

ANÁLISE QUALITATIVA DA TRANSMISSÃO DE DADOS ATRAVÉS DA REDE ELÉTRICA

A.L.P.S. Campos
UNED Zona Norte – CEFET-RN
Av. Sen. Salgado Filho, 1559 Tirol, Natal-RN, CEP 59.000-000
Tel: (84) 4009 – 2600
E-mail: antonioluiz@cefetrn.br

R.H.M. Montenegro
Pós-Graduando em Especialização em Telecomunicações
Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – UFG
Praça Universitária s/n, Setor Universitário, Goiânia – GO, CEP-74605-220
E-mail: ricardoholanda@gmail.com

RESUMO

Com o desenvolvimento da tecnologia *Power Line Communication* (PLC), que permite que transmissões de sinais por onda portadora em redes de distribuição de energia aconteçam, surge mais uma opção de conectividade em banda larga, além dos sistemas *wireless*, de satélite e cabos coaxiais das operadoras de TV por assinatura. Em termos simples, a PLC é uma tecnologia capaz de transmitir sinais de dados e voz pela rede convencional de distribuição de energia, usando sinais de alta frequência. Este trabalho descreve um estudo qualitativo da transmissão de dados usando como meio de comunicação a rede elétrica. Para se efetuar as transmissões, um sistema de comunicação *simplex* foi implementado. A modulação usada foi a modulação por chaveamento de frequência (FSK). Arquivos com extensão txt foram transmitidos e tiveram seus caracteres convertidos em valores ASCII para que se pudesse efetuar uma análise qualitativa da transmissão. Para se efetuar a análise usou-se a correlação calculada entre o arquivo transmitido e o recebido. Diversas situações de transmissão foram simuladas e analisadas.

PALAVRAS-CHAVE: PLC; Rede elétrica; Transmissão de dados; Análise qualitativa; Modulação FSK.

1. INTRODUÇÃO

A rede elétrica, inicialmente, não foi desenvolvida para ser utilizada como um canal de comunicação, pois contém ruídos que tornam quase impraticável a transmissão de dados (Marubayashi, 1996). Após várias pesquisas e testes, foram desenvolvidas técnicas capazes de superar estes obstáculos tornando viável o uso da mesma para este propósito. Essas técnicas são denominadas de PLC (*Power Line Carrier*) (Ferreira, 1996).

A tecnologia PLC utiliza os cabos da rede elétrica para transmissão de sinais de controle, de monitoramento de estado ou de emergência, usando sistemas ponto-a-ponto, dentro de um prédio ou de um prédio a outro sem o custo e a inconveniência de adicionar um cabeamento dedicado para isto (Dostert, 2001).

Esta tecnologia existe há muitos anos, mas ainda não está sendo largamente utilizada para implementar redes de dados residenciais e empresariais (Ishak, 2002). Isso se deve à falta de conhecimento dessa tecnologia por parte dos profissionais da área de redes.

No Brasil, as distribuidoras de energia estão entusiasmadas com este tipo de tecnologia, dentre as quais se podem citar a Light e a Eletropaulo. O objetivo é oferecer o aluguel dessa infra-estrutura, para operadoras de telecomunicações interessadas em uma nova opção tecnológica para acesso à internet em banda larga (Paiva, 2003).

A motivação deste trabalho foi o interesse nas aplicações de técnicas PLC em redes domésticas, visando a automação residencial de baixo custo. Foram projetados modems que utilizam a transmissão do tipo *half-duplex* para a transmissão de dados através da rede elétrica. Arquivos de texto foram transmitidos e uma análise matemática foi efetuada para se medir a qualidade das transmissões efetuadas. Os modems podem ser utilizados na implementação de um sistema de automação de baixo custo.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA IMPLEMENTADO

Para se efetuar as transmissões de dados através da rede elétrica, foi projetado e implementado um sistema de comunicação *simplex*, conectado entre dois computadores e que utiliza a rede elétrica como meio de transmissão. O transmissor e o receptor são ligados aos computadores através de cabos *null-modem* conectados a porta serial, conforme ilustra a Figura 1.

