

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Normando Pantoja Queiroz

“Provendo Soluções de Comunicação em Ambientes Industriais Inóspitos via PLC - Um estudo de caso aplicado a uma empilhadeira de bauxita da refinaria da Alunorte”

BELÉM

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM Engenharia Elétrica

Normando Pantoja Queiroz

“Provendo Soluções de Comunicação em Ambientes Industriais Inóspitos via PLC - Um estudo de caso aplicado a uma empilhadeira de bauxita da refinaria da Alunorte”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Margalho Coutinho
Co-Orientador: Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa

BELÉM

2009

Normando Pantoja Queiroz

**“Provendo Soluções de Comunicação em Ambientes Industriais
Inóspitos via PLC - Um estudo de caso aplicado a uma empilhadeira de
bauxita da refinaria da Alunorte”**

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica
do Instituto de Tecnologia da
Universidade Federal do Pará, como
requisito para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 04 / 12 / 2009

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro Margalho Coutinho – CMPPI / UFPA (Orientador)

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa – PPGEE / UFPA (Co-Orientador)

Prof. Dr. Antônio Jorge G. Abelém – PPGEE / UFPA (Membro)

Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês – PPGEE / UFPA (Membro)

Aos meus pais, Norberto e Nazaré Queiroz, que sempre me apoiaram, incentivaram e, principalmente, me ensinaram o valor do estudo. Minha esposa Débora e meu filho Gabriel, muito amado.

AGRADECIMENTOS

Deus.

À Alunorte.

À Universidade Federal do Pará.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mauro Margalho Coutinho, pelo apoio, incentivo e por ter me fornecido todos os recursos de infra-estrutura necessários ao desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa, pelo apoio, incentivo.

À minha família, pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Aos meus amigos Rui Matos, Luiz Simões e Daniella Ferreira, pela orientação na construção desta dissertação.

Aos meus amigos pelo companheirismo nas horas difíceis.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo fazer um estudo sobre um sistema de comunicação de dados, utilizando-se a rede elétrica existente entre equipamentos, como meio físico em um ambiente industrial inóspito. Nesse caso, foi implementado um piloto em uma refinaria de alumina, localizada em Barcarena no estado do Pará, em uma máquina móvel de empilhamento de bauxita, que possuía um sistema de comunicação de dados via rádio, no qual ocorriam muitas falhas de comunicação devido às interferências eletromagnéticas, RFI, etc. prejudicando o processo de produção da refinaria. Como alternativa, apresentar-se-á uma tecnologia menos susceptível a problema da interferência que permite melhorar o desempenho do sistema de comunicação entre equipamentos. Trata-se da tecnologia PLC – *Power Line Communication*- que é *full-duplex* e utiliza modulação OFDM, o que reduz o efeito indesejável de interferências.

Na conclusão, foram feitos comentários pertinentes aos resultados obtidos e os esperados acerca da confiabilidade da tecnologia, bem como sua utilização para futuras aplicações, nas diversas áreas onde a mesma pode ser utilizada.

Palavras-chaves: Automação industrial, Controladores programáveis, PLC, Powerline

ABSTRACT

This work has as main objective to make a study about a system of data communication, using the power network between equipment as the physical media in a harsh industrial environment. In this case, it was implemented a pilot project in an alumina refinery, located in Barcarena in Para state, in a bauxite stacking movable machine, which had a system of data communication via radio, where many communication failures occurred due to electromagnetic interference, RFI, etc., prejudicing the process of production of the refinery. As an alternative, it will be presented the use of a technology more immune to interference which can improve the performance of the system for communication between equipment. This is the technology PLC - Power Line Communication, which is full-duplex and uses OFDM modulation, which reduces the undesirable effect of interference.

In the conclusion, some comments were made to the obtained results and the expected ones about the reliability of the technology and its use for future applications in several areas where this technical can be used.

