



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

**GRUPO DE ESTUDO SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS -
GTL**

COMUNICAÇÃO SEM-FIO DE DADOS, IMAGEM E VOZ PARA ELETRICISTAS

**André R. Hirakawa(*)
Universidade de São Paulo**

**José C. V. Lemos
CTEEP**

**Thomas C. G. Vilhena
Universidade de São Paulo**

RESUMO

Eletricistas em atividades nas linhas vivas de transmissão se comunicam utilizando apenas a sua voz devido à inexistência de um sistema de comunicação efetivo. Assim, este trabalho apresenta a proposta conduzida pela CTEEP e a USP com o objetivo de projetar e desenvolver um sistema de transmissão sem-fio, instalado no capacete do eletricista, para uso como inter-comunicador digital de voz e transmissão de dados e imagem entre eletricistas atuando em linhas de transmissão.

A configuração do sistema proposto considera, além da especificação funcional, os aspectos de usabilidade. Resultados de testes de campo são apresentados e mostram a aplicabilidade da tecnologia adotada.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de transmissão, linha-viva, comunicação sem-fio, intercomunicador, imagem

1.0 - INTRODUÇÃO

Muitas operações de campo realizadas em linhas de transmissão, por exemplo, instalação, inspeção e manutenção, requerem que o eletricista suba nas torres e também nas linhas vivas. Uma vez posicionado, o eletricista faz uso de suas mãos para se movimentar, equilibrar e manusear as ferramentas e os dispositivos do processo em execução. Em varias etapas dessas operações pode ser necessária a comunicação entre os eletricistas e a equipe de apoio localizada em solo para transmitir alguma informação ou solicitar algum apoio. A figura 1 apresenta um exemplo do ambiente de trabalho típico.

Como procedimento natural, o eletricista tende a utilizar a sua voz para a comunicação, sendo necessário gritar para efetivar a comunicação em alguns casos. Em ambientes mais ruidosos esse meio de comunicação se torna inviável. Além disso, quando da identificação de alguma anomalia, o eletricista necessita de apoio técnico para realizar o diagnóstico e tomar alguma decisão, situação essa que demanda um meio de comunicação e transmissão de informação para a efetivação da operação.

Aliada a questão da comunicação entre os eletricistas, os processos envolvidos nas empresas de energia requerem cada vez mais meios para a integração da informação, e consequentemente, a integração dos processos. Dentre esses processos, as que ainda não possuem meios para a completa integração são as de inspeção e manutenção, principalmente nas pontas do processo, ou sejam, nas atividades de campo (1).

Para tentar solucionar o problema, proposta de uso de intercomunicadores de radio-frequência foram realizadas. Entretanto, essa solução se mostrou inviável devido às dimensões do dispositivo e a necessidade do uso da mão para ativá-lo (2).



FIGURA 1 – Ambiente de Trabalho em Campo

Algumas soluções tecnológicas são propostas também em diferentes países. Harkins (3) descreve um sistema de comunicação de voz entre os trabalhadores em grupo. Cada módulo é composto de um microfone, um transmissor-receptor e um alto-falante, mas permite apenas a comunicação de voz entre os trabalhadores em grupo a uma curta distância e não apresenta a capacidade de transmitir imagens e vídeo. Lee (4) descreve um sistema para a captura de imagem, sendo posteriormente processado, comprimido e convertido para transmissão digital por módulos de RF. A proposta permite apenas a transmissão de imagem de dispositivos sensores para um concentrador, sem contudo permitir a interação entre o transmissor e receptor para a configuração do modo de captura da imagem e não apresenta a capacidade de realizar a comunicação de voz.

Essa realidade e o diagnóstico dos problemas enfrentados pelos eletricitistas em atividade em linha-viva de transmissão de energia elétrica motiva a proposição de um sistema eletrônico que permita a comunicação de voz e a transmissão de imagem e vídeo para a equipe de apoio e para a central de operação. Além de solucionar os problemas mencionados o sistema aqui proposto deve ser integrado ao EPI (Equipamento de Proteção Individual) e poder ser operado sem o uso das mãos.

