

Sistema de Transmissão de Voz e Dados Aplicados para Eletricistas de Linha de Transmissão

André R. Hirakawa, Moacyr Martucci Jr., Thomas C.G. Vilhena, José C. V. Lemos

Resumo – Os eletricitistas em atividades nas linhas vivas de transmissão se comunicam utilizando apenas a sua voz devido à inexistência de um sistema de comunicação. Assim, este trabalho apresenta o projeto conduzido entre a CTEEP e a USP com o objetivo de desenvolver um sistema de transmissão sem-fio, instalado no capacete do eletricitista, para uso como intercomunicador digital de voz e transmissão de dados e imagem entre eletricitistas atuando em linhas de transmissão. Apresenta-se aqui também a configuração do sistema proposto que considera, além da especificação funcional, os aspectos de usabilidade (tamanho, peso, baixo consumo) e os resultados dos testes em laboratório e testes de campo junto à linha de transmissão. Os resultados mostram a aplicabilidade da tecnologia ZigBee para a solução, bem como a correta proposta de novos algoritmos de compactação de imagem e de um software dedicado para atuar como interface entre o sistema proposto e o usuário.

Palavras-chave – linha de transmissão, inspeção, imagem, voz, zigbee.

I. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta os resultados obtidos no projeto 0068-014/2007 “Desenvolvimento de Sistema de Transmissão de Voz e Dados Aplicados para Eletricistas de Linha de Transmissão”, executado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e a CTEEP no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL, finalizado em dezembro de 2010.

Muitas operações de campo realizadas em linhas de transmissão, por exemplo, instalação, inspeção e manutenção, requerem que o eletricitista suba nas torres e também nas linhas vivas. Uma vez posicionado, o eletricitista faz uso de suas mãos para se movimentar, equilibrar e manusear as ferramentas e os dispositivos do processo em execução. Em várias etapas dessas operações, pode ser necessária a comunicação entre os eletricitistas 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 eletricitista 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 eletricitista 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 eletricitistas, 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, nas atividades de campo [1].



Figura 1 – Ambiente de trabalho em campo.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

André R. Hirakawa, Moacyr Martucci Jr., Thomas C.G. Vilhena trabalham no Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (e-mail: andre.hirakawa@poli.usp.br).

José C. V. Lemos trabalha na CTEEP (e-mail: jclemons@ctEEP.com.br).

Para tentar solucionar o problema, propostas 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 ativar-lo [2].

Algumas soluções tecnológicas são propostas também em diferentes países. Harkins [3] descreve um sistema de comunicação de voz entre os trabalhadores em grupo. Cada mó-

dulo 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, motivam 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.

II. PROPOSTA 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 (Voice&Image Communication for Electrician) que vislumbra 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] e [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.

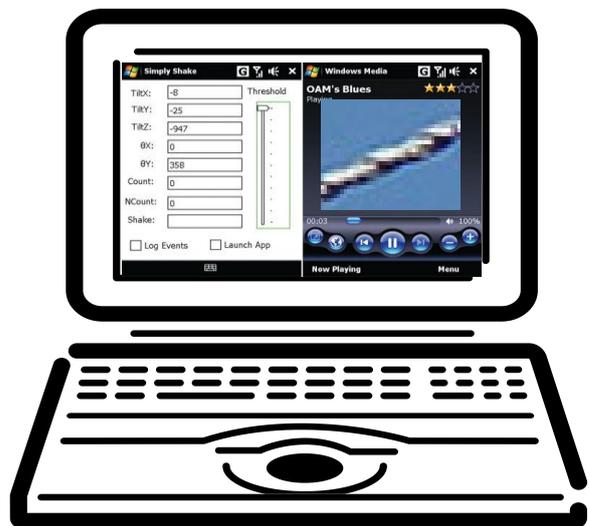
A comunicação de dados sem-fio pode ser utilizada para transmitir a imagem captada pela câmera para outros eletricitistas de forma a aprimorar a identificação e a análise de possíveis falhas. O sistema beneficiará na atividade do eletricitista provendo um dispositivo de comunicação Ubíquo (sem interferência 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 a tomada de decisão e melhorar a qualidade e a produtividade das atividades na linha de transmissão. Além disso, com a possibilidade da realização de análise e tomada 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.



