



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GTL - 29  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

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

**ESTUDO E DEFINIÇÃO DE REDES LOCAIS SEM FIO PARA APLICAÇÃO EM PÁTIOS DE SUBESTAÇÕES  
E USINAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

<b>Marcos Guimarães Castello Branco *</b>	<b>Guilherme Preger</b>	<b>Carlos Roberto Soares Fernandes</b>
<b>FUNDAÇÃO CPqD</b>	<b>FURNAS DET</b>	<b>FUNDAÇÃO CPqD</b>

**RESUMO**

Este trabalho descreve os principais resultados de um projeto de pesquisa e desenvolvimento, realizado em cooperação entre Furnas – Centrais Elétricas SA e CPqD – Fundação Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações, que incorporou estudos e especificações de uma rede local sem fio adequada aos ambientes de pátios de subestações e usinas de energia elétrica. Os estudos abordaram, dentre outros, os aspectos de compatibilidade eletromagnética dos equipamentos, propagação, cobertura de sinal, desempenho e aplicações destas redes locais nos ambientes dos pátios e em áreas com maior ou menor número de obstáculos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Redes locais sem fio (WLAN), compatibilidade eletromagnética, emissões espúrias por chaves seccionadoras e disjuntores de alta tensão.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O surgimento de novas tecnologias de redes locais sem fio de alta velocidade associado à necessidade de novas facilidades para as funções de tele-monitoramento, manutenção e operação de equipamentos nos pátios de subestações e usinas de energia elétrica, motivaram às equipes de Furnas e do CPqD a estudarem a viabilidade técnica das redes locais sem fio nestes ambientes bastante hostis do ponto de vista eletromagnético e cercados de um grande número de obstáculos que suportam dispositivos tais como chaves, disjuntores e linhas de alta tensão. O estudo foi iniciado por um levantamento experimental do ambiente eletromagnético característico dos pátios destas subestações e usinas sujeitos a manobras de dispositivos de alta tensão. Tais experimentos se concentraram nas faixas de frequências não licenciadas de 900 MHz, 2.4 GHz e 5.8 GHz regidas pela Resolução de Radiação Restrita da Anatel [1], e encontram-se descritos na seção 2.0. Na etapa seguinte foram efetuadas medidas de desempenho e cobertura de sinal para um sistema de acesso sem fio operando neste tipo de pátio no padrão IEEE-802-11b [2] na faixa de 2.4 GHz. Através destes experimentos, foi possível caracterizar a cobertura destes sistemas em pátios com maior ou menor densidade de obstruções, conforme visto na seção 3.0. A seção 4.0 aborda os aspectos de capacidade da rede. A seção 5.0 contém a descrição de um projeto piloto elaborado para um pátio de 345 kV na subestação de Ibiúna / SP que buscou explorar os aspectos analisados ao longo do estudo. Os principais benefícios alcançados pelo estudo encontram-se descritos na seção 6.0. A seção 7.0 contém as conclusões do trabalho e os agradecimentos à equipe de apoio ao projeto. As referências bibliográficas encontram-se na seção 8.0.

**2.0 - AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO DOS PÁTIOS**

**2.1 Emissões radiadas por dispositivos em manobra**

\*Rodovia Campinas – Mogi-Mirim, km 118,5 - CEP 13 086 -902 - Campinas - SP - BRASIL  
Tel.: (19) 3705-6543 - Fax: (19) 3705-6630 - e-mail: castello@cpqd.com.br

O primeiro desafio do estudo consistiu da avaliação do ambiente eletromagnético característico dos pátios de subestações e usinas de alta tensão. Para tal, foram realizadas visitas e entrevistas com equipes de laboratório, engenharia, manutenção e operação de Furnas. Destas entrevistas foram extraídas informações relativas aos dispositivos que potencialmente poderiam causar as mais intensas emissões eletromagnéticas no espectro radioelétrico, podendo prejudicar o funcionamento das redes sem fio em estudo. Deste modo, os seguintes dispositivos foram selecionados como focos para experimentos de campo: a) Chaves seccionadoras, b) Disjuntores, c) Transformadores e d) Bancos de capacitores para comutação.

