

JOSÉ FELIPE MANOEL VON TROMPOWSKY

**ESTUDO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA
GERADA POR REDES PLC (POWER LINE
COMMUNICATION) NO INTERIOR DE EDIFICAÇÕES**

FLORIANÓPOLIS

2005



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

ESTUDO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA
GERADA POR REDES PLC (POWER LINE
COMMUNICATION) NO INTERIOR DE EDIFICAÇÕES

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

JOSÉ FELIPE MANOEL VON TROMPOWSKY

FLORIANÓPOLIS, Dezembro de 2005

ESTUDO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA GERADA POR REDES PLC (POWER LINE COMMUNICATION) NO INTERIOR DE EDIFICAÇÕES

José Felipe Manoel Von Trompowsky

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de **Mestre em Engenharia Elétrica**, Área de Concentração em Compatibilidade Eletromagnética, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Orientador

Prof. Alexandre Trofino Neto, Dr.
Coordenador do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Presidente

Prof. Carlos Aurélio Faria da Rocha , D.Sc.

Prof. Luiz Henrique Alves de Medeiros, Dr.

Prof. Luis Carlos Martinhago Schlichting, Dr.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em engenharia Elétrica

ESTUDO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA GERADA POR REDES PLC (POWER LINE COMMUNICATION) NO INTERIOR DE EDIFICAÇÕES

José Felipe Manoel Von Trompowsky

Dezembro / 2005

Orientador: Prof. Adroaldo Raizer, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras-chaves: Power Line Communications, Interferência Eletromagnética (EMI), Compatibilidade Eletromagnética (EMC).

Número de Páginas: 90.

RESUMO: Os níveis de Interferência Eletromagnética (EMI) gerada por uma rede PLC, devido ao número limitado de testes já efetuados, ainda são pouco conhecidos no Brasil. Basicamente, o tema pode ser dividido em duas partes: A interferência provocada pela rede PLC em outros sistemas que compartilham o mesmo ambiente operacional e aquela provocada por outros sistemas licenciados causando distúrbios na operação de um sistema PLC. O primeiro caso se relaciona diretamente ao nível dos sinais interferentes que o organismo de regulação determinará como limite para operação dos sistemas PLC e o segundo caso se refere à redução do espectro disponível para a PLC causado pela interferência gerada por outros sistemas, implicando em taxas de transmissão muito baixas, e inviabilizando assim sua implantação. Considerando o provável público-alvo dessa aplicação, a implantação da PLC se viabilizará em locais de grande concentração urbana onde já existem outros sistemas operando na mesma faixa de frequência. Portanto, o prévio conhecimento do comportamento de uma rede PLC se revela de extrema importância para o sucesso da tecnologia. Diante disto, o objetivo principal deste trabalho é fornecer subsídios técnicos que comprovem a aplicabilidade da PLC em áreas internas a edificações, também conhecida como aplicações indoor da tecnologia Power Line Communication.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for degree of Master in Electrical Engineering

STUDY OF THE ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE GENERATED BY NETS PLC (POWER LINE COMMUNICATION) IN THE INTERIOR OF CONSTRUCTIONS

José Felipe Manoel Von Trompowsky

December / 2005

Advisor: Prof. Adroaldo Raizer, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices

Keywords: Power Line Communications, Electromagnetic Interference (EMI), Electromagnetic Compatibility (EMC).

Number of Pages: 90.

ABSTRACT: The levels of Electromagnetic Interference (EMI) generated by a PLC net, because to the limited number of effected tests already, still little are known in Brazil. Basically, the subject can be divided in two parts: The interference provoked for the PLC net in other systems that share the same operational environment and that one provoked by other permitted systems causing interferences in the operation of a system PLC. The first case if relates directly to the level of the interferences signals that the regulation organism will determine as limit for operation of systems PLC and as in case that it is mentioned to the reduction of the available specter for the PLC caused for the interference generated for other systems, causing in very low taxes of transmission, and thus making impracticable its implantation. Considering the probable public-target of this application, the implantation of the PLC will be made possible in places of great urban concentration where already other systems exist operating in the same band of frequency. Therefore, the previous knowledge of the behavior of a PLC net if discloses of extreme importance for the success of the technology. Ahead of this, the main objective of this work is to supply to subsidies technician that prove the applicability of the PLC in internal areas the building, also known as indoor applications of the technology Power Line Communication.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A comunicação digital utilizando linhas de potência como meio de transmissão de dados é uma idéia antiga que data aproximadamente dos anos de 1920. Por algumas décadas, as onipresentes redes de distribuição de energia e linhas de transmissão têm sido muito usadas para transmissão de dados em baixa velocidade [4].

Muitos diferentes padrões ou sistemas proprietários vem sendo utilizados para controle, transmissão e gerenciamento de sinais, como por exemplo: leitores remotos de medidores de energia usados por companhias distribuidoras de energia ou ainda, sistemas portadores para tele-proteção adotados por empresas transmissoras de energia.

Dentre estes, são bastante conhecidos e utilizados pelas empresas do setor de energia os Sistemas Power Line Carrier (Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão - OPLAT) de acoplamento capacitivo às linhas de alta tensão.

Entretanto, o uso de linhas de potência para comunicação foi largamente disseminado como sendo uma fonte muito grande de ruídos e interferências, quase que impraticável para que pudesse ser utilizado como canal de transmissão de dados em alta velocidade [3].

Em 1991, Dr. Paul Brown da Norweb Communications iniciou testes com comunicação digital de alta velocidade utilizando linhas de energia. Entre 1995 e 1997 ficou demonstrado que era possível resolver os problemas de ruído e interferências e que a transmissão de dados de alta velocidade poderia ser viável. Em março de 1998 a Nortel e a Norweb criaram uma nova empresa intitulada de NOR.WEB DPL com o propósito de desenvolver e comercializar Digital Power Line (DPL) [3].

Ao mesmo tempo, grandes avanços em pesquisas nos campos da modulação, codificação e processamentos digitais de sinais viabilizaram eficientes projetos de sistemas de comunicações em banda larga sobre linhas de potência.

A exploração da rede de distribuição de energia de baixa tensão (níveis de tensão abaixo de 1kV) como meio de acesso a Internet de Banda Larga por uma companhia de

distribuição de energia, tem sido proposta como uma forte alternativa às outras soluções de última milha, clássicas, como ADSL, cabo coaxial, ou mesmo sistemas sem fio de acesso a Internet.

No Brasil, uma das grandes barreiras que ainda existem, dificultando a ampla utilização do acesso à Internet, é sem nenhuma sombra de dúvida a ausência de um meio de transmissão de dados operacional e com baixos custos de instalação [3].

Analisando cronologicamente o avanço do acesso à Internet, é possível observar que, até recentemente, a maioria dos esforços públicos e privados estiveram concentrados na implantação de uma infra-estrutura de comunicação para tráfego de informações por meio de grandes vias de dados, também conhecidas de Troncos Principal de Dados (Backbones) [31].

O passo seguinte foi focado na disponibilidade de um modo simples e prático do acesso individual dos usuários domésticos e empresariais ao “Backbone” principal, a chamada “última milha” (Last Mile). Este acesso vem sendo estabelecido por meios físicos existentes, como os da rede telefônica e TV à cabo, que em sua grande maioria encontram-se restritos às zonas urbanas e fornecem um serviço relativamente caro, excluindo assim usuários de regiões afastadas ou de baixo poder aquisitivo.

Com o desenvolvimento da tecnologia Power Line Communication (PLC), também conhecida como Broadband over Power Lines (BPL), surge mais uma opção de conectividade dentro do universo da transmissão de dados, voz e imagem, além dos serviços de comunicação via satélite, sem fio, cabo coaxial ou fibra óptica hoje existente.

Porém, com o passar dos anos, devido ao crescente movimento de globalização da informação, a integração dos meios de comunicação se tornará inevitável e a necessidade de uma nova ferramenta que ofereça aos usuários finais altas velocidades na transmissão dos dados, poderá fazer com que a PLC possa acabar se tornando a alternativa mais competitiva, barata e viável. Haja vista que a velocidade de transmissão numa rede PLC, dependendo da quantidade de usuários conectados simultaneamente, pode alcançar níveis superiores à tecnologia ADSL.

Para vencer estes obstáculos algumas empresas distribuidoras de energia elétrica, que estão dispostas a utilizar suas próprias redes de distribuição para fornecer, além da energia elétrica, serviço de transmissão de dados em alta velocidade para usuários residenciais, estão avaliando em conjunto com a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) a normalização e implantação da PLC no Brasil [3].

A expectativa é que a PLC possa vir a se tornar realidade e o acesso à Internet via rede elétrica apareça como mais uma opção para os usuários brasileiros num horizonte de aproximadamente dois anos.

A PLC já é utilizada em caráter experimental em diversos países. No Brasil, empresas distribuidoras de energia elétrica como Eletropaulo, Cemig, Light, Excelsa e Copel encontram-se realizando testes com seus sistemas a fim de verificar a possibilidade de se implantar tal tecnologia à realidade do Sistema Elétrico Brasileiro [3].

Um dos pilares de apoio desta nova tecnologia encontra-se na disseminação do acesso à Internet não apenas por usuários nos diversos centros urbanos, mas também pelos mais afastados conglomerados populacionais, pois com o uso da PLC a exclusão tecnológica, teoricamente, deixaria de existir permitindo assim que o fluxo de informações e a cultura eletrônica possam ser de uso integral na sociedade moderna.

Existe também um interesse crescente na reutilização de toda a infra-estrutura elétrica de uma edificação para transformá-la em uma rede local de dados (LAN) com taxa transmissão em alta velocidade, através da simples utilização da tecnologia PLC.

A principal vantagem desta concepção é a possibilidade de se ter a Internet de banda larga à disposição 24 horas ao dia em qualquer ponto de alimentação de eletricidade em uma residência, escritório, hotel ou mesmo condomínio fechado, onde todas as tomadas podem também ser consideradas como pontos de acesso a Internet [29].

Outro importante campo de pesquisa está relacionado ao uso da rede de distribuição de energia em média tensão (níveis de tensão entre 1kV e 36kV) para propósitos de comunicação. A idéia é que ela possa ser usada como uma via de dados caso a rede tronco (Backbone) convencional esteja fora de operação.

Isto se justifica pelo fato das linhas de média tensão possuírem características próprias para uso como meio de comunicação. Elas apresentam, tipicamente, menos ruídos e menos variação de carga em sua topologia sendo assim um ambiente menos hostil para a comunicação, o que permite que maiores distâncias sejam alcançadas pelos dados transmitidos [2].

O problema com as linhas de média tensão é a necessidade de acopladores especiais para injeção dos sinais na linha de modo que estes garantam a integridade e o isolamento do equipamento responsável pelo controle e gerenciamento da comunicação.

Os equipamentos utilizados viabilizam ao assinante uma conexão para transmissão de dados do tipo 10Base T (comunicação via cabo de par trançado, padrão Ethernet, operando em 10Mbps), ao qual podem ser conectados vários serviços de telecomunicações em banda larga, tais como telefonia sobre IP (transmissão de voz utilizando Internet Protocol), fax, microcomputadores em rede, Internet, vídeo, medição de consumo de energia, automação residencial, TV Digital entre outros serviços. A provisão de todos estes serviços em uma rede PLC é totalmente baseada no protocolo TCP/IP [33] [38] [32].

Todas essas possibilidades de serviços de transmissão de dados em alta velocidade, utilizando uma estrutura de rede já existente e somente necessitando a instalação dos equipamentos responsáveis pela implantação da PLC, faz com que essa tecnologia torne-se uma solução extremamente competitiva, não somente em termos técnicos como também econômicos, às demais existentes no mercado de comunicações [3].

A faixa de frequências utilizada pelos produtos atualmente encontrados no mercado brasileiro foi determinada por estudos, considerando características existentes na Europa e Estados Unidos [9] [28].

Aspectos peculiares das instalações brasileiras, tais como, projeto e instalação da fiação interna das residências (diagramas unifilares), utilização de dispositivos de proteção, inexistência de filtros na maioria dos eletrodomésticos comercializados, cabos nus em redes de distribuição aéreas (grande maioria das redes das concessionárias), devem ser considerados na realização do projeto de implementação de um sistema PLC no Brasil [22] [23] [25].

A atenuação do sinal ao longo da linha de distribuição, que varia de acordo com sua topologia, variação de cargas, quantidade e tipo de derivações e até estado de conservação de suas conexões, é um dos mais importantes fatores que afetam o desempenho de sistemas PLC, limitando assim seu alcance.

Nesse sentido, esforços de caracterização das redes elétricas devem ser realizados pelas empresas que pretendem explorar a tecnologia. A execução de testes de campo que visem a confirmação das características teóricas das redes constitui importante passo para a aplicação comercial da tecnologia PLC.

O efeito das interferências eletromagnéticas é outra grande questão importante quando relacionada ao desempenho da PLC.

Basicamente, o tema pode ser dividido em duas partes: a interferência provocada em outros sistemas licenciados que compartilham o espectro com o sistema PLC e aquela provocada por outros usuários licenciados no sistema PLC em operação.

O primeiro caso se relaciona diretamente ao nível de potência que o organismo de regulação irá determinar como limite de operação para sistemas PLC; embora já venha se discutindo esse tema no Brasil há algum tempo, não temos nenhuma indicação de qual será a postura adotada por esse órgão.

Como informação adicional, nos EUA equipamentos e sistemas PLC devem se submeter aos limites de emissão estabelecidos pela Norma FCC - Parte 15 [8]. Na Europa se aplica a Regulamentação estabelecida na Norma CISPR 22 [1], que está sendo revista para a inclusão de equipamentos PLC.

Já para o segundo caso fica a preocupação com relação à redução do espectro disponível para o sistema causada pela interferência provocada por outros licenciados, implicando em taxas de transmissão muito baixas e inviabilizando sua aplicação.

Considerando que, devido aos custos envolvidos e ao provável público-alvo dessa aplicação, as instalações desse sistema se viabilizarão em locais de grande concentração urbana onde já existem outros sinais nessa faixa, o prévio conhecimento dos níveis de sinal interferente nessas regiões se revela de extrema importância para o sucesso do empreendimento.

É importante ressaltar que na faixa espectral utilizada pelos equipamentos que vêm sendo oferecidos ao mercado brasileiro, já se encontram licenciados os seguintes serviços: móvel marítimo, móvel aeronáutico, radioamador, radiodifusão [3].

Dentro deste contexto, este trabalho é fruto de uma demanda, cada vez maior, de dados experimentais sobre o estudo da Interferência Eletromagnética (Electromagnetic Interference - EMI) gerada pela aplicação da tecnologia Power Line Communication ao Sistema Elétrico Brasileiro.

Em síntese, o foco principal deste trabalho é o levantamento de dados que, futuramente, venham a auxiliar na análise do impacto, em termos de emissões de energia eletromagnética, desta nova tecnologia ao meio ambiente e aos demais sistemas de comunicação devido a sua aplicação interna a edificações.

Para atingir esta meta, inicialmente foi realizado um levantamento bibliográfico do estado da arte da tecnologia PLC. Em uma etapa posterior, foi realizado um estudo sobre a Regulamentação e Normalização do uso desta tecnologia como sistema de comunicação. Na seqüência foi realizado um estudo das normas internacionais utilizadas pela ANATEL – Agência Nacional de telecomunicações, referentes aos limites e métodos de medidas para distúrbios eletromagnéticos, para homologação dos equipamentos e regulamentação do serviço.

De posse destes dados e informações foram elaboradas, e executadas, medidas para a avaliação da eficiência da PLC nas redes embutidas, residenciais (aplicações indoor), de distribuição de energia.

Com o propósito de apresentar tal trabalho, está sendo proposto um roteiro de leitura e exposição formado por capítulos, permitindo assim um melhor entendimento do assunto, bem como, uma análise mais aprofundada de cada tópico abordado.

O Capítulo 2 apresenta aspectos relacionados a PLC (Power Line Communication), onde conceitos e a filosofia de funcionamento desta tecnologia são introduzidos de modo a dar embasamento para um melhor entendimento da matéria.

O Capítulo 3 apresenta uma introdução da Compatibilidade Eletromagnética (EMC – Electromagnetic Compatibility) abordando, especialmente, aspectos que venham a auxiliar no entendimento e na análise do impacto causado pela emissão de interferências

eletromagnéticas (EMI) provenientes de uma fonte, que no caso desta dissertação é a rede PLC, ao ambiente operacional que a circunda.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados dos levantamentos e das medidas realizadas com a Rede Piloto implementada, exclusivamente, para os ensaios deste trabalho.

Finalmente, de posse das informações e dos resultados obtidos nos ensaios e nas medidas, o capítulo 5 apresenta as conclusões gerais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

As referências bibliográficas encontram-se detalhadas ao final do trabalho.

CAPÍTULO 2

TECNOLOGIA POWER LINE COMMUNICATION (PLC)

2.1. Introdução

Neste capítulo o objetivo principal é fazer uma introdução teórica e em seguida apresentar as características técnicas de funcionamento e operação da tecnologia conhecida como Power Line Communication (PLC), utilizada neste trabalho para o estudo das Interferências Eletromagnéticas provenientes do seu funcionamento.

2.2. Descrição Técnica do Sistema Power Line Communication (PLC)

2.2.1. Arquitetura do Sistema PLC

A arquitetura básica de um sistema PLC é formada por um equipamento denominado como “Master”, instalado próximo aos transformadores de baixa tensão, nos casos de aplicações externas (*outdoor*), ou próximo aos relógios de entrada de energia das residências, nos casos de aplicações internas (*indoor*). São exatamente nestes pontos da rede onde são realizados os acoplamentos para inserção do sinal PLC na rede.

A função deste “Master” é concentrar, gerenciar e transmitir as informações aos equipamentos “Modem”, que por sua vez devem ser instalados nos locais onde se encontram os assinantes.

Com a finalidade de obtenção de um maior alcance na recepção dos dados transmitidos pela rede, quando necessário, são instalados em locais distantes dos equipamentos “Master”, equipamentos repetidores que fazem a ponte entre o “Master” e os “Modem”.

Sendo assim, a tecnologia PLC estabelece seus enlaces de telecomunicações no segmento da rede de distribuição definida entre o transformador de baixa tensão e as instalações dos usuários, ou entre os relógios de entrada das residências e os pontos de acesso, mais especificamente no “Modem” conectado à tomada de energia elétrica.

Sua topologia característica é multiponto, possuindo configuração de rede local (LAN - Local Area Network) e se comunicando através de protocolo TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol).

A fim de exemplificar a configuração básica de uma rede PLC, neste trabalho serão utilizadas nomenclaturas encontradas em equipamentos hoje disponíveis no mercado [33] [36] [38], conforme definido abaixo:

Equipamento PLC Nodes – equipamento acoplado, em paralelo, com as três fases do transformador de tensão, realizando o link de comunicação entre o Backbone e a rede de distribuição.

Pode ser utilizado como equipamento Master, injetando sinal na rede de distribuição de energia de média ou baixa tensão, ou também como equipamento Repetidor, aumentando a área de cobertura do sinal transmitido e, por consequência, possibilitando o atendimento a um número maior de usuários.

Equipamento PLC Modem ou CPE (Customer Premises Equipment) – É o modem do usuário-final. Este Modem é conectado à tomada de energia da rede de distribuição de baixa tensão por onde, além de ser alimentado, recebe o sinal PLC.

Este equipamento também possui como opções de interface de comunicação portas Ethernet e USB, para permitir ao usuário a conexão com o equipamento ou aplicativo de seu interesse.

Todo o sistema é totalmente configurável e flexível com a finalidade de permitir a adaptação dos equipamentos a diferentes tipos de topologias de rede. Toda configuração pode ser realizada remotamente e de uma maneira fácil, uma vez que todos os equipamentos estarão conectados a rede formada através da tecnologia PLC.

Na figura 2.1 é possível observar a topologia típica de um sistema PLC, tanto para aplicações externas (outdoor) quanto para internas (indoor).

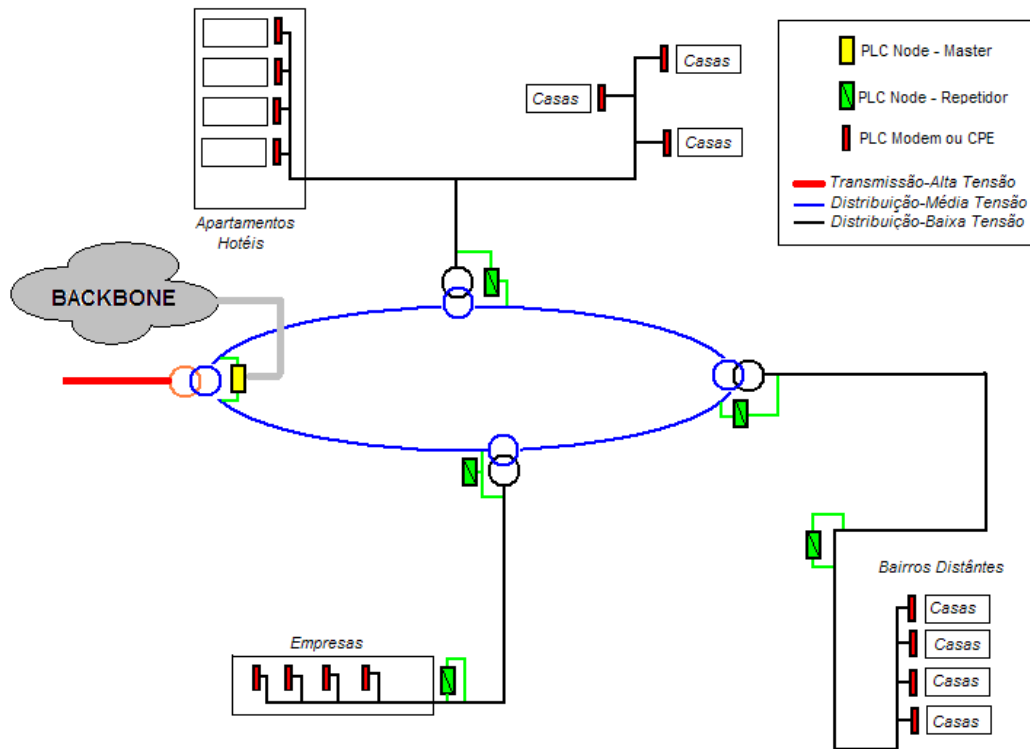


Figura 2.1 – Exemplo básico de configuração de uma rede PLC

2.2.2. Equipamentos que Compõem uma Rede PLC

2.2.2.1. PLC Node

O PLC Node trabalhando como Master é um modem digital de alta velocidade que geralmente é localizado junto aos transformadores MT/BT (média tensão / baixa tensão) e que se comunica com vários Repetidores ou CPEs. Sua função é realizar o controle da comunicação do sistema disponibilizando acesso de banda larga para vários outros PLC Nodes.

O Master pode ser conectado ao transformador de tensão de duas maneiras. Entre duas fases ou utilizando as três fases mais o neutro. A decisão pela escolha entre uma destas duas opções depende da topologia da rede de distribuição de energia e da Relação Sinal-Ruído (SNR - Signal to Noise Ratio) na recepção dos Repetidores ou CPEs.

O PLC Node trabalhando com Repetidor é uma combinação de um CPE com um Master. Este PLC Node possui uma interface de comunicação de Master e uma de CPE, tudo em um mesmo equipamento. Ele pode ser usado como um repetidor para receber, amplificar e retransmitir o sinal PLC para longas distâncias, como um roteador para

aplicações indoor, de modo a implementar redes locais dentro de edificações, ou ainda como ponto multiplicador para aumentar a quantidade de usuários por equipamento Master.

Geralmente o PLC Node, tanto funcionando como Master quanto como Repetidor, é um equipamento de propriedade do fornecedor do serviço PLC e não do usuário final.

2.2.2.2. CPE (Customer Premises Equipment)

O CPE geralmente é de propriedade do usuário final e se encontra conectado a uma tomada de energia. Os dados de saída deste equipamento podem ser transmitidos para um Repetidor ou diretamente ao Master.

O CPE permite a conexão com o computador do usuário através de portas Ethernet ou USB e ainda permite que um telefone analógico possa ser conectado ao mesmo, possibilitando assim que a distribuidora de energia possa prover serviços de telefonia, também conhecido como Voz sobre IP (VoIP), através das suas linhas de potência.

Na hierarquia de uma rede PLC, o CPE é denominado como um equipamento escravo, necessitando assim que na mesma estrutura de rede haja um equipamento Master ou um Repetidor para que este possa servir como ponto de acesso a um assinante.

2.2.3. Métodos e Unidade de Acoplamento de Sinais PLC

Acoplamento é o método utilizado para injetar ou receber o sinal PLC na rede de distribuição de energia. Este acoplamento pode ser do tipo indutivo ou capacitivo.

As unidades de acoplamento foram especialmente desenvolvidas para permitir a injeção do sinal PLC, tanto nas redes de média tensão quanto nas redes de baixa tensão. Cada um desses níveis de tensões possui seu próprio tipo de unidade de acoplamento responsável pela injeção do sinal PLC na rede de energia.

A principal função destas unidades de acoplamento, como a própria nomenclatura indica, é acoplar e desacoplar o sinal PLC numa faixa de frequência limitada e filtrar qualquer outro sinal que não esteja nesta faixa de operação.

Uma outra importante característica é a alta isolamento que estas unidades promovem, garantindo desta forma a completa segurança e proteção aos usuários e equipamentos de comunicação.

