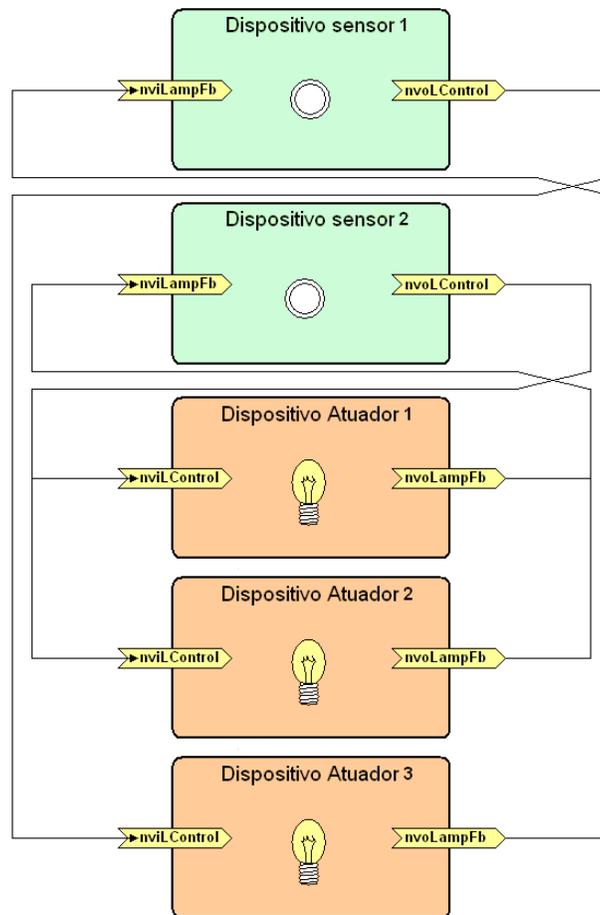


Figura 7. Exemplo de conexões de *NetWork Variables* (NV's) de diferentes dispositivos.

1.2 FUNDAMENTOS DA MODULAÇÃO PARA TRANSMISSÃO DE DADOS NA REDE ELÉTRICA

Um sinal se propagando em um canal está sujeito a sofrer distorção devido a imperfeições e ruídos do meio, assim, para que o receptor tenha acesso à mensagem correta ele deve operar sobre o sinal recebido. Para isso ser possível existem técnicas de modulação para encapsular a mensagem e a corrupção do sinal não impedir sua reconstituição.

A modulação é o processo pelo qual alguma característica de uma onda portadora é variada de acordo com a mensagem (sinal modulante),

produzindo um sinal modulado cujas propriedades são mais compatíveis com as características do canal (PINHO, 2005) (4).

Assim, o receptor é capaz de recriar o sinal transmitido mesmo a partir de uma versão degradada do mesmo. O tipo de modulação é escolhido de acordo com o meio a ser utilizado, de forma a minimizar essa degradação.

Os tipos de modulação podem ser classificados em modulação de pulso e de onda contínua, que ainda podem ser classificadas de acordo com o tipo de mensagem a ser transmitida: modulação analógica (como sinais de voz) ou modulação digital (como dados de computador), aqui só trataremos de modulação digital, as demais não fazem parte do escopo do trabalho.

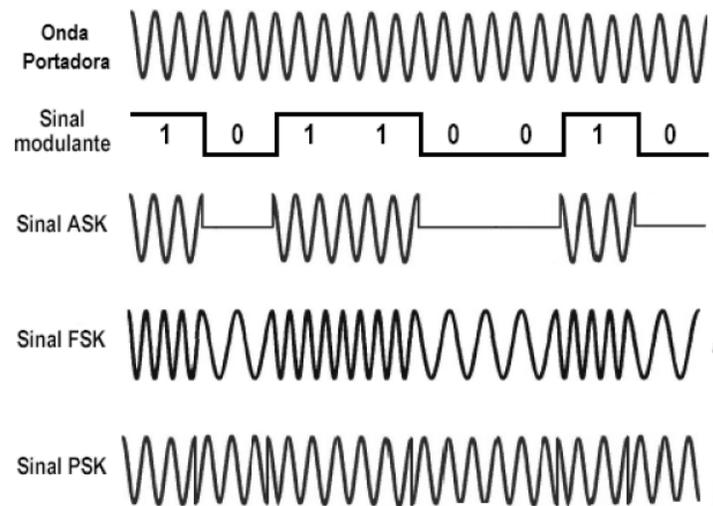


Figura 8. Modulação digital.(PINHO, 2005).

Podemos modular um sinal deslocando a fase do sinal portador de acordo com a mensagem (*Phase Shift Keying – PSK*), ou sua frequência (*Frequency Shift Keying – FSK*), ou sua amplitude (*Amplitude Shift Keying – ASK*), a Figura 8 mostra todos esses tipos de modulação.

Os tipos de modulação apresentadas acima são base para técnicas de modulação mais complexas e robustas, tais como :

- Modulação por deslocamento de fase (PSK) é base para a modulação por deslocamento de fase binário (*Binary Phase Shift Keying – BPSK*) e para

a modulação por deslocamento de fase em quadratura (*Quadrature Phase Shift Keying* – QPSK);

- Modulação por deslocamento de frequência (FSK) é base para a modulação por deslocamento mínimo de frequência (*Minimum Phase Shift Keying* – MSK) e modulação por deslocamento mínimo de frequência com filtro Gaussiano (*Gaussian Minimum Shift Keying* – GMSK).

A modulação PSK pode ter qualquer variação de fase para indicar o dado, quando esta variação é de 180° classificamos a modulação como BPSK, esta é explicitada na Figura 9. Essa modulação é utilizada no modem PL3120 que escolhemos para realização do trabalho.

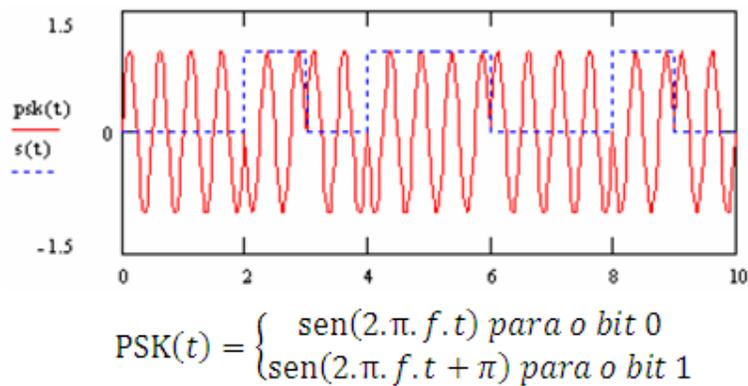


Figura 9. Sinal modulado em BPSK. (LANGTON, 2005) (5).

1.3 O MODEM PL3120

O modem PL3120 da Echelon é resultado de uma vasta experiência da empresa produzindo uma grande variedade de transceptores de banda estreita em uma larga linha de aplicações: predial, industrial e uma vasta gama de transportes (trens, aviões, carros...). Por utilizar recursos como modulação BPSK de banda estreita, operação com portadoras em duas frequências distintas, modulação adaptativa (*adaptive carrier*), cancelamento do ruído impulsivo (*impulsive noise cancelation*), rejeição de tom (*tone rejection*), um código de correção antecipada de erros (*forward error correction* – FEC)

altamente eficiente e de baixa sobrecarga e um código de checagem cíclica de redundância (cyclical redundancy check – CRC), esse modem apresenta uma grande tolerância a ruído.

O PL3120 inclui um circuito de acoplamento que permite comunicação sobre qualquer rede elétrica AC, DC ou mesmo um par de cabos não energizados.

O controle do modem é feito por um núcleo processador Neuron totalmente compatível com o protocolo LonWorks. Esse processador possibilitou uma redução no custo e dimensões do dispositivo e um aumento de seu desempenho. O PL3120 é destinado a sistemas que requerem até 4kB de memória, para aplicações mais complexas deve-se utilizar o PL3150 que é bastante similar ao PL3120, porém suporta memória externa, uma comparação entre os dois modems pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2. Comparação entre modems da Echelon.(PL3120-3150 Databook).

Característica	PL3150	PL3120
Tamanho da RAM (Bytes)	2.048	2.048
Tamanho da ROM (Bytes)	---	24.576
Tamanho da EEPROM (Bytes)	512	4.096
Pino de entrada/saída de uso geral	12	12
16-Bit Timer/Counters	2	2
Suporta memória externa	Sim	Não

1.3.1 ARQUITETURA DO PROCESSADOR NEURON

O núcleo de processamento Neuron é composto por três processadores, cujas funções são estabelecidas pelo firmware da seguinte forma:

O processador 1 é o processador da camada MAC, que trabalha com as camadas física e de enlace do protocolo LonTalk (ou LonWork) de sete camadas, o que inclui gerenciar o hardware dos subsistemas de comunicação e o algoritmo de controle de acesso ao meio. A comunicação desse processador com o seguinte se dá através de buffers de rede localizados na memória RAM compartilhada.