Paralelamente, foram tomadas algumas providências para a blindagem dos equipamentos de teste dos efeitos de induções e emissões espúrias produzidas por dispositivos de alta tensão durante manobras. Tais dispositivos foram alvos de medições de espectro radiado a diferentes distâncias conforme ilustra a figura 1.

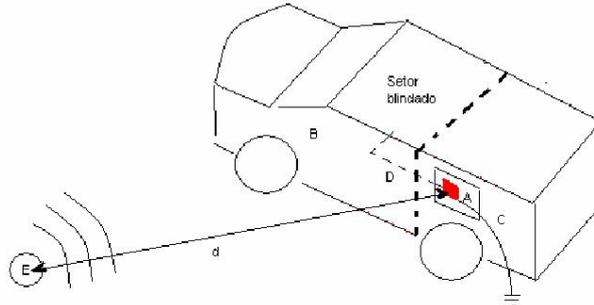


FIGURA 1. Esquema de medidas com laboratório móvel de emissões radiadas por dispositivos.

Os elementos da figura 1 são: A) Antena direcional para medição em cada uma das faixas de frequências de interesse; B) Laboratório móvel do CTE.O (Furnas); C) Cabo para aterramento de blindagem; D) Cabo coaxial de RF; E) Dispositivo sob teste no pátio.

Conforme ilustrado na figura 2, no setor blindado do laboratório móvel foram então instalados um analisador de espectro HP-8596E e um computador portátil dotado de um programa desenvolvido pelo CPQD para a captura automática da tela do analisador em pequenos intervalos de tempo pré-estabelecidos.



FIGURA 2. Analisador de espectro e PC para automação de medidas.

O analisador de espectro foi configurado de modo a manter na tela os níveis máximos de emissões espúrias medidas durante cada intervalo de tempo entre as capturas de dados. Durante os testes o laboratório móvel se posicionou a uma distância inferior a 50m de cada dispositivo em manobra monitorada. A figura 3 exemplifica uma das medições realizadas durante uma manobra programada de um disjuntor de 345 kV na subestação de Tijuco Preto / SP distando cerca de 35m da antena. Nesta figura se observam as emissões espúrias registradas na faixa de 900 MHz onde a emissão mais à direita é produzida pela base do telefone sem fio usado pela equipe de Furnas durante trabalhos de sincronismo de fase que motivaram as referidas manobras.

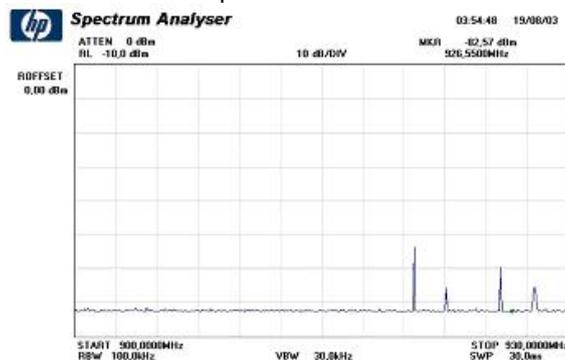


FIGURA 3. Espúrios em 900 MHz no fechamento de disjuntor de 345 kV.

A figura 4 ilustra, um exemplo de registro contendo as emissões detectadas na faixa de 2.4 GHz durante o fechamento de um disjuntor de 500kV situado a 12m da antena de monitoração. Nesta figura também pode ser vista, mais ao centro, a portadora de um sistema sem fio (WLAN – *Wireless Local Area Network*) ativo durante os testes. O ponto de acesso (AP) do sistema WLAN se encontrava instalado a uma distância de cerca de 100m da antena de monitoração e fora de direção de máximo ganho da mesma.