Todos os elementos que compõem o Sistema Elétrico de Geração, Transmissão e de Distribuição de Energia foram desenvolvidos para garantir que haja baixos níveis de perdas de energia no percurso desta, desde a sua geração até o usuário final. Desta forma, como qualquer outro elemento destes sistemas, os transformadores de potência foram projetados para prover baixos níveis de perdas de energia quando trabalhando em sua frequência nominal, ou seja, 60Hz no caso do Sistema Elétrico Brasileiro.

Os transformadores de potência funcionam como uma barreira natural às altas frequências. Sendo assim, onde existe a necessidade de transmissão de um sinal PLC oriundo da rede de média tensão para a rede de baixa tensão, ou vice versa, um PLC Node, através de cartões projetados especificamente para cada nível de tensão, faz esta ponte entre os dois meios para que o sinal não seja filtrado pelo transformador de tensão.

Esta solução não é meramente uma implementação de um desvio do sinal PLC (bypass) sobre o transformador, pois, no caso de um transformador abaixador de tensão, após o desacoplamento do sinal na rede de média tensão, este é amplificado, processado e re-injetado na rede de baixa tensão.

2.2.3.1. Acoplamento Indutivo

2.2.3.1.1. Princípio do Acoplamento Indutivo

A unidade de acoplamento indutivo é usada para possibilitar a transmissão de sinal PLC sobre linhas de potência de média ou baixa tensão.

Nas linhas de potência onde não haja ponto de contato galvânico disponível, estes componentes, através de uma braçadeira denominada como “*Clamp*”, são utilizados como circuitos magnéticos colocados em torno do condutor para que assim possam acoplar, por indução, o sinal PLC em banda larga com baixo nível de perdas.

A unidade de acoplamento indutivo possui um funcionamento idêntico a um transformador de tensão, onde não existe nenhum contato elétrico entre o circuito

equivalente primário e o secundário, e somente a indução mútua que neste caso se encontra entre a bobina e a linha que a atravessa.

O propósito da utilização da ferrite na construção da unidade de acoplamento indutivo é concatenar o campo magnético dentro de uma área específica. Portanto, devido a própria característica elétrica deste material, quanto mais ferrite for utilizada para prover o acoplamento, melhor será a eficiência da injeção do sinal desejado.

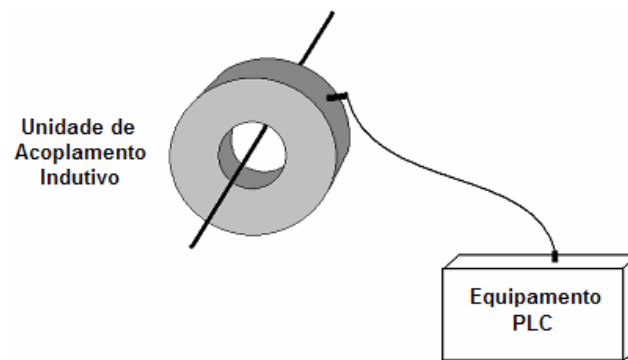


Figura 2.2 - Diagrama Básico do Acoplamento Indutivo

2.2.3.1.2. Unidades de Acoplamento Indutivo para Baixa Tensão

As Unidades de Acoplamento Indutivo de Baixa tensão são mais fáceis de serem instaladas do que as de acoplamento capacitivo, o que se deve a não necessidade da existência de pontos de contatos galvânicos nos cabos de potência e também pela possibilidade de serem instaladas sem a necessidade de interrupção no fornecimento de energia local.

Este tipo de acoplamento possui um desempenho diferente do acoplamento capacitivo. Por esta razão a decisão por sua utilização dependerá da topologia da rede de energia, tipos dos cabos de potência, disponibilidade de pontos de contatos galvânicos, etc.

As diferentes Unidades de Acoplamento Indutivo de Baixa Tensão se diferenciam umas das outras somente pelas dimensões de suas braçadeiras. Tal diferenciação se deve

à necessidade de melhor ajuste físico destes componentes aos cabos de potência onde são injetados os sinais PLC.

2.2.3.1.3. Unidades de Acoplamento Indutivo para Média Tensão

Estas unidades de acoplamento não utilizam a ferrite em sua composição. Utilizam um material magnético mole, especial, de altíssima permeabilidade que, para aplicações em Média Tensão, reduzem os problemas de saturação magnética quando comparado com o uso de ferrite.

2.2.3.2. Acoplamento Capacitivo

2.2.3.2.1. Princípio do Acoplamento Capacitivo

A Unidade de Acoplamento Capacitivo é a componente responsável pela injeção do Sinal PLC na rede de distribuição de energia através de contato direto, ou seja, através do acoplamento elétrico de tensão. Este método de acoplamento apresenta uma perda de sinal muito baixa durante sua injeção na rede, cujos valores aproximados estão na ordem de 1 a 2 dB.

A qualidade do contato galvânico influencia diretamente na qualidade da transmissão dos dados. Portanto, o ponto de contato deve ser o melhor possível.

O Acoplamento Capacitivo pode ser realizado entre fase e neutro ou fase e fase. Geralmente este último é o que apresenta melhor aproveitamento na injeção do sinal. Mesmo assim, sempre que for necessária a realização de um acoplamento capacitivo, é indicado que sejam testadas diferentes combinações de conexões entre as fases da rede, para que desta maneira possa ser comprovada, naquele ponto de acoplamento, qual deles apresentam melhores desempenhos.

2.2.3.2.2. Unidades de Acoplamento Capacitivo para Baixa Tensão

Como já abordado anteriormente, as unidades de acoplamento capacitivo e indutivo possuem diferentes modos de instalação. Para o caso do acoplamento capacitivo, uma má qualidade na conexão do acoplador durante a instalação pode diminuir significativamente a qualidade na transmissão do sinal PLC. Esta degradação também pode ser verificada em conexões realizadas nas redes de distribuição de energia elétrica

ao ar livre, quando sujeitas aos agentes climáticos sem que se tenham sido utilizados um tipo de conector apropriado para tal instalação.

Outra observação importante diz respeito ao comprimento dos cabos de conexão destas unidades de acoplamento, pois quanto menor for o cabo que realizará a conexão às linhas de potência ou aos barramentos e disjuntores localizados no interior dos quadros de distribuição, menor serão as perdas durante o processo de injeção do sinal na rede de energia.

2.2.3.2.3. Unidades de Acoplamento Capacitivo para Média Tensão

Existem diferentes tipos de Unidades de Acoplamento Capacitivo, cuja utilização depende dos seguintes fatores:

a - Local onde as unidades serão instaladas: Externo, para aplicações outdoor ou interno para aplicações indoor;

b - Modo de acoplamento: Acoplamento entre fases ou entre fase e terra;

c - Classe de isolamento: Até 36kV entre fases ou 24kV entre fase e terra.

Todas estas unidades utilizam em sua composição capacitores de acoplamento, elementos de proteção, sintonizadores, elementos responsáveis pelo casamento de impedância e conectores. Todos estes elementos encontram-se encapsulados formando uma única unidade compacta.

2.2.4. Modulação

Um fator importante relativo à imunidade do Sistema é a modulação utilizada. Existe uma variedade de técnicas para acoplar o sinal ao canal de comunicação, cada uma com suas vantagens e desvantagens, das quais destacamos as três seguintes como as mais relevantes.

A técnica de modulação de Espalhamento Espectral (Spread Spectrum) consiste em distribuir a potência do sinal ao longo de uma faixa de frequências muito ampla, de modo a garantir que a densidade espectral de potência seja bastante baixa. Em contrapartida, a largura de banda necessária para transmissão de taxas na ordem de megabits é bastante elevada.

Outra técnica de modulação empregada é a "Orthogonal Frequency Division Multiplex" (OFDM) que consiste em modular um grande número de portadoras de banda estreita distribuídas lado a lado. Este tipo de modulação oferece grande adaptabilidade ao sistema, pois é possível suprimir portadoras interferentes ou interferidas ou ainda variar a taxa de bits de cada portadora de acordo com a Razão Sinal Ruído ou Atenuação do Enlace.

Este sistema necessita de amplificadores altamente lineares sob pena das harmônicas existentes nas portadoras provocarem interferências.

Outra técnica de modulação utilizada é a GMSK ou "Gaussian Minimum Shift Keying" que é um caso particular de modulação OFDM, também conhecida como OFDM de banda larga. Neste caso as portadoras são moduladas em fase resultando em um "envelope" constante, de modo que os amplificadores podem ser mais simples [33] [37].

O sinal é robusto contra interferências de banda estreita tais como sinais de rádio de Ondas Curtas. Esta modulação resulta em um espectro de forma gaussiana, de onde se origina a sua denominação.

A Figura 2.3 ilustra o espectro de frequência característico de cada uma destas técnicas de modulação.

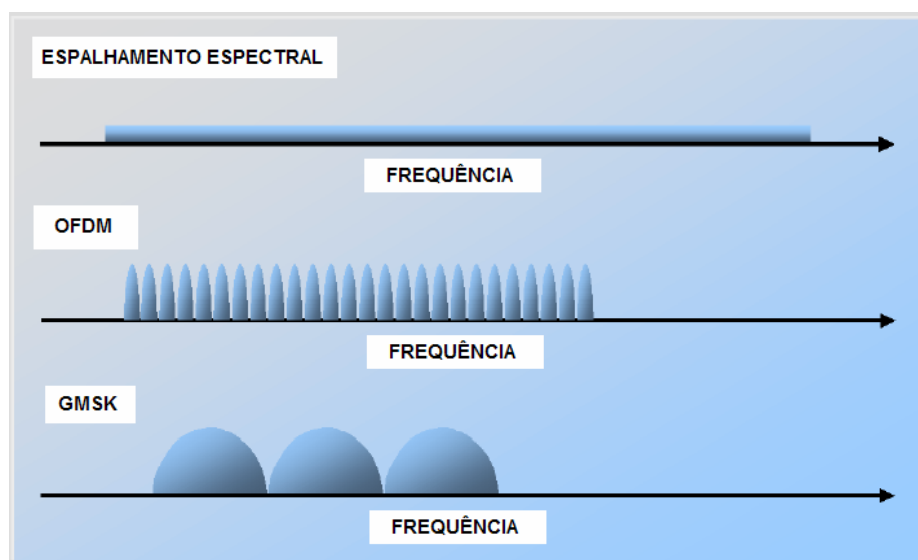


Figura 2.3. – Espectros de frequências característicos das técnicas de Modulação

Como já visto anteriormente, os sistemas PLC vêm sendo desenvolvidos para aplicações em redes de distribuição de baixa e média tensão. Ambas aplicações enfrentam restrições técnicas similares, quais sejam:

- Relação Sinal-Ruído (SNR)
- Interferências Eletromagnéticas (EMI)
- Segmentação de alimentadores
- Aspectos de Segurança

Tanto a Razão Sinal-Ruído (SNR) quanto as Interferências Eletromagnéticas (EMI) são fatores determinantes e correlacionados para estabelecer o espectro disponível para utilização pelo sistema.

A Razão Sinal-Ruído (SNR) influencia diretamente na potência de transmissão dos equipamentos e esta, por sua vez, influencia no nível de sinal irradiado pelo sistema, estabelecido pelos organismos responsáveis pela regulamentação do serviço.

A definição da arquitetura do sistema deve levar em conta os demais itens. Sua correta abordagem é decisiva para manter o sistema competitivo com outras tecnologias de banda larga.

2.2.5. Frequência de Operação

Os equipamentos que compõem os sistemas PLC (PLC Nodes e CPEs) podem trabalhar com várias bandas de frequências, bidirecionais, para comunicação, desde que estas estejam limitadas dentro da faixa total de frequência permitida para o uso desta tecnologia.

A faixa legalmente permitida pelos órgãos responsáveis para uso em sistemas PLC encontra-se definida entre 1MHz e 30Mhz. Seu aproveitamento operacional para comunicação entre os equipamentos varia dentro do grupo formado por fabricantes de equipamentos utilizados em Power Line Communication.

É importante ressaltar que na faixa espectral utilizada pelos equipamentos PLC que vêm sendo oferecidos ao mercado brasileiro, já se encontram licenciados os seguintes

serviços: móvel marítimo, móvel aeronáutico, radioamador, radiodifusão e rádio-localização.

2.2.6. Desempenho do Sistema Power Line Communication

Cada PLC Node trabalhando como Master pode gerenciar até 63 outros equipamentos escravos. Estes escravos, conhecidos como Slave Nodes, podem ser CPEs ou repetidores.

Por sua vez, cada Repetidor gerenciado por um Master também possui a capacidade de gerenciamento de mais 63 equipamentos escravos, formando assim uma topologia de comunicação em árvore com aproximadamente 4000 usuários por transformador, conforme ilustrado na Figura 2.4.

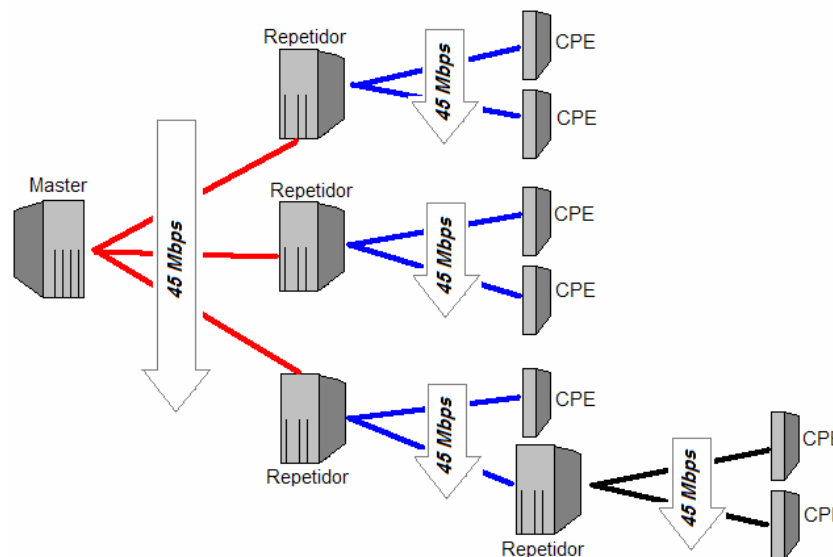


Figura 2.4 – Topologia de Comunicação

2.3. Topologias para Multi-injeção de Sinais em uma Única Rede de Distribuição de Energia

A tecnologia PLC permite a coexistência de mais de um equipamento Master conectado a uma mesma rede de energia, desde que as seguintes condições sejam observadas:

- a - Equipamentos Master operando em Links diferentes.

b - Equipamentos Master operando no mesmo Link, porém com uma atenuação suficientemente grande entre eles.

A frequência de operação dos equipamentos PLC, desde que haja permissão para tal ação, pode ser facilmente alterada através de comandos remotos. Esta flexibilidade para seleção e alocação de bandas de frequências de operação permite a configuração da rede PLC em diferentes topologias. Como exemplo ilustrativo, e por serem as mais utilizadas dentre as diversas possibilidades, serão apresentadas a seguir a Topologia Padrão, também conhecida como Estrela, e a Topologia Multi-hop.

2.3.1. Topologia Padrão (Estrela)

Nesta topologia, a comunicação entre o Master e os Repetidores é realizada através de um link específico e a comunicação entre os Repetidores e os diversos CPE's, através de um outro link também específico.

Caso a taxa de transmissão necessite ser incrementada a fim de cobrir um número maior de usuários devido a altas atenuações do sinal PLC, então Repetidores adicionais poderão ser instalados utilizando um terceiro link.

Com esta topologia de rede, o máximo de taxa de transmissão que pode ser estabelecida entre o Master e qualquer CPE é 45 Mbps. Esta topologia está ilustrada na Figura 2.4.

2.3.2. Topologia Multi-hop

Esta topologia é especialmente projetada para estabelecer enlaces através de Links de comunicação entre pontos separados por longas distâncias. Para isto, elementos repetidores adicionais podem ser instalados numa mesma rede de distribuição de energia, em locais onde a atenuação do sinal PLC é a máxima possível permitida, objetivando assim um aumento no alcance na transmissão de dados entre o Master e os usuários finais (CPEs).

Isto sempre é possível de ser implementado pois, se a atenuação não for alta o suficiente, ou seja, maior que 35dB, então os Repetidores não se tornam necessários.

Esta topologia pode ser observada conforme ilustrado na Figura 2.5.

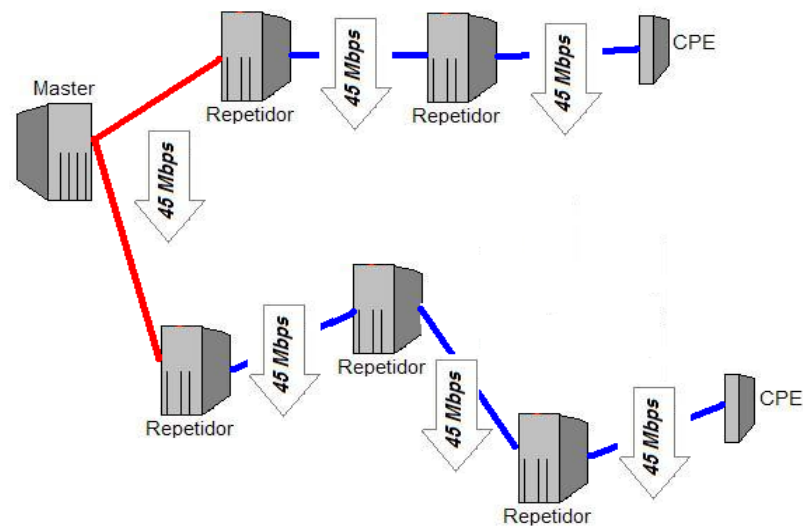


Figura 2.5 – Topologia Multi-Hop

2.3.2. Coexistência entre Equipamentos Master

A coexistência entre equipamentos Master em uma mesma rede é baseada em multiplexação de frequência. Sempre que vários equipamentos Master ou Repetidores utilizam a mesma faixa de frequência, a atenuação do sinal PLC existente entre eles aumenta consideravelmente.

Se a atenuação do sinal PLC entre os PLC Nodes se tornar muito alta, ou seja, maior que 35dB, então o sistema automaticamente inicia a transmissão dos dados utilizando a máxima taxa possível.

Um mecanismo de controle de potência dinâmico é utilizado em cada equipamento Master com a finalidade de diminuir os níveis de interferência inter-Master. Isto garante que cada equipamento com essa mesma função transmita os dados pela rede de distribuição de energia elétrica com o mínimo nível de potência necessária para manter o enlace de comunicação através da relação sinal-ruído (SNR) estabelecida pelo fabricante dos equipamentos.

A Distância Mínima entre equipamentos Master é um parâmetro que não depende da localização física destes equipamentos na rede, e sim da atenuação existente entre eles.

Geralmente, se atenuação entre eles estiver em níveis acima de 35dB, o equipamento não é afetado por outros equipamentos Master vizinhos. Porém, se a atenuação for menor que esse limite, então este equipamento fica limitado à máxima razão sinal-ruído (SNR) que pode ser obtida, cujo valor numérico geralmente é o mesmo da atenuação inter-Master.

2.4. Equipamentos PLC Utilizados para Realização do Estudo da Interferência Eletromagnética Gerada por redes PLC (Power Line Communication).

Para realização do estudo, objeto desta dissertação de mestrado, foram utilizados equipamentos usualmente encontrados no mercado.

Por motivos de ética profissional, sigilo industrial e visando uma não caracterização dos equipamentos adotados, pelos resultados obtidos através deste estudo, o fabricante dos equipamentos não será identificado. Somente estarão sendo apresentados os dados e as características elétricas dos equipamentos.

- **Equipamento Master:**

Alimentação: 90 a 264V_{CA} / 50 - 60Hz

Consumo: 45W

Máxima Potência Injetada : -50dBm

- **Equipamento CPE:**

Alimentação: 115 a 230V_{CA} / 50 - 60Hz

Consumo: 45W

Máxima Potência Injetada : -50dBm

2.5. Características das Redes de Energia Elétrica como Meio para Comunicação de Dados

Quando se utilizam as redes de distribuição de energia elétrica como meio de propagação de sinais em altas velocidades para uso de diversos tipos de serviços de telecomunicações, é importante ter em mente que esta rede representa uma estrutura eletromagneticamente aberta, insuficientemente protegida contra recepção e emissão de sinais interferentes em altas frequências.

Deste modo, a simples transmissão de um sinal PLC pode ser danosa a sistemas próximos, seja de maneira conduzida, através de conexões em comum em uma rede que esteja alimentando diversos sistemas e equipamentos, ou de maneira radiada, interferindo em sistemas baseados em comunicação sem fio que possam estar operando próximo a rede PLC, ou ainda, ao próprio sistema PLC [17], [18].

Por esta razão, e pelo fato da tecnologia PLC estar em processo de implantação no Brasil, torna-se crucial que sejam avaliados quais os impactos do uso desta tecnologia para a realidade do setor elétrico brasileiro.

As estruturas físicas de cabeamento utilizadas para o fornecimento de energia elétrica não foram projetadas para servirem como meio de propagação de sinais em altas frequências. A comunicação de dados através das Redes de Energia Elétrica encontra algumas dificuldades como seletividade de frequências, múltiplas reflexões e todos os tipos de ruídos existentes no meio [15].

Entretanto, devido a evolução tecnológica da microeletrônica e das técnicas de processamento digital de sinais, dispositivos e modems que utilizam tecnologia PLC estão em grande expansão comercial [4] [14] [16], podendo ser encontrados em redes locais, sistemas de automação, entre outros.

Redes de Energia Elétrica são usualmente classificadas, de acordo com o nível de tensão, em Alta Tensão (AT), Média Tensão (MT) ou Baixa Tensão (BT). Devido às várias topologias, até mesmo dentro de um mesmo nível, com diferentes tipos de linhas ou cabos, uma descrição geral torna-se difícil [19][20].

Mesmo assim, recentemente vários estudos vêm sendo realizados sobre o uso da PLC em linhas de distribuição de energia em Média e Baixa Tensão.

Um dos motivos do uso desta tecnologia estar restrito às redes com os menores níveis de tensão deve-se a dificuldade de garantia da segurança dos usuários, operadores e terminais de acesso quanto ao isolamento entre a redes de energia elétrica e os equipamentos PLC [24].

2.5.1. Impedância do Canal

Devido ao fato de uma rede de energia elétrica, seja ela externa, representada pelas Redes de Distribuição de Energia, ou interna, representada pelas redes de alimentação de uma edificação, possuir várias ramificações, com cargas sendo constantemente conectadas e desconectadas em diversos instantes não específicos, a impedância do canal torna-se uma variável extremamente flutuante.

Em conjunto com a variação da impedância característica nas linhas ou cabos, os diversos tipos de conexão existentes nas redes fazem com que torne extremamente influente o fenômeno da reflexão no sinal, prejudicando desta forma a comunicação que venha existir neste meio.

2.5.2. Atenuação do sinal PLC

A atenuação refere-se à perda que um sinal elétrico pode sofrer ao ser transmitido em um dado meio físico.

Nas linhas de potência a atenuação de um sinal tende a aumentar com o aumento de sua frequência de transmissão sobretudo devido ao efeito pelicular, com o aumento da distância entre transmissor e receptor e, também, em função da trajetória a ser percorrida pelo sinal.

A temperatura do meio e as condições climáticas também são fatores que influenciam na transmissão.

2.5.3. Interferências e Ruídos

As interferências e ruídos ocorrem nas redes de Alta Tensão devido à ocorrência de descargas atmosféricas, efeito corona, interrupção na operação de circuitos ou transitórios produzidos por manobras em uma subestação.

Nas redes de Média Tensão estes distúrbios são causados especialmente por chaveamentos em bancos de capacitores empregados para controle da tensão e correção do fator de potência.

Já nas redes de Baixa Tensão, sejam elas externas (linhas aéreas) ou internas (redes embutidas residenciais), os equipamentos industriais, comerciais ou residenciais são os principais agentes causadores dos ruídos e interferências.

Em sistemas de comunicação PLC podem ser classificados cinco classes gerais para ruídos:

RUÍDO COLORIDO – apresenta densidade espectral de potência (PSD) relativamente baixa, variando com a frequência. Sua causa é a superposição de numerosas fontes de ruídos com baixas potências;

RUÍDO DE BANDA ESTREITA – na maioria das vezes são sinais senoidais modulados em amplitude causados por interferências de estações de radiodifusão;

RUÍDO IMPULSIVO PERIÓDICO ASSÍNCRONO À FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL: com uma taxa de repetição entre 50 e 200 kHz são geralmente causados por fontes chaveadas;

RUÍDO IMPULSIVO PERIÓDICO SÍNCRONO À FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL: com uma taxa de repetição entre 60 e 120 Hz. Possuem densidade espectral de potência decrescente com a frequência fundamental. São causados por fontes de alimentação, principalmente pela comutação de diodos retificadores;

RUÍDO IMPULSIVO PERIÓDICO ASSÍNCRONO: são causados por chaveamentos transitórios na rede. Sua densidade espectral de potência pode alcançar valores superiores dos apresentados pelos ruídos coloridos.

2.6. PLC Aplicada a Redes de Distribuição em Baixa Tensão Embutidas – Aplicações Internas a Edificações (Aplicações Indoor)

Como esta dissertação aborda apenas a avaliação do uso da PLC em ambientes internos, residenciais ou comerciais, também denominadas como aplicações “indoor”, somente serão apresentados dados referentes ao uso da tecnologia PLC em redes de baixa tensão e embutidas.

As redes embutidas geralmente são formadas por grandes extensões de cabos de baixa tensão, isolados e não blindados, distribuídos junto ao solo e as paredes, especificamente localizadas no interior de calhas e eletrodutos, e apresentam, como nos casos dos sistemas reticulados, um grande número de interconexões [20].