Keywords: Industrial automation, Programmable Controllers, PLC, Powerline.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Visão geral do processo <i>Bayer</i>	20
Figura 2: Fluxograma básico da Alunorte	22
Figura 3: Área de Estocagem de Bauxita	24
Figura 4: Layout do sistema de automação e controle da comunicação de dados via rádio	24
Figura 5: Falhas de comunicação entre agosto 2006 e julho 2007	27
Figura 6: Multa portuária (demurrege) paga entre agosto 2006 e julho 2007.....	28
Figura 7: Espectro de Frequência do PLC.....	32
Figura 8: Arquitetura do sistema PLC.....	33
Figura 9: Subsistema outdoor	35
Figura 10: Divisão da rede em segmentos através do uso de diferentes frequências	35
Figura 11: Subsistema Indoor.....	37
Figura 12: Acoplador Indutivo	39
Figura 13: Acoplador Capacitivo	40
Figura 14: Exemplo de topologia de uma rede de distribuição de energia elétrica.....	42
Figura 15: Adição de diferentes tipos de ruídos na transmissão PLC.....	43
Figura 16: Densidade espectral de um sinal em banda base e um sinal espalhado.....	49
Figura 17: Representação simbólica OFDM	51

Figura 18: Subportadoras de um sinal OFDM.....	51
Figura 19: Relação sinal/ruído na modulação OFDM.....	52
Figura 20: Janela do software hane WIN DHCP Server	62
Figura 21: Parâmetros de conFiguração do modem PLC máster	63
Figura 22: Distância do trecho 2.....	64
Figura 23: Distância do trecho 3.....	65
Figura 24: Cubículo subestação 12A (A) e da empilhadeira de bauxita (B).....	66
Figura 25: Acoplador capacitivo na caixa de conexão da berma	67
Figura 26: Modem na caixa de conexão na berma	68
Figura 27:Parâmetros de conFiguração do modem PLC <i>slave</i>	69
Figura 28: SNR do enlace PLC	70
Figura 29: Topologia da tecnologia PLC sugerida para empilhadeira de bauxita.....	72
Figura 30: Arquivos de conFiguração do modem PLC master (A) e slave (B)	74
Figura 31: ConFiguração do conversor da berma	74
Figura 32: ConFiguração do conversor da subestação da empilhadeira de bauxita 2.....	75
Figura 33: Detalhes do painel PLC e acoplador capacitivo na caixa conexão	76
Figura 34: Detalhes do painel PLC e acoplador capacitivo na empilhadeira.....	77
Figura 35: SNR do enlace PLC do enlace da empilhadeira de bauxita (SNRViewer DS2)....	78
Figura 36: Taxa transmissão do enlace PLC (ManageEngine OpManager, 2007)	79
Figura 37: Disponibilidade do enlace PLC (ManageEngine OpManager, 2007).....	80
Figura 38:Falha de comunicação da empilhadeira de bauxita 2 entre jan/2007 a jul/2008.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	<i>Asea Brown Boboverly</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
APTEL	<i>Associação de Empresas Proprietárias de Infra-estrutura e Sistemas Privados de Telecomunicações</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
CEP	<i>Customer Premises Equipment</i>
CLP	<i>Controlador Lógico Programavel</i>
CVRD	<i>Companhia Vale do Rio Doce</i>
BPL	<i>Broaband Over Power Lines</i>
DHCP	<i>Dinamic Host ConFiguration Protocol</i>
DS2	<i>Company Technology PLC</i>
EUA	<i>United States</i>
GEPOR	<i>Gerência do Porto</i>
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HE	<i>Head End</i>

HG	<i>Home Gateway</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHM	<i>Interface Homem-Máquina</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPTV	<i>Internet Protocol Television</i>
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MOSCAD	<i>Motorola SCADA</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OPERA	<i>Open PLC European Research Alliance</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RFI	<i>Radio Frequency Interference</i>
RPC	<i>Ripple Control</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SDCD	<i>Sistema Digital de Controle Distribuído</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VoIP	<i>Voice Over Internet Protocol</i>