2.0 - VICEL

Para vislumbrar uma solução para o problema de intercomunicação entre eletricitistas, e a comunicação destes com as centrais de operação, é proposto o projeto VicEl que pretende utilizar a tecnologia de comunicação digital sem-fio (Wifi, WiMax e Zigbee entre outros) e viabilizar um canal de comunicação com recursos de comunicação de voz, dados e imagem aos eletricitistas em operação em linha-viva de transmissão de energia elétrica. Essas tecnologias foram selecionadas, pois, além de possibilitar as formas de comunicação desejadas, permitem a configuração automática de redes locais (rede Adhoc) e a formação de múltiplos canais entre os dispositivos (rede Mesh) (5) (6).

O dispositivo de comunicação proposto é adaptado ao capacete do eletricitista e possui: uma câmera capaz de captar imagens em modo fotografia e vídeo, um microfone e um fone para a intercomunicação e sensores para monitorar os estados do eletricitista. Além do dispositivo no capacete, o sistema é composto de um terminal principal para interfacear a comunicação com os eletricitistas e a central de operação. Esse terminal é implementado por meio de um aplicativo (software) exclusivamente desenvolvido e pode ser executado em um computador portátil (notebook) ou PDA (Personal Digital Assistant). A figura 2 apresenta o esboço dos dispositivos.



(a)



(b)

FIGURA 2 – (a) Dispositivo no Capacete, (b) Terminal de Comunicação.

A comunicação de dados sem-fio pode ser utilizada para transmitir a imagem captada pela câmera para outros eletricitistas de forma a aprimorar a identificação e a análise de possíveis falhas. O sistema beneficiará na atividade do eletricitista provendo um dispositivo de comunicação Ubíquo (sem interferência na atividade) e que lhe dará maior conforto e segurança, uma vez que, poderá ter o apoio operacional de outros eletricitistas e também o apoio técnico de especialistas caso encontre situações de tomada de decisão. Outro ganho é a possibilidade de registrar

os eventos operacionais e as ocorrências na linha de transmissão de forma que as informações sejam cadastradas para a análise e tomada de decisão e melhorar a qualidade e a produtividade das atividades na linha de transmissão. Além disso, com a possibilidade da realização de análises e tomadas de decisão de forma remota (com a transmissão de dados e imagem para especialistas) as atividades de retrabalho na linha poderão ser reduzidas.

Partindo-se desses requisitos e objetivos, a metodologia de pesquisa e desenvolvimento adotada considerou, em sua etapa inicial, a análise das tecnologias de comunicação sem-fio. Como resultado da análise, a tecnologia Zigbee foi selecionada. Na segunda etapa foram realizados testes de desempenho de comunicação do Zigbee em diferentes condições ambientais.

2.1 Arquitetura do Sistema

O sistema de transmissão de dados, imagem e voz para a comunicação entre eletricitistas em operação em campo (VlcEI) é composto dos dispositivos com comunicação sem-fio adaptados ao capacete do eletricitista e de um terminal de comunicação e interfaceamento. (Figura 3)

No diagrama da figura 3, que apresenta a arquitetura do sistema de comunicação proposto, a comunicação Zigbee é representada pelos vínculos em forma de “raio” e o vínculo em forma de “seta” representa a possível comunicação do sistema VlcEI com o centro de operações por meio de GPRS, Satélite ou qualquer outro meio de comunicação que permita o transporte de pacotes TCP/IP. Ainda na figura, são representados três dispositivos/capacete que podem se comunicar entre si. Conforme especificação do Zigbee, não há um limite lógico para o número de dispositivos que podem compor a rede local. (7)

2.2 ZigBee e IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 é um meio físico para comunicação, assim, está contido nas duas primeiras camadas do modelo OSI (Open System Interconnection) e tem como objetivo ser a base para a formação de WPAN (Wireless Personal Area Network) focadas na comunicação de baixo custo operacional, de baixa taxa de transmissão de dados e de sentido bidirecional (6). Quanto à camada física do IEEE 802.15.4, a estrutura básica concebe um raio de comunicação de 10 metros entre os dispositivos, a uma taxa de transmissão de 250 kbits/s. Porém, dispositivos com necessidades especiais de economia de energia podem dispor de taxas alternativas de 20, 40 ou 100 kbits/s.