A ausência de blindagem nos cabos, a proximidade ou contato físico do seu isolamento com o solo faz com que cada cabo singelo se comporte como uma linha de transmissão de um condutor próximo a terra, com o valor de sua impedância característica dependente desta proximidade, apresentando assim elevados valores de capacitância e condutância para a terra [26][27].

Pelo fato das interconexões serem freqüentes e repetitivas, a impedância característica de alguns trechos pode vir a ser bem reduzida.

Esta combinação de valores muito baixos de impedâncias características com elevados valores de capacitância e condutância para a terra é quase sempre associada a elevados valores de atenuação.

Todas estas características, teoricamente, fazem com que o comportamento das redes embutidas de distribuição de energia como meio de propagação, não sejam apropriadas para transmissão de sinais em freqüências elevadas.

Isto porque estas características exercem sobre o sinal transmitido, um elevado efeito de atenuação causado pelas perdas por efeitos condutivos e capacitivos, além dos efeitos de descasamento de impedâncias.

Alguns ruídos observados nas redes aéreas não devem estar presentes nas redes embutidas, isto devido ao efeito de blindagem do solo. Ruídos e impulsos ocasionados por descargas atmosféricas também não devem estar presentes.

Um outro motivo que levam os demais serviços de comunicação, que operam em áreas fisicamente próximas as redes PLC, a serem contrários ao uso desta tecnologia é a emissão de energia radiada gerada durante sua operação [34].

Quando um condutor, como os utilizados nas redes de alimentação em baixa e média tensão, é usado como meio de propagação de sinais em alta frequência, este funciona perfeitamente como uma antena, irradiando energia para suas proximidades [6][30].

Um ponto positivo, quando comparamos o uso da PLC em ambientes fechados com o uso em ambientes abertos, está na baixa potência dos sinais. Devido a isto, os sinais irradiados por Redes de Energia Elétrica embutidas são atenuados quase que completamente numa região próxima ao condutor.

2.6.1. Compatibilidade com Sistemas de Comunicação sem Fio (Wireless)

Quando falamos em comunicação sem fio, devemos ter em mente que, neste caso, o meio de propagação das informações entre transmissor e receptor é o ar livre.

Sendo assim, é possível citar como exemplos de comunicações sem fio a telefonia celular, os rádio amadores, a comunicação aeronáutica e marítima, etc.

Estes sistemas, embora utilizem o mesmo meio de propagação e muitas vezes operam simultaneamente, não interferem uns nos outro devido as suas faixas de frequências de operação serem distintas.

No caso da PLC, por se tratar de uma comunicação que se utiliza de cablagem, ou seja, seus sinais são transmitidos através de um meio físico sólido, no caso os cabos do sistema de distribuição de energia elétrica, não deveriam apresentar nenhum tipo de interferência na operação dos sistemas sem fio. Porém, na prática, isto não é puramente verdade [35][37].

A compatibilidade eletromagnética dos sistemas PLC com serviços de radiocomunicação trata-se de um problema bidirecional. De um lado, campos eletromagnéticos gerados por rádios transmissores induzindo tensões ou correntes nas Redes de Energia Elétrica de média e baixa tensão, interferindo na comunicação PLC. Do outro lado, os sinais PLC irradiando campos eletromagnéticos que poderão vir a

interferir nos rádios receptores e conduzindo sinais que poderão interferir no funcionamento de outros sistemas alimentados pela mesma rede.

2.7. Conclusões

Neste capítulo foram apresentados conceitos e características funcionais referentes à tecnologia Power Line Communication (PLC). É possível que dentre os diversos fabricantes desta tecnologia a nomenclatura utilizada para os equipamentos PLC nesta apresentação sofra algumas variantes devido às particularidades de cada um, porém, o funcionamento de cada um destes equipamentos formando uma rede PLC respeitará ao que foi apresentado.

É sabido que as modernas técnicas de multiplexação de sinais, de controle do nível de potência dos sinais PLC injetados nas Redes de Energia Elétrica, de utilização de filtros para serviços que dividem a mesma rede de alimentação com o uso da PLC e, por fim, de distanciamento entre os diversos sistemas de comunicação, tendem a viabilizar a coexistência entre os vários serviços de comunicação disponíveis e a PLC [30].

Deste modo, o estudo do impacto, tanto pela energia irradiada quanto pela conduzida através dos condutores das Redes de Energia Elétrica, torna-se primordial. Portanto, neste trabalho será estudado, especificamente, o comportamento e impacto da EMI gerada por redes PLC utilizadas internamente em edificações.

Os resultados, como também toda metodologia, configurações e equipamentos utilizados para realização das medidas de emissão de energia eletromagnética, conduzida e radiada, pelas redes embutidas de distribuição de energia elétrica quando da utilização das mesmas para comunicação PLC, serão apresentadas e discutidas no capítulo 4

No capítulo 3 serão apresentadas as definições, os fundamentos e a filosofia da Compatibilidade Eletromagnética, para que, a partir destes conceitos, possamos ter subsídios para coletar e avaliar a interferência eletromagnética que esta nova tecnologia pode gerar ao meio ambiente.

CAPÍTULO 3

UMA VISÃO SOBRE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA (EMC)

3.1. Introdução

O objetivo deste capítulo é fazer uma introdução conceitual da Compatibilidade Eletromagnética (EMC – Electromagnetic Compatibility) abordando, especialmente, o aspecto do impacto gerado pela emissão de interferências eletromagnéticas provenientes de uma fonte ao meio ambiente que a circunda.

3.2. Conceitos Fundamentais

O Ambiente Eletromagnético é uma parte integrante no universo em que vivemos. Vários sistemas como aparelhos telefônicos sem fio, telefones celulares, estações de transmissão de rádio e televisão, radiam energia eletromagnética durante seu funcionamento normal.

Outras aplicações, como sistemas de ignição de motores de automóveis, uma variedade de aparelhos eletrodomésticos, fontes de alimentação para equipamentos eletroeletrônicos, lâmpadas com reatores eletrônicos, controles para graduação de intensidade luminosa (dimer), entre outros, também radiam energia eletromagnética. Porém, nestes casos, essas emissões não fazem parte do correto funcionamento destes sistemas.

Portanto, o ambiente eletromagnético formado por essas fontes emissoras de energia eletromagnética, quando demasiadamente fortes, pode interferir na operação de outros equipamentos ou sistemas eletroeletrônicos que estejam nas proximidades [5].

Sendo assim, um sistema eletrônico que seja capaz de funcionar de forma compatível com outros sistemas eletrônicos, não interferir e ser imune a interferências oriundas de outros sistemas, é dito ser eletromagneticamente compatível com seu ambiente de operação [7]. Estes são os fundamentos principais do que é conhecido como Compatibilidade Eletromagnética (CEM).

3.2.1. Abordagem Histórica à Questão da Compatibilidade Eletromagnética (CEM)

A Interferência Eletromagnética (EMI) começou a ganhar importância na década de 20. Nesta época os primeiros artigos técnicos sobre EMI foram publicados em alguns jornais técnicos, e na década de 30 a rádio-interferência surgiu como um problema maior [7].

A partir da Segunda Guerra Mundial a utilização de dispositivos eletrônicos aumentou significativamente, primeiramente, em rádios, equipamentos de navegação e radares. Deste momento em diante, o termo Interferência Eletromagnética (EMI) surgiu fortemente no campo da Engenharia [7].

Com o crescente uso das facilidades e vantagens oferecidas pelas telecomunicações, pelos radares e também pela utilização de faixas de frequências mais elevadas do que as empregadas na transmissão de rádios, o interesse dos militares a respeito deste fenômeno tornou-se muito forte. Tal interesse alavancou o desenvolvimento de padrões militares e instrumentação adequada para permitir medições de EMI até 20MHz durante os anos 40, progredindo para 30MHz durante os anos 50, e para frequências de até 1GHz durante os anos 60 [7].

No ano de 1979, em virtude da observação de interferências entre sistemas digitais e sistemas de comunicações, a Federal Communications Commission - FCC publicou nos Estados Unidos uma regulamentação que limitava as emissões eletromagnéticas provenientes de equipamentos eletroeletrônicos e sistemas digitais em níveis abaixo de limites pré-definidos [7].

Os Estados Unidos não foram os primeiros a controlar os níveis de emissões eletromagnéticas. Em 1933, uma reunião da International Electrotechnical Commission – IEC, realizada em Paris, recomendou a formação do "International Special Committee on Radio Interference – CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radio-électriques.)", para tratar do emergente problema da EMI. O comitê produziu um documento detalhando os equipamentos e metodologias de medidas para determinar o potencial das emissões de EMI [7].

Estas regulamentações têm feito da EMC um aspecto crítico e importante no que tange as etapas de projeto, fabricação, implantação e comercialização de um produto eletrônico ou novas tecnologias.

Há vários países no mundo onde um produto que não esteja em conformidade com as normas de EMC adotadas pelos órgãos responsáveis, em tese, não pode ser comercializado dentro de suas fronteiras.

Nos últimos anos tem aumentado em demasiado o número de pesquisas e investimentos na área de EMC. Tal crescimento segue em paralelo com o contínuo avanço na tecnologia de novos equipamentos e sistemas.

3.2.2. Definições

Para fins de um melhor entendimento do conteúdo apresentado no decorrer deste trabalho, são definidos alguns termos que serão muito utilizados [12][11][15]:

- Ambiente Eletromagnético: Conjunto de fenômenos eletromagnéticos existentes em um dado local.
- Ruído Eletromagnético: Fenômeno eletromagnético variável no tempo, aparentemente não possuindo informação e capaz de superpor-se a um sinal desejado ou ainda, combinar-se com o mesmo.
- Sinal não desejado: Sinal capaz de prejudicar a recepção de um sinal desejado.
- Sinal interferente: Sinal que prejudica a recepção de um sinal desejado.
- Perturbação eletromagnética: Fenômeno eletromagnético capaz de degradar o desempenho de um dispositivo, equipamento ou sistema, ou de afetar desfavoravelmente matéria viva ou inerte.
- Interferência eletromagnética (EMI): Degradação do desempenho de um equipamento, canal de comunicação ou sistema; causada por uma perturbação eletromagnética.

- Nota: O termo “Perturbação eletromagnética” e “Interferência eletromagnética” designam, respectivamente, causa e efeito, e não devem ser utilizados indiscriminadamente.
- Compatibilidade eletromagnética (EMC ou CEM): Capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema para funcionar satisfatoriamente em seu ambiente eletromagnético, sem introduzir perturbação eletromagnética intolerável em tudo que se encontre neste mesmo ambiente.
- Emissão (Eletromagnética): Fenômeno pelo qual a energia eletromagnética emana de uma fonte.
- Radiação (Eletromagnética): Fenômeno pelo qual a energia emana de uma fonte para o espaço sob a forma de ondas eletromagnéticas.
- Interferências intersistemas: EMI que ocorre num sistema devido a uma perturbação eletromagnética produzida por outro sistema.
- Interferências intra-sistema: EMI que ocorre num sistema devido a uma perturbação eletromagnética produzida internamente ao próprio sistema.
- Ruído natural: Ruído eletromagnético cuja fonte reside em fenômenos naturais e não naqueles produzidos artificialmente.
- Ruído artificial: Ruído eletromagnético produzido artificialmente.
- Plano (de referência) de terra: Superfície condutora, plana, cujo potencial é utilizado como uma referência comum.
- Corrente de modo diferencial: Em um cabo de dois condutores, ou para dois condutores particulares em um cabo multicondutor, é a metade da amplitude da diferença dos fasores que representam as correntes em cada condutor.
- Corrente de modo comum: Em um cabo tendo mais que um condutor, incluindo blindagem onde houver, é a amplitude da soma dos fasores representando as correntes em cada um dos condutores.

- Perturbação de faixa larga: Uma perturbação eletromagnética de largura de faixa maior que aquela de um dado equipamento de medição, receptor ou dispositivo susceptível.
- Perturbação de faixa estreita: Uma perturbação eletromagnética, ou componente espectral de uma perturbação, de largura de faixa menor ou igual àquela de um dado equipamento de medição, receptor ou dispositivo susceptível.

3.3. Interferência Eletromagnética (EMI)

A Interferência Eletromagnética é um fenômeno que ocorre quando tensões ou correntes indesejadas encontram-se presentes, influenciando negativamente no desempenho operacional de um dispositivo.

Este fenômeno pode ser decomposto em três partes: Fonte, Percurso ou Canal de Propagação e Receptor. Onde a Fonte produz a emissão, o Percurso de Propagação é por onde a energia eletromagnética é transferida e o Receptor recebe a energia emitida pela Fonte.

O ambiente eletromagnético consiste de vários equipamentos que irradiam energia eletromagnética quando estão em operação. Qualquer dispositivo eletrônico é susceptível a EMI. Sua influência pode ser percebida com facilidade.

O impacto destas perturbações inclui os chamados “fantasmas” nas imagens de recepção de TV, interferências nos serviços de rádio-táxi com os sistemas de rádio da polícia, interferência de transientes de linhas de distribuição ou transmissão de energia em computadores pessoais, auto-oscilação em circuitos receptores ou transmissores, entre outros.

Sabe-se que as descargas atmosféricas, a atuação de relés, o funcionamento de motores elétricos em tensão contínua, o acionamento de lâmpadas fluorescentes e seus respectivos reatores eletrônicos geram ondas eletromagnéticas ricas em conteúdo espectral. As emissões destas ondas ao ambiente eletromagnético geram as perturbações de faixa larga.

Também existem fontes de emissões eletromagnéticas de faixa estreita, tais como as linhas de distribuição de energia de baixa e média tensão, ou ainda as linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão, responsáveis pela emissão de ondas eletromagnéticas em sua frequência de operação, ou seja, no padrão brasileiro, 60Hz.

Os geradores de sinais rádio e televisão transmitem as emissões desejadas através da modulação da informação de interesse (voz, vídeo, música, imagem, etc.) em uma frequência portadora. Os receptores destes equipamentos interceptam estas ondas eletromagnéticas, as amplificam e extraem, através de demodulação, a informação por ela transportada.

A transferência de energia eletromagnética ocorre, freqüentemente, via modos de acoplamento não intencionais. Entretanto, a transferência não-intencional de energia causa interferência apenas se a energia recebida tiver sua magnitude, ou conteúdo espectral, suficientemente potente para fazer com que o receptor se comporte de um modo indesejado.

A propagação da interferência através deste caminho de acoplamento pode ser realizada de dois modos. Conduzida, através de cabos de conexão, cabos de alimentação, trilhas, ou seja, qualquer meio físico interligando a Fonte e o Receptor onde possa ocorrer condução de corrente; ou Radiada, geralmente através de uma antena, intencional ou não, por onde a energia é emitida para o ar, e por propagação chegando ao receptor.

Os possíveis percursos por onde a Interferência Eletromagnética pode ser transmitida da sua Fonte até o Receptor são:

- Radiação direta da Fonte para o Receptor realizada pelo ar.
- Radiação direta da Fonte acoplada ao cabo de alimentação, sinal ou controle do Receptor.
- Radiação realizada pelo cabo de alimentação, sinal ou controle, este funcionando com uma antena não intencional, para o Receptor.
- Condução direta da Fonte para o Receptor via cabos e conexões em comum.

As interferências eletromagnéticas possuem seu espaço no espectro eletromagnético de frequências. Esta se manifesta, é estudada e normalizada na faixa de frequências que se estende, aproximadamente, de 9kHz a 1GHz.

Tal definição do espaço ocupado pela EMI no espectro eletromagnético de frequências tem por finalidade explicar que a EMI é apenas uma das manifestações da energia eletromagnética, possuindo uma faixa de frequências e correspondentes comprimentos de ondas associados.

As causas de um problema de EMI podem estar tanto dentro de um sistema, caso em que é chamado de problema intra-sistêmico, quanto fora, caso em que é chamado de problema inter-sistêmico. Tanto a EMI inter-sistêmico quanto à intra-sistêmico podem, em geral, ser controladas durante a fase de projeto de um sistema através da adoção de alguns procedimentos e técnicas básicas de projeto.

3.4. Acoplamentos

A EMC, invariavelmente, possui dois aspectos complementares. Em qualquer situação de incompatibilidade deverá haver uma fonte responsável pela emissão da interferência e um receptor, também conhecido como vítima, que deverá ser susceptível a emissão desta energia. Se qualquer um destes elementos estiver ausente, então não existe um problema de compatibilidade eletromagnética.

Existe também um terceiro fator fundamental nesta relação que é o acoplamento. Para que uma fonte seja interferente em um receptor, deverá existir um acoplamento entre as partes, podendo este ser estabelecido através de uma conexão direta, por indução ou mesmo por radiação de energia [38].

3.4.1. Acoplamento Direto

O método de acoplamento mais comum de ser observado é quando existe uma conexão direta entre a fonte e o receptor. Um exemplo típico deste fenômeno ocorre quando o receptor recebe a EMI pela rede de alimentação, conforme ilustrado na figura 3.1(a). O distúrbio gerado pela fonte flui através da sua interface de alimentação, se propagando pelos cabos de potência da rede de distribuição de energia elétrica, rede esta que é comum a inúmeros dispositivos, chegando a um receptor susceptível a este

distúrbio, e assim gerando uma interferência em seu funcionamento normal. Geralmente neste esquema a rede de distribuição pode ser vista como um elemento passivo entre a fonte e o receptor.

Nesta rede de alimentação os distúrbios podem se propagar de modo diferencial, ocorrendo apenas entre seus condutores; ou de modo comum, ocorrendo entre todos os seus condutores e um plano de referência de terra. Na maioria das situações de acoplamento ambos os modos podem ser observados, porém, em sua totalidade um deles sempre se torna dominante [38].

O acoplamento total pode ser modelado como uma fonte com impedância interna Z_S acoplada a uma impedância característica Z_0 da rede de alimentação, por sua vez tratada como uma linha de transmissão, alimentando uma impedância de carga Z_L do receptor, conforme figura 3.1(b). É claro observar que o nível de distúrbio no final desta linha de transmissão, onde se encontra o receptor, depende destas impedâncias, que por sua parte são impedâncias complexas e dependentes da frequência de propagação [1].

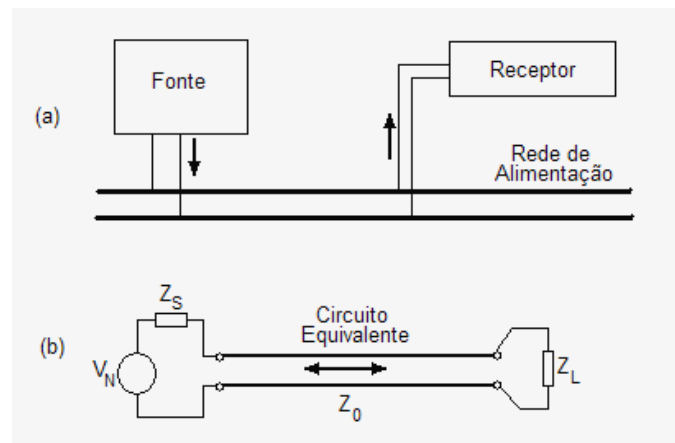


Figura 3.1. – Acoplamento via Rede de Alimentação

Numa rede pública de distribuição de energia elétrica, a impedância característica Z_0 é altamente afetada pela variação de cargas imposta pela alternância de dispositivos elétricos que são ligados e desligados constantemente.

Sendo assim, a impedância característica de $50\Omega/50\mu\text{H}$ entre cada fase e o plano de terra, que vem sendo utilizada pela CISPR para cobrir a faixa de frequência que vai de 9kHz a 30MHz para os testes de emissão conduzida, é um valor médio que foi

determinado através de medidas executadas em milhares de instalações em diferentes países ao redor do mundo.

Acoplamento via rede de alimentação não é o único exemplo de acoplamento direto, porém é o mais significativo porque, geralmente, não há nenhuma relação específica entre uma fonte e suas vítimas. Linhas de sinais e controle entre diferentes equipamentos também podem ser portadoras de distúrbios, e a mesma análise de acoplamento pode ser aplicada a elas.

3.4.2. Acoplamento por Impedância Comum

Uma segunda forma de acoplamento direto ocorre entre dois dispositivos, equipamentos, ou mesmo sistemas, que se encontram separados, funcionalmente, porém, que dividem uma impedância comum [38].

A figura 3.2 ilustra dois sistemas funcionalmente independentes, conectados a uma única barra de terra comum, que por sua vez se encontra conectada ao plano de terra de referência por um cabo. Neste caso, o sistema 1 pode gerar um ruído interno V_N que é acoplado ao seu cabo de aterramento, e está referenciado ao plano de terra de referência por uma capacitância C_S ou por conexões a outros sistemas.

Este distúrbio gerado não se propaga apenas pelo cabo de aterramento do sistema 1, mas também pelo cabo de aterramento que conecta a barra de terra comum ao plano de terra de referência. Devido a uma impedância não nula que este cabo possui, um ruído de tensão V_{INT} será estabelecido entre a barra comum e o plano de referência, que por sua vez será acoplado a conexão de terra do sistema 2.

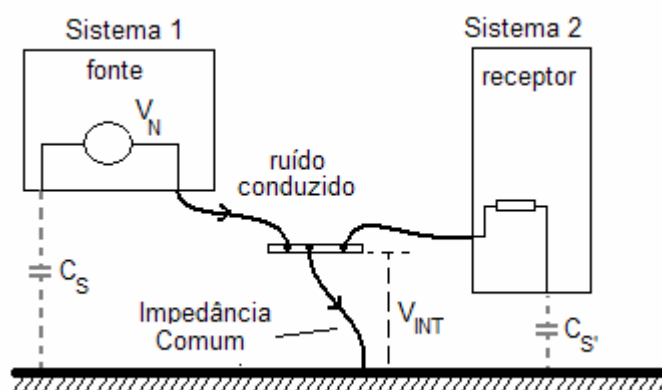


Figura 3.2. – Acoplamento por Impedância Comum

Este mecanismo ocorre em todos os casos de interconexão e, por este motivo, torna-se muito mais freqüente em sistemas que possuem vários módulos conectados a uma barra de terra comum.

Caso este tipo de distúrbio não seja observado é porque, provavelmente, o sistema foi bem projetado com relação aos aspectos de EMC e a impedância não-nula do condutor de aterramento tornou-se imperceptível na freqüência de operação do sistema.

3.4.3. Acoplamento por Campo Próximo

Dispositivos eletroeletrônicos não necessitam estarem conectados para que o acoplamento ocorra. Qualquer corrente que esteja sendo conduzida através de um condutor elétrico gera um campo magnético ao seu redor e qualquer tensão que se estabeleça entre dois condutores geram um campo elétrico entre eles.

Cada um destes campos são capazes de induzir em um circuito secundário um sinal interferente através do acoplamento. O princípio envolvido neste exemplo de EMI é deliberadamente utilizado em transformadores e capacitores. A intensidade deste tipo de acoplamento torna-se mais significantes em altas freqüências.

3.4.3.1. Acoplamento Magnético ou Indutivo

A tensão V_N induzida em um condutor, devido ao fluxo de uma corrente em outro condutor que esteja próximo, segue a equação 3.2., onde M representa a indutância mútua de acoplamento entre os dois condutores.

$$V_N = -M \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.2)$$

A situação mais comum onde se pode observar a presença do acoplamento magnético de um modo mais significativo é quando vários condutores encontram-se dispostos em uma única canaleta. Nesta situação os vários circuitos estão muito próximos uns dos outros e, geralmente, seguindo juntos por distâncias bem longas fazendo com que a indutância mútua entre ele torne-se muito alta.

Esta é uma das razões pela qual se torna recomendável, quando se deseja minimizar os efeitos de EMI, a separação de circuitos e cabos de diferentes classe e funções [7]

Entretanto, se em um circuito em que seus condutores, principal e de retorno, são dispostos juntos ao longo do seu percurso, evitando assim grandes laços, mais conhecidos como “Loop”, o campo magnético gerado pelo fluxo da corrente que flui pelo condutor principal é quase que cancelado pelo campo magnético gerado pela mesma corrente que flui pelo condutor de retorno. Portanto, quanto maior a distância em que estes condutores se encontrem dispostos juntos, mais os campos magnéticos gerados por estes se auto anulam.

Isto porque a indutância mútua entre pares de condutores próximos é inversamente proporcional ao logaritmo do quadrado da distância de separação entre os mesmos.

3.4.3.2. Acoplamento Elétrico ou Capacitivo

Quando uma diferença de tensão é estabelecida entre dois condutores um campo elétrico é criado. Este campo, por sua vez, caso haja um equipamento receptor em sua proximidade, pode induzir uma tensão parasita no condutor deste receptor, o que pode causar uma interferência em seu funcionamento normal.

A tensão induzida neste condutor segue a equação 3.3., onde V_{IN} é a tensão induzida no circuito receptor com impedância Z_{IN} , por um distúrbio de tensão com amplitude V_S acoplada através de uma capacitância mútua C_C .

É importante observar que, de modo diferente do acoplamento magnético ou indutivo apresentado no subitem 3.4.3., a severidade do acoplamento elétrico depende diretamente da impedância de carga, ou seja, circuitos com altas impedâncias são mais susceptíveis.

Outro ponto importante de ser observado é que os circuitos da fonte de interferência e do receptor devem ter em comum a mesmo ponto de referência de aterramento.

$$V_{in} = C_C \cdot Z_{in} \cdot \frac{dV_s}{dt} \quad (3.3)$$

3.4.4. Acoplamento Radiado

Até o momento os fenômenos de acoplamento magnético e elétrico foram tratados de modos separados. Este fenômeno somente é possível quando trabalhamos com correntes e tensões no domínio da estática, onde as frequências são nulas; ou em um domínio

onde as frequências não são nulas, porém, com valores muito baixos. Domínio este também conhecido como “quase-estática”[1]

Quando se trabalha com frequências não nulas, segundo as Equações de Maxwell, os campos elétricos e magnéticos comportam-se de modo complementar, ou seja, a variação de um campo causa o aparecimento do outro e então se torna impossível trabalhar com eles isolados. Daí o surgimento dos campos eletromagnéticos [6].