O processador 2 é o processador de rede, que implementa as camadas de rede, de transporte, de seção e de apresentação do protocolo LonTalk. Ou seja, ele trabalha com as variáveis de rede (NVs), endereçamento, processamento de transações, autenticação, os temporizadores do software, o gerenciamento da rede e as funções de roteamento. A

comunicação com o processador 3 ocorre através dos buffers de aplicação, também localizados na memória RAM compartilhada. A competição pela utilização dessa memória compartilhada é mediada por semáforos implementados por hardware. A Figura 10 retrata o compartilhamento de *buffers* pelos processadores.

O processador 3 é o processador de aplicação, ele executa o código escrito pelo usuário e os recursos do sistema que esse código usa. A linguagem de programação aceita por esse processador é o *Neuron C*, derivada do *ANSI C* e otimizada para aplicações de controle distribuído usando LonWorks, a Echelon define essa linguagem como (PL3120-3150 Databook):

- Um modelo de comunicação baseado em blocos funcionais e variáveis de rede que simplifica a troca de dados entre dispositivos.
- Um modelo baseado em arquivos de recursos (*resource files*) que facilita a integração de dispositivos de diferentes fabricantes.
- Um grande conjunto de gerenciadores de entrada e saída que suportam os recursos do núcleo Neuron.
- Uma poderosa linguagem orientada a eventos que simplifica a interface com a rede, portas de entrada e saída e eventos dos relógios (*timers*).

O três processadores compartilham o mesmo circuito de acesso à dados, ULA e memória, porém cada um deles tem o seu próprio conjunto de registradores: flags (8 bits) e ponteiros de próxima instrução (IP de 16 bits), de pilha (DSP de 8 bits), de retorno da pilha (RSP de 8 bits) e ponteiro de topo da pilha (TOS de 8 bits e entrada da ULA).

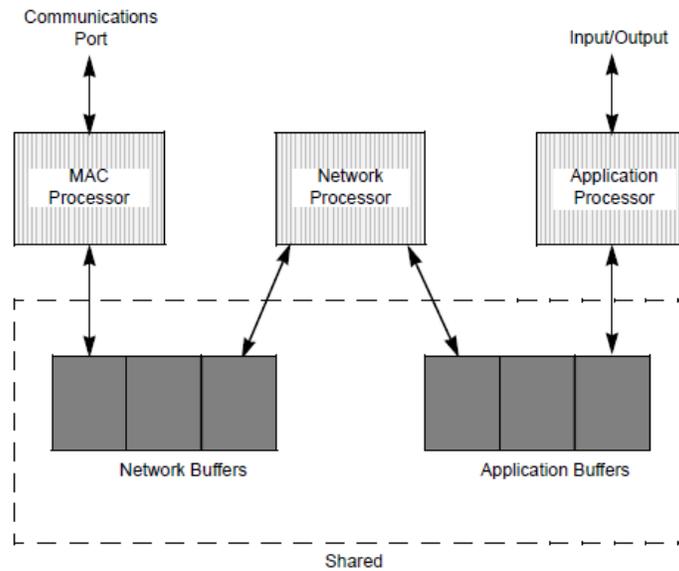


Figura 10. Alocação da memória compartilhada. (PL3120-3150 Databook).

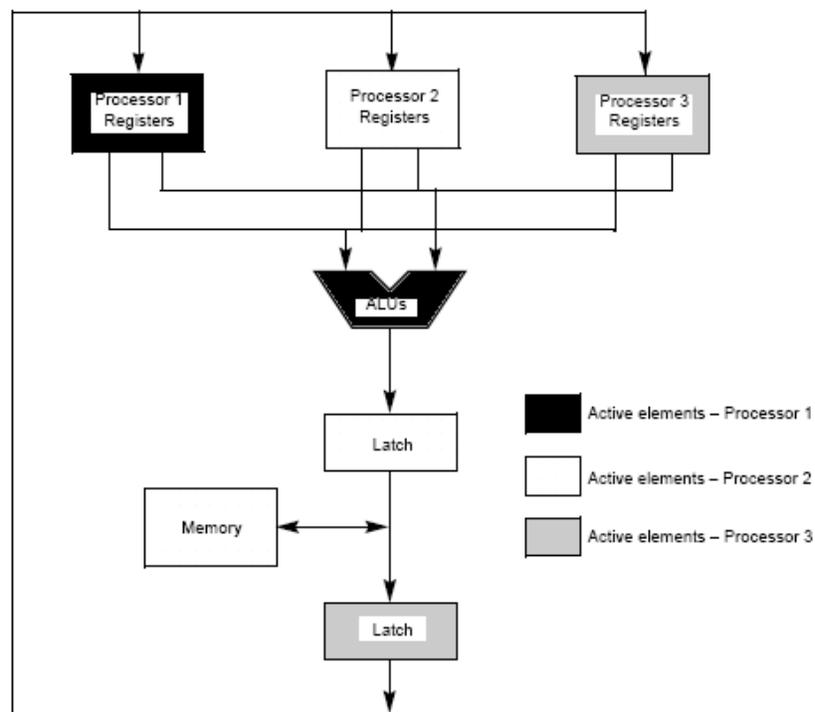


Figura 11. Acesso a ULA/Memória em um único ciclo de *clock* no sistema de *mirror clock*. (PL3120-3150 Databook).

O acesso a esses recursos é possível por um sistema de *mirror clock* (relógio espelhado), que consiste em um único *clock* defasado para cada processador, dessa forma cada processador pode acessar a ULA e a memória uma vez a cada ciclo de *clock*,

com um sistema de *pipeline* para os três processadores, a Figura 11 mostra os elementos ativos para cada processador durante um ciclo, reduzindo os requerimentos sem afetar o desempenho, isso permite a execução dos três processadores em paralelo sem desperdício de tempo e troca de contexto.

A memória no PL3120 é organizada da seguinte forma:

- 4.096 bytes programável da EEPROM que inclui:
 - Configuração da rede e informação de endereçamento;
 - Um código de identificação único, *Neuron ID*, de 48bits;
 - O código da aplicação do usuário e os dados mais utilizados.
- 2.048 bytes da RAM estática que armazena:
 - Dados e a pilha do sistema;
 - *Buffers* de rede e de aplicação.
- 24.576 bytes da ROM com:
 - O firmware do Neuron, de todos os três processadores e as bibliotecas necessárias à aplicação.

1.3.2 A LINGUAGEM NEURON C

Neuron C é uma linguagem baseada no difundido ANSI C, dessa forma ela implementa todos os tipos básico da sua linguagem mãe, e outros, como o tipo variável de rede (*Network Variable Type – NVT*), o tipo propriedade de configuração (*Configuration Property Type – CPTs*), o tipo blocos funcionais (*Functional Blocks – fblock*), o tipo timer e o tipo “objeto de entrada e saída” (*I/O Object – IO*).

- Variáveis de rede – são variáveis compatíveis com o protocolo LonWorks, são dados agrupados em estruturas do ANSI C, porém alterações nos valores desse tipo de variável serão automaticamente enviados a todos os dispositivos da rede “conectados” a essa variável. O tamanho máximo de uma variável de rede é de 31 bytes.
- Propriedades de configuração – são construtores do Neuron C, permitem a configuração do dispositivo através de ferramentas específicas, chamados de *network tools*, essa configuração pode ser, por exemplo, mudar o tipo de uma variável de rede.

- Blocos funcionais – é um conjunto de variáveis de rede e propriedades de configuração agrupados para executar uma determinada tarefa, por exemplo, para monitorar em tempo real a temperatura e hora de um ambiente. Pode-se agrupar uma NV de temperatura, uma NV de tempo e uma propriedade de configuração que limita o tempo máximo de envio, como mostra o exemplo da Figura 12.
- *Timers* – existem dois tipos de *timers* definidos por software na linguagem Neuron C, um com precisão de segundos com duração de 1 a 65.535 segundos e um com precisão de milisegundos, com duração de 1 a 64.000 milisegundos (0,001 a 64 segundos), esse tipo de variável sempre decreta, a contagem inicia no momento em que a variável receber um valor e só para quando for zerada, a não ser que seja declarada como sendo *repeating*, nesse caso ela reinicia a contagem ao zerar.
- Objetos de entrada ou saída – o modem PL3120 tem onze pinos de entrada e saída, qualquer um destes que não estiver declarado em uma aplicação em Neuron C não é utilizado, portanto desativado. Esses pinos podem ser utilizados como pinos de entrada ou de saída separadamente e livres de gerenciamento pelo firmware ou gerenciados como portas seriais (i2c, spi, sci, neurowire...), gerenciados como portas paralela ou muxbus, ou ainda gerenciados para se comunicar com *timers* ou contadores externos. No exemplo da Figura 12 o pino de entrada e saída 6 (IO_6) foi configurada para se comunicar com o *timer* 555 que gerencia o sensor de temperatura e os pino IO_3 e IO 2 foram configurados para receber a hora do relógio RTC via comunicação serial.