A camada de enlace oferece funcionalidades para a transmissão de dados entre entidades da rede, garantindo confiabilidade e eficiência.

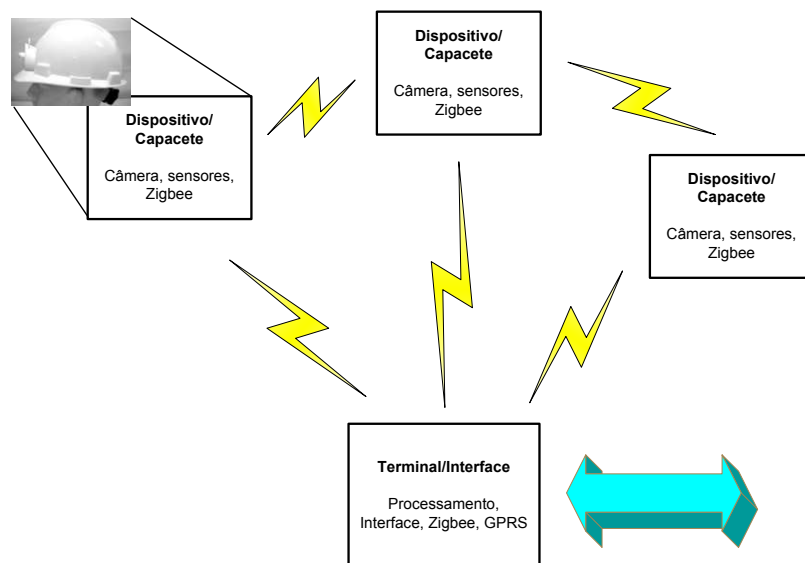


FIGURA 3 – Diagrama do Sistema de Comunicação.

O Zigbee define os perfis das camadas do modelo OSI subsequentes as definidas pelo padrão IEEE 802.15.4. A camada de rede ZigBee suporta três topologias distintas: estrela, árvore e malha. A definição da topologia a ser utilizada por uma aplicação influenciará em parâmetros como confiabilidade de transmissão de dados, consumo de energia e de custo de implantação do sistema.

A topologia adotada para o VlcEI é em malha, na qual cada nó apresenta um link ativo e os demais inativos, porém passíveis de ativação dependendo da saúde da conexão primária. Rigorosamente, o resultado final será uma topologia em árvore dinâmica, ou seja, em constante modificação e que permite a implementação da topologia Mesh.

2.3 Configuração Experimental do VicEL

A implementação física do protótipo do VicEL para a realização do desenvolvimento e dos testes utiliza a plataforma de processamento Imote2 da CrossBow, composto do módulo IPR2400 juntamente com o módulo de aquisição de imagens e áudio IMB400 (9). O conjunto dispõe do transceptor de rádio frequência CC2400 que implementa as camadas física e de acesso ao meio da norma IEEE 802.15.4. A placa multimídia IMB400 fornece recursos multimídia à plataforma de processamento Imote2.

A Tabela 1 apresenta as principais características da camada física da norma IEEE 802.15.4 para WPAN's (Wireless Personal Area Network) utilizadas no CC2400.

Tabela 1 – Camada física da norma IEEE 802.15.4

Banda de Frequência	2400.0 à 2483.5 MHz
Tipo de Modulação	QPSK
Taxa de Transmissão de Dados	250 Kbits/s
Número de Canais	16
Potência de Transmissão	1 mW

O diagrama da figura 4 apresenta o processo de aquisição de imagem que compreende o uso de um sensor de imagem, o circuito de processamento e a memória para o armazenamento da imagem para ser transmitida por meio de comunicação sem-fio ZigBee.