As componentes elétricas e magnéticas deste campo se propagam por irradiação, através de ondas eletromagnéticas, por todo o espaço ao redor da fonte desta energia. Para isto, as duas componentes vetoriais, uma referente à variação do campo magnético e a outra do campo elétrico, são perpendiculares à direção de propagação desta onda [6].

Ocorrendo este fenômeno, caso haja um equipamento receptor próximo bastante da fonte do distúrbio, o acoplamento será realizado de modo radiado.

O acoplamento radiado entre uma fonte e um receptor segue exatamente o princípio de funcionamento das antenas. Dispositivos elétricos e eletrônicos que não foram concebidos para funcionarem como rádio-transmissor ou como rádio-receptor, raramente, são projetados com a intenção de serem conversores de energia radiada, no entanto, um determinado arranjo de componentes em seu circuito interno pode, de modo não intencional, torná-lo uma antena com alta eficiência em uma determinada faixa de frequência. Será exatamente nesta faixa de frequência que o dispositivo poderá se tornar susceptível a uma EMI.

3.5. Aspectos de Compatibilidade Eletromagnética frente ao uso da tecnologia PLC (Power Line Communication)

Quando usamos a rede de distribuição de energia elétrica como meio de transmissão de dados em alta velocidade para serviços de telecomunicações, é importante ter em mente que esta rede é uma estrutura eletromagneticamente aberta, insuficientemente protegida contra recepção e emissão de sinais interferentes em altas frequências.

Desta forma, a transmissão do sinal PLC poderá interferir tanto em outros sistemas PLC existentes num mesmo segmento de rede, através dos cabos de potência que os

conectam, quanto em sistemas de comunicação sem fio, via campos eletromagnéticos radiados.

Porém, mesmo com o meio de transmissão não sendo o ideal é possível que haja uma coexistência pacífica entre os diversos sistemas de comunicação existentes, o que foi definido neste capítulo como Compatibilidade Eletromagnética.

Para isto é necessário que tanto a interferência eletromagnética conduzida quanto a radiada, gerada pela transmissão do sinal PLC através da rede de distribuição, estejam dentro dos limites aceitáveis para o correto funcionamento de todos os demais sistemas de comunicação que operam na mesma faixa utilizada pela PLC, ou seja, de 1 a 30MHz. Esta condição também deve ser respeitada por todos os outros sistemas de comunicação para evitar que o sistema PLC sofra interferências oriundas destes.

Tais níveis que definem esta interoperabilidade entre os diversos sistemas de comunicação são definidos, através de normas específicas para tal fim, pelos órgãos reguladores oficiais.

3.6. Normas de EMC

Como uma medida prática para assegurar a compatibilidade eletromagnética vem surgindo ao longo dos anos muitas normas de diferentes agências ao redor do mundo.

Estas normas apresentam razões e limites de níveis de emissão eletromagnética para diferentes equipamentos.

A motivação para criação de normas de Compatibilidade Eletromagnética decorre da imposição de requisitos adicionais para o projeto de sistemas eletrônicos, além daqueles necessários para que o sistema funcione. Esses requisitos adicionais originam-se da necessidade de que os sistemas tenham compatibilidade eletromagnética com seu ambiente.

Há, basicamente, duas classes de normas que são usadas em sistemas elétricos e eletrônicos. As normas impostas pelas agências governamentais e as especificadas pelos fabricantes de equipamentos [7].

As normas impostas pelas agências governamentais são normas ditas legais e não podem ser desprezadas. Essas normas possuem o objetivo de controlar as interferências eletromagnéticas geradas e emitidas por um equipamento, e a imunidade deste mesmo equipamento às interferências eletromagnéticas oriundas de outros sistemas ou dele próprio.

Porém, mesmo que um equipamento esteja em total conformidade com estas normas de EMC, não há garantias de que este não vá gerar ou receber EMI. A norma somente garantirá que, caso o equipamento esteja emitindo energia eletromagnética, seja ela irradiada ou conduzida, esta emissão estará abaixo dos limites especificados pelo documento em questão; e, caso ele venha a estar exposto a EMI oriunda de outros equipamentos, ele será imune a elas, dentro dos limites também especificados pelo respectivo documento.

Já as normas impostas pelos fabricantes aos seus equipamentos, em tese, foram, e continuam sendo, criadas para satisfazer o consumidor. Elas são especificadas com o propósito de garantir o fornecimento de equipamentos confiáveis e de qualidade.

Atualmente, com a enorme agilidade nos sistemas de transporte e a globalização da comunicação, o mercado consumidor tomou dimensões continentais, não havendo fronteiras comerciais para seu alcance. Conseqüentemente, as normas de EMC de todos os países são relevantes para os fabricantes de dispositivos e sistemas elétricos e eletrônicos.

Não existe um órgão de controle único com jurisdição sobre todos os sistemas, capaz de determinar as ações necessárias para se obter EMC. Portanto, geralmente, a EMC é obtida por associações industriais, regulamentação voluntária, regulamentação forçada pelos governos ou ainda, acordos negociados entre as partes envolvidas. As faixas de frequências de operação possuem um papel importante para EMC.

É importante ser enfatizado que tais normas estão em constante estado de atualização devido ao aparecimento de novas aplicações e novas tecnologias.

A alocação e distribuição de frequências para operação para os diversos tipos de equipamentos e tecnologias são vinculadas a acordos estabelecidos por tratados

internacionais. Os regulamentos resultantes de tais acordos internacionais são publicados pela "International Telecommunication Union" (ITU).

Nos Estados Unidos o "Federal Communication Commission" (FCC) possui autoridade sobre as comunicações via rádio e via cabo [9]. Neste país é expressamente proibida, sob penas legais, a venda de qualquer dispositivo eletroeletrônico cujas emissões radiadas e conduzidas não tenham sido medidas ou cujos valores estejam acima dos limites estabelecidos pela FCC. Assim, qualquer dispositivo, equipamento ou sistema eletroeletrônico que tenha sido projetado e fabricado sem incorporar os princípios de projeto de EMC, provavelmente não obedecerá aos limites estabelecidos pelo FCC [4].

No Brasil, para equipamentos de telecomunicações, tal função é exercida pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) através da Resolução nº 237, de 09 de novembro de 2000, que regulamenta a certificação de equipamentos de quanto aos aspectos de Compatibilidade Eletromagnética.

Em geral, quando se fala de emissões de energia eletromagnética conduzida e radiada, a norma mais utilizada com relação a equipamentos de Tecnologia da Informação, onde se enquadram os equipamentos PLC, e que por isso será adotada neste trabalho, é a CISPR 22, ou EN 55022.

Os equipamentos de tecnologia da Informação (ITE) são todos os equipamentos projetados com o propósito de recepção, processamento, arquivamento, controle e envio de dados, sendo que, esta última função pode ser realizada através de diferentes interfaces para este propósito [38].

Após muitos anos de estudos e revisões, a utilização desta norma é, praticamente, um consenso mundial. A própria FCC (federal Communication Commission), órgão de fiscalização e controle do espectro eletromagnético nos Estados Unidos da América (EUA), adotou os limites de emissões especificados pela CISPR 22 [3].

Os procedimentos são especificados para a medição dos níveis das emissões eletromagnéticas geradas pelos equipamentos testados e os respectivos limites são impostos para a faixa de frequência que vai de 150kHz até 1GHz para equipamentos de Classes A e B.

Os equipamentos de Classe A são os utilizados em aplicações industriais, e os de Classe B enquadram os demais equipamentos que não sejam de Classe A, ou seja, equipamentos utilizados em áreas residenciais e comerciais em geral. Diante disto, os equipamentos PLC quando utilizados para aplicações internas a edificações são classificados como classe B [39].

Os limites para Classe B são mais rígidos do que os para Classe A, devido a pouca distância existente entre equipamentos em operação simultânea em ambientes residenciais e comerciais típicos.

A seguir estão apresentados os limites especificados pela norma CISPR 22 para os fenômenos de emissão de energia eletromagnética radiada e conduzida.

3.6.1. Limites para Emissões Radiadas para Equipamentos classe B (10m):

Frequência (MHz)	Quase-pico – dB(μV/m)
30 a 230	30
230 a 1000	37

3.6.2. Limites para Emissões Conduzidas para Equipamentos classe B

Porta de Alimentação		
Frequência (MHz)	Quase-pico - dB(μV)	Médio – dB(μV)
0,15 a 0,5	66 a 56	56 a 46
0,5 a 5	56	46
5 a 30	60	50

Porta de Telecomunicação		
Frequência (MHz)	Quase-pico - dB(μV)	Médio – dB(μV)
0,15 a 0,5	84 a 74	74 a 64
0,5 a 30	74	64

Da mesma forma com que as normas especificam limites para emissão de energia eletromagnética de um equipamento ao seu ambiente operacional, também existem

normas que são aplicadas a estes equipamentos de modo a tentar garantir que os mesmos sejam imunes às interferências presentes ao seu redor.

Nestes casos as normas aplicadas são a IEC 61000-4-3, cujo objeto é a comprovação da imunidade do equipamento à atuação dos campos eletromagnéticos radiados, gerados por transmissores de rádio, transceivers, telefones celulares e outras fontes, e a IEC 61000-4-6, cujo objeto é a comprovação da imunidade do equipamento à atuação de distúrbios conduzidos induzidos por rádio-frequência [40][41].

Os níveis de ensaio de acordo com a IEC61000-4-3, tanto para equipamentos classe A quanto para classe B, na faixa de frequência especificada pela norma, ou seja de 80MHz a 1GHz e de 1,4GHz a 2GHz, são apresentados a seguir.

80MHz - 1GHz		1,4 GHz - 2GHz	
Níveis	Valor do Campo Elétrico (V/m)	Níveis	Valor do Campo Elétrico (V/m)
1	1	1	1
2	3	2	3
3	10	3	10
4	-	4	30

Da mesma forma, os níveis de ensaio de acordo com a IEC61000-4-6, tanto para equipamentos classe A quanto para classe B, na faixa de frequência especificada pela norma, ou seja de 150 kHz a 80MHz, são apresentados a seguir.

Faixa de Frequência (MHz)	Nível (V) -Sem modulação	
	Classe A	Classe B
0,15 a 1,8	3	10
1,8 a 80	3	3

Neste trabalho, como o objetivo principal não é a comprovação da conformidade dos equipamentos PLC, tampouco da rede PLC, com as normas de compatibilidade eletromagnética, tais informações, apresentadas acima acerca da CISPR 22, da IEC 61000-4-3 e da IEC 61000-4-6, servirão apenas dados para uma comparação com os níveis de interferência medidos durante o estudo.

3.7. Conclusões

Neste capítulo foram introduzidos fundamentos importantes de EMC e a questão da EMI, juntamente com conceitos básicos associados.

Os fenômenos físicos que, geralmente, dão origem às interferências eletromagnéticas foram abordados. A filosofia e os princípios da EMC foram apresentados. As normas responsáveis pela regulamentação da EMC foram apresentadas, com um foco especial para o controle da emissão de EMI radiada e conduzida, através da norma CISPR 22, e da imunidade dos equipamento e sistemas frente a campos radiados e campos conduzidos por indução de rádio-frequências.

A partir deste ponto, é possível iniciarmos, o que é o foco principal deste trabalho, o estudo da Interferência Eletromagnética, conduzida e radiada, proveniente da implantação da tecnologia Power Line Communication nas redes de alimentação em baixa tensão residencial.

É importante deixar claro que as medidas realizadas e apresentadas no capítulo 4 foram executadas com o objetivo de servirem como uma fonte de dados empíricos para auxiliar no estudo da Power Line Communication.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DAS MEDIDAS - APLICAÇÕES INTERNAS A EDIFICAÇÕES

4.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados das medidas realizadas, com o objetivo de avaliar se a geração não intencional de interferências eletromagnéticas por um sistema PLC, operando no interior de uma edificação, poderá vir a causar degradação no funcionamento de outros sistemas que coabitem o mesmo ambiente operacional.

4.2. Rede Piloto PLC

A rede PLC utilizada para a realização das medidas foi montada no interior do MAGLAB (Laboratório de Eletromagnetismo e Compatibilidade Eletromagnética), laboratório de estudos, simulações e ensaios do GEMCO (Grupo de Engenharia em Compatibilidade Eletromagnética) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

A escolha do laboratório teve a intenção de simular um cômodo de uma residência ou de um hotel, ou ainda um escritório de uma empresa, utilizado por um usuário qualquer da tecnologia PLC para acesso ao serviço de acesso a dados em alta velocidade de transmissão.

Este local contou com outros equipamentos eletroeletrônicos funcionando simultaneamente que estavam sendo alimentados pelo mesmo circuito da rede de energia elétrica utilizado pela rede PLC. Deste modo todos estavam gerando e recebendo EMI uns dos outros, como ocorre em uma situação real.

A rede de alimentação do MAGLAB é formada por eletrodutos de PVC colocados a uma altura de 30 cm do solo e presa à parede por grampos metálicos. Esta estrutura por ser não-embutida estava emitindo e receptando, de modo mais severo, as EMI existentes no ambiente de ensaio. Portanto, tratou-se do pior caso quando pensamos em uso interno da PLC (aplicações Indoor).

O MASTER foi conectado a rede LAN (Local Area Network) do laboratório, realizando assim a interface da rede interna PLC com o servidor de Internet do GEMCO. Este MASTER, por sua vez, também foi conectado à tomada da rede de energia elétrica de alimentação em 220V_{CA} do laboratório, por onde foi injetado, em modo comum fase-neutro, o sinal PLC.

O CPE, de maneira idêntica ao MASTER, também foi conectado a rede de energia elétrica de alimentação em 220V_{CA} do laboratório através de uma tomada comum. Para testar a eficácia do link de comunicação PLC, foi conectado ao CPE um computador pessoal por onde foi realizado o acesso à Internet, via rede PLC, através do servidor de Internet do GEMCO.

A Figura 4.1 ilustra a configuração da rede PLC montada no interior do MAGLAB.

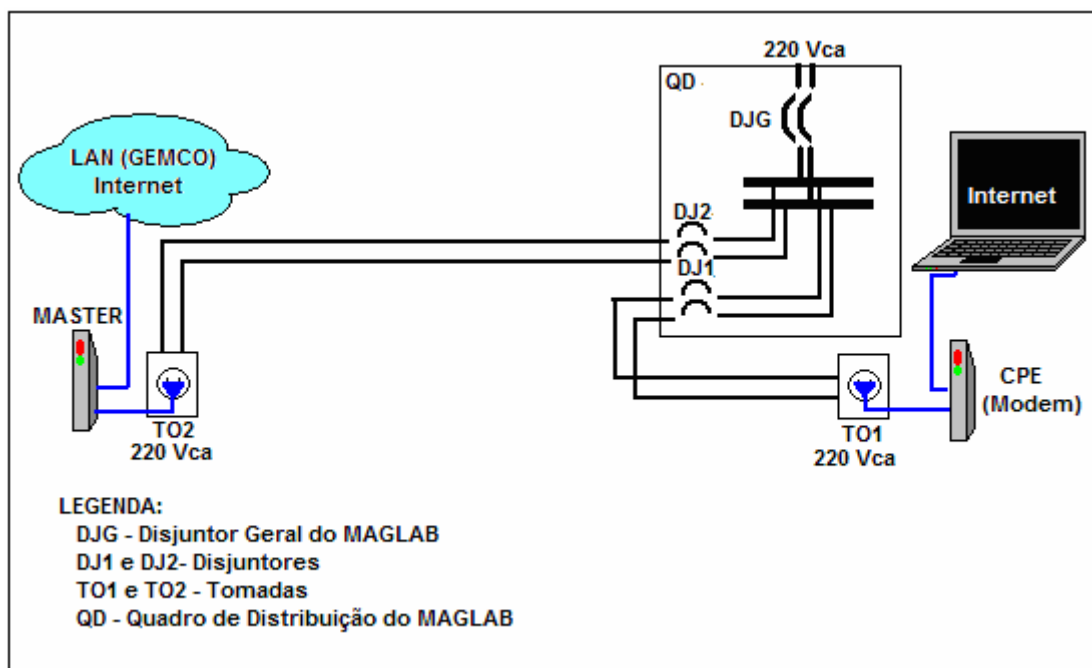


Figura 4.1 – Rede Piloto PLC montada no MAGLAB

Os equipamentos MASTER e CPE, responsáveis por estabelecer o link de comunicação PLC, foram dispostos no interior do laboratório de modo que o sinal estivesse percorrendo um caminho que envolvesse o máximo possível da área do ambiente. O percurso realizado pelos sinais PLC, internamente ao MAGLAB, foi de, aproximadamente, 23m.

Este procedimento foi realizado com o objetivo de tornar mais severo possível a emissão de interferências eletromagnéticas, oriunda da rede PLC. Além disto, um outro motivo para adoção de tal procedimento foi porque, quanto mais abrangente fosse a rede PLC mais equipamentos estariam operando entre o MASTER e o CPE, e assim, do ponto de vista de variação de impedância da rede, mais realista estaria sendo a simulação desejada.

Com esta estrutura montada tornou-se possível levantar os dados que permitiu o estudo do impacto, em termos de interferências eletromagnéticas, da adoção desta nova tecnologia, se restringindo é claro para seu uso em aplicações internas a edificações.

4.3. Procedimentos Utilizados

A fim de proporcionar um melhor entendimento dos procedimentos utilizados nestes conjuntos de medidas será descrito a seguir, de maneira resumida, a ordem das etapas realizadas e os objetivos almejados em cada uma.

ETAPA 1:

Foram realizadas medidas com os equipamentos PLC (MASTER e CPE), isoladamente, operando apenas como cargas puras, ou seja, sem a função de telecomunicação ativada.

Nestas medidas o objetivo foi verificar a conformidade dos equipamentos MASTER e CPE com a CISPR 22 (norma adotada pela Resolução n°. 237, da ANATEL, para equipamentos de Tecnologia da Informação – TI). Nessas medidas foi observado o comportamento dos equipamentos PLC frente a emissão de energia eletromagnética de modo conduzido e radiado.

Após esta etapa, em todas as etapas subseqüentes serão realizadas as medidas não mais com os equipamentos PLC operando isoladamente, e sim com a Rede Piloto PLC, objeto deste trabalho, conforme apresentada no item 4.2 deste capítulo.

ETAPA 2:

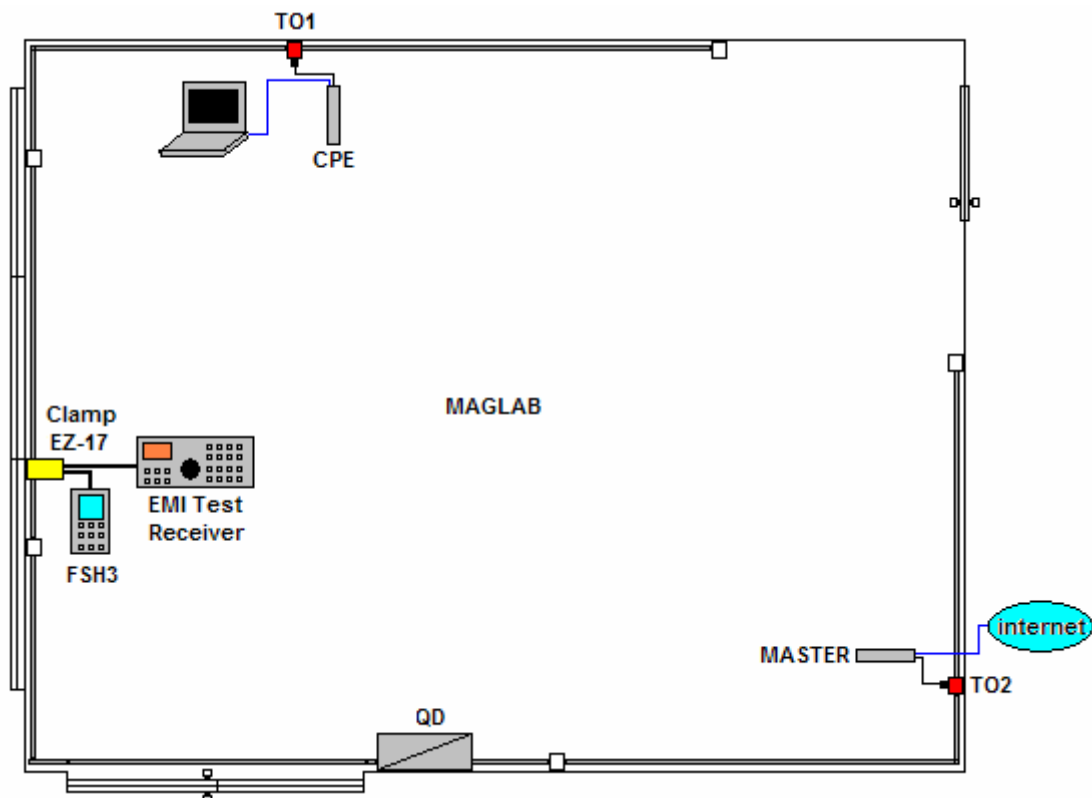
Nesta etapa foram realizadas as medidas para observar o comportamento da Rede Piloto PLC frente à emissão de EMI conduzida dentro do espectro de frequência

máximo permitido, cujos limites encontram-se entre 100kHz e 100MHz, pelos equipamentos utilizados para tal finalidade.

As características de cada equipamento de medida serão descritas no item 4.4 deste capítulo.

Para este conjunto de medidas foram utilizados um analisador de espectro (FSH3), um "Receiver" (EMI Teste Receiver) e uma braçadeira indutiva (Clamp EZ-17).

A figura 4.2 ilustra a disposição, dentro do MAGLAB, dos equipamentos e a configuração da rede para realização das medidas conduzidas.



4.2 – Configuração das medidas de EMI conduzida pela Rede Piloto PLC no MAGLAB

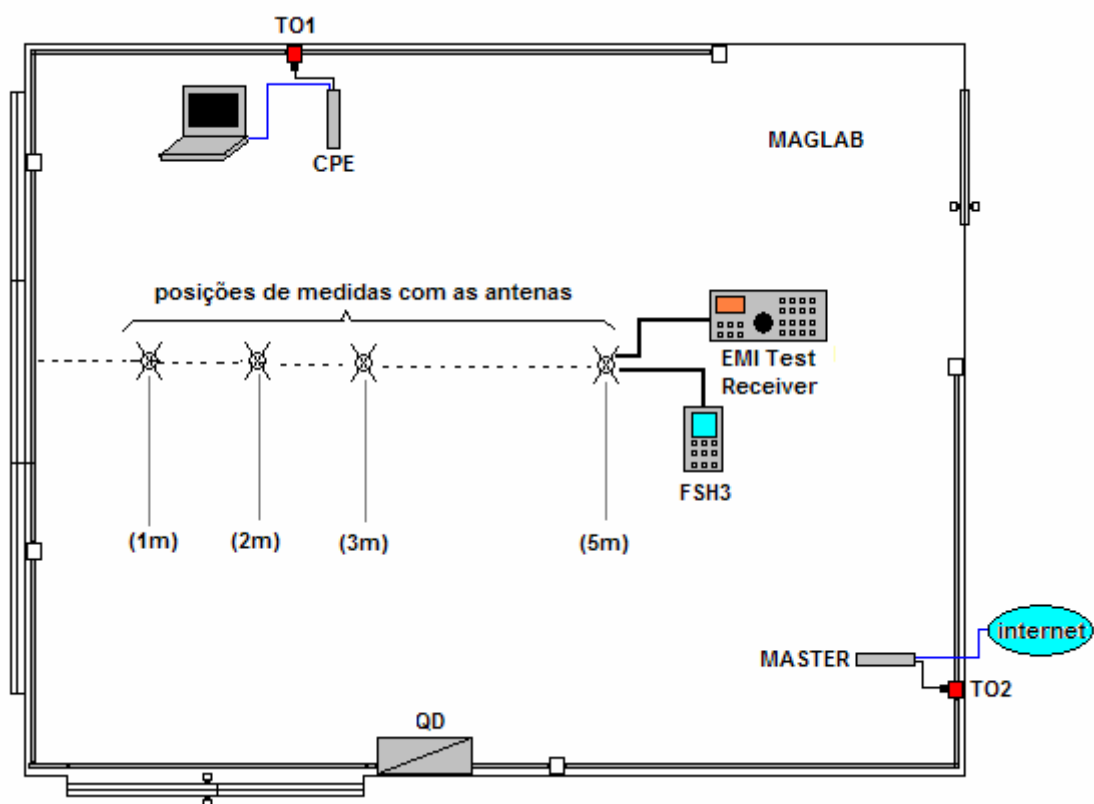
ETAPA 3:

Nesta etapa foram realizadas as medidas para observar o comportamento da Rede Piloto PLC frente à emissão de EMI radiada ao meio ambiente pelos cabos da rede de energia elétrica do MAGLAB.

Para possibilitar uma varredura no espectro de frequência foram utilizadas diferentes antenas, cada uma responsável por uma parcela do espectro total. As características de cada equipamento de medida, e das antenas utilizadas serão descritas no item 4.4.

Para este conjunto de medidas foram utilizados um analisador de espectro (FSH3), um "Receiver" (EMI Teste Receiver) e as antenas (Loop-magnética, Bicônica, Log-periódica e Log-periódica dipolo).

A figura 4.3 ilustra a disposição, dentro do MAGLAB, dos equipamentos e a configuração da rede para realização das medidas radiadas.