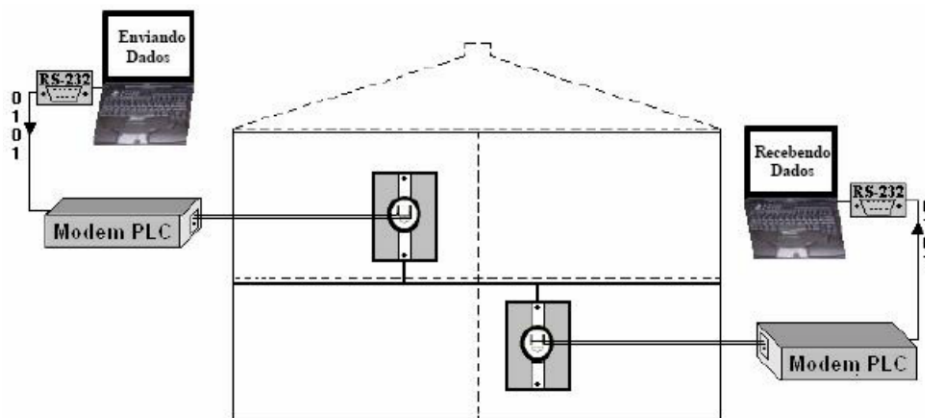


Figura 1. Sistema Implementado.

O tipo de modulação utilizado foi modulação por chaveamento de frequência (*Frequency Shift Keying* – FSK) devido à sua maior imunidade a ruídos, comparada com a ASK; e maior facilidade de implementação, quando comparada com a PSK. Os modems são compostos por circuitos moduladores, demoduladores, amplificadores e pelas redes de acoplamento.

O modulador implementado baseia-se no circuito integrado XR-2206, o qual é um gerador de funções capaz de produzir senóides de alta qualidade. Suas formas de onda podem ter a frequência modulada por uma tensão elétrica externa. Podem ser geradas duas frequências FSK independentes. Assim, as frequências são chaveadas entre dois níveis f_1 e f_2 . Esse modulador foi projetado para as seguintes frequências de operação: 87kHz para o bit 0 e 89kHz para o bit 1. Esses valores foram escolhidos baseados em diversos testes de transmissão feitos em laboratórios e usando como referência medições do espectro de ruído realizadas em (Hagmann, 1989), cujos resultados estão ilustrados na Figura 2. Como se pode observar, existe uma janela espectral menos poluída de ruídos em torno de 90kHz. Através das medições efetuadas escolhemos as frequências 87kHz e 89kHz.

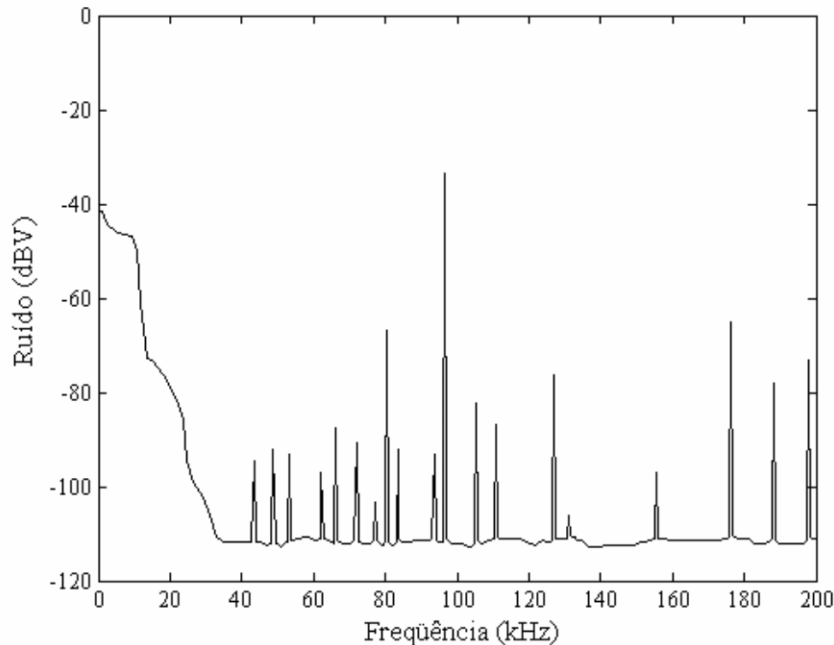


Figura 2. Medições do espectro de ruídos em uma rede elétrica de 220V realizadas na Suécia.

Já o demodulador é implementado através do circuito integrado XR-2211 que utiliza um PLL (*Phase Locked Loop*) projetado especialmente para aplicações de transmissões de dados. O PLL rastreia o sinal de entrada na banda de passagem projetada.

O circuito amplificador serve para efetuar casamento entre a saída do modulador e a entrada da rede de acoplamento bem como, para fornecer potência suficiente ao sinal modulado para transpor a rede de acoplamento. O amplificador projetado foi do tipo classe AB e seu ganho é de aproximadamente 12dB.

Um dos circuitos mais importantes do sistema é a rede de acoplamento. Este circuito bloqueia o sinal de 60Hz ao mesmo tempo em que acopla o sinal a ser transmitido à rede elétrica. A topologia utilizada neste projeto é do tipo diferencial indutivo, pois o mesmo provê um isolamento físico entre a rede elétrica e a rede de comunicação, fornecendo assim uma maior segurança. A rede de acoplamento é composta por um filtro LC de 2ª ordem em paralelo. O transformador foi construído de forma artesanal, utilizando um núcleo toroidal de ferrite e projetado com a relação de espiras de 1:1.