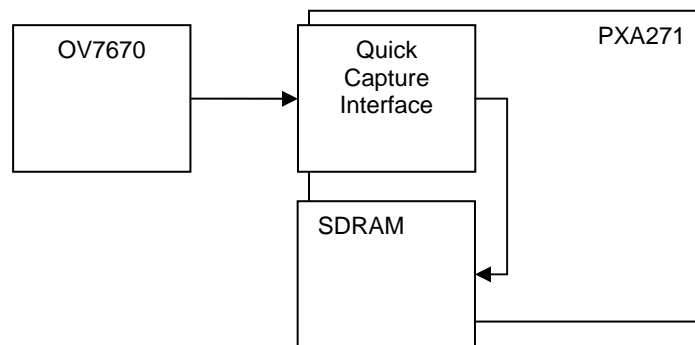


FIGURA 4 - Diagrama simplificado da etapa de aquisição de imagens

Na figura 4, o sensor de imagem OV7670 efetua a aquisição de imagens, as quais serão automaticamente enviadas ao processador PXA271 da plataforma Imote2 via interface de captura rápida (Quick Capture Interface). Este hardware dedicado recebe os bytes de dados do sensor de imagem e os armazena de forma automática na memória SDRAM interna, economizando recursos de processamento.

A imagem de saída do sensor OV7670 tem tamanho padrão VGA e utiliza o formato YUV 4:2:2, ou seja, dois bytes por pixel. Porém, é possível configurar outros formatos, como o RGB 5:5:6, por meio do barramento serial de controle da câmera (SCCB).

3.0 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM LABORATÓRIO

Durante o desenvolvimento do sistema VicEL, diversos testes de avaliação em laboratório foram realizados nos módulos componentes do sistema. Os seguintes itens apresentam, assim, os resultados dos testes com os módulos de comunicação e de captura de imagem em diferentes condições ambientais.

3.1 Avaliação do Desempenho de Comunicação

O primeiro teste de comunicação tem como objetivo avaliar a interferência da potência transmitida na qualidade e na intensidade do sinal recebido, uma vez que é desejável utilizar a menor potência possível para a economia de energia. Foram utilizados dois módulos ZigBee separados por uma distância de aproximadamente 1,35 m e em duas condições, com e sem interposição de obstáculo.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos testes de transmissão, na qual foram mantidas as configurações físicas do experimento e variadas as condições da potência transmitida. Além da intensidade do sinal, foi medido o percentual de erro de transmissão.

Tabela 2 - Resultados do experimento de transmissão.

Potência RF (dB)	Sem Obstáculos		Com Obstáculos	
	Percentual de erro de Transmissão	Intensidade do sinal de rádio recebido (dBm)	Percentual de erro de Transmissão	Intensidade do sinal de rádio recebido (dBm)
-25,0	0,48%	-86,4	0,95%	-86,5
-15,0	0,00%	-77,3	0,47%	-76,6
-10,0	0,00%	-72,2	0,00%	-71,1
-7,5	0,00%	-67,9	0,00%	-68,0
-5,2	0,00%	-66,0	0,00%	-65,8
-3,4	0,00%	-63,7	0,00%	-63,7
-1,7	0,00%	-61,2	0,00%	-62,0
0,0	0,00%	-60,8	0,00%	-61,2

O gráfico da figura 5 apresenta o comportamento da variação da potência do sinal recebido em decorrência da variação da potência do sinal transmitido. Pode-se notar que, para a distância adotada no experimento, e para a faixa de potência útil (até -86,5 dBm) não há variação significativa no comportamento. Desta forma, e para a economia de energia, observa-se que é possível utilizar a mínima potência de transmissão para cada distância.