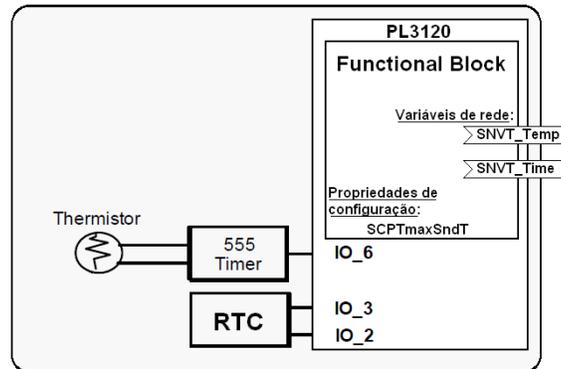


Figura 12. Dispositivo de monitoramento de temperatura e hora em tempo real.

1.3.3 ESCALONAMENTO DE TAREFAS (*SCHEDULER*)

Alguns eventos especiais predefinidos nessa linguagem, que devem ser explicados são: *offline* e *wink*, o primeiro só ocorre se um comando for enviado de uma ferramenta de gerenciamento de rede ou através da função **go_offline()**, geralmente em resposta a uma emergência, o programa de aplicação não é executado até que o dispositivo seja reiniciado ou receba um comando para ficar *online*. O dispositivo não pode ignorar um comando para ficar *online* ou *offline*. O evento *wink* é utilizado para executar uma ação em resposta a uma mensagem de *wink* de um gerenciador da rede se existir, este evento ocorre mesmo que o dispositivo esteja ou não configurado, mas caso a configuração ainda não tenha ocorrido as inicializações das variáveis e dos pinos (ou portas) de entrada e saída são realizados antes do evento *wink*.

O processador de código do usuário do Neuron avalia os eventos de um código de aplicação, aqueles que forem avaliados como *TRUE* serão executados, e os avaliados como *FALSE* não serão executados, a ordem e a frequência em que essa avaliação ocorre são ditadas por um “agendador”, ou *scheduler*, os eventos *offline*, *wink*, e eventos de prioridade são avaliados com maior frequência, sempre que um desses é avaliado como *TRUE* o scheduler reinicia as avaliações.

As avaliação do scheduler sempre iniciam com o evento *offline*, porém se este for avaliado verdadeiro a agenda é reiniciada e o mesmo evento será avaliado primeiro, dessa forma os demais eventos só serão avaliados e executados se o dispositivo não estiver *offline*.

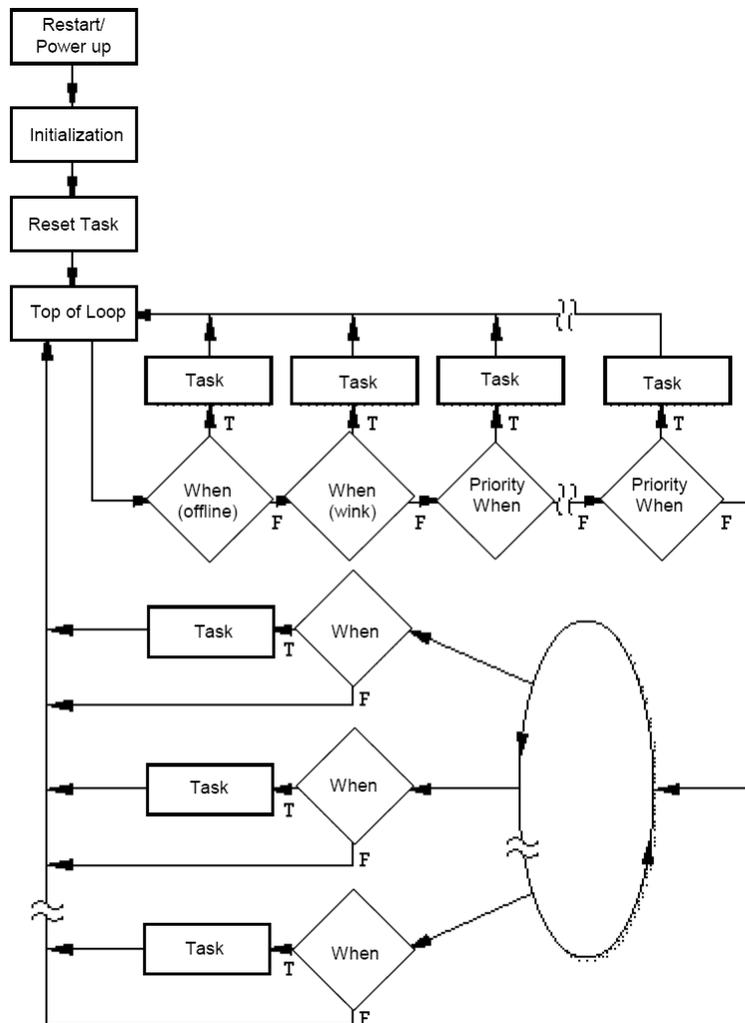


Figura 13. Escalonador (scheduler) definido no firmware do Neuron. (Neuron C Programmers Guide, 2003) (6).

O segundo evento a ser avaliado é o *wink*, seguido pelos eventos de prioridade definidos pelo usuário, elas são avaliadas em uma ordem específica todas as vezes que o scheduler é executado, sempre que uma é avaliada como *TRUE* o agendamento reinicia, avaliando o evento *offline*, *wink* e outra vez os eventos de prioridade. Quando todos os eventos de prioridade só são avaliados como *FALSE*, então um evento sem prioridade é avaliado, esse evento é selecionado segundo uma política *round-robin*. Por isso devemos ter cuidado ao utilizar eventos de prioridade, se forem muitos ou ocorrerem com frequência alta ocorrerá que os eventos sem prioridade serão raramente avaliados ou nunca serão avaliados. Uma ilustração desse processo de “agendamento” dos eventos pode ser visto na Figura 13.

2 A INTERFACE PLC

Toda a parte de hardware da interface é parte de módulos já utilizados em um projeto de desenvolvimento na área de PLC, esses módulos utilizam dois PICs, um denominado “PIC Modem”, capaz de se comunicar via porta serial com o modem PL3120 e o outro, denominado “PIC Interface”, destinado a gerenciar a comunicação com o equipamento que utiliza a interface. A comunicação entre os dois PICs é feita através da porta paralela. Assim nosso trabalho ao criar esta interface consiste em gerar os códigos para os dois PICs e o Neuron.

Esse hardware consiste em uma única placa com os dois PICs, suporte para 2Mbyte de memória EEPROM extra, cujo acesso é exclusivo ao PIC Interface. É um módulo flexível do ponto de vista do modem utilizado, podendo ser o modem SSC P485 da *Intellon*, o modem ST7540 da *ST MicroEletronics*, ou os modems PL3120 e PL3150 da *Echelon*. Essa placa ainda pode ser ter alimentação monofásica ou trifásica. Se a rede trifásica for utilizada o circuito é capaz de chavear seu acoplamento para comunicar em qualquer uma das fases da rede. O módulo com este circuito pode ser visto na Figura 14.

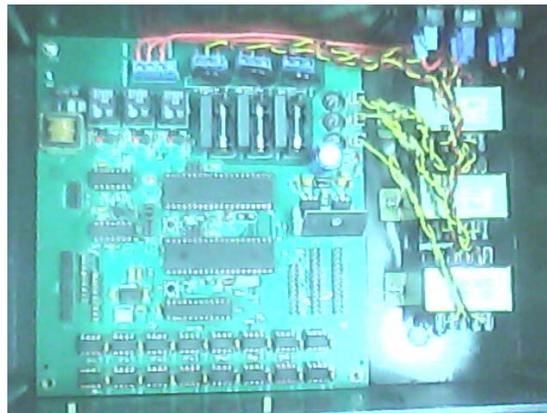


Figura 14. Foto do circuito utilizado na interface.