3. CORRELAÇÃO

Em sinais, medidas de correlação são em geral utilizadas para comparar um sinal w com um outro sinal f . Em geral isto é feito quando se quer determinar se o sinal w combina com o sinal f . Esta comparação normalmente é feita utilizando-se a correlação entre sinais (Weisstein, 2006). A correlação entre dois sinais é calculada como

$$C = \sum_t (f(t) - \bar{f}(t))(w(t) - \bar{w}) \quad (1)$$

Esta abordagem não é muito adequada para medir a semelhança entre dois sinais, pois variações ou diferenças de amplitude causam mudança no valor da correlação. Quando se deseja realizar a comparação entre dois sinais sem o problema da amplitude utiliza-se uma medida chamada de coeficiente de correlação γ . O coeficiente de correlação entre um sinal w e um sinal f quaisquer na posição s de f é dado por (Papoulis, 1991):

$$\gamma(s) = \frac{\sum_t (f(t) - \bar{f}(t)) (w(t-s) - \bar{w})}{\sqrt{\sum_t (f(t) - \bar{f}(t))^2 \sum_t (w(t-s) - \bar{w})^2}} \quad (2)$$

em que $\bar{f}(t)$ e \bar{w} são os valores médios de f e w , sendo o valor de f calculado apenas onde o mesmo se sobrepõe a w .

O uso do deslocamento s no cálculo da correlação possibilita uma "busca" no sinal maior pelo sinal menor, tornando a comparação ainda mais correta. Neste caso, uma média ou o valor máximo da correlação pode ser utilizado como medida de comparação como pode ser visto em (3) (González, 1992).

$$\bar{C} = \max_s \{\gamma(s)\} \quad (3)$$

4. RESULTADOS OBTIDOS

Após a implementação dos modems, foram realizados testes com os mesmos conectados à rede elétrica. Os testes foram realizados utilizando-se o programa computacional *RealTerm* que é um programa terminal (*freeware*) especialmente implementado para enviar, capturar, controlar e depurar fluxos de dados binários e de outros formatos através da porta serial (Realterm, 2004).

O arquivo padrão utilizado nas transmissões está ilustrado na Figura 3. Para se efetuar a análise matemática dos arquivos recebidos, cada caractere do arquivo texto foi convertido em seus respectivos valores ASCII e esses valores foram armazenados em um vetor e, de posse desses valores, pôde-se calcular a correlação entre o arquivo transmitido e os arquivos recebidos.. Para isso, foi utilizado um programa computacional elaborado no *software* MATLAB®.

```
SRE.C */

/*****
* Este programa faz transferência de arquivos através da
* porta serial. Utiliza comunicação direta com a porta
* serial por meio da programação do UART.
* MODO DE USO
* Deve ser instalado em dois computadores da seguinte
* forma;
* A linha de comando para o computador
* que receberá o arquivo é:
* A>SRE R <nomearq.ext>
* A linha de comando para o computador
* que enviará o arquivo é:
* A>SRE E <nomearq.ext>
*****/

*****

* Engenharia de Computação UNP - PROJETO
*****

|
|
*****

* TRANSMISSÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA
*****
```

Figura 3. Arquivo Padrão Transmitido.

As transmissões do arquivo padrão foram feitas no Laboratório de Redes e Eletrônica, da Universidade Potiguar. Elas foram realizadas em uma situação padrão, ou seja, com os mesmos equipamentos ligados.

Foram efetuadas diversas transmissões. Entretanto, serão mostradas nesse trabalho apenas algumas delas. As transmissões foram efetuadas sob condições especificadas na Tabela I.

TABELA I. Situações de Transmissão

Transmissão	Aparelhos ligados
1 ^a	22 lâmpadas fluorescentes, 01 motor e 01 estabilizador
2 ^a	24 lâmpadas fluorescentes e 4 estabilizadores
3 ^a	16 lâmpadas fluorescentes e 4 estabilizadores
4 ^a	12 lâmpadas fluorescentes e 2 estabilizadores

A primeira transmissão foi realizada nas frequências de 80 e 90kHz. Os resultados obtidos nesta transmissão podem ser vistos na Figura 4. Como pode ser visto, os dados recebidos são bastante diferentes dos transmitidos, forçando a mudança da faixa de frequência para uma mais livre de ruídos. Esta transmissão obteve um coeficiente de correlação fraco (0,27269).