(a)



(b)

Figura 2 – (a) dispositivo no capacete, (b) terminal.

A. Arquitetura do Sistema

O sistema de transmissão de dados, imagem e voz para a comunicação entre eletricitistas em operação em campo (VICel) é composto dos dispositivos com comunicação sem-fio

adaptados ao capacete do electricista e de um terminal de comunicação e interfaceamento. (Figura 3)

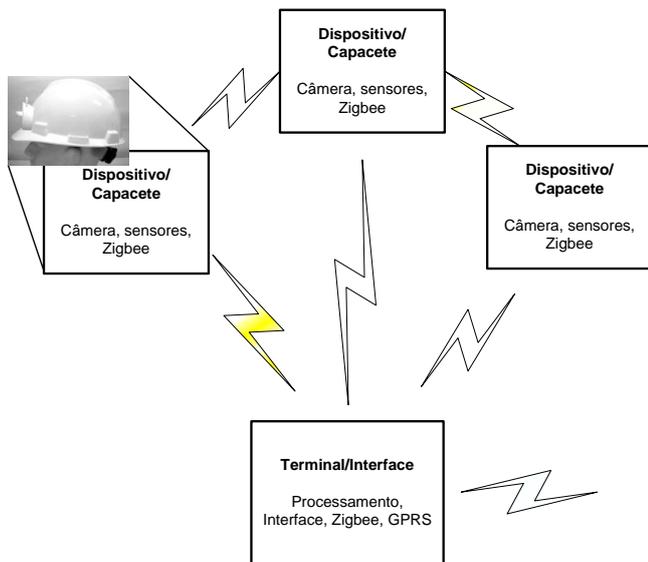


Figura 3 – Diagrama do Sistema de Comunicação.

No diagrama da figura 3, que apresenta a arquitetura do sistema de comunicação proposto, a comunicação Zigbee é representada pelos vínculos em amarelo e o vínculo em azul representa a possível comunicação do sistema VICeI 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].

B. ZigBee e IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15.4 é um padrão para o meio físico de 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.

Fatores geográficos justificam a existência de três bandas de frequência distintas para a operação dos dispositivos, sendo elas as bandas de 868.0 à 868.8 MHz (Europa), 902 à 928 MHz (América do Norte) e 2400.0 à 2483.5 MHz (uso mundial).

A modulação do sinal utiliza a técnica de Offset QPSK (Quadrature Phase-shift Keying), que associa valores de bits a defasagens da onda eletromagnética transmitida.

Para evitar interferências na transmissão do sinal, técnicas de espalhamento espectral (DSSS ou PSSS) são empregadas.

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

Desenvolvida pela ZigBee Alliance [7], 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, como apresentados na figura 4.

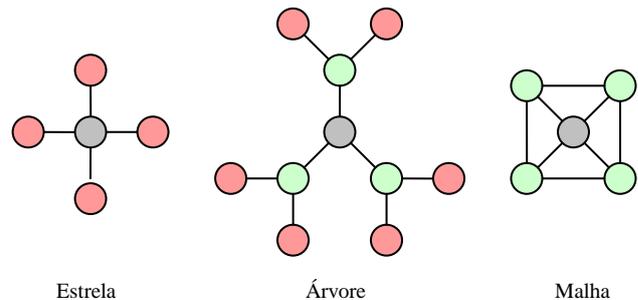


Figura 4 - Topologias de rede ZigBee.

Na figura 4, o elemento em cinza indica o coordenador de rede, em cor verde, um nó com funções avançadas e com cor vermelha, um nó com funções reduzidas.

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 VICeI 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.