2.1 O NEURON

A biblioteca padrão do Neuron C inclui variáveis de rede, propriedades de configuração e blocos funcionais padrões, são as *Standard Network Variable Types*, ou

SNVT; *Standard Configuration Properties Types*, ou SCPT; e *Standard Functional Blocks Templates*, ou SFBT. Porém nenhuma *SNVT* ou *SFBT* atende aos nossos interesses, de forma que foi necessário criar novas variáveis de rede, chamadas de UNVTs (*User Network Variable Types*). Como o limite de uma NV é de 31bytes e esse tamanho é suficiente para as aplicações mais comuns definimos apenas uma UNVT, de 30bytes (UNVT_array30). O bloco funcional criado, ou *User Functional Block Template* (UFBT), contém apenas duas instância da UNVT_array30 criada, sendo uma de saída e outra de entrada, e um SCPT de configuração da rede (SCPTnwrkCnfg), com ele habilitamos a configuração externa da rede. A configuração externa nos permite iniciar o protocolo ISI, que no modo *AutoEnrollment* possibilita o dispositivo encontrar todos os outros com o mesmo modo do protocolo e configurar a conexão do blocos funcionais e suas NVs automaticamente. A configuração desses UNVT e UFBT é feita por um aplicativo “*Echelon NodeBuilder Resource Editor*” que omite do usuário toda a configuração da variável, apenas selecionamos o tipo de dado a ser enviado, o que facilita a criação

Criado o bloco funcional desejado dois módulos foram configurados para se comunicar, realizando o processo de *binding* entre suas variáveis de saída e entrada, como mostra a Figura 15, mas um terceiro dispositivo instalado na rede se cominca com apenas um dos dispositivos já existentes, pois sua NV de saída se conectaria a apenas uma das NV’s de entrada, pois elas não estão no mesmo “fio virtual.

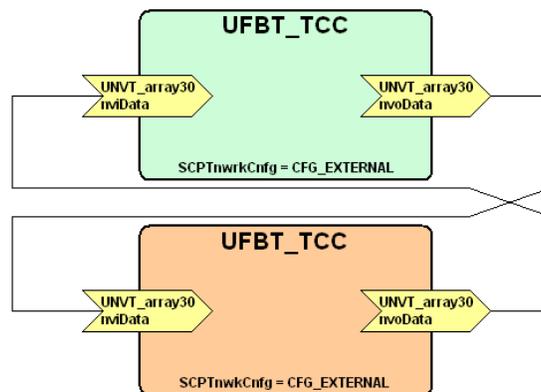


Figura 15. Bloco funcional UFBT_TCC, com duas NVs de 30bytes, sendo uma entrada e uma saída e uma propriedade de configuração de rede.

O protocolo ISI (*Interoperable Self-Installation*) é um protocolo da camada de aplicação que permite a instalação dos dispositivos e gerenciamento das conexões sem utilizar uma ferramenta de gerenciamento da rede. Neste protocolo um dispositivo deve comunicar que iniciará a configuração da rede, os demais solicitam ingresso nessa rede

e o dispositivo que iniciou a rede envia confirmação. Os modos de operação desse protocolo são: *Manual Enrollment*, no qual cada uma dessas mensagens só é enviada se o usuário pressionar o botão de conexão no dispositivo; *Automatic Enrollment*, no qual as mensagens do protocolo ISI são enviadas automaticamente e todos que receberem respondem; e *Controlled Enrollment*, nesse modo a rede é configurada aos poucos, cada dispositivo só entra na rede quando tentar enviar um pacote de dados pela primeira vez.

(7)

Feita a configuração dos blocos funcionais e suas variáveis de rede basta criar um evento quando o dispositivo receber dados da serial, nesse caso ele deve atualizar a NV de saída com o dado recebido, e um evento quando ocorrerem atualizações na sua NV de entrada, nesse caso os dados recebidos devem ser enviados pela serial.

2.2 OS PICs

O PIC Modem se comunica com o Neuron através da porta serial configurada para 4800bits/s, sem paridade. A comunicação com o PIC Interface acontece através da porta paralela, mas o gerenciamento desta comunicação é realizado pelo PIC Modem, desta forma o PIC Interface utiliza sua porta serial escrava (*Parallel Slave Port – PSP*), simplificando o seu código e diminuindo o processamento exigido dele, assim, neste PIC, podemos acrescentar qualquer tratamento de dados que desejarmos que a interface realize.

O PIC Modem gerencia a comunicação paralela de forma a implementar um “*handshake*”, pois o PIC que deseja enviar o dado deve enviar um byte de acordo com o que o PIC que deve receber solicitar, por exemplo: O PIC Modem deseja enviar dados para o PIC Interface, então o primeiro envia o byte da posição zero do array, a confirmação de recebimento ocorre quando o segundo PIC envia “1” para o PIC Modem, informando que o byte esperado é o byte da posição 1 no array, isso se repete para os demais bytes, o PIC Interface sempre informa qual o byte esperado. Isso foi implementado para sincronizar a comunicação entre os microcontroladores PIC.

A função do PIC Modem é enviar o que receber do PIC Interface para o Neuron e o que receber do Neuron, enviar para o PIC Interface, porém, caso os bytes demorem muito para chegar, o que é definido por um “*timeout*” a mensagem recebida deve ser descartada, ou seja, mesmo que receba o pacote de dados em pedaços o PIC Interface

que deve juntar os dados e enviá-los de uma só vez para o PIC Interface, ou completar os 30bytes com dados sem significado. A função principal do PIC Modem é similar: enviar o que receber do dispositivo que usa a interface, através de uma serial a 115200bits/s, sem paridade, e enviar para o PIC Modem e vice-versa, porém o PIC Interface pode ter seu código acrescido de acordo com os requisitos de implementação, podendo ainda utilizar a memória EEPROM extra, através de um código de acesso circular à memória já existente, de modo propiciar um desgaste uniforme da memória, não havendo risco de a memória se perder tendo sido gastos apenas as posições iniciais.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos que serão descritos e discutidos a seguir têm como objetivo identificar a maior taxa de fluxo de dados alcançada com baixo percentual de erros e fazer um estudo da robustez e confiabilidade da interface PLC, que mesmo na presença de ruídos na rede deve garantir uma entrega da mensagem não corrompida.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

- 02 – Módulos com dois PICs 18F4525 e um modem Echelon PL3120;
- 02 – Computadores;
- 05 – Cabos de Tensão de 50m cada;
- 06 – Réguas de Tomada;
- 06 – Lâmpadas 11W/220V/50/60Hz, f.p. $\geq 0,5$, I = 72mA (GP 154 GO);
- 04 – Lâmpadas Fluorescentes 40W, T12, Sylvania;
- 04 – Reatores Eletrônicos Partida Instantânea para 2 Lâmpadas Fluorescentes Tubulares (37W, 0,28^a, f.p. = 0,60);
- 07 – Cargas de 5 Ω .
- 01 – Analisador de Espectro Agilent E4411B – 9kHz a 1,5GHz.

3.2 DESCRIÇÃO DO CENÁRIO DE TESTES

No cenário de teste a rede elétrica não é totalmente controlada, ou seja, livre de ruídos, é parte integrante da rede elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus I, onde foram realizados os testes, de forma que fontes de ruído desconhecidas podem influenciar nos mesmos, para avaliar o comportamento da rede elétrica ao longo do dia, os testes foram feitos ao meio-dia, no período noturno ou em fins de semana.

A rede utilizada nos teste não tem ramificações, ou seja, é uma linha única de comprimento total de 250m, sendo uma extremidade conectada à rede elétrica da universidade (posição 0m), e outra extremidade (posição 250m) livre de conexões, flutuando, ver Figura 16, é importante ressaltar que não há atenuadores ou terminadores

na rede, de forma que sinais na extremidade livre de conexões estão sujeitos a reflexão do sinal.

A localização dos elementos (módulos de comunicação, cargas ou fontes de ruído) presentes na rede é feita através da distância para o início da rede (0m), definido como a extremidade conectada à rede elétrica da universidade, sendo a posição final (250m) a extremidade oposta. Os cabos têm 50m, dessa forma só há possibilidade de inserir elementos (cargas ou fontes de ruído) na rede a cada 50m.

Os experimentos foram realizados utilizando dois computadores do tipo desktop com a interface PLC criada, um funcionando para envio de mensagens (emissor) e outro funcionando para recebimento de mensagens (receptor), com a comunicação apenas em um sentido, pois dessa forma o emissor sempre estaria na posição 0m de forma que os ruídos da rede teriam influência minimizada pelos métodos de rejeição a ruído utilizados pelo PL3120.

Nos testes realizados apenas dois módulos de comunicação foram utilizados, um configurado para, durante 10min, enviar mensagens conhecidas de 30bytes a um determinado intervalo pré-definido, e outro responsável por monitorar a rede, receber os pacotes e conferir se não há diferenças entre o pacote recebido e o pacote esperado.

3.3 APRESENTAÇÃO DOS DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

As condições de cada experimento foram pensadas para minimizar o número de experimentos, como o intervalo de tempo entre dois envios do emissor, ou a posição dos elementos emissor e receptor na rede, bem como das fontes de ruído. O tempo entre comunicações, mesmo sem ruído na rede e a distância entre emissor e receptor nula, com um intervalo de 800ms entre comunicações de 750 pacotes enviados 94,8% foram recebidos, já para um intervalo de 850ms foram enviadas 707 pacotes, com 100% de sucesso na comunicação. Dessa forma o tempo padrão entre comunicações utilizados foi de 850ms, na existência de ruídos, esse intervalo foi aumentado para 900ms, mas não houve aumento significativo na taxa de acerto.