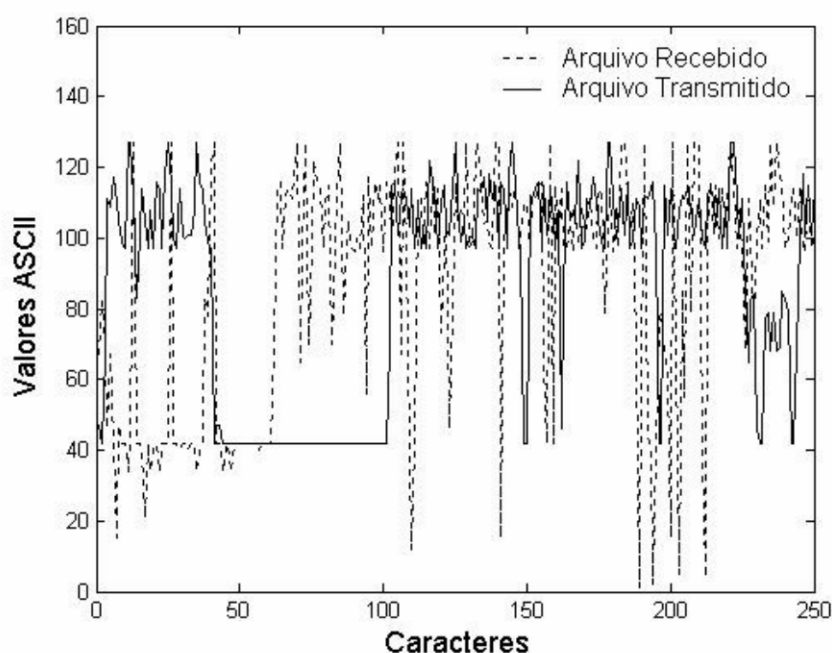


Figura 4. Curvas traçadas referentes às frequências 80 e 90kHz.

A Figura 5 ilustra as curvas traçadas dos arquivos: transmitido e recebido, para as frequências de 86 e 90kHz. Esta escolha foi feita, procurando-se um melhor ajuste de frequências. Após transmissões terem sido realizadas, o grau de correlação obtido foi de 0,12427, classificado como fraco. Concluiu-se que esta faixa era mais suscetível a ruídos que a faixa de frequência anterior (80 e 90kHz), no entanto é importante chamar a atenção que, apesar de se ter diminuído a largura de banda do sistema PLC de 10kHz para 4kHz, este ainda se encontra em uma faixa de ruídos bastante forte. Foi detectado que estes ruídos eram provenientes das lâmpadas fluorescentes instaladas no Laboratório de Eletrônica e Redes de Computadores, pois quando as mesmas eram desligadas, os dados recebidos tinham poucos erros, causados por outros equipamentos não identificados.

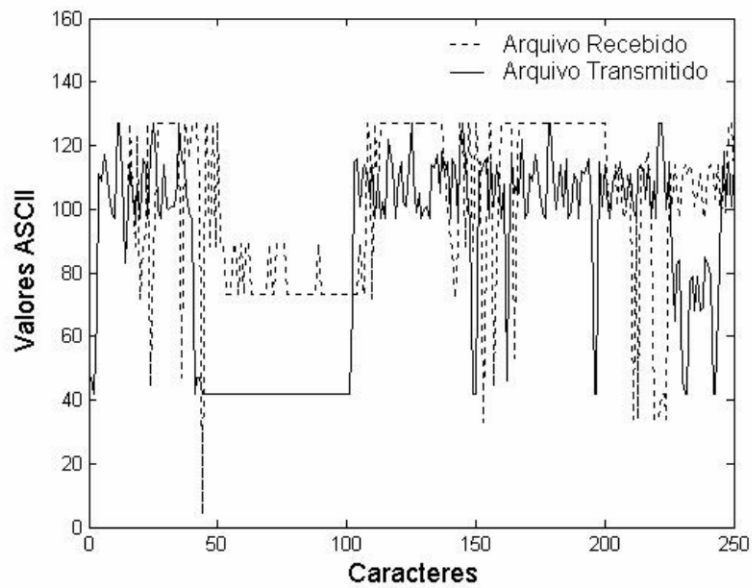


Figura 5. Curvas traçadas referentes às frequências 86 e 90kHz.

Curvas correspondentes às frequências de 87 e 90kHz são ilustradas na Figura 6. O grau de correlação obtido foi de 0,73752 (Forte). Conseqüentemente ocorreram poucos erros na detecção do sinal recebido. O gráfico abaixo mostra que, do 1º caractere até o 300º (Eixo X) não ocorreu nenhum tipo de erro (sinal transmitido sobreposto ao recebido), ou seja, durante este período nenhum ruído afetou os dados transmitidos. Já do 301º (aproximadamente) ao 500º o sistema de comunicação sofreu interferência, no entanto poucos erros de caracteres foram detectados.