C. Configuração Experimental do VICeI

A implementação física do protótipo do VICeI, 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 Tabela I apresenta as principais características da camada física da norma IEEE 802.15.4 para WPAN's (Wireless Personal Area Network) utilizadas no CC2400.

Tabela I - 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

A placa multimídia IMB400 fornece recursos multimídia à plataforma de processamento Imote2 e é formada dos

componentes apresentados na Tabela II.

Tabela II - Recursos da placa IMB400

COMPONENTE	FABRICANTE
Sensor de Imagem	Omni Vision
Codec de Áudio	Wolfson
Sensor de Movimento	Panasonic

O diagrama da figura 5 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.

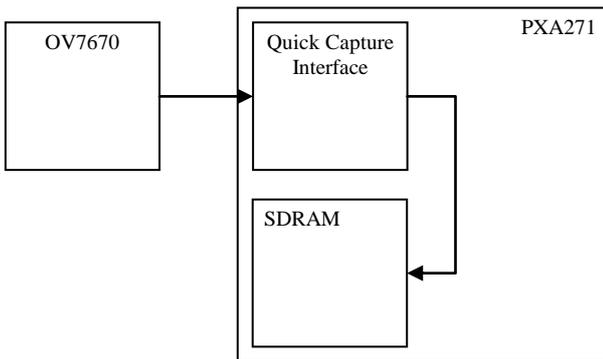


Figura 5 - Diagrama simplificado da etapa de aquisição de imagens

Ainda na figura 5, 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).

III. 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.

A. Avaliação do desempenho de comunicação

O primeiro teste 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 no processo de transmissão de dados. Foram utilizados dois módulos ZigBee separados por uma distância de aproximadamente 1,35 m e em duas condições, com e sem interposição de obstáculo entre os dispositivos. (Figura 6)

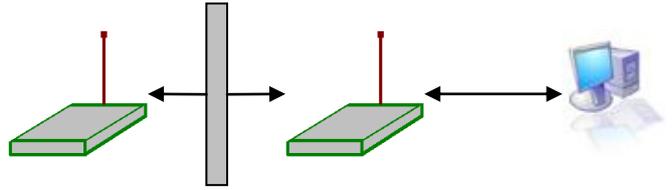


Figura 6 – Configuração do teste – com e sem obstáculo.

A Tabela III apresenta os resultados obtidos nos testes de transmissão em laboratório.

O gráfico da figura 7 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 favorecer a economia de energia, pode-se utilizar a mínima potência de transmissão para cada distância.

Tabela III - Resultados do experimento de transmissão.

Potência RF (dB)	Sem Obstáculos		Com Obstáculos	
	Percentual de erro de Transmissão	Intensidade do sinal (dBm)	Percentual de erro de Transmissão	Intensidade do sinal (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

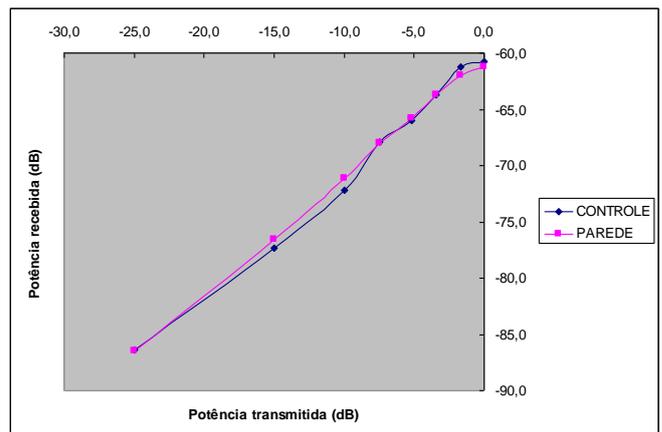


Figura 7 – Potência transmitida e recebida.

B. 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 IV para os testes e futura implementação.

Tabela IV - 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 IV, 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 [9], [10] e [11].

A conclusão alcançada 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 com qualidade e atraso aceitáveis.

C. Algoritmo de Compactação de Imagem

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. Esse método é o mesmo utilizado para a compactação de imagens no padrão JPEG [12][13].