Ainda sem a inserção de ruído posicionamos o emissor e o receptor a uma distância de 250m, sendo o emissor na posição 0m e o receptor na posição 250m. Esta

configuração não influenciou na taxa de comunicações com êxito, a um intervalo mínimo de 850ms obtivemos sucesso em 100% dos envios. Assim os testes descritos a seguir foram realizados nas condições deste teste, duração dos testes: 10min, intervalo entre envios: 850ms, total de mensagens enviadas: 707, posição dos elementos de comunicação mostrada na Figura 16.

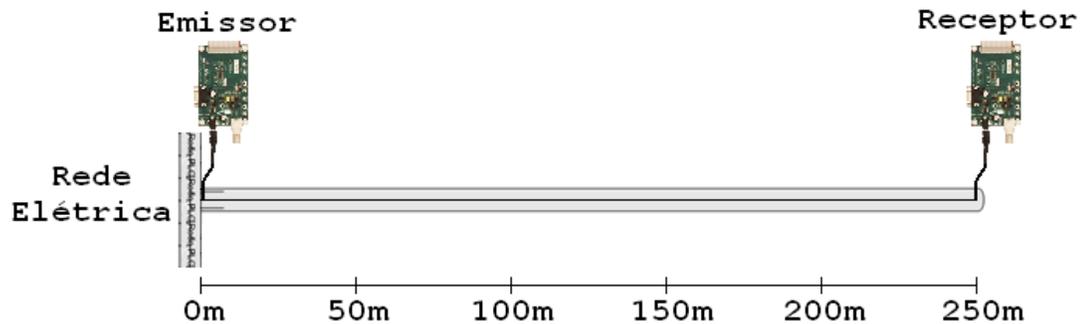


Figura 16. Esquema da rede com referência de posicionamento dos modens PLC, emissor na posição 0m e receptor na posição 250m.

Testes foram feitos tanto com o receptor quanto com o emissor na posição 250m. Para o caso em que o emissor está na posição 250m a taxa de erro foi muito alta (pouco maior que 70%). Isso se deve ao fato de que a rede não tem terminadores. Dessa forma ocorre reflexão do sinal, causando interferência. Por isso só serão apresentados experimentos em que o emissor se localiza em 0m e o receptor em 250m.

As repetições dos testes foram feitas em dias diferentes, evitando que uma anormalidade na rede, devido a um teste no laboratório de alta tensão, por exemplo, possam influenciar todos os resultados.

Um analisador de espectros também foi utilizado para caracterizar a rede e as fontes de ruído, alguns dos espectros apresentados neste trabalho foram adquiridos através da função *Max Hold* do equipamento (ver Introdução Teórica). O tempo de amostragem, medido manualmente, foi em média 5s. Na Figura 17 podemos ver o sinal da rede e o sinal transmitido, a janela mostrada tem largura de 100kHz e frequência central 125kHz. Ainda na Figura 17 podemos ver duas transmissões em diferentes frequências, isso ocorre porque o modem Echelon opera com duas portadoras em diferentes frequências, maiores detalhes podem ser visto no tópico 1.1.3 da Introdução.

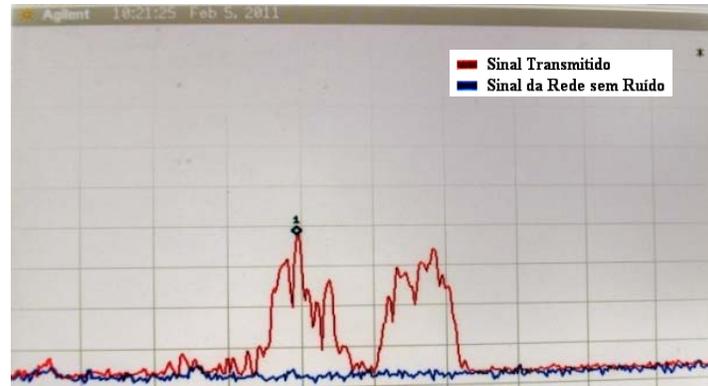


Figura 17. Espectros dos sinais presentes na rede elétrica, o sinal original natural da rede sem ruído sem e com transmissão. Imagem com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.

3.3.1 CARGAS DE 5Ω .

A Echelon realiza uma sequência de testes sobre seus modems, para o modem PL3120, que está sendo utilizado neste trabalho, a “verificação de performance na transmissão” é realizado com a carga da Figura 18, o teste da Echelon verifica o nível de sinal com a presença da carga (8), neste trabalho, porém, será verificado a quantidade de comunicações realizadas com sucesso, outra diferença para o teste da empresa é que nossa rede teste não é isolada.

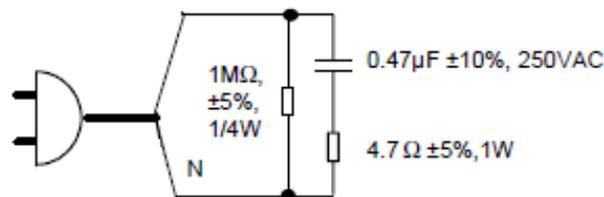


Figura 18. Carga de 5Ω para teste de performance de transmissão sugerido pela Echelon.

Como esta carga não injeta ruídos na rede não é necessário o uso do analisador de espectros.

Cada experimento teve três repetições em diferentes dias, todas realizadas com o maior número de cargas possível, o que significa cinco para as posições onde há um módulo, receptor ou emissor, e seis para a posição intermediária. Uma análise feita com o analisador de espectros nos mostra que a atenuação causada por uma carga é muito pequena, ou quase inexistente, assim seriam necessárias muitas cargas para influenciar na comunicação.

Tabela 3. Testes feitos com cargas de 5Ω apresentadas em (PL3120-3150 Databook).

Posição da Fonte de Ruído	Número de Cargas	Número de Mensagens Recebidas	Comunicações com sucesso
0m	5	707	100%
0m	5	707	100%
0m	5	707	100%
150m	6	707	100%
150m	6	707	100%
150m	6	707	100%
250m	5	707	100%
250m	5	707	100%
250m	5	707	100%

Condições de teste: duração: 10min, tempo entre comunicações: 850ms, número de mensagens enviadas: 707, horário: 18h30min.

3.3.2 LÂMPADAS ELETRÔNICAS

Os testes a seguir consistem em injetar perturbações na rede para verificar a robustez e confiabilidade da interface, a primeira fonte de ruído é um quadro com até sete lâmpadas eletrônicas 11W/220V/50/60Hz, $f.p. \geq 0,5$, $I = 72\text{mA}$ (GP 154 GO).

O primeiro experimento foi realizado com o número máximo de lâmpadas, nas posições 0m, 150m e 250m da rede, de forma a verificarmos também a influência da localização da fonte de ruído na rede.

Tabela 4. Testes realizados ao meio-dia dos dias 13 e 14 de Janeiro de 2011, utilizando como fonte de ruídos lâmpadas 11W, $f.p. \geq 0,5$, $i = 72\text{mA}$.

Posição da Fonte de Ruído	Número de Lâmpadas	Data: 13 de Janeiro de 2011		Data: 14 de Janeiro de 2011	
		Número de Mensagens Recebidas	Comunicações com sucesso	Número de Mensagens Recebidas	Comunicações com sucesso
0m	6	707	100%	707	100%
0m	6	707	100%	707	100%
0m	6	707	100%	707	100%
150m	6	705	99,72%	694	98.18%
150m	6	668	94,48%	707	100%
150m	6	689	97,45%	703	99.47%
150m	6	680	96,18%	698	98.72%
150m	6	688	97,31%	695	98,30%
250m	6	700	99,01%	703	99.47
250m	6	706	99,86%	699	98.87

Condições de teste: duração: 10min, tempo entre comunicações: 850ms, número de mensagens enviadas: 707, horário: 12h

Baseado nos dados da Tabela 4 podemos afirmar que a interface é pouco sensível ao ruído gerado por estas lâmpadas, não sendo afetado se a perturbação for próximo ao emissor (0m) e sendo mais sensível a ruídos presentes entre o emissor e o

receptor (150m), porém isso representa uma taxa de erro menor que 2%. Há ainda, uma quantidade considerável de ruídos da rede da universidade, já que a rede teste utilizada não é isolada, a Figura 19 mostra um momento em que perturbações da rede universitário se soma às perturbações das lâmpadas, causando ruído nas duas frequências de transmissão, de forma que a comunicação pode ser comprometida, mas ainda com esse problema atingimos taxas superiores a 90% de sucesso. Esses resultados poderiam ter sido melhores se a rede fosse isolada. Um erro nulo quando posicionamos a fonte de ruído no emissor era esperado, pois os modems PLC utilizam modulação adaptativa (*adaptive Carrier*) e rejeição de tom (*tone rejection*).