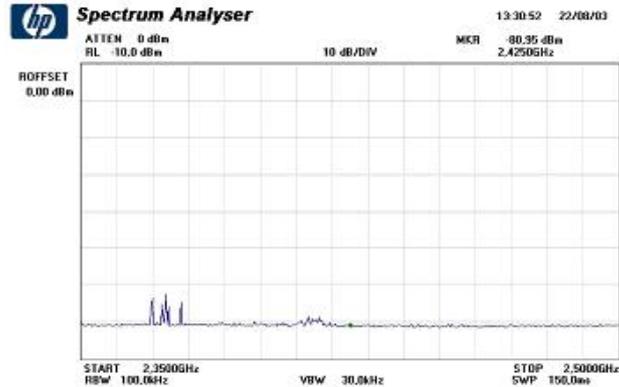


FIGURA 4. Espúrios em 2.4 GHz no fechamento de disjuntor de 500kV.

Os testes permitiram constatar a maior intensidade de emissões espúrias nas faixas de freqüências mais baixas tais como 900 MHz e a ausência de espúrios observados na faixa mais elevada de 5.8 GHz. As emissões em 2.4 GHz, portanto, apresentaram intensidades intermediárias. Em todas as faixas medidas, os níveis de espúrios mais elevados foram observados durante os fechamentos de chaves seccionadoras, conforme ilustrado na figura 5 onde a chave se encontrava a cerca de 12m da antena. Não foram detectadas emissões produzidas por bancos de capacitores ou por transformadores. A figura 6 ilustra a topologia dos testes feitos na SE de Tijuco Preto / SP. A figura 7 ilustra os valores teóricos da atenuação em espaço livre nas três diferentes faixas medidas (900 MHz, 2.4 GHz e 5.8GHz). Estes valores reforçam a adequação da faixa de 2.4 GHz como solução intermediária para a rede local sem fio, com raios de cobertura entre 100 e 250m por ponto de acesso, mesmo considerando-se a existência de espúrios causados por manobras, porém em níveis menores que os observados em 900 MHz.

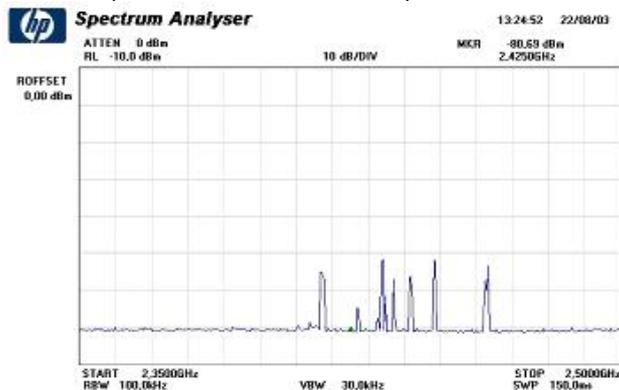


FIGURA 5. Espúrios em 2.4 GHz no fechamento de chave de 500kV.

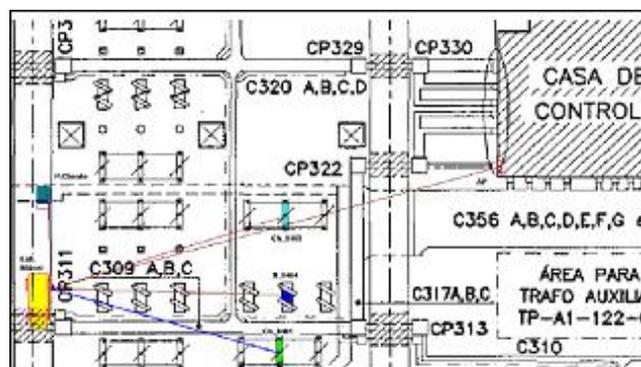


FIGURA 6. Topologia dos testes na SE-Tijuco Preto.