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 dimensão da DCT bi-dimensional foi obtida por meio de testes com diferentes fatores e aplicada a blocos de diferentes dimensões. Para blocos com 8 x 8 pixels em uma imagem, uma boa taxa de compressão de dados pode ser obtida. Por definição, calcula-se a DCT bi-dimensional por meio da equação (1).

$$c(i,j) = k(i) \times k(j) \times \sum_{y=0}^7 \sum_{x=0}^7 m(x,y) \times \cos \left[\frac{(x+0.5)}{8} \times i \times \pi \right] \times \cos \left[\frac{(y+0.5)}{8} \times j \times \pi \right] \quad (1)$$

Sendo:

$c(i,j)$ a matriz transformada

$$k(\alpha) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{8}}, & \text{se } \alpha = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{8}}, & \text{se } \alpha \neq 0 \end{cases}$$

$m(x,y)$ a matriz de entrada

Apesar da equação (1) estar correta, sua aplicação explícita é extremamente ineficiente em termos de tempo de processamento. A simetria evidente na definição da DCT bi-dimensional permite simplificar sua implementação por meio do uso da DCT uni-dimensional para vetores de 8 ele-

mentos, a qual é definida pela equação (2).

$$c(i) = k(i) \times \sum_{x=0}^7 m(x) \times \cos \left[\frac{(x+0.5)}{8} \times i \times \pi \right] \quad (2)$$

Sendo:

$c(i)$ o vetor transformado

$$k(\alpha) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{8}}, & \text{se } \alpha = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{8}}, & \text{se } \alpha \neq 0 \end{cases}$$

$m(x)$ o vetor de entrada

Conforme equação (2), o método simplificado consiste no cálculo da DCT uni-dimensional das linhas da matriz de entrada, gerando uma matriz intermediária. Posteriormente, aplica-se a DCT uni-dimensional nas colunas da matriz intermediária, gerando a matriz transformada. O resultado final será o mesmo, porém o tempo de processamento torna-se convenientemente menor.

Para otimizar ainda mais a etapa de compactação, pode-se utilizar um algoritmo eficiente para o cálculo da DCT uni-dimensional.

Para fins de comparação, a Tabela V apresenta o desempenho relativo (em tempo de processamento) entre dois algoritmos otimizados em relação ao algoritmo não otimizado para cálculo da DCT bi-dimensional.

Tabela V. Comparação entre aplicação da definição da DCT bi-dimensional

ALGORITMO	LINGUAGEM	DESEMPENHO RELATIVO
Não otimizado	C	1
Otimizado	C	20
Otimizado	Assembly	150

Os valores de desempenhos relativos, apresentados na Tabela V, consideram como referência o tempo de processamento demandado no algoritmo não otimizado e escrito em linguagem C, ou seja, o valor 150, apresentado na terceira linha, indica que o algoritmo otimizado escrito em linguagem Assembly apresenta desempenho 150 vezes mais rápido se comparado ao algoritmo não otimizado escrito em linguagem C.

Os resultados apresentados na Tabela V foram obtidos por meio de testes efetuados na plataforma de processamento Imote2 operando na frequência de 104 MHz.

Após aplicar a DCT bi-dimensional a um bloco de 8 x 8 pixels, efetua-se a quantização dos coeficientes resultantes pela utilização da matriz de quantização. Essa matriz de quantização atenua severamente as componentes de alta frequência, que em seguida são arredondadas para o inteiro

mais próximo, ou seja, para zero. Isto faz com que apareça uma sequência de zeros na matriz compactada, a qual pode ser descartada devido a sua redundância, reduzindo, portanto o tamanho final do bloco. A equação (3) apresenta a aplicação da matriz de quantização.

$$f(i, j) = \text{round} \left[\frac{c(i, j)}{q(i, j)} \right] \quad (3)$$

Sendo:

$f(i, j)$ o bloco final compactado

$c(i, j)$ a matriz transformada

$q(i, j)$ a matriz de quantização, determinada empiricamente

$\text{round}(x)$ a função que aproxima um número real por seu inteiro mais próximo

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. Logo, é possível calcular os valores Tabela VI com o tamanho das imagens compactadas e o novo tempo de transmissão.