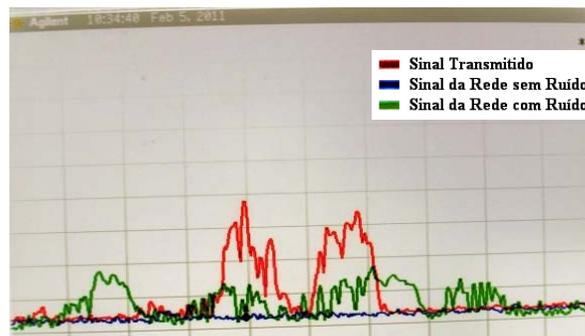


Figura 19. Espectro do sinal transmitido, do sinal da rede com ruído e do sinal da rede sem ruído (utilizando função *Max Hold*). Imagem com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.

A repetição dos testes confirmou a robustez a ruídos no emissor, porém mostrou uma maior sensibilidade a perturbações no receptor e principalmente entre o emissor e o receptor. A posição da fonte de ruído se mostrou um fator muito influente na comunicação, de forma que um estudo dessa influência se faz necessário.

Tabela 5. Testes realizados no dia 14 de Janeiro de 2011, às 18h, utilizando como fonte de ruídos lâmpadas 11W, f.p. $\geq 0,5$, $i = 72\text{mA}$.

Posição da Fonte de Ruído	Número de Lâmpadas	Data: 14 de Janeiro de 2011	
		Número de Mensagens Recebidas	Comunicações com sucesso
0m	7	707	100%
0m	7	707	100%
0m	7	707	100%
150m	7	687	97,17%
150m	7	663	93,78%
150m	7	696	98,44%
250m	7	694	98,16%
250m	7	690	97,60%
250m	7	686	97,03%

Condições de teste: duração: 10min, tempo entre comunicações: 850ms, número de mensagens enviadas: 707, horário: 18h

Esse estudo foi realizado com diferentes quantidades de lâmpadas funcionando como fonte de ruído, fonte esta que teve sua posição variada a um passo de 50m em cada experimento, esses dados estão apresentados no gráfico da Figura 20, que nos permite conferir que, como esperado, quanto mais longe do emissor mais influente é o ruído, as posições que mais influenciam na comunicação são 150m e 200m, é interessante notar que ao contrário do esperado, se localizarmos a fonte de ruído no fim da rede junto ao módulo receptor há uma melhora na comunicação comparado a 150 e 200m, isso se deve ao cancelamento do ruído impulsivo (*impulse noise cancellation*) utilizado pelo modem PL3120.

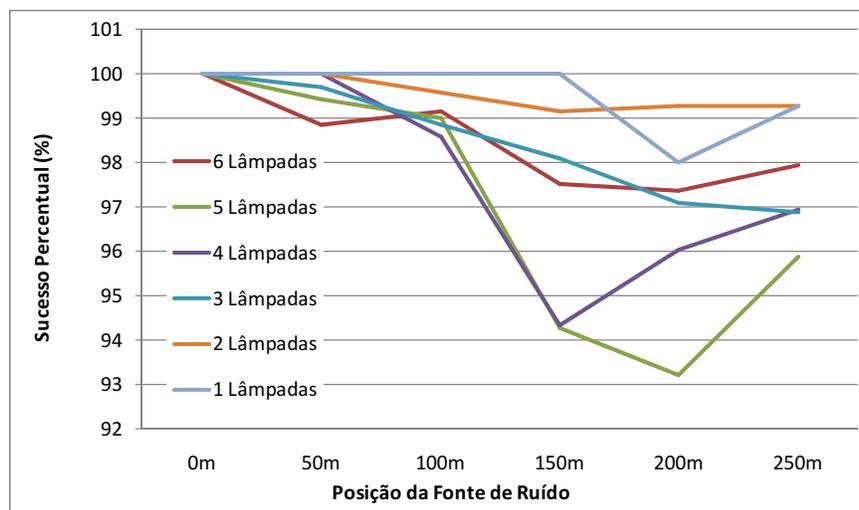


Figura 20. Caracterização da rede quanto à posição da fonte de ruído (lâmpadas eletrônicas).

Um problema verificado neste experimento é o fato de que nem sempre um menor número de lâmpadas funcionando como fontes de ruído implicou em uma melhor comunicação, por exemplo, para quatro e cinco lâmpadas em 150m ou 200m ocorreram mais erros que qualquer outra configuração da rede, isso ocorreu em todos os testes, já que o resultado apresentado na Figura 20 é uma média de vários testes. Por isso realizamos alguns testes alterando o número de lâmpadas entre seis e cinco, mas estes se mostraram inconclusivos, ver Figura 21, de forma que o uso do analisador de espectros é necessário para uma análise do sinal presente na rede.

Podemos ver nos espectros dos sinais presentes na rede, ver Figura 22, que as lâmpadas eletrônicas geram ruído na frequência primária de envio do PL3120, porém o ruído resultante para duas lâmpadas não é significativamente alterado se aumentarmos o

número de lâmpadas, de forma que a probabilidade de uma falha na comunicação não é maior para um maior número de lâmpadas, diferente do que esperávamos.

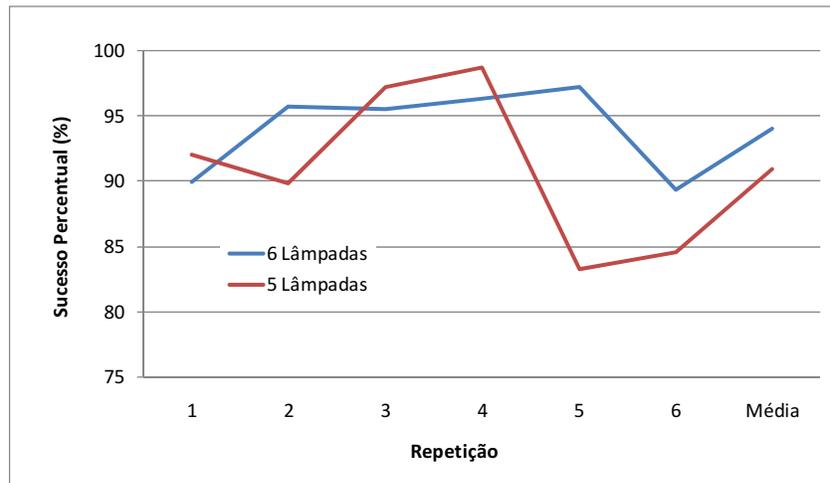


Figura 21. Influência do número de lâmpadas como fonte de ruído na comunicação.

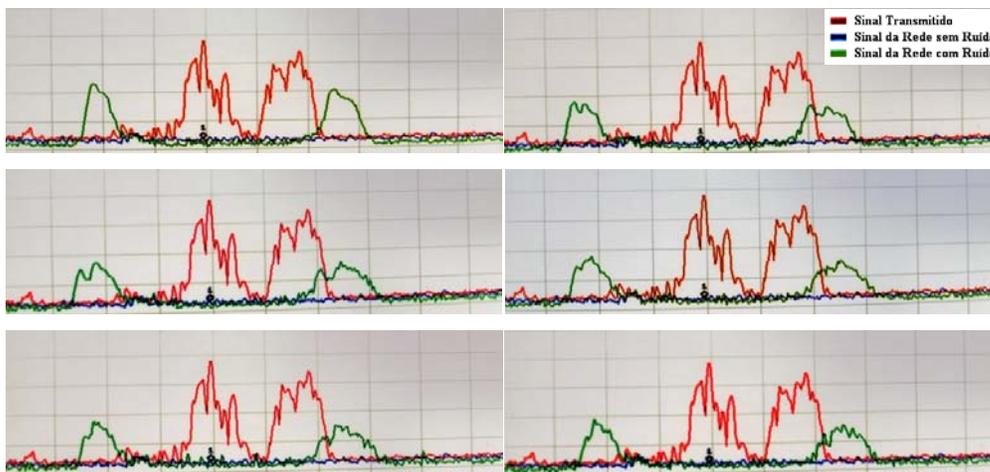


Figura 22. Espectros do sinal da rede variando o número de lâmpadas eletrônicas como fonte de ruído (utilizando função *Max Hold*). Imagens com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz..

É importante esclarecer que o ruído gerado pelas lâmpadas eletrônicas têm formatos impulsivos com frequência central variando em uma determinada faixa de frequências, as figuras mostradas utilizam a função *Max Hold*, de forma que apresentamos apenas os picos em cada frequência, o espectro utilizando a função *Clear Write*, ver Introdução Teórica, pode ser visto na Figura 23.