4.3 – Configuração das medidas de EMI radiada pela Rede Piloto PLC no MAGLAB

4.4. Equipamentos Utilizados para as Medições

Os equipamentos utilizados na realização das medições são equipamentos de última geração, todos de propriedade da UFSC/EEL/GEMCO, e em total conformidade com as normas adotadas para medições de emissão de energia eletromagnética radiada e conduzidas.

Foi empregada uma câmara GTEM (Giga Transverse Electromagnetic Cell) para realização de um estudo do comportamento dos equipamentos MASTER e CPE, operando isoladamente, como fontes de EMI radiada. Este estudo objetivou a verificação da conformidade dos equipamentos PLC com a CISPR 22 [8], antes que os equipamentos fossem conectados à redes de energia elétrica do MAGLAB.

Uma câmara GTEM [13] consiste em um ambiente de teste blindado cuja principal finalidade é gerar e receptor campos eletromagnéticos em seu interior. No caso das medidas aqui realizadas ela funcionará como receptora das emissões geradas pelos equipamentos.

Neste caso, o equipamento que se deseja observar a intensidade dos campos eletromagnético por ele radiados, é colocado no interior da câmara, de modo que o mesmo fique posicionado de maneira equidistante das paredes internas da GTEM e opere normalmente de acordo com sua função operacional, conforme ilustrado na Figura 4.4.

Dentro da câmara GTEM são realizadas medidas nos eixos de coordenadas x, y e z para um mapeamento total do equipamento.

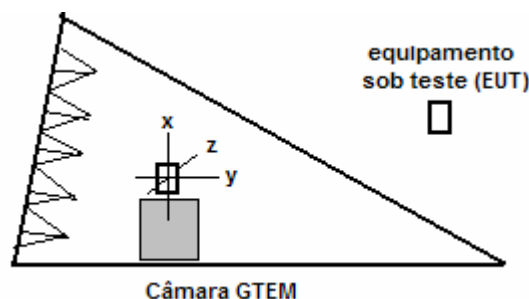


Figura 4.4 – Câmara GTEM da Rohde & Schwarz

Tanto para realização das medidas conduzidas quanto para as radiadas, foram utilizados o Analisador de Espectro portátil, modelo R&S-FSH3, com faixa de frequência de operação de 100kHz a 3GHz, e o Receptor EMI Test Receiver ESPC com faixa de frequência de operação 9kHz a 2.5GHz, conforme ilustrado nas Figuras 4.5 e 4.6.

O analisador de espectro FSH3 foi usado em uma primeira etapa, em todas as medidas,(conduzida e radiadas) para a detecção prévia da presença das interferências no espectro de frequência de interesse.

Após esta avaliação do espectro com o FSH3, foi usado o EMI Test Receiver para, agora sim, realizar a medição dos campos eletromagnéticos conduzidos e radiados dentro das respectivas faixas de frequência de operação da braçadeira indutiva (EMI conduzida) e das antenas (EMI radiada).



Figura 4.5 – Analisador de Espectro, modelo FSH3 da Rohde & Schwarz



Figura 4.6 – Receptor de EMI, modelo EMI Test Receiver ESPC da Rohde & Schwarz

Sendo assim, para realização das medidas de EMI conduzida, tanto pelos equipamentos PLC isolados (conformidade com a CISPR) quando pela Rede PLC Piloto (objeto deste trabalho), foi utilizada uma braçadeira indutiva, também conhecida como "Clamp", dispositivo que possui o mesmo princípio de funcionamento das unidades de acoplamento indutivo apresentadas no capítulo 1.

Porém, neste caso, a única diferença está no fato deste dispositivo, ao invés de injetar sinal PLC em um condutor, está sendo utilizado para recepção, ou leitura, dos sinais conduzidos através de um condutor.

A “Clamp” indutiva utilizada é a modelo EZ-17, da Rohde & Schwarz, com faixa de frequência de operação de 100kHz a 100MHz, conforme ilustrado na Figura 4.7 .



Figura 4.7 – Clamp EZ-17 da Rohde & Schwarz

Já para as medidas da EMI radiada gerada pela rede PLC, visando a realização de uma varredura na faixa de frequência de 150kHz a 3GHz, e seguindo o procedimento descrito anteriormente com o uso do FSH3 e do EMI Test Receiver, foram usadas 04 antenas. Cada uma possuindo sua faixa de frequência de operação específica.

A seguir as figuras 4.8 a 4.11 apresentam as antenas utilizadas para as medidas de EMI radiada.

A Figura 4.8 ilustra a antena Loop-magnética, modelo HFH2-Z2, da Rohde & Schwarz, utilizada nas medições na faixa de frequência de 150kHz a 30MHz.



Figura 4.8 – Antena HFH2-Z2 da R&S

A Figura 4.9 ilustra a antena Bicônica modelo HK116, da Rohde & Schwarz, utilizada nas medições para a faixa de frequência de 30MHz a 300MHz.



Figura 4.9 - Antena HK116 da R&S

A Figura 4.10 ilustra a antena Log-periódica, modelo HL223, da Rohde & Schwarz, utilizada nas medições para faixa de frequência de 300MHz a 1,3GHz.



Figura 4.10 - Antena HL223 da R&S

Por fim, a Figura 4.11 ilustra a antena Log-Periódica Dipolo, ou também conhecida como Bico de Pato, modelo HL040, da Rohde & Schwarz, utilizada nas medições para faixa de frequência de 1,3GHz a 3GHz.



Figura 4.11 - Antena HL040 da R&S

4.5. Ensaios de Conformidade dos Equipamentos MASTER e CPE com a CISPR 22

A configuração dos ensaios e dos equipamentos utilizados nestas medidas foi feita de acordo com as especificações para tais fins na norma CISPR 22 [8]. Tal procedimento foi realizado com o objetivo principal de conhecer o comportamento dos equipamentos acima citados como simples emissores de EMI, antes que estabelecêssemos a rede PLC no interior do MAGLAB.

Para as medidas de conformidade da EMI Conduzida foram usados a Clamp EZ-17 e o EMI Test Receiver ESPC. Já para as medidas de conformidade da EMI radiada foram usados uma Câmara GTEM e o EMI Test Receiver ESPC. O resultado destas medidas mostrou que, com relação à EMI conduzida, tanto o MASTER quanto o CPE estão dentro dos limites especificados pela CISPR 22 para equipamentos de uso residencial, ou seja Classe B [8]. As figuras 4.12-A e 4.12-B ilustram os resultados obtidos.

Nos seguintes gráficos estarão representados os valores calculados de "quase-pico" (EN_V_QP) e "médios" (EN_V_AV). Também, como informações complementar e novamente relacionadas aos gráficos a seguir, nos eixos verticais estarão representados os valores de amplitude dos campos e nos eixos horizontais os valores de frequência.

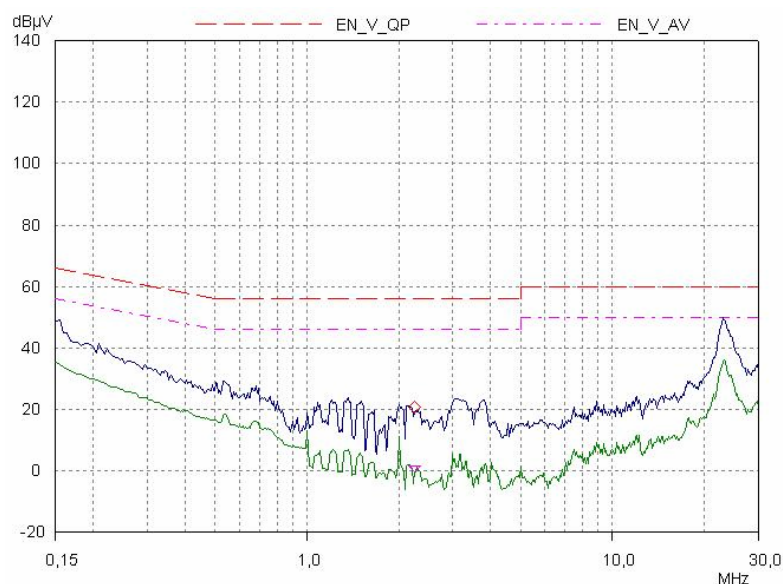


Figura 4.12-A – Emissão Conduzida (porta de alimentação) do equipamento MASTER

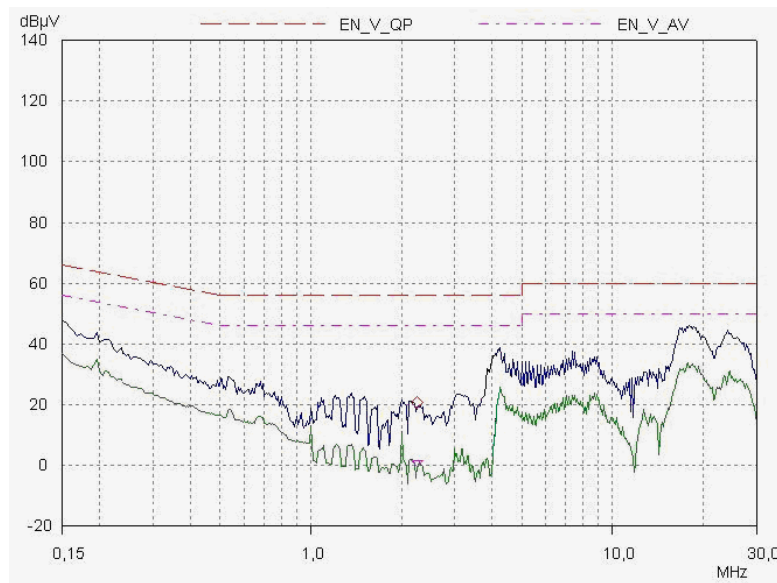


Figura 4.12-A – Emissão Conduzida (porta de alimentação) do equipamento CPE

Porém, de acordo com as Figuras 4.13-A e 4.13-B, com relação à EMI radiada, foram observados pontos de não conformidade com a mesma norma.

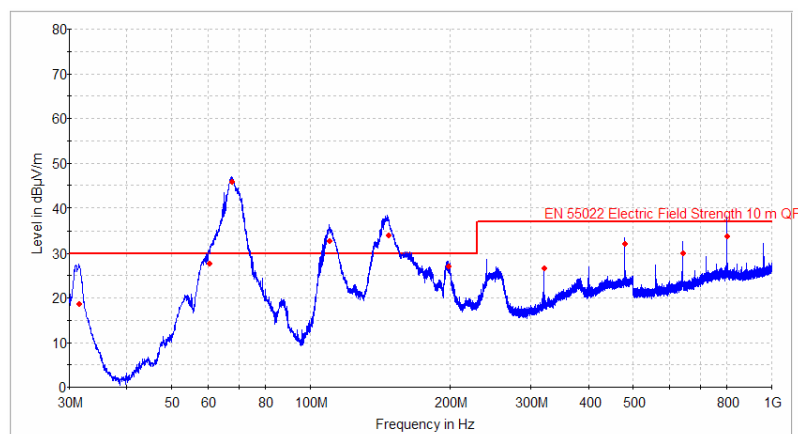


Figura 4.13-A – Emissão Radiada do equipamento MASTER

Para a medida de EMI radiada, realizada com o MASTER, foram encontrados vários pontos acima dos limites especificados pela CISPR 22 para equipamentos de uso residencial.

Ponto 1: $F_1 = 67,50 \text{ MHz} \rightarrow 45,9 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ (Quase-pico);

Ponto 2: $F_2 = 109,98 \text{ MHz} \rightarrow 32,9 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ (Quase-pico);

Ponto 3: $F_3 = 147,18 \text{ MHz} \rightarrow 34 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ (Quase-pico).

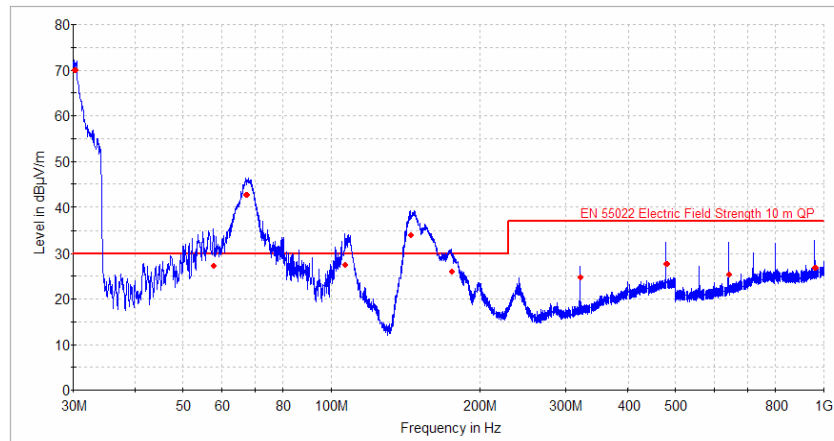


Figura 4.13-B – Emissão radiada do equipamento CPE

Do mesmo modo, para a medida de EMI radiada realizada com o CPE, também foram encontrados alguns pontos acima dos limites especificados pela CISPR 22 para equipamentos de uso residencial.

Ponto 1: $F_1 = 30,18 \text{ MHz} \rightarrow 70,0 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ (Quase-pico);

Ponto 2: $F_2 = 62,32 \text{ MHz} \rightarrow 42,7 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ (Quase-pico);

Ponto 3: $F_3 = 144,90 \text{ MHz} \rightarrow 34,1 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ (Quase-pico).

Este resultado indica que os equipamentos MASTER e CPE, quando conectados isoladamente na rede de alimentação, radiam energia eletromagnética para o ambiente a sua volta acima dos níveis aceitáveis para este tipo de equipamento, podendo causar interferência no funcionamento de outros equipamentos ou sistemas.

4.6. Medição da EMI Conduzida gerada pela rede PLC Piloto

A configuração da Rede PLC Piloto e dos equipamentos utilizados nestas medidas encontram-se descritas no item 4.3 deste capítulo.

Diante disto, antes que as medidas fossem realizadas, foi feito um levantamento na rede de alimentação do laboratório utilizando o analisador de espectro FSH3 e verificou-se que apenas na faixa de 1MHz a 30MHz eram observados sinais interferentes devido ao uso da estrutura física como meio de comunicação PLC.

Tal constatação, que já era de se esperar uma vez que a faixa de operação da tecnologia PLC aqui utilizada é exatamente entre 1MHz e 30MHz, deveu-se a comparação entre o ruído de fundo existente na redes de energia elétrica antes da Rede PLC Piloto ser ativada e o perfil do espectro de frequência da redes de energia elétrica do MAGLAB após a Rede PLC Piloto ser ativada..

As Figuras 4.14-A, 4.14-B, 4.14-C e 4.14-D apresentam o resultado acima descrito.

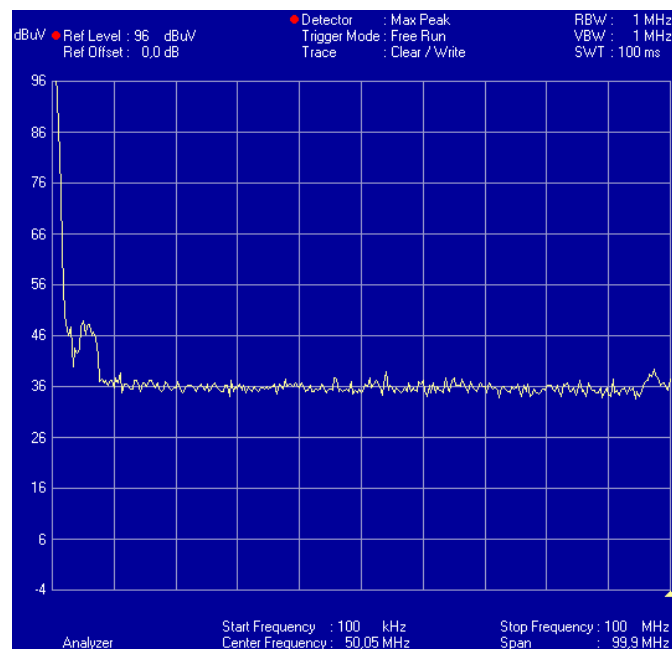
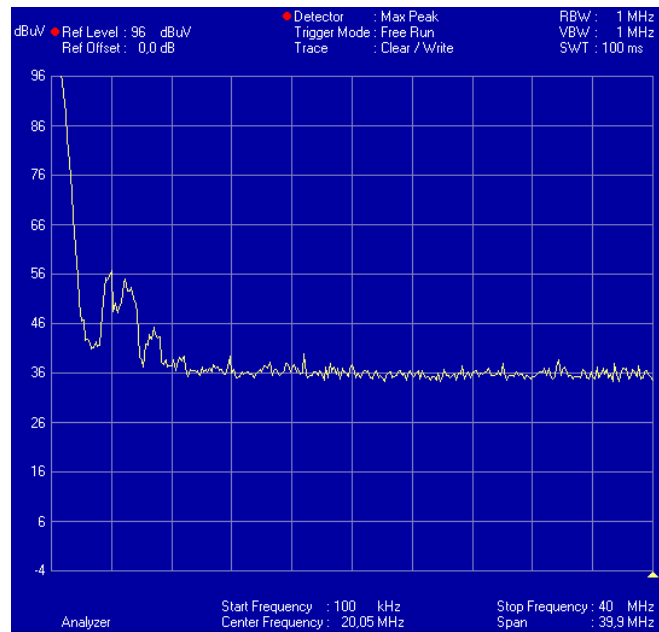
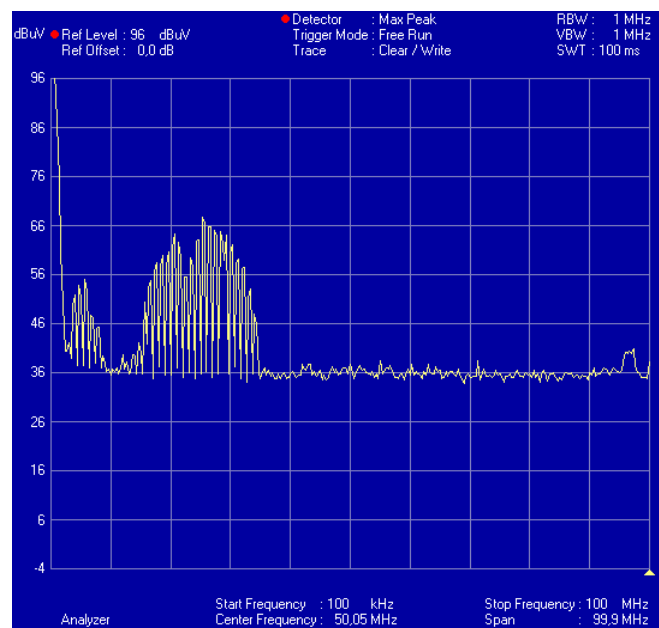


Figura 4.14-A – Ruído de fundo presente na rede de alimentação do MAGLAB – 100kHz a 100MHz (Máxima varredura possível)



**Figura 4.14-B – Ruído de Fundo presente na rede de alimentação do MAGLAB
– Zoom realizado na faixa de 100kHz a 40MHz**



**Figura 4.14-C – Rede PLC ativa com transmissão de dados (Acesso a Internet
através da rede PLC) – 100kHz a 100MHz (Máxima varredura possível)**

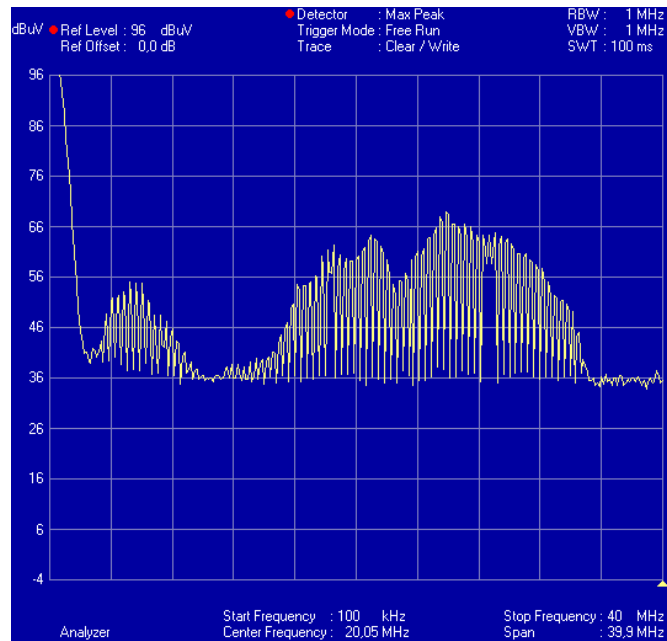


Figura 4.14-D – Rede PLC ativa com transmissão de dados (Acesso a Internet através da rede PLC) – Zoom realizado na faixa de 100kHz a 40MHz

Após esta etapa de comprovação da existência dos sinais PLC na redes de energia elétrica, e agora com os equipamentos MASTER e CPE ligados e o link PLC estabelecido, foram realizadas novas medidas de EMI conduzida com a Rede PLC Piloto sem transmissão de dados (Stand by) e com transmissão de dados (acesso a Internet).

Tal procedimento objetivou verificar se a transmissão de informações, além da comunicação operacional necessária entre os equipamentos PLC, geraria, ou não, mais interferência para a rede de alimentação que ora serve como meio físico para comunicação PLC.

De modo complementar, com a finalidade de tornar mais eficiente uma comparação entre a interferência gerada pela Rede PLC Piloto e a interferência gerada por equipamentos usualmente utilizados no nosso dia a dia, foram feitas mais duas medidas.

Uma medida com a rede de energia alimentando apenas uma fonte retificadora CA/CC, utilizada em equipamentos eletroeletrônicos e encontrada à venda no comércio local, e outra com a rede transmitindo dados, ou seja, operando como rede PLC e alimentando, simultaneamente, a mesma fonte.

As figuras a seguir ilustram os resultados das medidas acima citadas.

A Figura 4.15 mostra a medida do ruído de fundo existente na rede de alimentação do Laboratório antes da Rede PLC Piloto ser ativada. É possível notar que não há presença de nenhum ponto acima dos níveis permitidos pela CISPR para tal fenômeno, neste gráfico representado pelos traços vermelhos e rosas conforme especificado em sua legenda.

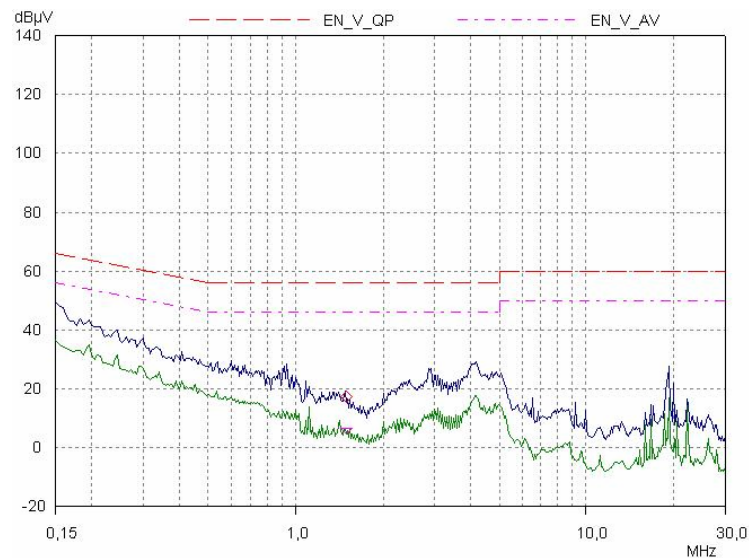


Figura 4.15 – Ruído de Fundo presente na rede de alimentação do MAGLAB

A Figura 4.16 mostra o sinal injetado na rede de alimentação do laboratório após a Rede PLC Piloto ser ativada. Neste caso ainda não está havendo transmissão de dados, somente a comunicação operacional básica entre o MASTER e o CPE.

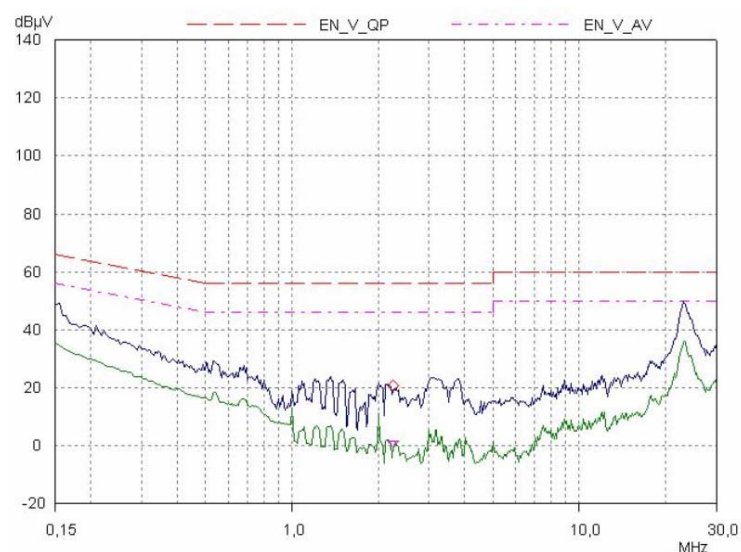
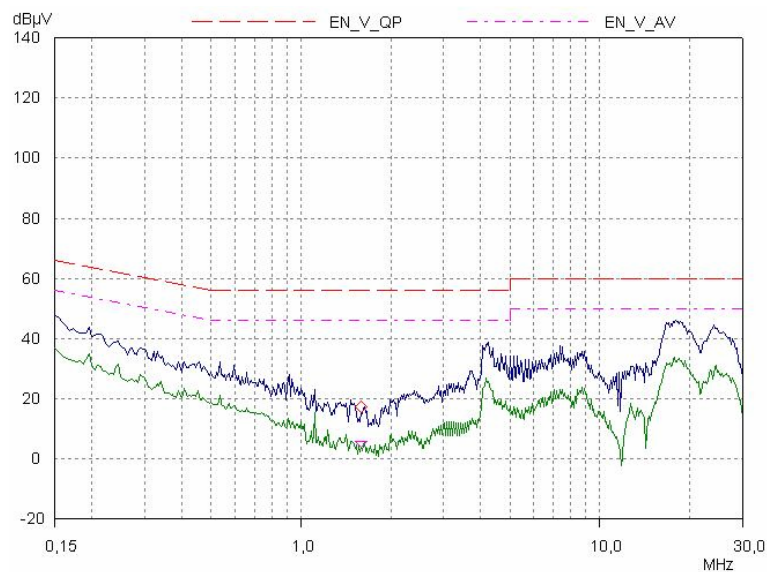


Figura 4.16 – Rede PLC Piloto ativada sem transmissão de dados (Stand by)

Novamente é possível notar que não há presença de nenhum ponto acima dos níveis permitidos pela CISPR 22 para tal fenômeno.