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

PADRÃO	DCT bidimensional	
	TAMANHO (kbytes)	TRANSMISSÃO (segundos/quadro)
VGA	61.440	1.96
QVGA	15.360	0.49
QQVGA	3.840	0.12

Para recuperar as imagens compactadas, basta aplicar a transformada inversa de cossenos (IDCT) bi-dimensional. Este algoritmo é praticamente idêntico à DCT bi-dimensional, e todos os métodos de otimização discutidos podem ser aplicados de forma análoga. Segue a definição matemática da IDCT bi-dimensional:

$$m(i, j) = k(i) \times k(j) \times \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 c(x, y) \times \cos \left[\frac{(i+0.5)}{8} \times x \times \pi \right] \times \cos \left[\frac{(j+0.5)}{8} \times y \times \pi \right] \quad (4)$$

Sendo:

$m(i, j)$ a matriz recuperada

$$k(\alpha) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{8}}, & \text{se } \alpha = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{8}}, & \text{se } \alpha \neq 0 \end{cases}$$

$c(x, y)$ a matriz de entrada

A aplicação da DCT bi-dimensional seguida da matriz de quantização de coeficientes é um bom método de compactação de imagens individuais. Porém, existem diversas técnicas adicionais para compactação de vídeo que possibilitam atingir maiores taxas de compressão [13].

O método mais simples para compactação de vídeo é o método das diferenças entre quadros consecutivos. Nesse método espera-se que imagens capturadas sequencialmente em um intervalo de tempo muito pequeno sejam bastante semelhantes. Consequentemente, devido ao fato da DCT ser uma operação linear, a compactação dos quadros consecutivos irá produzir resultados muito próximos.

Logo, a simples subtração dos blocos compactados de um quadro com os blocos compactados do quadro imediatamente anterior irá novamente zerar diversos coeficientes, muitos dos quais podem ser descartados no momento do armazenamento do quadro do vídeo.

A taxa de compressão alcançada por meio da aplicação do método das diferenças irá depender das características do vídeo. Quanto menos movimento houver no vídeo capturado, maior será a compressão atingida por este método.

Estimando-se uma taxa adicional de compressão de quatro vezes sobre o resultado da DCT bi-dimensional, podem-se obter os valores apresentados na Tabela VII.

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

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

Algoritmos mais complexos podem facilmente obter taxas de compressão de 200 vezes, porém a plataforma Imote2 possui recursos de processamento limitados e a aplicação desses algoritmos complexos iria demandar muito processamento, prejudicando a taxa de transmissão de quadros do vídeo.

A partir desses resultados experimentais de laboratório, e considerando as necessidades dos eletricitistas, foram adotados dois modos de transmissão de imagens para o ViCEl. 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.

A efetivação das taxas de transmissão apresentadas na Tabela VII é fortemente dependente das características de movimento da imagem capturada, sendo na prática atingida apenas quando há pouca ou nenhuma variação entre as imagens capturadas. Desta forma, para a transmissão da imagem

com resolução VGA, adota-se o valor apresentado na Tabela VI como sendo mais realístico e cujo valor é de cerca de 2 segundos, valor esse que foi obtido também por meio dos experimentos de captura de imagens realizados.

IV. SISTEMA VICEL

Por meio dos resultados dos testes de laboratório, e considerando os requisitos funcionais do eletricitista, a arquitetura e a configuração final do VICel foram definidas e implementadas. Os seguintes itens apresentam a configuração final do VICel e os resultados dos testes realizados em campo.