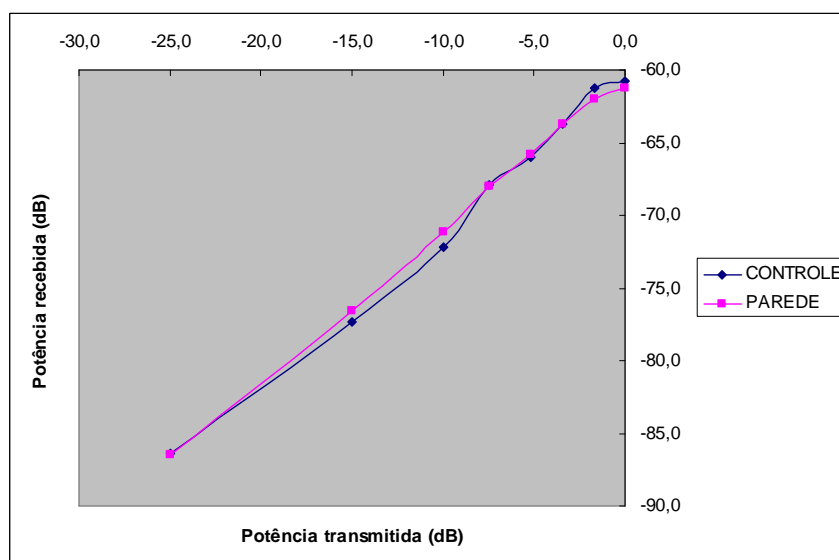


FIGURA 5 – Potência Transmitida e Recebida.

3.2 Avaliação do Desempenho de Imagem

O módulo de captura de imagens IMB400 permite a captura de imagens com variadas resoluções. Para viabilizar a transmissão de imagem (estática e vídeo) com qualidade adequada e respeitando-se a especificação das condições de uso da operação em linha-viva, foram adotadas as resoluções apresentadas na Tabela 3 para os testes e futura implementação.

Tabela 3 - Tamanhos dos quadros (considerando 2 bytes por pixel)

PADRÃO	RESOLUÇÃO (pixels)	TAMANHO (kBytes)	TRANSMISSÃO (segundos/quadro)
VGA	640x480	614.400	19.66
QVGA	320x240	153.600	4.92
QQVGA	160x120	38.400	1.23

Na Tabela 3, a coluna TRANSMISSÃO apresenta o tempo estimado para a transmissão de um quadro considerando que o IEEE 802.15.4 permite uma taxa máxima de transmissão de 250 kbits/s, ou 31.25 kbytes/s.

A conclusão obtida pela análise da tabela é a de que, em decorrência da limitada taxa de transmissão de dados, é necessária a compactação dos quadros de imagens para transmitir vídeo de qualidade e atraso aceitáveis.

O método aplicado para compactação do vídeo é constituído de duas partes, sendo que cada uma delas agrega uma redução no tamanho médio dos quadros. Primeiramente, efetua-se a compressão individual dos quadros utilizando-se a transformada discreta de cossenos de duas dimensões (DCT bi-dimensional) seguida da quantização da matriz resultante. Em seguida, aplicando o princípio da semelhança entre quadros consecutivos com espaçamento temporal pequeno, adota-se o método da diferença, enviando apenas as variações na imagem. A matriz de quantização influi diretamente sobre a taxa de compressão alcançada pela compactação individual dos quadros do vídeo. Uma matriz de quantização típica fornece taxas de compressão maiores do que 10 vezes, sem comprometer significativamente a qualidade da imagem.

A Tabela 4 apresenta os tamanhos (em Bytes) de cada quadro e o tempo de transmissão para os dois métodos de compressão testados.

Tabela 4 - Tamanho e tempo de transmissão por quadro usando compactação de imagem.

PADRÃO	DCT bidimensional		DCT + Método das Diferenças	
	TAMANHO (kbytes)	TRANSMISSÃO (segundos/quadro)	TAMANHO (kbytes)	TRANSMISSÃO (segundos/quadro)
VGA	61.440	1.96	15.360	0.49
QVGA	15.360	0.49	3.840	0.12
QQVGA	3.840	0.12	0.960	0.03

A partir desses resultados experimentais de laboratório, e considerando as necessidades dos eletricitistas, foram adotados dois modos de transmissão de imagens para o VlcEL. A resolução QVGA (160x120 pixels) foi adotada para a transmissão de vídeo em tempo-real para acompanhamento da atividade do eletricitista, uma vez que fornece atualizações de imagens na razão de aproximadamente 10 quadros/segundo. A resolução VGA (640x480 pixels) foi adotada para a transmissão de imagem estática (fotografia) em situações nas quais se deseja um detalhamento do objeto identificado e com necessidade de análise. Conforme tabela 4, o tempo de transmissão de uma imagem com resolução VGA é de cerca de 2 segundos.