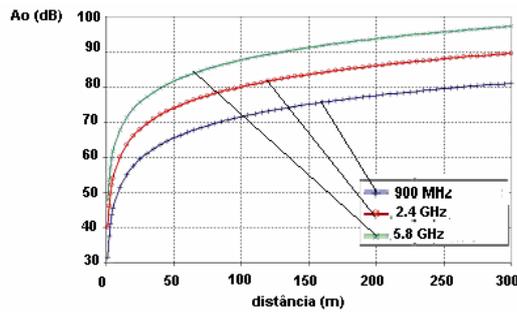


FIGURA 7. Atenuação de espaço livre (teórica) nas faixas de teste.

A tabela 1 relaciona níveis máximos observados de emissão radiada em 2.4 GHz pelos dispositivos em manobra. Visando a comparação, os níveis medidos no analisador de espectro (potência recebida) foram também convertidos em potência equivalente isotropicamente radiada (EIRP).

TABELA 1  
NÍVEIS MÁXIMOS DE EMISSÃO EM 2.4 GHz DURANTE MANOBRAS

Manobra	Potência recebida	Distância entre o dispositivo e a antena de monitoração	Largura de banda da maior raia espúria	EIRP estimada da maior raia espúria
Fechamento de chave 345 kV em Tijuco	-73 dBm	40m	5 MHz	-7.8 dBm
Fechamento de chave 500 kV em Ibiúna	-62 dBm	12m	2 MHz	-7.7 dBm
Fechamento de disjuntor 500 kV em Ibiúna	-73 dBm	12m	1 MHz	-18.3 dBm
Fechamento de disjuntor 500 kV em Ibiúna	-71 dBm	12m	1 MHz	-16.3 dBm
Fechamento de disjuntor 500 kV em Ibiúna	-70 dBm	12m	1 MHz	-15.3 dBm
Fechamento de disjuntor 500 kV em Ibiúna	-71 dBm	12m	1 MHz	-16.3 dBm

Importante observar que, para cada tipo de dispositivo, os níveis máximos de espúrios registrados apresentaram valores bastante próximos entre si no conjunto de diferentes manobras efetuadas, indicando boa consistência dos resultados. Estes resultados apontam para uma EIRP produzida no fechamento das chaves seccionadoras superior em cerca de 8 dB àquela produzida no fechamento dos disjuntores.

Considerando-se que os sistemas WLAN comerciais operam com EIRP nominais máximas de +36 dBm [2] e o sistema instalado durante os testes operava com uma EIRP de + 15 dBm, foi possível estimar os valores de C/I (relação portadora sobre interferência) obtidas na prática e as distâncias de proteção que estes sistemas devem operar para evitar interferências destrutivas pelos dispositivos em manobra.

## 2.2 Distância de proteção

Uma vez que as emissões espúrias produzidas na faixa de 2.4 GHz pelas manobras de chaves seccionadoras e disjuntores apresentaram larguras de banda máxima de 5MHz, e considerando-se que os canais dos sistemas WLAN no padrão IEEE 802-11b ocupam uma banda de cerca de 22 MHz, as emissões produzidas por estas manobras foram analisadas como interferências de faixa estreita (ocupam apenas parte do canal de comunicação do sistema sem fio). Com base nesta premissa, foi reproduzido em laboratório, através de um gerador de RF modulado, um experimento visando avaliar a influência do nível relativo de uma interferência (I) produzida por dispositivo em manobra quando gerada no centro da faixa do canal, com potência de sinal recebido (C), de um sistema WLAN em operação no pátio. Este ensaio visou identificar um valor mínimo aceitável de C/I para que o sistema WLAN mantenha a comunicação entre o cliente e o AP sem perda de pacotes de informação.

Para este experimento foi considerado um patamar de ruído de -92 dBm, observado durante os testes de campo. O nível de sinal recebido pelo ponto cliente foi estabelecido em -66,6dBm, pois corresponde ao nível teórico recebido pelo cliente com uma antena de 2 dBi e produzido por um AP radiando uma EIRP de 15 dBm a uma distancia de 150m em espaço livre. Estes níveis conduzem a uma relação sinal / ruído de 25,4dB, que garante a máxima taxa de dados quando na ausência de interferência.