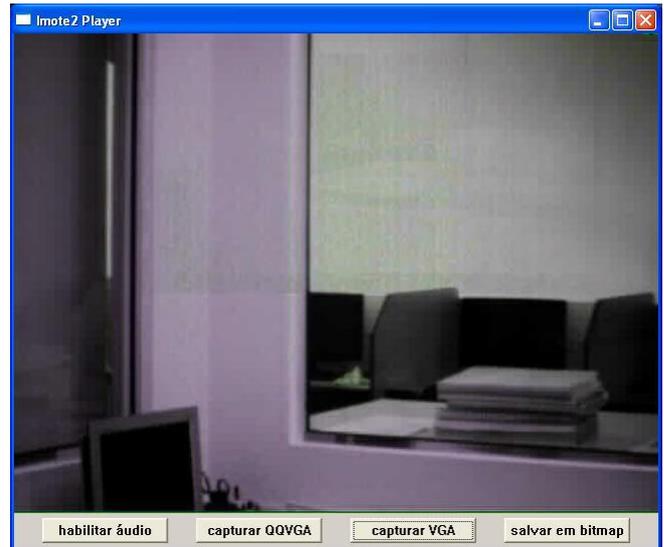
A. Arquitetura e Configuração Finais

A figura 8 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. O item (b) apresenta a aparência da interface de software, desenvolvida e implementada em um Notebook, para o eletricitista interagir com o VICel.

Na configuração de uso em campo pelo eletricitista, o dispositivo de captura, processamento e transmissão de voz e imagem é instalado no capacete conforme proposta apresentada na Figura 2 (a). Ainda, na configuração de uso em campo, o Notebook que executa a comunicação com o dispositivo de captura e a interface com o usuário é operado pelo eletricitista da equipe de apoio em solo, localizado próximo a área da atividade na linha de transmissão.



(a)



(b)

Figura 8 – (a) Dispositivo de Captura/Transmissão, (b) Aplicativo do Notebook.

Por meio da interface de software, o usuário (eletricista) pode habilitar e desabilitar os recursos para realizar a comunicação por voz, a recepção de vídeo em tempo-real com resolução QQVGA e a captura de imagem com resolução VGA. Além disso, as imagens capturadas podem ser armazenadas (salvar em bitmap) e transmitidas para qualquer localidade pelo uso do Servidor Web instalado no Notebook.

B. 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 9 apresenta o ambiente de teste no qual, (a) o módulo está em contato com a linha e (b) o módulo está a uma distância da linha.



(a)



(b)

Figura 9 – Ambiente de teste de campo: (a) Módulo em contato com a Linha. (b) Módulo próximo da Linha.

Durante os experimentos, a corrente elétrica nas linhas de alta tensão era da ordem de 400 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 VIII apresenta os resultados dos testes de campo.

Tabela VIII - Resultados dos testes de campo.

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

Conforme Tabela VIII, 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.

C. 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 10 apresenta o ambiente de teste no qual o sistema foi submetido, e a Tabela IX apresenta os resultados da transmissão de imagem.

Na Tabela IX, a indicação da Qualidade da Imagem, dada por meio de: NORMAL, NORMAL – pequenas interrupções e FALHAS, são referentes à percepção subjetiva do usuário

que opera o Notebook. A qualidade NORMAL indica que a imagem, transmitida em quadros com resolução QQVGA, é recebida sem qualquer interrupção ou falhas de blocos nos quadros. A qualidade NORMAL – pequenas interrupções indica que a imagem é recebida de forma visível e passível de identificação, mas apresenta perdas de blocos em quadros, limitadas e estimadas a 10%. A indicação FALHA representa que existem perdas de blocos superiores a 10%, que descaracterizam a imagem, ou que a recepção é completamente interrompida.