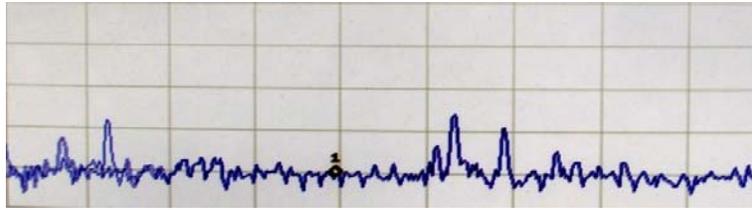


Figura 23. Espectro do sinal da rede com lâmpadas eletrônicas como fonte de ruído (utilizando função *Clear Write*). Imagem com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.

3.3.3 LÂMPADAS FLUORESCENTE

Realizamos também testes utilizando como fonte de ruído lâmpadas fluorescentes 40W, T12, Sylvania e seus reatores eletrônicos de partida instantânea para 2 Lâmpadas Fluorescentes Tubulares (37W, 0,28A , $f.p. = 0,60$). Assim como fizemos para lâmpadas eletrônicas os testes iniciais foram realizados com o número máximo de fontes de ruído, quatro lâmpadas e quatro reatores, nas posições 0m, 150m, e 250m.

Tabela 6. Testes com lâmpadas fluorescentes e seus reatores. Testes realizados nos dias 15, 16 e 17 de Janeiro de 2011.

Tempo entre comunicações	Posição da F. Ruído	Nº Fontes	Enviadas	Recebidas	Sucesso Percentual
850ms	0m	4	707	707	100%
850ms	0m	4	707	707	100%
850ms	0m	4	707	707	100%
850ms	150m	4	707	668	94,48%
850ms	150m	4	707	663	93,78%
850ms	150m	4	707	684	96,75%
850ms	250m	4	707	632	89,39%
850ms	250m	4	707	650	91,94%
850ms	250m	4	707	647	91,51%
900ms	150m	4	667	602	90,25%
900ms	150m	4	667	615	92,20%
900ms	150m	4	667	607	91,00%
900ms	250m	4	667	632	94,75%
900ms	250m	4	667	600	89,96%
900ms	250m	4	667	608	91,15%

Condições de teste: duração: 10min, horário: 18h.

Uma análise dos resultados deste teste, apresentados na Tabela 6, nos permite confirmar o intervalo ótimo entre envios como 850ms, pois ao aumentarmos este intervalo para 900ms não houve melhora significativa no número de sucessos entre comunicações.

Mais uma vez o ruído na mesma posição do emissor não influencia na comunicação, isso se deve à modulação adaptativa e rejeição de tom utilizadas pelo modem. As lâmpadas fluorescentes e seus reatores causaram mais erros durante a comunicação do que as lâmpadas eletrônicas, porém, diferente destas sua posição mais influente é 250m, onde se encontra o receptor. Nesse nível de ruído os métodos de robustez a ruído do Echelon se tornam mais expressivos, pois como pode ser visto na Figura 24 as lâmpadas fluorescentes causam uma perturbação muito expressiva à comunicação, assim, uma taxa de acerto média maior que 90% é mérito desses métodos.

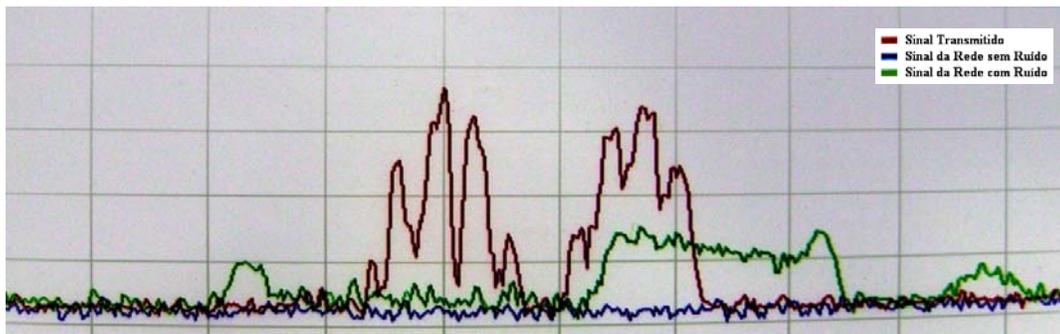


Figura 24. Espectro do sinal transmitido e do sinal da rede com e sem ruído gerado por lâmpada fluorescente (utilizando função *Max Hold*). Imagem com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.

Assim como foi feito com as lâmpadas eletrônicas, também realizamos testes variando a posição das lâmpadas na rede, ver Figura 25, mais uma vez percebemos que fontes de ruído localizadas a 150m ou 200m do emissor causam maior dano à comunicação. A menor taxa de sucesso ocorre para quatro lâmpadas, porém ainda temos mais que 90% de acerto. Para melhor embasar nosso estudo é importante caracterizar o ruído gerado em questão, mais uma vez utilizamos o analisador de espectros para isso.

Diferente das lâmpadas eletrônicas, o ruído resultante sofre grande variação de acordo com o número de lâmpadas fluorescentes, como podemos ver na Figura 26. Para uma lâmpada a frequência da portadora secundária não sofreu ruído, mas a primária é fortemente afetada, para duas lâmpadas o ruído foi deslocado na frequência, mas ainda não afetou a faixa da portadora secundária, porém a inserção de mais uma lâmpada como fonte de ruído causou uma atenuação do ruído na frequência primária e espalhou o ruído, causando também perturbação na faixa de frequência da portadora primária.

Para quatro lâmpadas o ruído na portadora secundária é mais expressivo, o que pode comprometer a retransmissão da mensagem, confirmando os dados da Figura 25, ou seja, menor taxa de acerto para quatro reatores e suas lâmpadas. Com isso podemos concluir que o principal motivo para a ocorrência de uma comunicação com sucesso é a existência da portadora secundária em uma frequência diferente.

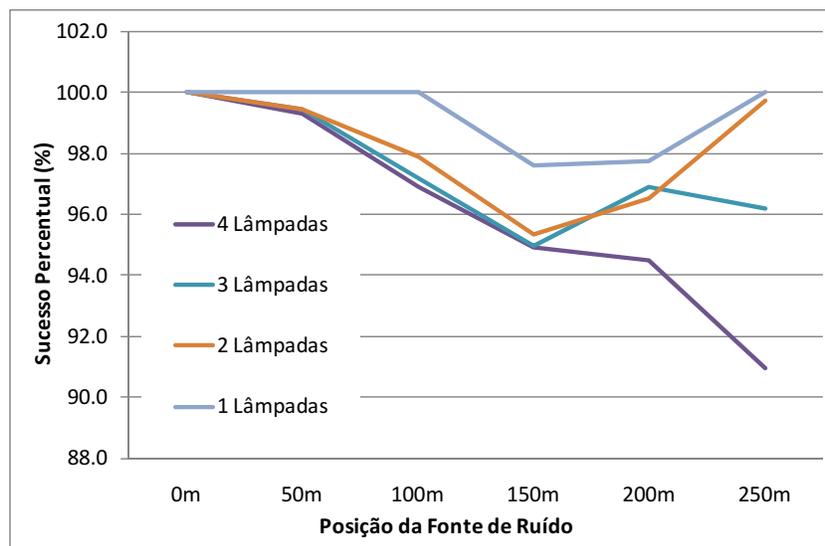


Figura 25. Caracterização da rede quanto à posição da fonte de ruído (lâmpadas fluorescentes).

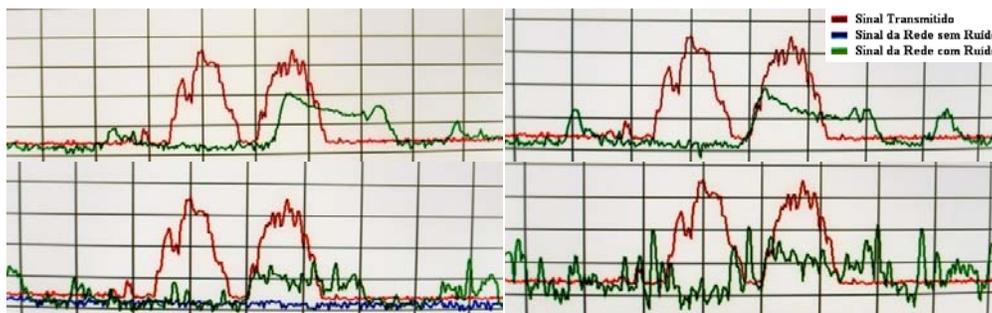


Figura 26. Espectros do sinal da rede variando o número de lâmpadas fluorescentes como fonte de ruído (utilizando função *Max Hold*). Imagens com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.

Durante a análise da rede com o equipamento da *Agilent* verificamos que quando duas ou mais lâmpadas fluorescentes, e seus reatores, estavam ligadas ocorreram momentos de elevados níveis (Figura 27) de ruído que não eram oriundos da rede, embora pouco freqüentes e de duração relativamente curta, duravam na rede mais que o sinal transmitido e podem justificar equívocos nos testes, a causa não foi identificada, podendo inclusive ser defeito dos reatores ou mesmo da lâmpada.