Nessas condições, o sistema WLAN em teste se comportou sem nenhuma perda de pacotes enquanto o nível de interferência não ultrapassou o valor de -73,6dBm, significando uma relação de C/I mínima aceitável de 7 dB.

A partir da equação da perda de espaço livre e da relação entre EIRP transmitida e potência recebida a uma certa distância do emissor e do ganho da antena receptora, é possível se obter a expressão contida na equação 1,

$$d(m) = \frac{0.3\sqrt{10^{(EIRP_{tx} - P_{rx} + G_{rx})/10}}}{4\pi f (GHz)} \quad (1)$$

onde  $d$  = distância (m),  $f$  (GHz) = frequência em GHz,  $EIRP_{tx}$  = EIRP do dispositivo em manobra (dBm),  $G_{rx}$  = ganho da antena receptora do sistema interferido (dBi) e  $P_{rx}$  = potência da interferência recebida (dBm) no sistema quando situado a uma distância  $d$  do dispositivo em manobra.

A Figura 8 ilustra a distância de proteção de espaço livre requerida para diferentes níveis de interferência produzidos numa manobra de chave ( $EIRP \leq -7.7$  dBm) ou disjuntor ( $EIRP \leq -15.3$  dBm).

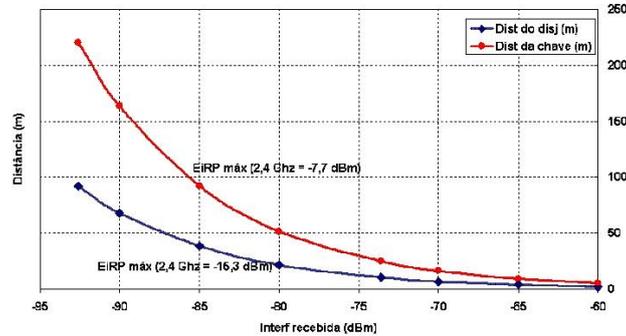


FIGURA 9. Distâncias de proteção em espaço livre em 2.4 GHz

Particularmente, visando assegurar a interferência abaixo do limite de  $-73.6$  dBm ( $C/I \geq 7$  dB) as distâncias de proteção deveriam ser superiores a  $24,7$ m e  $10,3$ m, respectivamente, para uma chave seccionadora e um disjuntor, em condições de espaço livre.

### 3.0 - COBERTURA DE SINAL NOS PÁTIOS

Visando avaliar os aspectos de cobertura de sinal nos pátios das subestações e usinas de Furnas, foram realizados testes de desempenho e cobertura para um sistema sem fio do tipo WLAN 2.4 GHz no pátio (ambiente externo) de uma subestação. O ponto servidor (ponto de acesso – AP) foi instalado em local elevado no pátio da subestação empregando-se a antena interna do próprio cartão PCMCIA / WLAN (15dBm de EIRP) e posto em operação sem ocorrência de manobras.

O Ponto cliente (computador portátil) foi transportado a pé em diferentes distâncias do ponto de acesso e a uma altura média de 1m do solo no pátio da subestação, equipado com receptor de GPS (Sistema de Posicionamento por Satélite) para sua localização geográfica. No ambiente de medida havia áreas com maior ou menor número de obstáculos (Pilares de concreto e dispositivos de subestação) e diversas fontes emissoras de ruído na subestação situadas ao longo do percurso de comunicação entre os pontos cliente e AP.

O ponto cliente coletou em todo o percurso os níveis de sinais recebidos do AP. Nos pontos onde o nível de sinal era muito baixo o sistema registrava somente a perda de conexão entre os dois pontos (AP / Cliente).

A figura 9 ilustra uma das áreas na qual foi realizado teste de cobertura. Observam-se as inúmeras obstruções no percurso, provocando eventualmente perda total de comunicação pela falta de visada para o AP. Esta ocorrência de perda pode ser constatada na figura 10 que apresenta os valores medidos de C/N (Sinal / ruído) e Taxa de transmissão de dados líquida (Mbps) obtida no acesso durante os testes de cobertura realizados em Ibiúna.