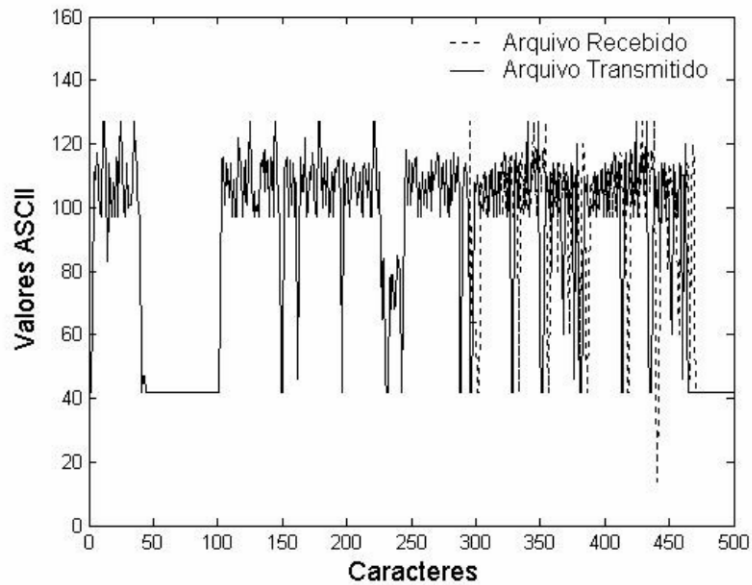


Figura 6. Curvas traçadas referentes às frequências 87 e 90kHz.

A Figura 7 ilustra as curvas traçadas na faixa de frequência mais livre de ruídos possível, dentro da faixa de operação desejada (80 a 100kHz). As frequências de operação escolhidas foram 87kHz e 89kHz. O grau de correlação obtido nesta transmissão foi de 0,98938 (Muito Forte) e mostra que esta faixa de frequência é menos poluída de ruídos do que todas as faixas anteriormente testadas.

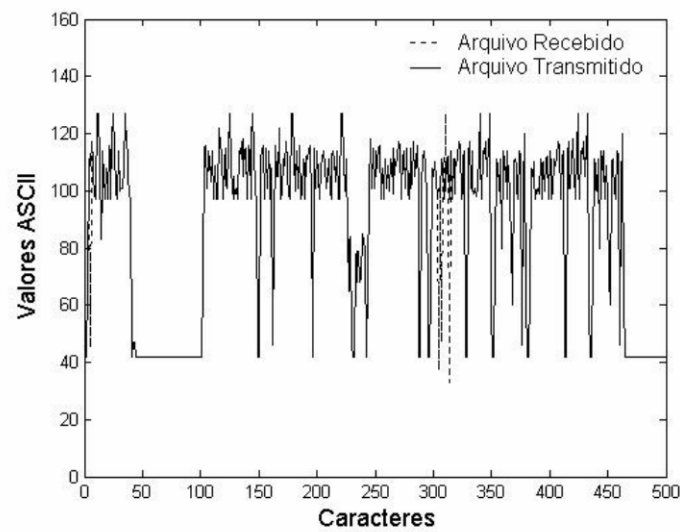


Figura 7. Curvas traçadas referentes às frequências 87 e 90kHz.

O gráfico da Figura 8 mostra o grau de correlação para as faixas de frequências utilizadas nas diversas transmissões efetuadas, fazendo uma comparação entre os graus de correlação referente às quatro faixas de frequências. As frequências de 87 e 89kHz apresentaram maior imunidade a ruídos e tiveram seu grau de correlação igual a 0,9838. Várias transmissões com esta faixa de frequência foram realizadas com êxito e suas correlações foram perfeitas (grau de correlação igual a 1).

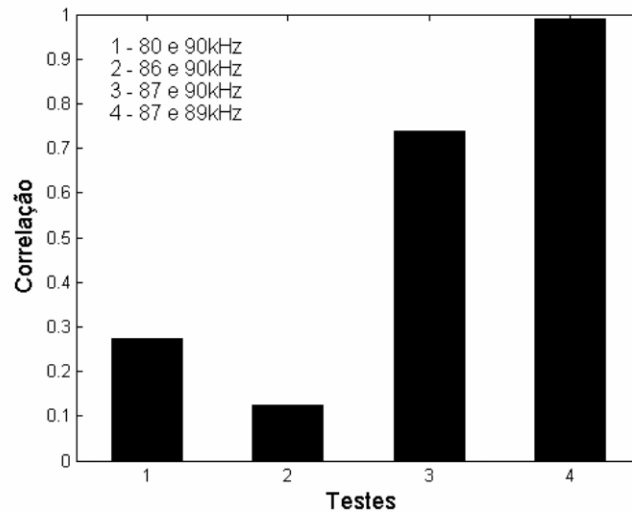


Figura 8. Comparação entre os graus de correlação obtidos nas diversas transmissões.