4.0 - SISTEMA VICEL

A partir dos resultados dos testes de laboratório, e considerando os requisitos funcionais do eletricitista, a arquitetura e a configuração final do VlcEL foram definidas e implementadas. Os seguintes itens apresentam a configuração final do VlcEL e os resultados dos testes de campo.

4.1 Arquitetura e Configuração Finais

Na figura 6, que apresenta duas imagens, o item (a) mostra o dispositivo de captura, processamento e transmissão de voz e imagem implementado, sendo adotada a configuração do protótipo apenas em caixa blindada para a realização dos testes de campo e sem o acoplamento ao capacete. O item (b) apresenta a aparência da interface de software, desenvolvido e implementado em um Notebook, para que o eletricitista interagir com o VlcEL.

Por meio da interface, o usuário (eletricitista) pode habilitar e desabilitar os recursos para realizar a comunicação por voz, a recepção de vídeo em tempo-real com resolução QVGA e captura de imagem com resolução VGA. Além disso, as imagens capturadas podem ser armazenadas (Salvar em Bitmap) e transmitidas para qual localidade pelo uso do servidor Web instalado no Notebook.



FIGURA 6 – (a) Dispositivo de Captura/Transmissão, (b) Aplicativo do Notebook.

4.2 Teste de Comunicação

Com o objetivo de verificar o funcionamento e o desempenho dos módulos sem-fio ZigBee, quando submetidos a ambientes de campos elétricos e magnéticos elevados, foram realizados experimentos na subestação da CTEEP em Cabreúva, SP. Os módulos ZigBee usados foram dispostos a distâncias variadas das linhas de transmissão de 138 kV e de 440 kV para a coleta de dados. A figura 7 apresenta o ambiente de teste no qual o módulo está a uma distância da linha.

Durante os experimentos, a corrente elétrica nas linhas de alta tensão era da ordem de 200 A. Foi observado que as descargas disruptivas que ocorrem durante a aproximação da caixa de proteção do módulo à linha de alta tensão interferem na comunicação dos dispositivos. A Tabela 5 apresenta os resultados dos testes de campo.

Conforme Tabela 5, há interferência da linha energizada sobre o comportamento da comunicação Zigbee no sentido que, quando existe a descarga do Efeito Corona, como no teste na linha de 440kV com contato, a potência do sinal transmitido decresce bruscamente. Entretanto, o efeito da interferência do campo eletromagnético não é significativo se comparado o efeito da variação da distância, uma vez que, quando o módulo foi aproximado da linha, ele se distanciava do outro módulo.



FIGURA 7 – Ambiente de teste de campo.

Tabela 5 - Resultados dos testes de comunicação.

Distância do cabo (m)	Linha de 138kV Potência do sinal (dBm)	Linha de 440kV Potência do sinal (dBm)
4	-49,3	-58,4
2	-50,2	-58,1
0	-55,0	-94,5

4.3 Teste de Transmissão de Imagem

O teste de transmissão de imagem foi realizado também na subestação da CTEEP em Cabreúva, SP. O sistema desenvolvido foi submetido na linha de transmissão de 138 kV para diferentes distâncias e com a medida da qualidade da imagem recebida. A figura 8 apresenta o ambiente de teste no qual o sistema foi submetido e a tabela 6 apresenta os resultados da transmissão de imagem.