A Figura 4.17 mostra o resultado das medidas da Rede PLC Piloto, agora com transmissão de dados. Neste ensaio havia um microcomputador conectado ao CPE que, através do MASTER, conectado à rede LAN do MAGLAB, estava acessando a Internet.

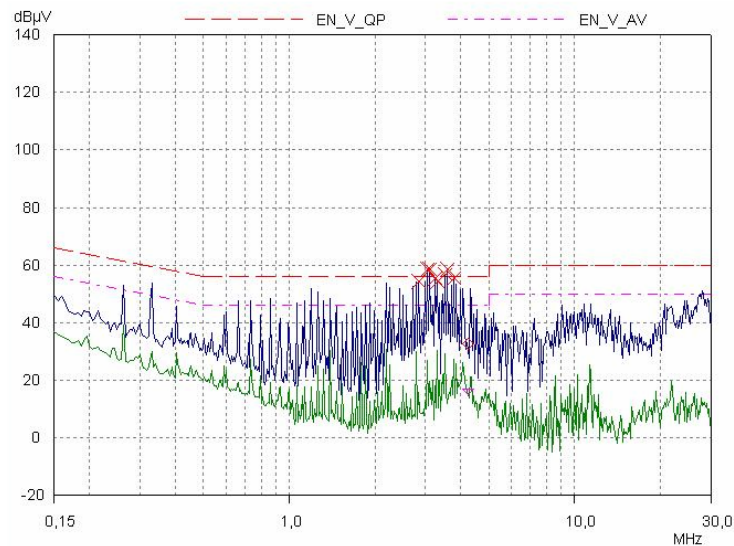
**Figura 4.17 – Rede PLC Piloto ativada e com transmissão de dados (Acesso a Internet através da rede PLC)**

Mesmo com tráfego de informações sendo realizado através dos cabos de potência é possível observar que a rede PLC não gera níveis de interferência suficientes ao ponto de interferir no funcionamento de equipamentos que estejam sendo alimentados pela mesma rede de energia.

É importante ficar claro que tal afirmação somente pode ser feita se tais equipamentos estiverem em conformidade com a norma IEC 61000-4-6, conforme descrito no item 3.6 do Capítulo 3.

Na figura 4.18, os equipamentos MASTER e CPE foram desligados, desativando assim a Rede PLC Piloto, e foi conectada a mesma rede de energia uma fonte retificadora CA/CC.

Nesta medida foi observada uma quantidade muito grande de EMI injetada na rede de alimentação do laboratório que em alguns pontos entre 3MHz e 4 MHz, conforme indicado na tabela logo abaixo do gráfico, chegaram a ultrapassar os limites permitidos pela CISPR 22 para este tipo de emissão.



Frequency MHz	Peak dBµV
3,0435	58,58
3,111	58,49
3,5115	56,88
3,57	58,57

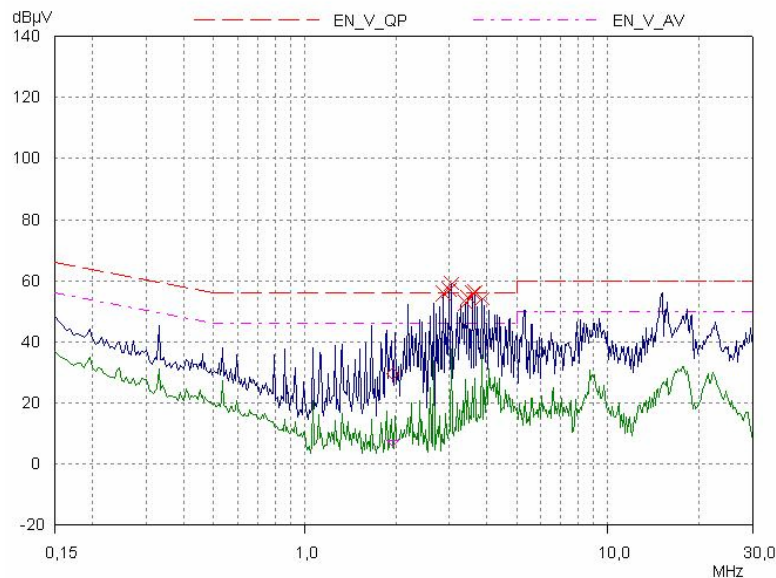
Figura 4.18 – Rede de Alimentação apenas alimentando uma fonte retificadora CA/CC

Após a realização desta medida, os equipamentos MASTER e CPE foram novamente conectados a rede de energia juntamente com a Fonte CA/CC. Neste momento a Rede PLC Piloto foi ativada e fez-se novamente trafegar dados através dela (acesso à Internet pelo microcomputador conectado ao CPE).

A Figura 4.19, mostra o resultado das medidas com esta nova configuração de ensaio, ou seja a Rede PLC Piloto e a Fonte Retificadora operando simultaneamente.

Comparando as Figuras 4.18 e 4.19, verificou-se que houve um pequeno incremento nos níveis de EMI conduzida devido à ativação da Rede PLC Piloto em paralelo com a fonte retificadora CA/CC. Novamente, entre 3MHz e 4MHz, foram observados pontos

acima dos limites permitidos pela CISPR 22 para EMI conduzida, porém, é clara a constatação de que tais interferências são características da fonte retificadora e não da Rede PLC Piloto.



Frequency MHz	Peak dBµV
2,985	56,98
3,048	59,15
3,579	56,11
3,6465	56,31

Figura 4.19 – Rede PLC Piloto ativada operando simultaneamente com uma fonte retificadora CA/CC

Diante do exposto é possível verificar que, do ponto de vista da Interferência Eletromagnética Conduzida, a tecnologia PLC aqui estudada e utilizada para implantação da Rede PLC Piloto, quando utilizada em ambientes internos a edificações, não gera distúrbios suficientemente potentes para interferir no funcionamento de outros equipamentos ou sistemas que estejam sendo alimentados pela mesma rede de energia elétrica e que estejam em conformidade com a IEC 61000-4-6.

Constatou-se também que, atualmente no Brasil, devido à ausência de um controle obrigatório dos níveis para emissão de EMI, gerados por equipamentos eletroeletrônicos, são encontrados no mercado equipamentos, como o caso da fonte

retificadora utilizada nestes ensaios, que são muito mais prejudiciais às redes de distribuição de energia do que a utilização da PLC.

Porém, é preciso deixar registrado que não são todas as fontes comercializadas que geram estes níveis de interferência. Neste caso presenciado durante os ensaios, a fonte utilizada, coincidentemente, não estava em conformidade com as normas de EMC.

4.7. Medição da EMI Radiada gerada pela rede PLC Piloto

De modo similar ao item anterior, antes que as medidas de EMI radiada fossem realizadas, utilizando o analisador de espectro FSH3 em conjunto com as antenas específicas para cada faixa de frequência do espectro total de análise, foi feito um levantamento objetivando a verificação de quais faixas de frequências eram observadas a presença dos campos eletromagnéticos irradiados pela Rede PLC Piloto.

Foram realizadas medidas com as antenas nas polarizações horizontais e verticais, a 1m, 2m, 3m e 5m de distância de um ponto escolhido da rede PLC conforme descrito no item 4.3 deste capítulo.

Por limitação de espaço físico no interior do laboratório, não foi possível realizar medidas a 10m de distância de nenhum ponto na rede PLC. E, por limitação operacional das antenas aqui empregadas, não foi possível realizar medidas a distâncias menores que 1m da Rede PLC Piloto.

Neste levantamento verificou-se que a 1m as medidas ficaram imprecisas devido às antenas não serem apropriadas para medição de campos próximos. Já nas medidas realizadas a 2m e 3m não foram observadas nenhuma variação na intensidade nem nos espectro de frequência dos campos detectados e a 5m observou-se uma atenuação na intensidade dos mesmos.

Diante destas informações foi escolhido 3m como distância padrão para realização das medidas da EMI radiada pela Rede PLC Piloto.

Outro resultado importante deste levantamento foi que, em relação ao ruído de fundo existente no laboratório, nas faixas de frequências de 300MHz a 1,3GHz e 1,3GHz a 3GHz não foram detectadas a presença de emissões de EMI radiada pela Rede PLC

Piloto. Tal constatação já era de se esperar uma vez que a faixa de frequência operacional da tecnologia PLC aqui empregada está limitada entre 1MHz e 30MHz.

Portanto, somente serão apresentados os resultados em que se observou a influência da aplicação da PLC na rede de alimentação de energia elétrica do MAGLAB.

A seguir serão apresentados os resultados das medidas, por faixas de frequências, de acordo com as frequências operacionais das antenas utilizadas durante sua realização, ou seja, de 150kHz a 30MHz para a antena Loop-magnética (modelo HFH2-Z2 da R&S), e de 30MHz a 300MHz para a antena Bicônica (modelo HK116 da R&S).

4.7.1. Medição da EMI Radiada pela Rede PLC Piloto entre 150kHz e 30MHz

Para realização destes ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos de medidas abaixo listados:

- Antena Loop- Magnética, modelo HFH2-Z2 da Rodhe & Schwarz;
- Analisador de Espectro Portátil, modelo FSH3 da Rodhe & Schwarz;
- Receptor de EMI, modelo EMI Test Receiver ESPC (9kHz a 2.5GHz) da Rodhe & Schwarz.

Tanto os levantamentos quanto as medidas foram realizadas com a antena Loop-magnética posicionada a 0° e 90°, e nas polarizações vertical e horizontal. Como os melhores resultados foram observados na polarização horizontal, somente estes serão apresentados.

A Figura 4.20 apresenta o levantamento do ruído de fundo existente no MAGLAB antes da Rede PLC Piloto estar ativada na redes de energia elétrica do laboratório.

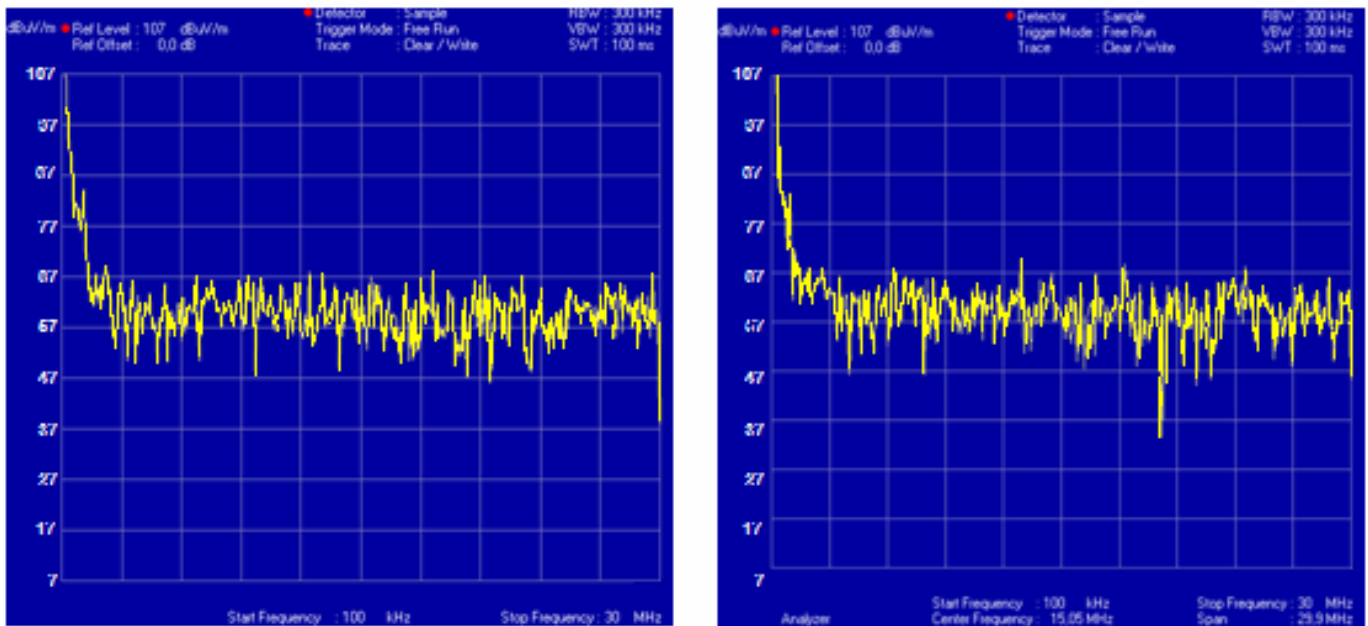


Figura 4.20 – Ruído de Fundo (antena a 0° e 90°)

As figuras 4.21 e 4.22 apresentam, respectivamente, os levantamentos da EMI radiada pela Rede PLC Piloto, ativada, sem tráfego de dados e com tráfego de dados (acesso à Internet), respectivamente.

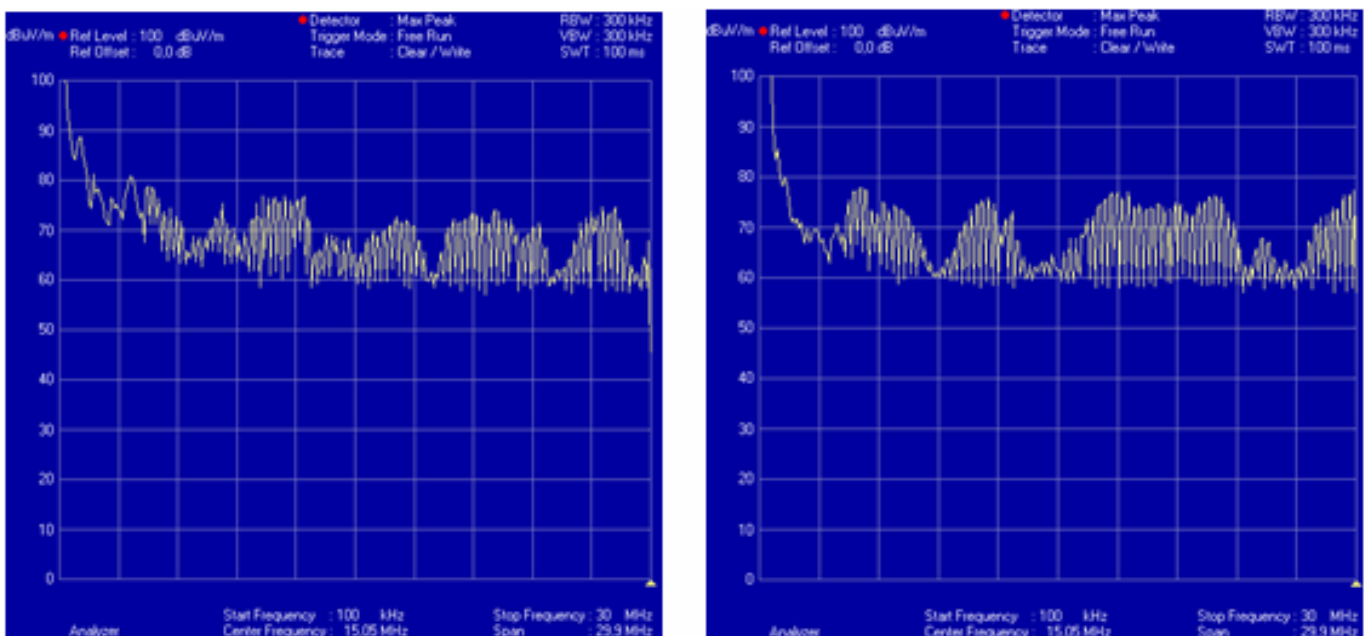


Figura 4.21 – Rede PLC Piloto sem tráfego de dados (antena a 0° e 90°)

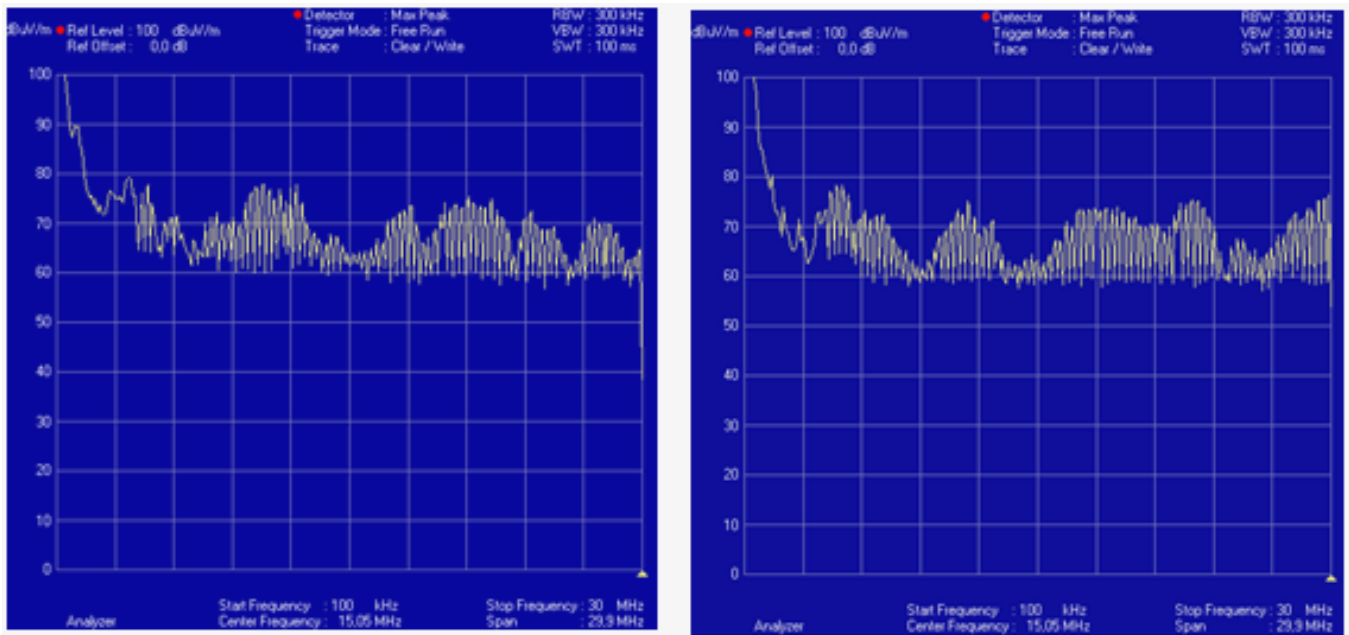


Figura 4.22 – Rede PLC Piloto com tráfego de dados (antena a 0° e 90°)

Da mesma forma que no item 4.6 deste capítulo, com a finalidade de tornar mais eficiente a comparação entre a interferência gerada pela rede PLC e a interferência gerada por equipamentos usualmente utilizados no nosso dia a dia, foi feito um ensaio complementar.

Para isto, a rede PLC foi desativada, e à rede de energia foi conectado um Liquidificador.

O fato de este equipamento ser composto por um motor elétrico com um rotor, onde há constantemente o aparecimento de arcos elétricos emitindo, tanto de forma conduzida como radiada, energia com altos níveis de ruídos eletromagnéticos ao seu ambiente operacional, fez com que fosse escolhido.

A Figura 4.23 apresenta o resultado deste levantamento.

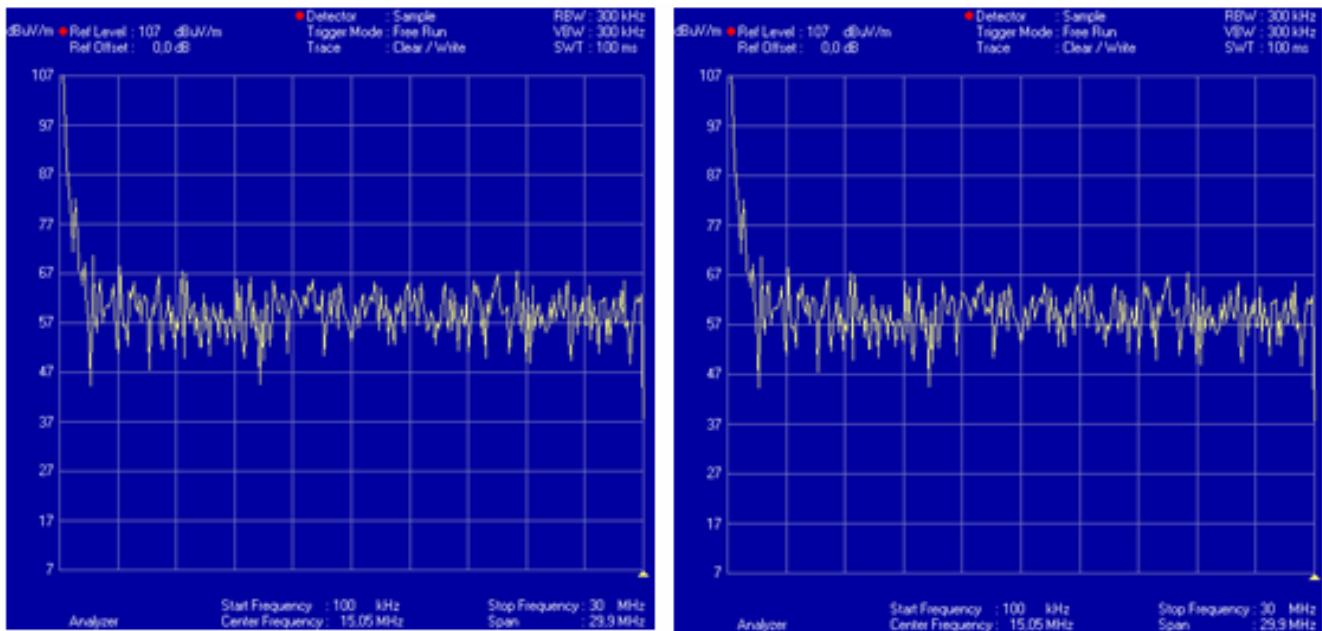


Figura 4.23 – Espectro de Frequência de um Liquidificador (antena a 0° e 90°)

Ao comparar estes gráficos com os gráficos relativos ao ambiente eletromagnético característico do MAGLAB, ilustrados através da figura 4.20, verifica-se que a energia eletromagnética radiada ao ambiente pelo uso do liquidificador não altera a forma do espectro de frequência característico do ruído de fundo do laboratório.

Assim sendo, em princípio, sempre lembrando que esta constatação é relativa a emissão de EMI radiada, o uso deste equipamento eletrodoméstico não vem a causar maiores distúrbios em outros equipamentos, ou sistemas que estejam funcionando próximos, do que o próprio ambiente eletromagnético do laboratório.

Após estes levantamentos, deu-se início às medidas com o EMI Teste Receiver ESPC para que então fosse possível realizar uma quantificação do impacto desta interferência ao ambiente.

A seguir, através das figuras 4.24 a 4.29, seguem apresentados os resultados obtidos nas medidas aqui tratadas.