FIGURA 9 – Área de teste de cobertura obstruída (Subestação de Ibiúna).

As Figuras 11 e 12 contêm a atenuação de sinal verificada nos dois tipos de ambientes distintos da subestação (com e sem obstruções) e as compara à condição ideal de atenuação em espaço livre. A comparação entre estas duas figuras permite verificar a influência dos obstáculos ao longo do percurso obstruído. São também observados pontos de interrupção de comunicação ( $C/N = 0$  dB) durante situações de obstrução total de visada.

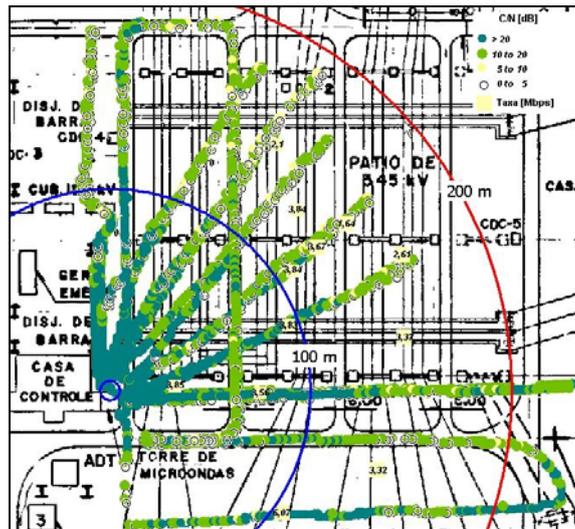


FIGURA 10 – Mapa de cobertura (área parcial da Subestação de Ibiúna)

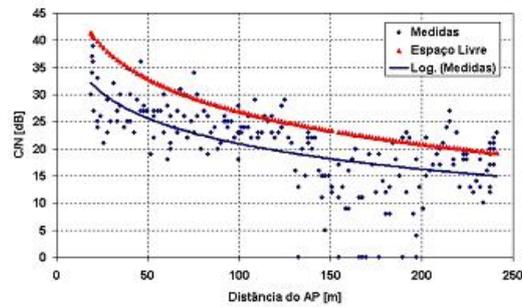


FIGURA 11 – Relação C/N em raia de percurso desobstruída (Ibiúna)

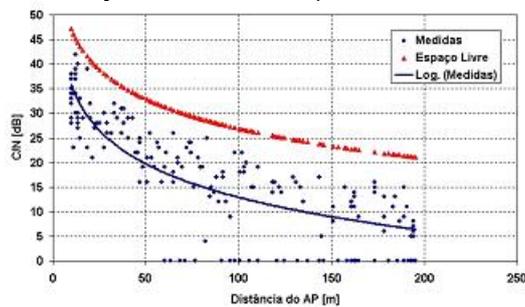


FIGURA 12– Relação C/N em raia de percurso obstruída (Ibiúna)

A Figura 13 contém os resultados de um teste realizado em ambiente interno (*indoor*) de forma a estimar a correlação entre a taxa líquida (Mbps) obtida num sistema WLAN 2.4 GHz (IEEE 802.11b) e sua relação sinal / ruído (C/N ou RSR) na conexão. Este resultado, associado às figuras 12 e 13, servem como base para se estimar as distâncias de cobertura possíveis num pátio de uma subestação para este tipo de sistema.

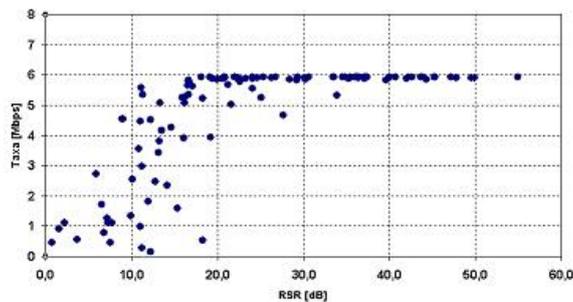


FIGURA 13– Medidas de taxa líquida de acesso para diferentes relações C/N (RSR) para um sistema WLAN indoor.