FIGURA 8 – Ambiente de teste de campo

Tabela 6 - Resultados dos Testes de Imagem

DISTÂNCIA (m)	QUALIDADE DA IMAGEM
60	NORMAL – pequenas interrupções
40	NORMAL
20	NORMAL
10	NORMAL
5	NORMAL
2	NORMAL
1	NORMAL
CONTATO	FALHAS - interrupção

Conforme resultados apresentados na Tabela 6, para distâncias elevadas, até o limite especificado para o projeto, a transmissão da imagem ocorre normalmente. Entretanto, no momento que ocorre o contato com a linha-viva, existe a descarga do Efeito Corona que interrompe a comunicação.

5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a proposta do sistema VlcEI que possibilita a intercomunicação e a transmissão de dados e imagens para os eletricitistas em campo. De acordo com a especificação estabelecida, foi selecionada a tecnologia Zigbee como meio físico de comunicação do VlcEI, sendo desenvolvidos o projeto e o protótipo do sistema.

Considerando a pouca banda de transmissão disponível na tecnologia Zigbee, foi necessário estabelecer duas configurações para a transmissão da imagem: imagem com alta resolução com poucos quadros e imagem de monitoração com baixa resolução e em tempo-real e também o desenvolvimento de um algoritmo de compactação de imagem computacionalmente “leve” e simples.

Os resultados dos testes de campo mostraram a adequação da tecnologia para uso no ambiente estabelecido.

Entretanto, quando há a ocorrência de descargas disruptivas, o sistema de comunicação não pode operar, impossibilitando o funcionamento adequado do VlcEL.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) RUBIN, Lew. The future of power line inspection. Electrical World T&D, 2000.
- (2) LEMOS, J. C. V. Projetos de comunicação CTEEP. Comunicação pessoal. São Paulo, 2007.
- (3) HARKINS, D; MINTER, C.; ULM, B. Wireless Short Range Communication System. Patente: US 7,342,502 B2, 2008.
- (4) LEE, H. H.; YANG, C. H. Wireless Image capture Apparatus. Patente: US 2007/0158431 A1, 2007.
- (5) CALLAWAY, E.; CALLAWAY JUNIOR, E. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols. CRC Press, 2003.
- (6) GUTIERREZ, J. A.; NAEVE, M.; CALLAWAY, E.; BOURGEOIS, M.; MITTER, V.; HEILE, B. IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Power Low-Cost Wireless Personal Area Networks. IEEE Network, 2001, p. 12-19.
- (7) RAYMOND, B.; CALLAWAY, E.; GUTIERREZ, J. IEEE 802.15.4 Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensor Networks. Inst of Elect & Electronic, 2003.
- (8) ZIGBEE ALLIANCE, ZigBee Architecture Overview. San Jose, California, 2006.
- (9) CROSSBOW Technology. Crossbow Knowledge Base. Disponível em: <http://www.xbow.com/Support/>. Acesso em outubro de 2008.
- (10) CRAIG, W. C. ZigBee: Wireless Control that Simply Works. ZMD America Inc. 2004.
- (11) CIPOLLONE, E. et al. Topology Characterization and Performance Analysis of IEEE 802.15.4 Multi-Sink Wireless Sensor Networks. The Sixth Annual Mediterranean Ad Hoc Networking WorkShop, Corfu, Greece, June 12-15, 2007, p. 196-203.
- (12) KOH, B. K.; KONG, P. Performance Study on ZigBee-Based Wireless Personal Area Networks for Real-Time Health Monitoring. ETRI Journal, vol.28, no.4, 2006, p.537-540.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

André Riyuiti Hirakawa

Nascido em Suzano, SP em 15 de junho de 1965.

Graduado (1990) e Mestre (1992) em Engenharia Elétrica: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Doutor (1997) em Engenharia Elétrica: Yokohama National University - Japão.

Professor Associado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desde 1998.

José Carlos Villela Lemos

Nascido em Jundiaí, SP em 23 de março de 1966.

Graduado (1992) em Engenharia Elétrica: EFEI.

Engenheiro Sênior da CTEEP – Divisão de Gestão da Manutenção.

Thomas Cegal Gouthier de Vilhena

Nascido em São Paulo, SP em 07 de janeiro de 1989.

Aluno do quinto ano de graduação em Engenharia Elétrica: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