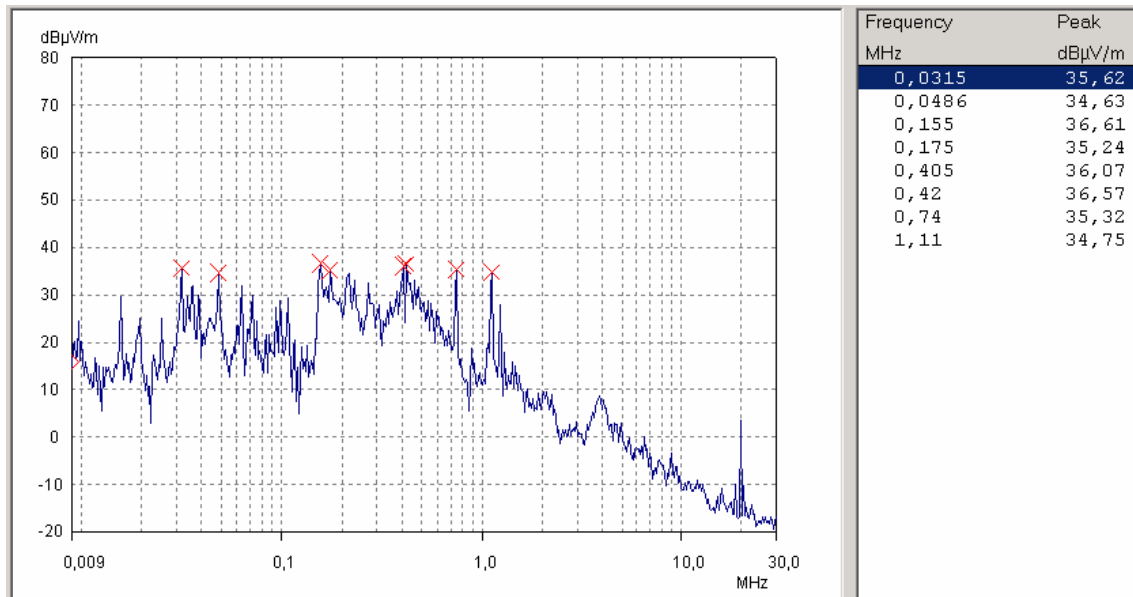


Figura 4.24 – Ruído de Fundo (antena a 0°)

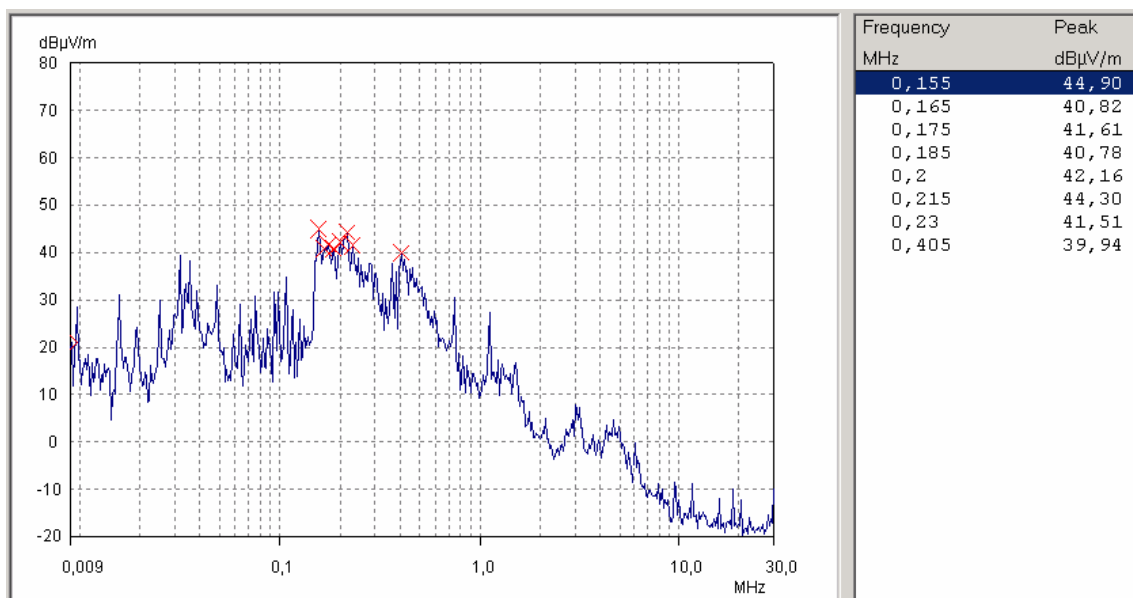


Figura 4.25 – Ruído de Fundo (antena a 90°)

As figuras 4.24 e 4.25 apresentam o perfil do ambiente eletromagnético característico existente no interior do MAGLAB.

Observando as duas medidas é possível verificar que os sinais mais interferentes encontram-se entre 150kHz e 400kHz, aproximadamente.

As figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 apresentam, respectivamente, as medidas da EMI radiada pela Rede PLC Piloto operando sem tráfego de dados (stand by) e com tráfego de dados (acesso a Internet), simultaneamente.

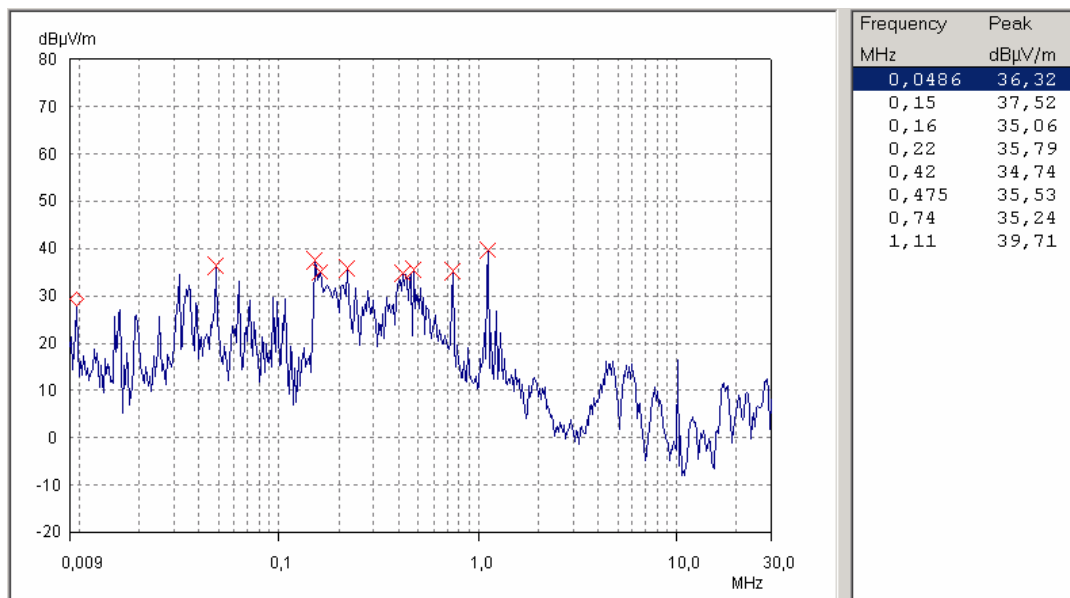


Figura 4.26 – Rede PLC sem tráfego de dados (antena a 0°)

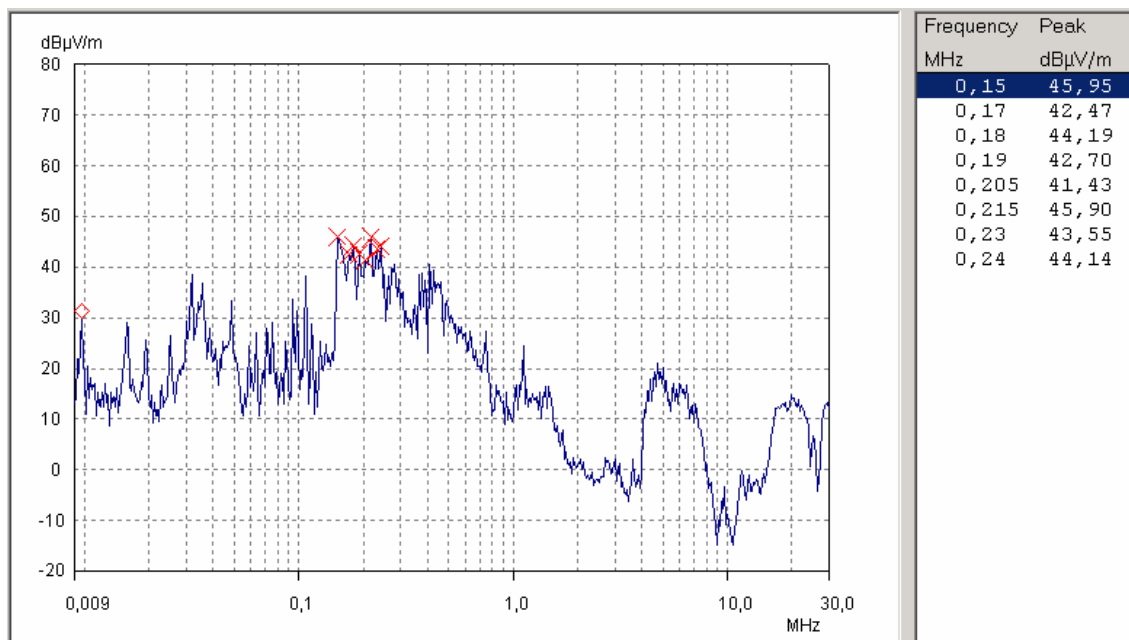


Figura 4.27 – Rede PLC sem tráfego de dados (antena a 90°)

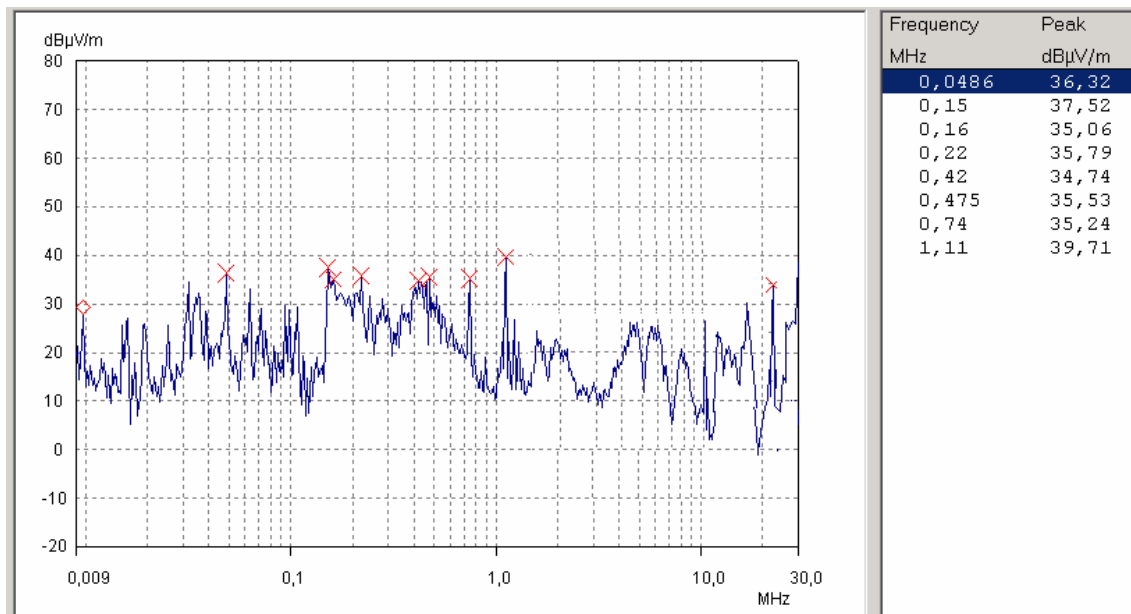


Figura 4.28 – Rede PLC com tráfego de dados (antena a 0°)

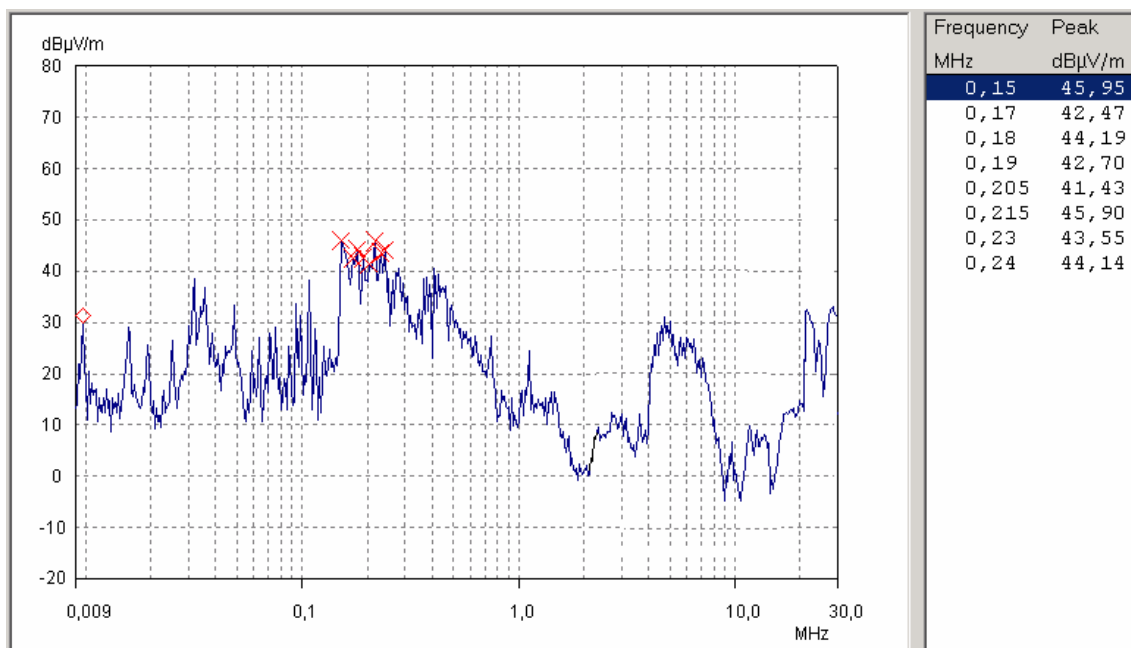


Figura 4.29 – Rede PLC com tráfego de dados (antena a 90°)

Comparando as figuras acima, é possível verificar que, mesmo havendo uma mudança no espectro de frequência entre 1 MHz e 30MHz, o que era de se esperar uma vez que se trata da faixa de frequência de operação da Rede PLC Piloto; tanto a rede PLC operando sem tráfego de dados quanto ela operando com tráfego de dados, os

sinais radiados mais interferentes possuem valores aproximados, quando comparado as medidas realizadas com o ruído de fundo.

4.7.2. Medição da EMI Radiada pela Rede PLC Piloto entre 30MHz e 300MHz

Para realização destes ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos de medidas abaixo listados:

- Antena Bicônica, modelo HK116 da Rodhe & Schwarz;
- Analisador de Espectro Portátil, modelo FSH3 da Rodhe & Schwarz;
- Receptor de EMI, modelo EMI Test Receiver ESPC (9kHz a 2.5GHz) da Rodhe & Schwarz.

Com os mesmos procedimentos adotados no subitem 4.7.1, porém para uma faixa de frequência diferente, ou seja de 30MHz a 300MHz, tanto os levantamentos quanto as medidas, foram agora realizadas com a antena Bicônica (modelo HK116 da Rohde & Schwarz) nas polarizações vertical e horizontal.

Os melhores resultados foram observados com a antena na polarização horizontal e, por este motivo, serão estes os apresentados.

A Figura 4.30 apresenta o levantamento do ruído de fundo ambiente realizado com o analisador de espectro FSH3 antes dos equipamentos MASTER e CPE estarem alimentados pela rede de energia do laboratório.

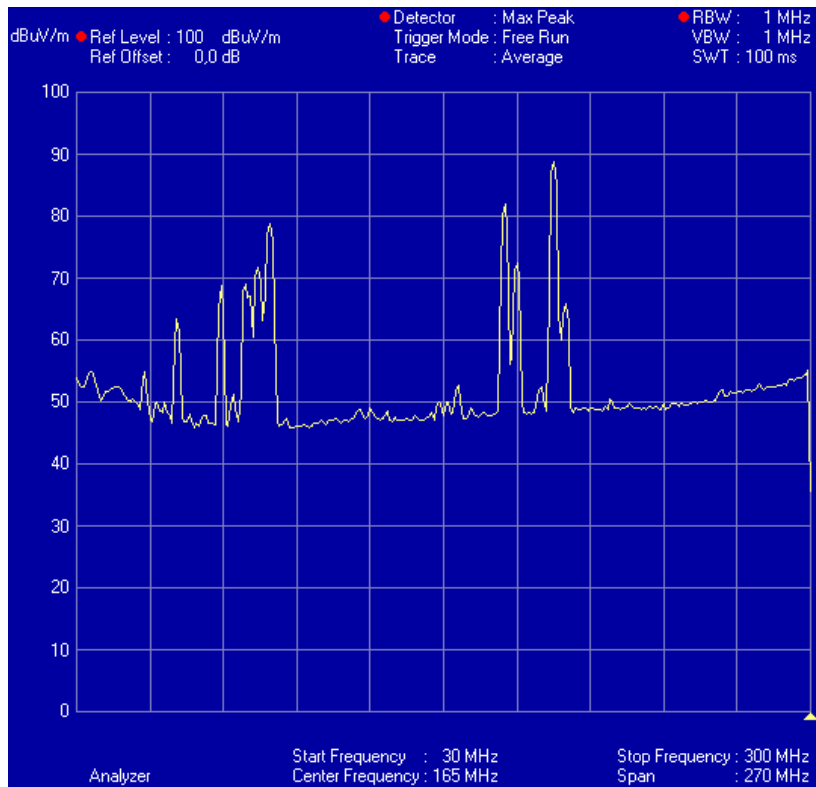


Figura 4.30 – Ruído de Fundo

Neste levantamento foi observada a presença de alguns sinais importantes.

As figuras 4.31 e 4.32, respectivamente, apresentam os levantamentos realizados com a Rede PLC Piloto, ativada, operando sem tráfego de dados e com tráfego de dados, respectivamente..

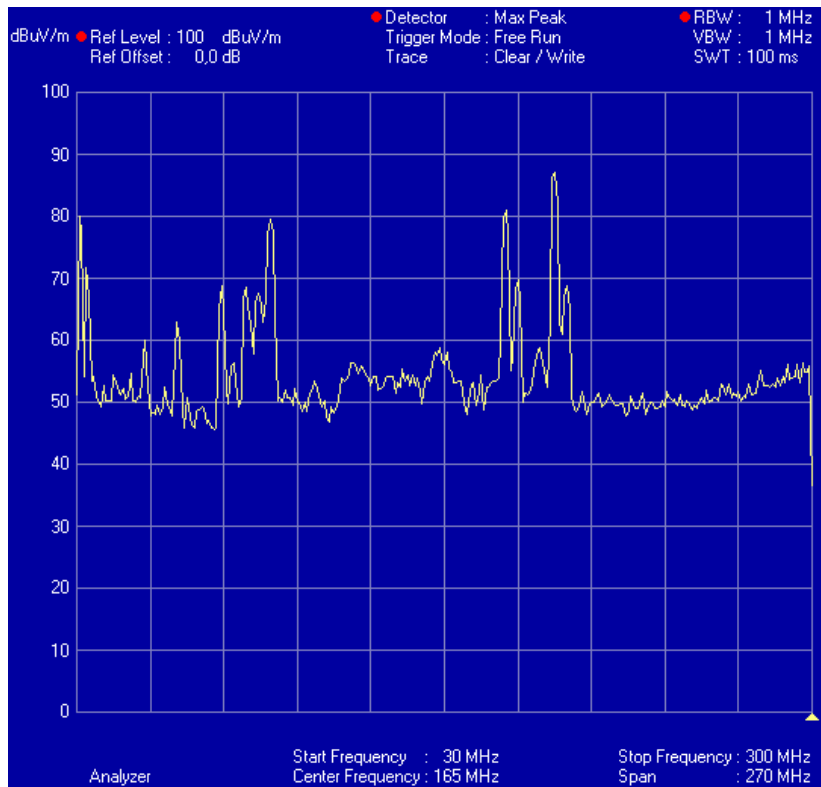


Figura 4.31 – Rede PLC Piloto operando sem tráfego de dados

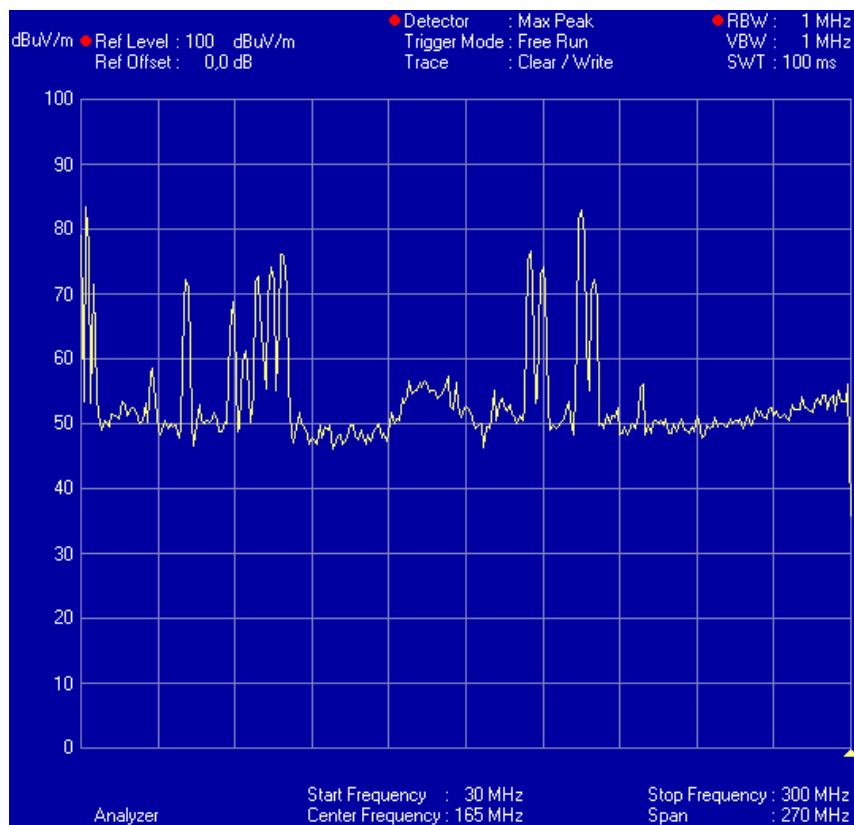


Figura 4.32 – Rede PLC Piloto operando com tráfego de dados

Observando as figuras acima é possível notar que há uma alteração no espectro de frequência, quando da ativação da Rede PLC Piloto, porém, somente nas proximidades de 30MHz. Tal alteração era de se esperar devido a faixa de frequência de operação da tecnologia PLC aqui aplicada.

Após estes levantamentos deu-se início às medidas com o EMI Teste Receiver ESPC.

Neste ponto, faz-se necessário um esclarecimento. Ao se analisar o espectro medido através do EMI Test Receiver desde 150kHz até 30MHz (antena Loop-magnética) e de 30MHz até 300MHz (antena Bicônica) é possível observar que há uma diferença entre as intensidades dos campos eletromagnéticos, medidos em 30MHz, de, aproximadamente, 52dB.

Tal discrepância é explicada pelo fato de que, ao se realizar as medidas com a antena Loop-magnética, o fator de correção da antena, configurado no software de controle do EMI Test Receiver, estava configurado para leituras de campo magnético ao invés de estar configurado para leituras de campo elétrico, como de fato deveria estar.

De acordo com o manual de operação da antena Loop-magnética, modelo HFH2-Z2 da Rodhe & Schwarz, uma vez configurado o fator de correção para leituras de campo elétrico, as medidas seriam, em toda sua faixa de frequência de operação, linearmente incrementadas em 51.5 dB, e assim sendo, esta diferença não haveria entre as medidas realizadas com as duas antenas, ficando assim, coincidentes em 30MHz, as leituras realizadas por ambas

A Figura 4.33 apresenta os resultados das medidas do ruído de fundo existente no laboratório entre 30MHz e 300MHz.

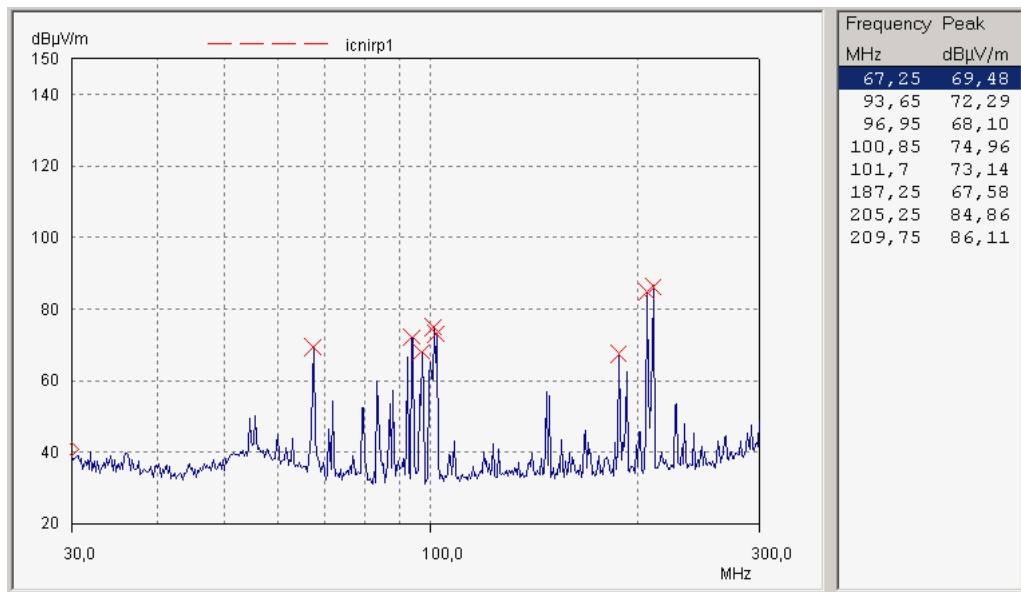


Figura 4.33 – Ruído de Fundo

Durante o levantamento já havia sido observada a presença de alguns sinais bastante potentes. Através das medidas das suas frequências portadoras os sinais foram identificados como sendo transmissões de Estações de Rádios FM e portadoras de sinais de áudio e vídeo de Redes de Televisão locais.

As figuras 4.34 e 4.35 apresentam os resultados das medidas com a Rede PLC Piloto operando sem tráfego de dados e com tráfego de dados, respectivamente.