#### 4.0 - ASPECTOS DE CAPACIDADE DA REDE

Uma análise de capacidade da rede sem fio foi também efetuada com base nas características e premissas assumidas ao longo do projeto. A figura 14 resume esta análise e aponta para uma capacidade adequada do sistema para atendimento ao conjunto de aplicações previstas pela equipe de Furnas. Para esta análise foram assumidas algumas premissas para um cenário, considerado médio, de utilização da rede. As premissas assumidas incluem: a) Fator de atividade de 25% por cliente da rede; b) Operação half-duplex; c) Taxa máxima líquida por AP de 6 Mbps (IEEE 812-11b); d) Não consideradas perdas por colisões de pacotes de informação transmitida na rede; e) Não considerado overhead de bits de segurança nos dados trafegados.

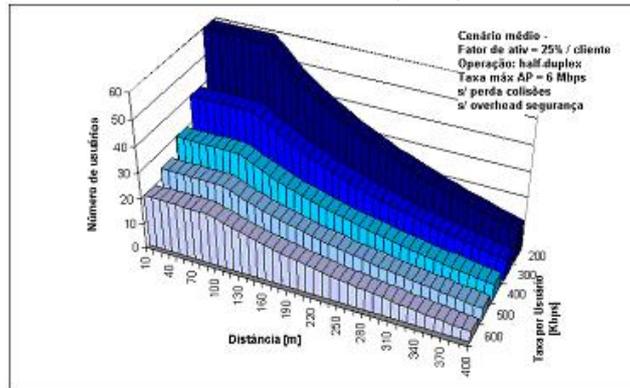


FIGURA 14 – Estimativa do número máximo de clientes por AP em área típica de pátio com obstruções.

#### 5.0 - DEFINIÇÃO DE PROJETO PILOTO

Nesta seção serão descritos os principais resultados da definição do projeto piloto de uma rede local sem fio elaborado para implementação em área parcial do pátio da subestação de Ibiúna / SP.

O projeto em questão foi elaborado de forma a permitir a avaliação dos diferentes recursos e facilidades analisadas durante as etapas de estudo. Para tanto, os requisitos adotados para o projeto piloto foram:

- Raio de cobertura > 150m com taxa mínima líquida total de 1 Mbps (baseado nos testes de campo);
- Ambientes híbridos com e sem obstruções (por dispositivos da SE);
- Pátios típicos das SEs;
- Disponibilidade e proximidade de ponto de rede;
- 1 ou 2 AP próximos de ponto de rede (óptico);
- Possibilidade de uso de técnicas de proteção de RF (antenas externas direcionais e controle de potência) impondo menor risco de invasões;
- Padrão IEEE 802-11b (11 Mbps brutos) permitindo evolução para 11g (54 Mbps brutos);
- Clientes c/ cartão PCMCIA (notebooks, palmtops, sensores, câmeras, etc..);
- Atendimento à Res. 305 (radiação restrita) da Anatel;

Com base nos requisitos acima, foi elaborado um projeto que visa cobrir duas áreas distintas, mas adjacentes, de um pátio de 345kV da SE-Ibiúna. A figura 15 ilustra as áreas de cobertura previstas para cada um dos APs utilizados, já se estimando os efeitos das obstruções de prédios existentes no local.

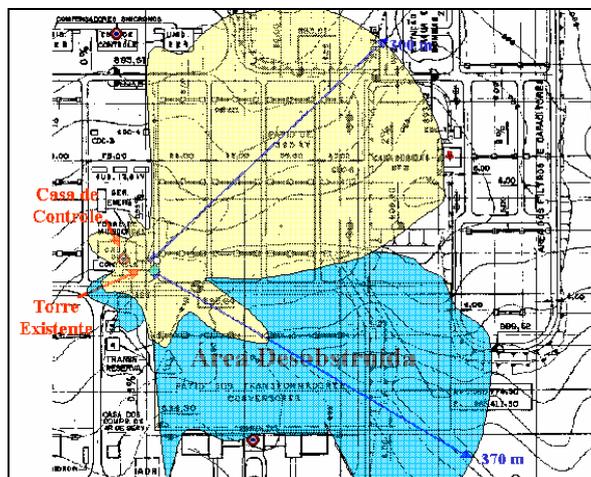


FIGURA 15 – Estimativa de áreas de cobertura no projeto piloto.