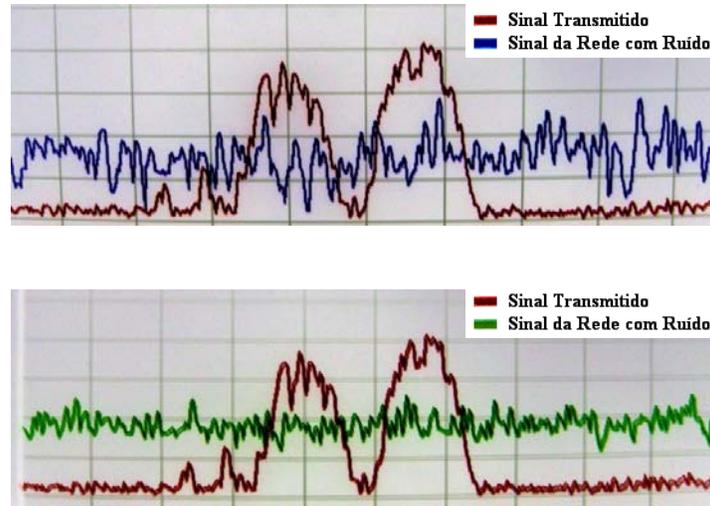


Figura 27. Espectro do sinal na rede com a o ruído gerado por lâmpadas fluorescentes e seus reatores, na posição de 150m do emissor, causa não identificada (utilizando função *Max Hold*). Imagem com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.

Como todos os espectros para o ruído com lâmpadas fluorescentes foram feitos utilizando a função *Max Hold* do analisador de espectros, mostramos na Figura 28 o espectro do ruído conseguido utilizando a função *Clear Write* do mesmo para retratar o ruído instantâneo gerado pelas lâmpadas.

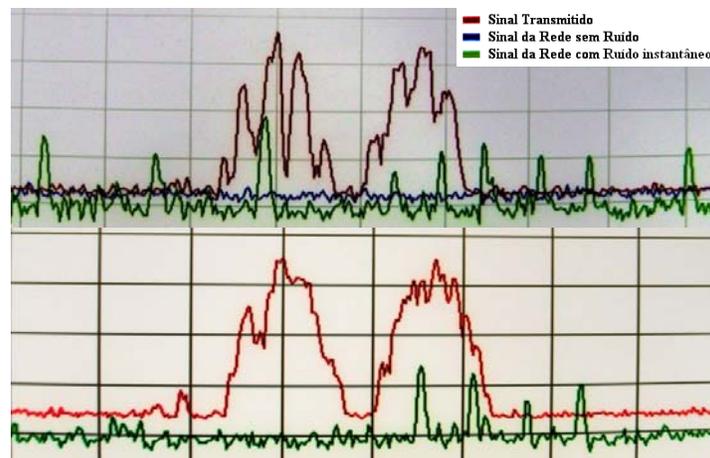


Figura 28. Espectro do sinal da rede com lâmpadas fluorescentes e seus reatores como fonte de ruído (utilizando função *Clear Write* apenas para o ruído na rede). Imagem com 10dB/div, na faixa de 75kHz a 125kHz.

3.3.4 INVERSOR

Por fim foram realizados testes utilizando como fonte de ruído um inversor ligado um motor de 6A, apesar de o inversor estar modulado com uma frequência de

10kHz o ruído está presente em toda faixa de frequência. Na Figura 29(a) pode-se ver o ruído em toda uma faixa de frequência de 75kHz a 175kHz.

Pode-se ver, comparando as Figura 29 (a) e (b), que a relação sinal-ruído é justificada um acerto médio na de 98%.

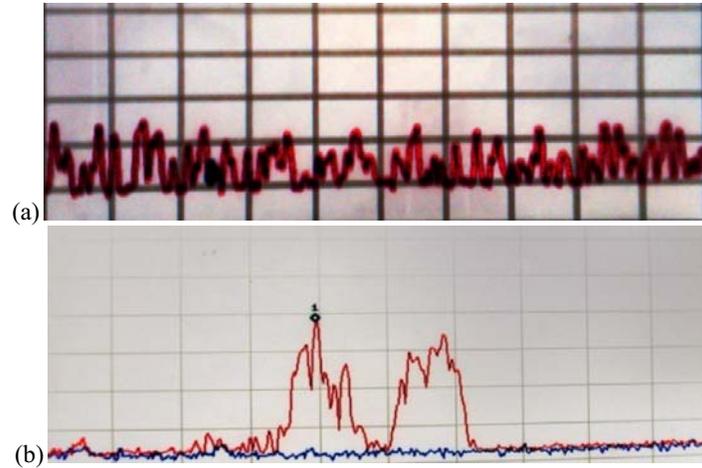


Figura 29 (a) Ruído gerado por um inversor ligado a um motor de 6A (função *Clear Write*) (b) Espectro do sinal transmitido para fins de comparação. Ambos estão configurados para 10dB/divisão

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho desenvolvemos uma interface PLC de acoplamento via porta serial baseado no modem PL3120 da empresa Echelon, toda a confiabilidade do sistema se baseia na confiabilidade do modem utilizado, visto que é através do PL3120 que ocorre toda a comunicação na rede.

A interface tem como principal característica a não necessidade de conhecimento da topologia da rede ou os seus componentes, isso se deve ao protocolo OSI de sete camadas utilizado pelo modem escolhido.

Os vários testes e suas repetições confirmaram uma alta robustez a ruídos presentes na rede. Durante os testes nenhuma mensagem chegou errada, ou seja, não houve corrupção da mensagem, mesmo que algum pacote tenha chegado corrompido o erro foi detectado e o pacote descartado isso se deve ao “altamente eficiente e de baixa sobrecarga” algoritmo de correção antecipada de erros (*forward error correction – FEC*) e a verificação de redundância cíclica (*cyclical redundancy check – CRC*) (PL3120/PL3150 Databook), de forma que é garantida a integridade dos dados se houver uma comunicação.

Durante os testes foram observados ruídos na rede provenientes da rede elétrica da universidade, isso retrata, mesmo que de forma limitada um ambiente real de uso da rede, mas estes não influenciaram significativamente a taxa de acerto, o que comprova a validade dos testes.

Os resultados obtidos nos levaram a concluir que o tempo mínimo entre comunicações com uma taxa de sucesso aceitável é de 850ms, um tempo maior implica em uma taxa de transmissão menor e o período maior não resulta em um ganho considerável na confiabilidade da comunicação.

A rede elétrica, como esperado, apresenta restrições de uso para fins de comunicação, no entanto, a escolha adequada de modulação, recursos de correção de erro, escolha de faixa de frequência de portadora e possibilidade de distribuição de nós de comunicação em posições adequadas da rede elétrica, viabilizam o seu uso como meio de comunicação.

Por restrições da plataforma de testes não foi possível identificar a distância máxima de alcance da comunicação, sendo 250m o maior alcance testado, porém não há

perda significativa na amplitude do sinal nessa distância, e mesmo na presença de ruído a taxa de sucesso é maior que 90%, que é aceitável para qualquer caso em que não há restrição de tempo na comunicação, havendo tempo hábil para repetições.

BIBLIOGRAFIA

1. **Carvalho, Antônio Henrique R.** Projeto Vila Digital de Barreirinhas - A EVOLUÇÃO DE UMA IDÉIA. *VIII Seminário PLC Porto Alegre*. 2007.
2. **Duque, C. A.** *Transmissão de Dados em Redes Elétricas*. Juiz de Fora : Intech Brasil, 2001.
3. **Echelon.** *Introducción to LonWorks Systems*.
4. **Pinho, Roberto Roma de.** *Comunicação de dados através da rede elétrica aplicado à automação residencial e predial: Hardware*. Sorocaba/SP : s.n., 2005.
5. **Charan Langton.** Tutorial in Digital Communication. *All About Modulation*. [Online] Dezembro de 2005. [Citado em: 15 de Fevereiro de 2011.] <http://www.complextoreal.com/chapters/mod1.pdf>.
6. *Neuron C Programers Guide*. San Jose, CA. USA. : Echelon Coporation, 2003.
7. *ISI Protocol Specification*. 2006.
8. PL 3120 / PL 3150 Power Line Smart Transceiver Data Book. s.l. : Echelon.
9. **Ribeiro, André Cardoso de Sá e Serruya, Jacob.** *Provendo Internet Banda Larga através da tecnologia Power Line Communicatio - PLC*. Belém : s.n., 2004.
10. **X10.** X10 Powerline Carrier (PLC) Technology. *X10 Home Page*. [Online] [Citado em: 13 de Fevereiro de 2011.] <http://www.x10.com/support/technology1.htm>, 2011..