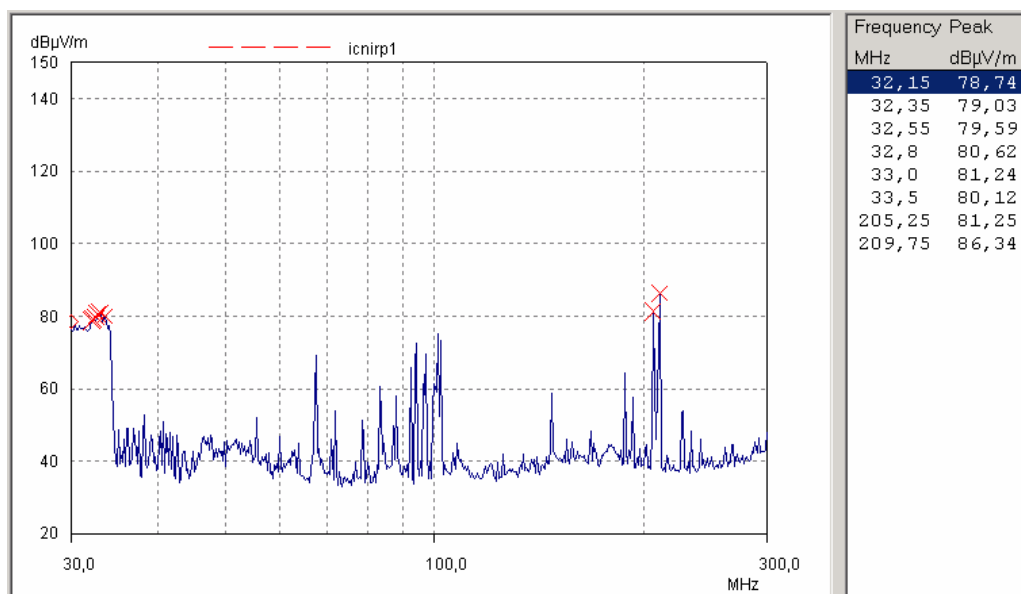


Figura 4.34 – Rede PLC Piloto operando sem tráfego de dados

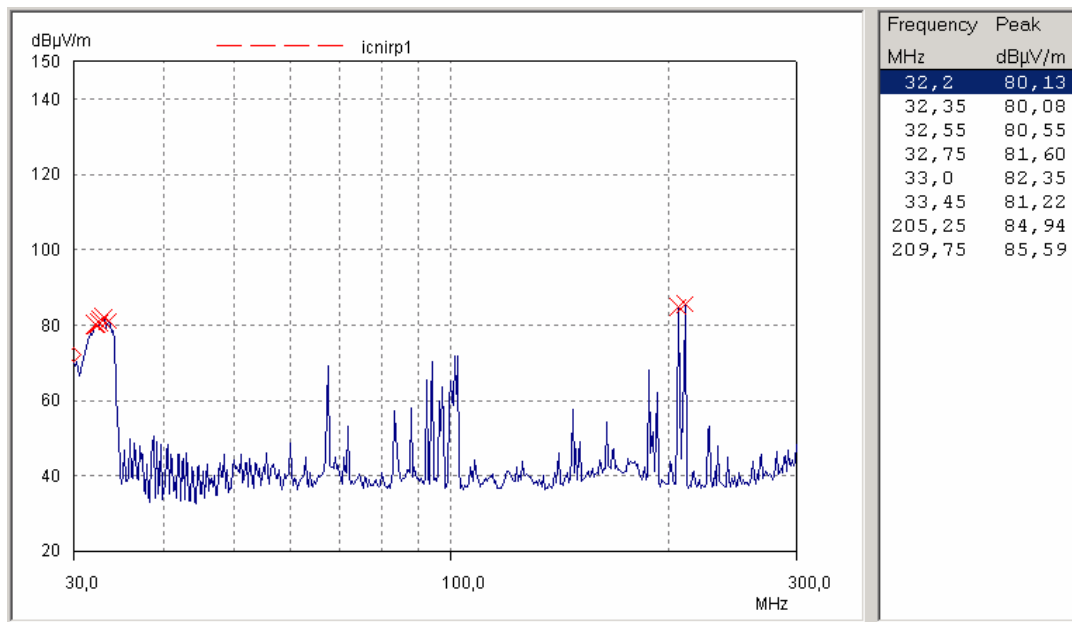


Figura 4.35 – Rede PLC Piloto operando com tráfego de dados

Analisando as figuras acima, foi possível observar a presença da EMI radiada pela Rede PLC Piloto, através de alguns pontos localizados nas frequências próximas a 33MHz. Tal presença era de se esperar, uma vez que se trata do limite superior da faixa de operação da tecnologia PLC aqui estudada.

Porém, ainda assim, permanecem como pontos mais potentes existentes no ambiente do interior MAGLAB, as portadoras de áudio e vídeo emitidas pela estação transmissoras de uma Rede de Televisão.

Diante destes dados é possível verificar que a EMI radiada para o ambiente pela rede PLC, nas dependências do laboratório, possui o mesmo potencial para interferência que os sinais de rádio FM, porém estão localizadas em portadoras diferentes. Tal constatação permite a afirmação de que a rede PLC, mesmo emitindo sinais interferentes ao ambiente, possivelmente não virá a degradar o funcionamento das rádios FM, tampouco das Redes de Televisão.

Outro diferencial está na potência dos transmissores aqui envolvidos. Os serviços de Rádio FM e Televisão possuem fontes intencionais geradoras de sinais em altas

potências, pois isto garante que seus sinais se propaguem por grandes distâncias possibilitando assim um grande alcance a seus serviços.

Já a Rede PLC Piloto implementada no MAGLAB, embora também esteja radiando sinais, só que neste caso, não-intencionais, não possui potência suficiente para que seus sinais se propaguem mais do que alguns metros dos cabos da rede de energia elétrica que ela utiliza como canal de transmissão, e assim saiam de dentro dos limites do ambiente de ensaio e, conseqüentemente, da edificação onde esta se encontra implementada.

4.8. Conclusões

Neste capítulo, foram apresentados os ensaios realizados através de uma rede PLC modelo, aqui denominada de Rede PLC Piloto, onde foram simulados da maneira mais realista possível o funcionamento desta tecnologia para aplicações internas a edificações.

Também foram apresentadas a configuração dos ensaios dentro do MAGLAB e todos os equipamentos que tornaram possíveis esta pesquisa.

Nos ensaios foram feitos levantamentos onde se procurou, numa primeira etapa, localizar as faixas de frequências em que eram observadas as interferências geradas pela rede PLC. Após a comprovação da existência destas interferências, nas faixas de frequências onde o fenômeno fora observado, foram então executadas as medidas.

Embora no Brasil ainda não tenha sido adotada nenhuma norma para a tecnologia PLC que especifique os níveis máximos para emissão de EMI, seja ela conduzida ou radiada, tampouco que determine os procedimentos e configurações para a realização das medidas, procurou-se realizá-las em concordância com as normas aplicadas a equipamentos de telecomunicações em geral, ou seja, a CISPR 22 [8].

Também foram realizadas medidas com equipamentos conhecidamente problemáticos com relação à emissão de EMI. Estas medidas foram realizadas com o intuito de se comparar o impacto ao ambiente eletromagnético causado pelo funcionamento destes equipamentos com o funcionamento da tecnologia PLC aqui aplicada.

Todos os resultados obtidos foram apresentados no decorrer da apresentação deste capítulo e, através deles, podemos concluir que, em princípio, pelo menos quando relacionada a aplicações internas a edificações, também conhecidas como aplicações “Indoor”, a tecnologia PLC aqui aplicada para formar a Rede PLC Piloto, do ponto de vista da Compatibilidade Eletromagnética, pode vir a ser utilizada normalmente como qualquer outra opção de tecnologia para transmissão de dados em banda larga

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Introdução

No decorrer deste trabalho foram apresentadas as atividades de pesquisa referentes ao estudo, do ponto de vista de Interferências Eletromagnéticas (EMI), do impacto gerado ao ambiente operacional pelo uso da tecnologia Power Line Communication em redes de distribuição de energia, internas a edificações, e em baixa tensão.

O presente capítulo, por sua vez, tem como objetivo a descrição das conclusões gerais acerca da presente dissertação de mestrado, visando contribuir da forma mais eficiente possível, inclusive com sugestões de trabalhos futuros, com a comunidade científico-tecnológica.

5.2. Conclusões Gerais

Após análise dos dados gerados por todas as medidas realizadas foi possível chegar a algumas conclusões, acerca da tecnologia PLC.

É importante ficar claro que as conclusões a seguir, são fruto do trabalho descrito nesta dissertação e estão relacionadas, única e exclusivamente, ao fabricante dos equipamentos PLC empregados para formar a rede PLC Piloto, e não devem ser extrapoladas para as demais tecnologias antes que se faça um conjunto de medidas e ensaios para conhecer seus comportamentos operacionais.

Como já abordado anteriormente nesta dissertação, por motivos de sigilo profissional o fabricante dos equipamentos utilizados não foram identificados.

Quanto à emissão conduzida de interferência eletromagnética, foi possível comprovar que seu impacto à rede de distribuição de energia, dentro de uma edificação, é mínimo.

Através de uma análise comparativa dos resultados, foi verificado que um dispositivo eletroeletrônico com circuito chaveado, neste caso uma fonte retificadora CA/CC usada durante os ensaios, que não esteja em conformidade com as normas de compatibilidade eletromagnética, possui um potencial muito mais severo de interferência em outros

equipamentos, que estejam alimentados pela mesma rede de energia elétrica, do que uma rede PLC embutida.

Quanto à emissão radiada de interferência eletromagnética, foi comprovado que, dentro do espectro total de frequência analisado, somente na faixa de 1,2MHz a 33,5MHz foi observada a presença de alguns sinais interferentes radiados ao ambiente pelo uso da rede de energia elétrica do laboratório como meio de transmissão de dados pela Rede PLC Piloto.

Esta constatação vem de encontro ao fato de que a faixa de frequência operacional dos equipamentos PLC adotados nestes ensaios é de 1MHz a 30Mhz.

Porém, frente a uma análise detalhada dos números gerados através da realização das medidas, foi possível concluir que, mesmo existindo no ambiente próximo a rede PLC a presença de interferência eletromagnética gerada por sua operação, estes sinais não causam maiores danos aos demais equipamentos ao seu alcance do que o próprio ambiente eletromagnético característico no interior do Laboratório.

Tal afirmação pode ser validada pelo fato de que as maiores intensidades de campo eletromagnético radiado observadas dentro da faixa de frequência de operação da Rede PLC Piloto foi de, aproximadamente, 80dB(μ V/m), o que corresponde a um valor de tensão de 10mV.

Se este valor for confrontado com os limites especificados pela norma IEC 61000-4-3 [40], norma referenciada no capítulo 3 desta dissertação, pode-se verificar que este campo não deveria causar distúrbio algum em outros equipamentos ou sistemas que estivessem operando próximo. Claro que isto somente será verdade se estes demais equipamentos estiverem em conformidade com as normas de EMC (Emissão e Imunidade).

Ainda relativo ao comportamento da Rede PLC Piloto frente a radiação de EMI, cabe aqui lembrar que, mesmo a Rede PLC, como um todo, não apresentando maiores impactos ao meio ambiente operacional, os equipamentos MASTER e CPE, quando testados isoladamente visando assim verificar a conformidade dos mesmos com a CISPR 22, apresentaram pontos acima dos limites especificados pela citada norma. E,

por este motivo, não estariam aprovados para comercialização antes que tal problema fosse solucionado pelo fabricante.

Como já abordado no início do capítulo 4, o MAGLAB, local onde a Rede PLC Piloto foi implementada, está localizado no interior de um dos prédios do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Trata-se de um ambiente comum, sem nenhum tipo de blindagem ou qualquer dispositivo de controle de propagação ou recepção de campos eletromagnéticos.

Deste modo, extrapolando as conclusões feitas após a análise dos resultados das medidas, é possível concluir que o comportamento da Rede PLC Piloto aqui estudado, poderá vir a se repetir em qualquer outro ambiente interno a uma edificação em que uma rede PLC, baseada na mesma tecnologia PLC utilizada nestes ensaios, possa ser implantada.

Diante do exposto, o trabalho apresentado através desta dissertação de Mestrado, vem contribuir com o estudo realizado por concessionárias de distribuição de energia elétrica, por órgãos governamentais de regulamentação de serviços de telecomunicações, por fornecedores de equipamentos e soluções de tecnologia Power Line Communications e pela comunidade científica, no que tange a possibilidade de implantação da transmissão de dados em banda larga através das Redes de Energia Elétrica.

5.3. Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho de pesquisa, em sua fase inicial, almejava ser realizado tanto para aplicações internas quanto para aplicações externas da tecnologia Power Line Communication.

Porém, algumas dificuldades operacionais relacionadas à disponibilidade de local para implementação de uma rede piloto externa, aérea, em Média e Baixa Tensões, que retratasse fielmente uma Rede de Distribuição de Energia, como as existentes tanto nos centros urbanos quanto nas áreas rurais, com todos os elementos que compõe sua estrutura básica (postes, transformadores, dispositivos de proteção, derivações, etc.), levou a este trabalho ter de se limitar ao uso da PLC em aplicações internas a edificações.

Diante disto, visando uma complementação das informações resultantes desta pesquisa, segue como uma sugestão para trabalhos futuros, a implementação de uma rede piloto aérea, externa, conforme citada no parágrafo anterior, para avaliação do impacto das interferências eletromagnéticas ao meio ambiente causado pela aplicação da tecnologia Power Line Communication.

Para este trabalho de pesquisa ser continuado, seria de fundamental importância, porém, não impeditivo, que, através de programas de Pesquisa e Desenvolvimento se realizasse um projeto, em parceria com empresas concessionárias de energia elétrica, para implantação de uma Rede Piloto ou utilização de uma rede de distribuição já existente para que fosse possível a implantação de uma Rede PLC.

Esta parceria otimizaria os recursos de pesquisa, disponibilizaria aos ensaios uma estrutura bem mais próxima da realidade, contaria com a experiência dos profissionais da empresa parceira no que tange a operação da rede e, principalmente, por se estar trabalhando com níveis de tensão que trazem risco de morte em caso de acidentes, a segurança do pessoal envolvido.

Dependendo do resultado da pesquisa, caso venha a ser positivo, disponibilizaria subsídios para ajudar na regulamentação do serviço e assim, possibilitando a adoção da PLC por parte destas concessionárias de distribuição de energia elétrica.

Esta adoção poderá gerar benefícios significativos a estas concessionárias, pois a racionalização de suas atividades operacionais proporcionadas pela aplicação da tecnologia contribuirá para a redução de seus custos.

Por exemplo, um sistema de supervisão baseado na tecnologia PLC poderia auxiliar na isolação de falhas ao nível do consumidor, agilizando desta forma a manutenção e minimizando os tempos de indisponibilidade.

Aplicações típicas de Gerenciamento da Rede de Distribuição, tais como leitura automática de medidores, gerenciamento de carga, monitoração da qualidade da energia fornecida e gerenciamento de falhas, ou seja, automação da rede, são outros exemplos de atividades operacionais tornadas mais eficientes e menos custosas pelo emprego da tecnologia PLC.

Além disto, de modo complementar, também possibilitaria uma melhoria de processos internos e na qualidade dos serviços prestados conforme listado a seguir:

- Redução de custos com Sistema de Comunicação Corporativa (uso de telefonia e rede de informática em banda larga sem necessidade de investimento em infra-estrutura);
- Disponibilidade para desenvolvimento de ferramentas para supervisão e automação da rede de distribuição de energia (elementos do sistema e sistemas de proteção);
- Benefício e aumento da qualidade dos serviços para o consumidor e para a empresa distribuidora, referente ao monitoramento remoto de pontos de falhas do sistema,
- Redução de custos e, conseqüentemente, aumento de arrecadação com telemedição e demais serviços típicos da área do setor elétrico que serão agregados naturalmente com a adoção da tecnologia PLC.

Outras sugestões interessantes para trabalhos de pesquisa seriam, o estudo da EMI gerada pela tecnologia PLC em campos próximos, ou seja, em distancias inferiores a 1 metro da rede PLC; o estudo do impacto das EMI geradas por redes PLC aos seres humanos; e também, o estudo relacionado a correlação entre a EMI gerada por outros Sistemas e o desempenho de uma sistema PLC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PAUL, C. R. "Introduction to Eletromagnetic Compatibility". Edited by John Wiley and Sons. New York, 1992.

[2] FELTON, D. ; BROWN, P. "Some Aspects of High Frequency radieted Emissions from Wireline Communication Systems in the Near and far Fields". White Box Solutions LTD., UK, 2002.

[3] ANATEL, Relatório Final do Programa 2 CBC 7 – "Desenvolvimento de Tecnologias e Redes de Telecomunicações: Proposta de Subsídios Para Regulamentação, Normalização e Certificação, Para a Prestação de Serviços de Telecomunicações Via Rede Elétrica com a Tecnologia PLC". 2004.

[4] UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE, NTIA – National Telecommunications and Information Administration Report 04-413. "Potential interference from broadband over power line (bpl) systems to federal government radiocommunications at 1.7 - 80 MHz". Washignton D.C.,2004.

[5] WILLIAMS, T.; ARMSTRONG, K. "EMC for Systems and Installations". Newnes Press. Oxford, 2000.

[6] SADIKU, M.N.O. "Elements of electromagnetics". 3rd ed. Oxford University Press. New York, 2001.

[7] RAIZER, A. "Apostila de Compatibilidade Eletromagnética". UFSC. Florianópolis, 2002.

[8] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (Comité International Spécial des Perturbations Radio-électriques). "Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement". CISPR 22, Genebra, 1997.

[9] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION. "FCC PART 15 – Radio Frequency Devices". Washignton D.C.,2003.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Vocabulário eletrotécnico internacional – Capítulo 161: Compatibilidade Eletromagnética”. Projeto 03:077.01-001, Rio de Janeiro, 1997.

[12] de LIZ, M. B. “Técnicas de mitigação da interferência eletromagnética em fontes chaveadas”. Tese de Doutorado submetida a UFSC, 2003.

[13] WEINZIERL, D. “Estudos de câmaras de testes de compatibilidade eletromagnética (CEM) através do método de modelagem por linhas de transmissão (TLM)”. Tese de Doutorado submetida a UFSC, 2004.

[14] BOSTOEN, T.; VAN DE WIEL, O. “Modelling the Low Voltage Power Distribution Network in the Frequency Band from 0,5 MHz to 30MHz for Broadband Powerline Communication (PLC)”. Alcatel Corporate Research Center, Belgium.

[15] (1) HENSEN, C.; (2) SCHWARZE, S. “Electromagnetic Compatibility for Power-Lines Communications on the Medium Voltage Grid”. (1) Intellon Design Center Europe GmbH, Germany. (2) University of Paderborn, Germany. 2000.

[16] (1) ISSA, F.; (2) CHAFFANJON, D.; (2) PACAUD, A. "Radiated Emission associated with Power Line Communications on low voltage buried cable".(1) Electricité de France, (2) France Ecole Supérieure d' Electricite, Paris, 2003.

[17] EMC Commissie Veron, Koos Fockens Dutch PLC Measurements - "The radio amateur and the effects of the use of the 230 Volt power line for broadband data communication (PLC)". 21 de Junho de 2002.

[18] VICK, R. "Radiated Emission caused by In-house PLC- Systems". Planungsbüro, 2003.

[19] HANSEN, D. "Megabits per Second on 50-Hz Power Line" (IEEE EMC Society Newsletter, Practical Papers, Winter 2001). Disponível na Internet: <http://www.ieee.org/organizations/pubs/newsletters/emcs/winter03/>

[20] HANSEN, D. "EMC: The impact of Power Line Communication, part 1". (CE Compliance Engineering), 2004. Disponível na Internet: <http://ce-mag.com/archive/03/ARG/hansen1.html>

[21] PC Magazine M&NE – "Power Line Communications-Elerifying the broadband", 2004. Disponível na Internet: <http://pcmag.dit.net/print.php?id=EplEpluFuVAyJBNNgF.05/04/2004>.

[22] ALVARENGA, L.M.; JUNIOR, A.V.P.; SOUZA, F.C.; BANDIM, C.J.. "Considerações sobre o uso de energia elétrica como meio de propagação de sinais de Comunicação". XVI SNTPEE, Outubro 2001, Brasil.

[23] OLIVEIRA, A.D.; DUQUE, C.A.; da SILVA, H.F. "Técnica de multiplexação por divisão de frequências ortogonais aplicada à comunicação de dados em linhas de energia elétrica". XVII SNTPEE, Outubro de 2003.

[24] ROMANO, R.B.; CLUDI, C.A.Z.; NETO, F.M.P.; JUNIOR N.S. "Avaliação preliminar de desempenho de um sistema PLC de banda larga". XVII SNTPEE, Outubro de 2003.

[25] ARANHA, A.B.. "Análise de transmissão de dados em banda larga via equipamentos Powerline para rede elétrica secundária". XVII SNTPEE, Outubro de 2003.

[26] QUINNELL, R.A. "Test problems radiate below 30MHz". Artigo disponível na Internet: <http://www.reed-electronics.com/tmworld/article/CA448833?text=30mhz,28/10/2004>.

[27] RAMSEIER, S.; ARZBERGER, M.; HAUSER A. "MV and LV Powerline Communication: New proposed IEC satandards", ABB, Suíça, 1999.

[28] DALICHAU, H. "Evaluation of different frequency bands regarding their qualification for inhouse Powerline Communication", München, Alemanha, 2001.

[29] (1) FERREIRA H.C.; (1) GROVÉ, H.M.; (2) HOOIJEN, O., (2) HAN VINCK, A.J. "Power Line Communication: na overview". (1) Departament of Electrical and Electronic Engineering, África do Sul; (2) Institut für Expemintelle Mathematik, University GHS Essen, Essen, Alemanha, 1996.

[30] DOSTERT, K. "Powerline Communication". 1.ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

[31] <http://www.anatel.gov.br>, 12/11/2003.

[32] <http://www.echelon.com>; 10/04/2004.

[33] <http://www.ebaplc.com>; 12/04/2004.

[34] <http://www.cemig.com.br/plc>; 04/05/2004.

[35] <http://informatica.terra.com.br/interna/0,,OI429609-EI553,00.h>; 29/11/2004.

[36] <http://www.ascom.com/powerline>; 22/04/2004.

[37] http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/secoes/sec_plc.html, 03/11/2004.

[38] <http://plc.hypertrade.com.br>, 15/04/2004.

[39] RAIZER, A.; BITTAR, G.L.A.." A Compatibilidade Eletromagnética em Equipamentos de Telecomunicações no Cenário Nacional ". SBrT , Setembro de 2005.

[40] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.
"Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-3: Testing and measurement techniques - radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test". IEC 61000-4-3

[41] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.
"Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-6: Testing and measurement techniques - immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields " IEC 61000-4-6

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 -TECNOLOGIA POWER LINE COMMUNICATION (PLC)	8
2.1. Introdução	8
2.2. Descrição Técnica do Sistema Power Line Communication (PLC).....	8
2.2.1. Arquitetura do Sistema PLC	8
2.2.2. Equipamentos que Compõem uma Rede PLC	10
2.2.3. Métodos e Unidade de Acoplamento de Sinais PLC	11
2.2.4. Modulação.....	15
2.2.5. Frequência de Operação.....	17
2.2.6. Desempenho do Sistema Power Line Communication	18
2.3. Topologias para Multi-injeção de Sinais em uma Única Rede de Distribuição de Energia ..	18
2.3.1. Topologia Padrão (Estrela)	19
2.3.2. Topologia Multi-hop	19
2.3.2. Coexistência entre Equipamentos Master	20
2.4.Equipamentos PLC Utilizados para Realização do Estudo da Interferência Eletromagnética Gerada por redes PLC (Power Line Communication).....	21
2.5. Características das Redes de Energia Elétrica como Meio para Comunicação de Dados.....	22
2.5.1. Impedância do Canal.....	23
2.5.2. Atenuação do sinal PLC.....	23
2.5.3. Interferências e Ruídos.....	24
2.6. PLC Aplicada a Redes de Distribuição em Baixa Tensão Embutidas – Aplicações Internas a Edificações (Aplicações Indoor)	25
2.6.1. Compatibilidade com Sistemas de Comunicação sem Fio (Wireless)	26

2.7. Conclusões	27
-----------------------	----

CAPÍTULO 3 -UMA VISÃO SOBRE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA (EMC)..... 28

3.1. Introdução	28
3.2.1. Abordagem Histórica à Questão da Compatibilidade Eletromagnética (CEM).....	29
3.2.2. Definições	30
3.3. Interferência Eletromagnética (EMI)	32
3.4. Acoplamentos	34
3.4.1. Acoplamento Direto	34
3.4.2. Acoplamento por Impedância Comum	36
3.4.3. Acoplamento por Campo Próximo.....	37
3.4.4. Acoplamento Radiado.....	38
3.5. Aspectos de Compatibilidade Eletromagnética frente ao uso da tecnologia PLC (Power Line Communication)	39
3.6. Normas de EMC	40
3.6.1. Limites para Emissões Radiadas para Equipamentos classe B (10m):	43
3.6.2. Limites para Emissões Conduzidas para Equipamentos classe B	43
3.7. Conclusões	45

CAPÍTULO 4 -RESULTADOS DAS MEDIDAS - APLICAÇÕES INTERNAS A EDIFICAÇÕES

46

4.1. Introdução	46
------------------------------	-----------

4.2. Rede Piloto PLC.....	46
4.3. Procedimentos Utilizados	48
4.4. Equipamentos Utilizados para as Medições	50
4.5. Ensaios de Conf. dos Equipamentos MASTER e CPE com a CIPR 22	56
4.6. Medição da EMI Conduzida gerada pela rede PLC Piloto.....	58
4.7. Medição da EMI Radiada gerada pela rede PLC Piloto	66
4.7.1. Medição da EMI Radiada pela Rede PLC Piloto entre 150kHz e 30MHz.....	67
4.7.2. Medição da EMI Radiada pela Rede PLC Piloto entre 30MHz e 300MHz	74
4.8. Conclusões	80
CAPÍTULO 5 -CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS	
FUTUROS	82
5.1. Introdução	82
5.2. Conclusões Gerais	82
5.3. Sugestões para Trabalhos Futuros	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87