As coberturas da figura 15 foram estimadas visando assegurar taxa mínima líquida total de 1 Mbps na borda das áreas iluminadas por cada AP. Na área desobstruída os níveis de potência do AP foram reduzidos para manter o raio médio de cobertura e impedir o transbordamento da cobertura para áreas externas ao projeto, aumentando assim a segurança da rede.

## 6.0 - BENEFÍCIOS ALCANÇADOS

Os principais benefícios alcançados por este trabalho de P&D para a empresa Furnas foram identificados e relacionados a seguir:

- A identificação e caracterização do ambiente eletromagnético das subestações típicas de Furnas permitiram um melhor conhecimento dos efeitos deste ambiente nos equipamentos e no desempenho de sistemas sem fio nele presentes existentes ou planejados. Destas medições foi possível a identificação das faixas de frequência mais adequadas e das distâncias de proteção dos equipamentos de acesso em relação aos dispositivos elétricos presentes nas subestações e maiores emissores de radiação eletromagnética quando manobrados;
- Foram efetuados testes e avaliações experimentais sobre dispositivos sem fio comerciais, nos ambientes dos pátios das subestações, permitindo maior segurança e garantia de sucesso nas futuras implantações destas novas redes sem fio;
- Foram ensaiadas reais condições de operação destes sistemas nos pátios, com e sem manobras de dispositivos elétricos da SE, permitindo prever as condições de operação futuras, tendo sido avaliados aspectos de cobertura, atenuação e efeitos de obstruções causadas por obstáculos característicos das áreas de pátio;
- Foram identificadas importantes aplicações destes novos sistemas sem fio, na maior parte das rotinas de manutenção e operação das equipes de Furnas, principalmente, nos pátios. Tais aplicações vão desde sensores de tele-monitoramento sem fio até terminais de dados portáteis;
- A definição do projeto piloto de uma rede, realizada para uma área de pátio da SE - Ibiúna, permitirá a avaliação real em uma primeira implantação e, ao mesmo tempo, uma base de referência para futuros projetos nesta ou em outras subestações ou usinas de Furnas. Além disso, possibilitará ainda expansão de capacidade por permitir evolução para novos padrões tecnológicos do IEEE (ex. 802-11g) que empregam as mesmas faixas de frequência, porém com maiores taxas de transmissão e acesso aos clientes da rede;

## 7.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados de um projeto de pesquisa e desenvolvimento conduzido em parceria entre CPqD e Furnas que buscou estudar soluções de redes locais sem fio aplicáveis a pátios de subestações e usinas de energia elétrica. O estudo, que englobou várias etapas experimentais e teóricas, permitiu alcançar uma série de resultados importantes e benefícios para a empresa Furnas que deverá prosseguir nas etapas de implantação e testes de aplicações de dados, voz e imagem neste tipo de rede, explorando os recursos e facilidades da mesma.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe do laboratório do CTE.O (Passos / MG – Furnas) pelo apoio técnico durante a realização dos experimentos. Agradecimentos também aos colegas do CPqD Nelson Mincov, Leonardo Cruz Melo, Aldionso Marques Machado, Sandra Maria C. Tomé, Roberto Petry e Ivo Ribeiro pelo importante apoio na execução das atividades deste projeto. Agradecimentos especiais para toda a equipe de engenharia e operações de Furnas que tanto apoiou com importantes realimentações em todas as fases do projeto.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANATEL – Resolução 305 (26 de julho de 2002) – Regulamento sobre equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita.
- (2) IEEE - Norma IEEE 802-11b – Part 11 – Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band.