É bom frisar que uma pequena modificação de 1kHz; referente ao bit “1”; na frequência de comunicação (p.ex: 87-90kHz para 87-89kHz) proporcionou uma melhora considerável na comunicação de dados, ou seja, uma faixa de comunicação bem menos ruidosa.

Após a identificação das frequências que seriam utilizadas nos modems, foram efetuadas diversas transmissões, procurando-se identificar quais cargas eram mais prejudiciais nas transmissões.

A Figura 9 ilustra curvas traçadas a partir dos arquivos: transmitido e recebido. Nesta transmissão, estavam ligadas 24 lâmpadas, 01 motor de exaustor e 02 estabilizadores. Ocorreram diversos caracteres errados e a correlação obtida foi de 0,628. A correlação obtida nessa transmissão levava a crer que um motor universal, de um exaustor estava causando um ruído destrutivo na faixa de frequências escolhidas, então se fez uma outra transmissão na qual o motor foi desligado.

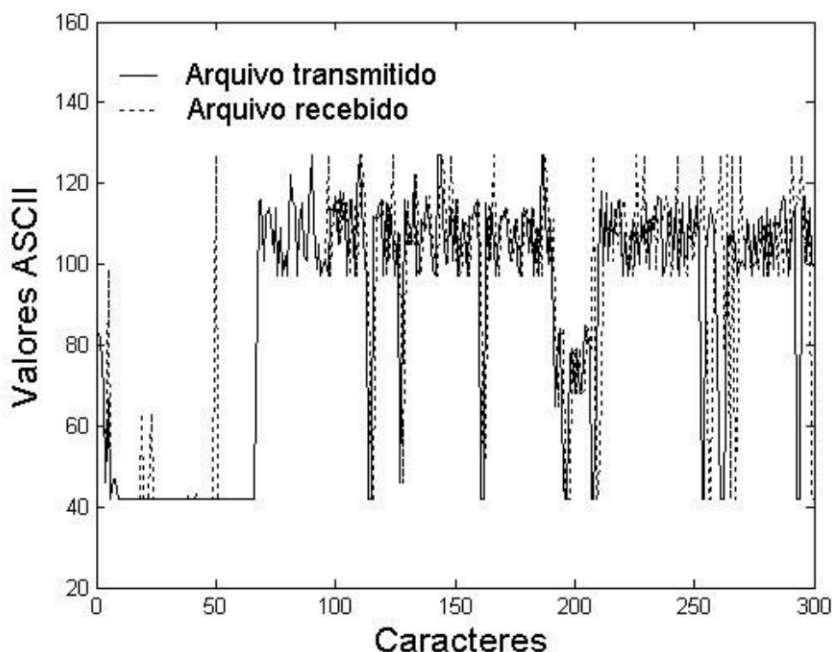


Figura 9. Curvas traçadas ligando-se 22 lâmpadas fluorescentes, 01 motor e 01 estabilizador.

Dessa vez mais lâmpadas foram ligadas. A Figura 10 ilustra os valores ASCII que foram obtidos dos arquivos transmitido e recebido. Nessa transmissão, a correlação piorou ao invés de melhorar. Levando a conclusão de que as lâmpadas estavam provocando mais ruído que o motor. A correlação obtida nessa transmissão foi de 0,377.

Como se pôde observar na Figura 10, com o aumento do número de lâmpadas fluorescentes a correlação diminuiu, indicando uma maior taxa de erro. Para se comprovar o ruído provocado pelas lâmpadas, fez-se outra transmissão na qual foi ligado um número menor de lâmpadas. Dessa vez foram ligados 16 lâmpadas fluorescentes e 04 estabilizadores. A Figura 11 ilustra os valores ASCII que foram obtidos dos arquivos transmitido e recebido. Nessa transmissão, a correlação obtida foi de 0,956. Esta alta taxa de correlação, indicando uma boa transmissão, levou a conclusão definitiva de as lâmpadas, realmente, provocam uma elevada taxa de ruídos na faixa de frequências escolhida.

Para se tirar qualquer dúvida em relação ao efeito provocado pelas lâmpadas, foi efetuada mais uma transmissão. Dessa vez, apenas 12 lâmpadas fluorescentes foram ligadas. Além disso, 01 máquina furadeira e 04 estabilizadores foram ligados. A Figura 12 ilustra os valores ASCII que foram obtidos dos arquivos transmitido e recebido. Nessa transmissão, a correlação obtida foi igual a 1, indicando uma transmissão perfeita.