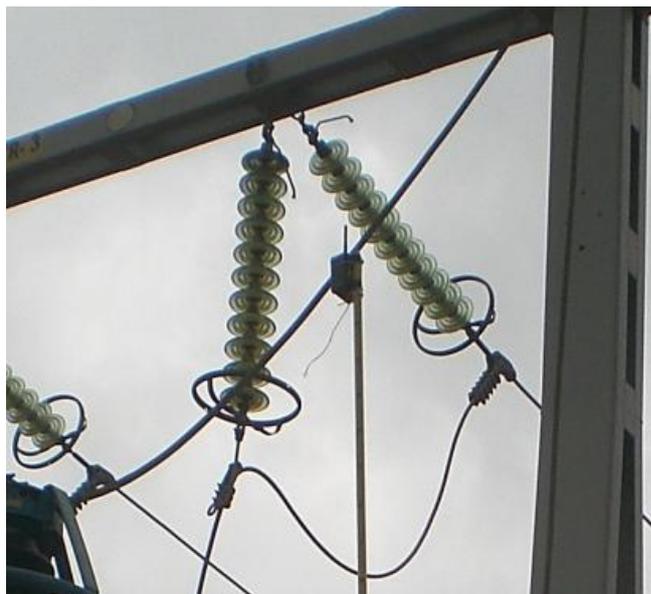


Figura 10 – Ambiente de teste de campo

Conforme resultados apresentados na Tabela IX, para distâncias elevadas, e 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.

Tabela IX – 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

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a proposta do sistema VICel 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 VICel, 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 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 VIcEI.

O protótipo foi testado em condições controladas na subestação da CTEEP e sem a instalação efetiva do dispositivo no capacete do electricista, uma vez que o projeto teve o seu foco no estudo da ideia por meio da prototipagem e sem se considerar os aspectos da industrialização.

O sistema proposto pode ser aplicado às mais diversas atividades do setor elétrico como uma ferramenta para o acompanhamento, monitoração e registro remoto das atividades, bem como um recurso para a monitoração desassistida do sistema elétrico, uma vez que, as tecnologias de captura de imagem e voz e de transmissão dessas informações em ambiente elétrico foram estudadas, avaliadas e confirmadas.

Para a efetiva industrialização do sistema proposto é necessário se realizar ainda um projeto de cabeça-de-série para a pesquisa e o desenvolvimento do processo de fabricação.

VI. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi concretizado com a valorosa ajuda da equipe de profissionais da CTEEP. Agradecemos em especial os profissionais da área de gerência de projetos e os lotados na subestação de Cabreúva.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Rubin, “The future of power line inspection.” *Electrical World T&D*, 2000.
- [2] J. C. V. Lemos, “Projetos de comunicação CTEEP.” Comunicação pessoal. São Paulo, 2007.
- [3] D. Harkins, C. Minter e B. Ulm, “Wireless Short Range Communication System.” US Patent 7,342,502 B2, 2008.
- [4] H. H. Lee e C. H. Yang, “Wireless Image capture Apparatus.” US Patent 2007/0158431 A1, 2007.
- [5] J. A. Gutierrez, M. Naeve, E. Callaway, M. Bourgeois, V. Mitter e B. Heile, “IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Power Low-Cost Wireless Personal Area Networks.” *IEEE Network*, 2001, p. 12-19.
- [6] B. Raymond, E. Callaway e J. Gutierrez, “IEEE 802.15.4 Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensor Networks.” *Inst. of Elect & Electronic*, 2003.
- [7] *ZigBee Architecture Overview*, ZigBee Alliance, San Jose, California, 2006.
- [8] *Crossbow Knowledge Base*. Crossbow Technology. Disponível em: <http://www.xbow.com/Support/>. Acesso em outubro de 2008.
- [9] W. C. Craig, “ZigBee: Wireless Control that Simply Works.” *ZMD America Inc*. 2004.
- [10] E. Cipollone 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.
- [11] B. K. Koh, P. Kong, “Performance Study on ZigBee-Based Wireless Personal Area Networks for Real-Time Health Monitoring.” *ETRI Journal*, vol.28, no.4, 2006, p.537-540.
- [12] Dong, J., e Ngan, K., “16x16 Integer Cosine Transform for HD Video Coding Dept. of Electronic Engineering” The Chinese University of Hong Kong - Hong Kong SAR, 2006
- [13] Wien, M., Variable Block-Size Transforms for H.264/AVC. July, 2003