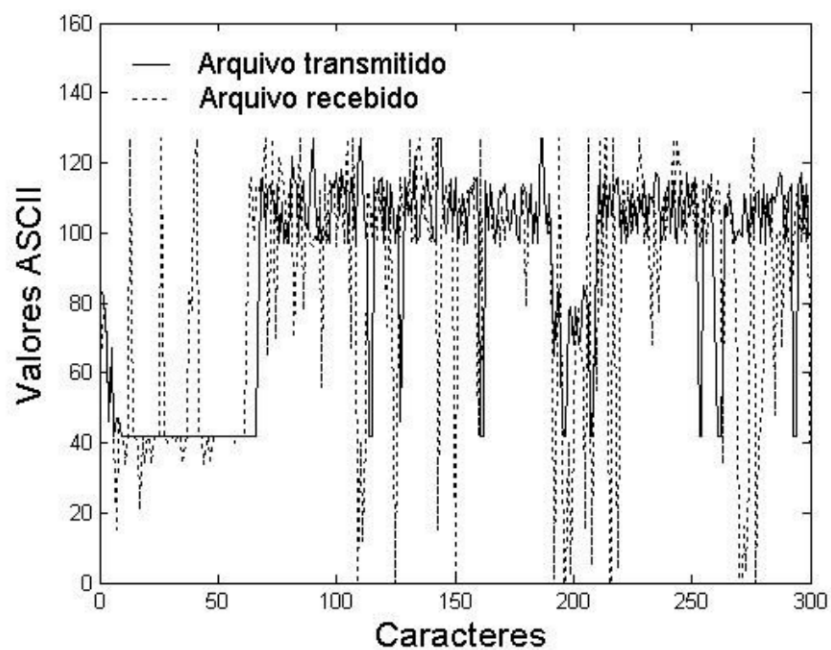


Figura 10. Curvas traçadas ligando-se 24 lâmpadas fluorescentes e 4 estabilizadores.

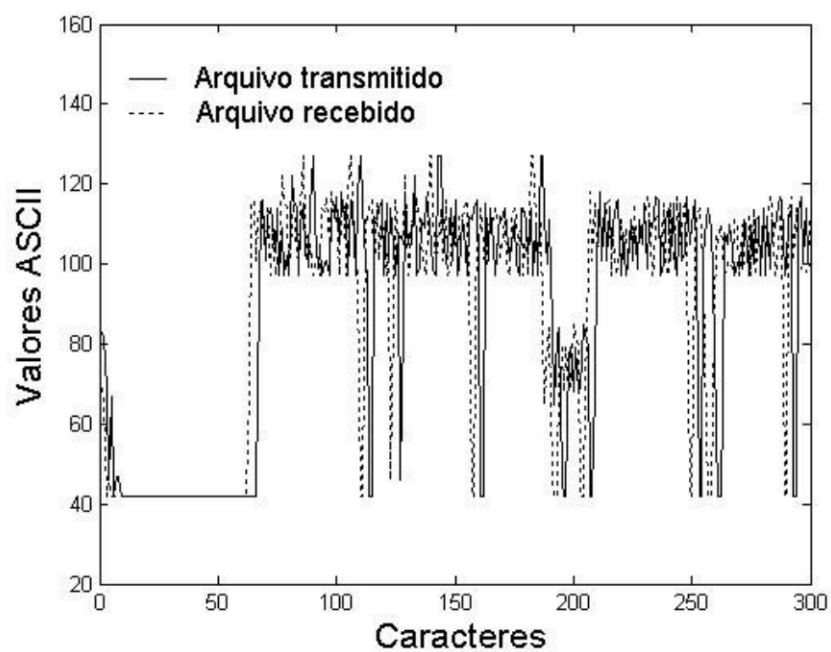


Figura 11. Curvas traçadas ligando-se 16 lâmpadas fluorescentes e 4 estabilizadores.

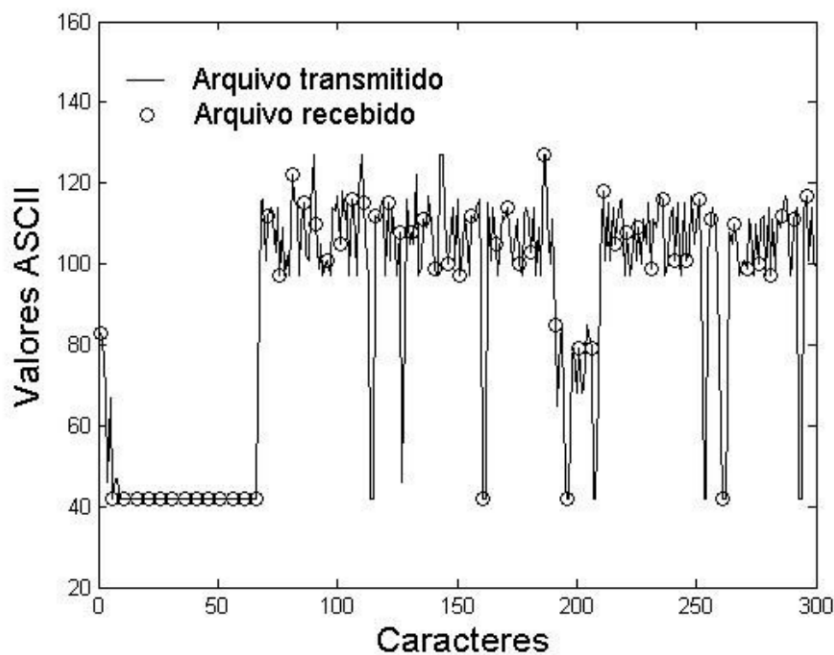


Figura 12. Curvas traçadas ligando-se 12 lâmpadas fluorescentes e 2 estabilizadores.

5. CONCLUSÕES

Foi implementado um sistema de transmissão de dados do tipo *half-duplex* para se efetuar o estudo da transmissão de dados através da rede elétrica. Programas computacionais foram elaborados no *software* MatLab®, para se efetuar uma análise qualitativa da transmissão. Para efeito de análise foi utilizada a correlação ao invés da taxa de erro de bit. O uso da correlação se deve ao fato de se ter usado a porta serial (RS-232) para conexão do computador ao sistema implementado.

As experiências mostraram que as principais interferências detectadas são provenientes das lâmpadas fluorescentes ocasionando assim erros nas transmissões dos dados. A faixa de frequência (87kHz e 89kHz) para modulação *FSK* se mostrou como uma das melhores faixas para comunicações de dados através da rede elétrica à uma taxa de transmissão igual à 1200bps, para o ambiente de testes considerado.

As transmissões efetuadas mostraram que há a necessidade de uma investigação detalhada do ruído presente no canal. Por isso, é recomendável a realização de medições com equipamentos como analisador de espectro, para uma melhor caracterização desses ruídos.

As grandes variações nas taxas de correlação mostraram que é imprescindível a utilização de um protocolo de detecção e correção de erros. A transmissão de dados através da rede elétrica é viável. Entretanto, técnicas de modulação mais robustas devem ser utilizadas para esse propósito.

Será feita a medição da taxa de erro de bit (BER), para se ter uma análise quantitativa dos erros ocorridos nas transmissões efetuadas. A Relação Sinal-Ruído (SNR) também deve ser usada para obter uma melhor avaliação do sistema.

Melhorias devem ser realizadas no sistema implementado, tais como: uso de um controle automático de ganho no demodulador, implementação de uma interface USB, ao invés de RS-232, inserção de uma interface micro-controlada. Além disso, pretende-se implementar um sistema de automação residencial com os modems implementados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dostert, K., **Power line communications**, Nova Jersey, Prentice Hall, 2001.

Ferreira, H. C. et al., (1996). **Power Line Communications: An Overview**, Transactions of the S.A. Institute of Electrical Engineerings, setembro, pp. 558 – 563.

Gonzáles, R. C.; e Woods, R. E., (1992). **Processamento de Imagens Digitais**, São Paulo, Editora Edgard Blücher.

Hagmann, W. (1989). **A Spread Spectrum Communication System for Load Management and Distribution Automation**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No 1, pp 75-80.

Ishak, N. et al. (2002). **Power Line and Home Automation**, 2002 Student Conference on Research and Development Proceedings, Shaa Alam, Malásia.

Marubayashi, G. e Tachikawa, S.(1996). **Spread Spectrum Transmission on Residential Power Line**, IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Vol. 3 ,22-25 Setembro, pp. 1082 – 1086.

Paiva, F. (2003). **Internet na tomada**, Revista Teletime, <http://200.157.161.15/teletime/revista/60/capa.htm>, Dezembro.

Papoulis, A. (1991). **Probability, Random Variables and Stochastic Process**, McGraw-Hill, 3ª Edição.

Realterm, **Serial Terminal**. Acessado em 01 de maio de 2006. Disponível em: <http://realterm.sourceforge.net/>.

Weisstein, E. W. **Correlation Coefficient**, MathWorld – A Wolfram Web Resource. Acessado em 01 de maio de 2006. Disponível em: <http://mathworld.wolfram.com/>.