WAN	<i>Wireless Area Network</i>
WLL	<i>Wireless Local Loop</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2	MOTIVAÇÃO	15
1.3	OBJETIVO DO TRABALHO	16
1.4	TRABALHOS RELACIONADOS	16
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	19
2.1	A ALUNORTE	19
2.2	CENÁRIO DO PROBLEMA	23
2.3	PROBLEMAS ENCONTRADOS NO SISTEMA EM OPERAÇÃO.....	26
2.3	SOLUÇÃO PROPOSTA	28
3	A TECNOLOGIA PLC	30
3.1	HISTÓRICO	30
3.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	32

3.3 ARQUITETURA DO SISTEMA PLC.....	33
3.3.1 Subsistema <i>Outdoor</i>	34
3.3.2 Subsistema <i>Indoor</i>	36
3.4 ACOPLAMENTO DO SINAL PLC	38
3.4.1 Acoplamento Indutivo.....	39
3.4.2 Acoplamento Capacitivo	40
3.5 CANAL PLC	41
3.5.1 Ruídos	42
3.5.1.1 Relação Sinal/Ruído.	44
3.5.2 Interferência.....	45
3.5.3 Atenuação	46
3.5.4 Impedância de Rede Elétrica.	47
3.6 MODULAÇÃO DO SINAL.....	48
3.6.1 Espalhamento Espectral.....	48
3.6.2 Divisão de Frequência Ortogonal	50
3.6.3 Modulação Estreita da Faixa	53
3.7 SEGURANÇA DOS DADOS NO SISTEMA PLC.....	53
3.8 SERVICOS SUPOSTADOS PELA TECNOLOGIA PLC	54
3.9 VANTAGENS DA TECNOLOGIA PLC.....	55
3.10 DESVANTAGENS DA TECNOLOGIA PLC	56
3.11 LEGISLAÇÃO E REGULAMENTO	56
3.11.1 Regulamentação para o sistema <i>Indoor</i>	58
3.11.2 Regulamentação para o sistema <i>Outdoor</i>	58
4 IMPLANTAÇÃO DO ENLACE PLC	60
4.1 <i>SITE SURVEY</i>	60
4.1.1 Inspeção do local de implantação.....	60
4.1.2 Equipamentos e ConFiguração	61
4.1.3 Medição de nível de sinal de potência.....	63
4.1.3.1 Medição no trecho 1	66
4.1.3.2 Medição no trecho 2	67

4.1.3.3 Medição no trecho 3	68
4.2 INSTALAÇÃO DO ENLACE PLC	73
4.2.1 Equipamentos utilizados na topologia híbrida.....	73
4.2.2 ConFiguração dos equipamentos.....	73
4.2.2 Detalhes das instalações	75
5 RESULTADOS OBTIDOS	78
5.1 SNR.....	78
5.2 TAXA DE TRANSMISSÃO.....	79
5.3 DISPONIBILIDADE.....	79
5.3 FALHA DE COMUNICAÇÃO	80
5.4 CUSTOS BENEFÍCIOS	81
6 CONCLUSÃO	82
7 REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Sabe-se o quanto é importante o valor da informação e da comunicação em nosso dia-a-dia, principalmente quando envolve riscos. No caso do estudo mostrado nesse trabalho, os riscos se devem pelas perdas de comunicação do sistema de controle das máquinas rotativas do pátio de bauxita da Alunorte, que é realizado através de um sistema de transmissão de dados via rádio . Essas falhas acarretam prejuízos operacionais e financeiros para a empresa. O ponto principal aqui desenvolvido foi o estudo e análise do efeito da comunicação de dados, envolvendo equipamentos móveis utilizados em um complexo sistema de controle de descarga de navios , transporte e armazenamento de bauxita.

O funcionamento do sistema de controle sem perda de comunicação entre as máquinas do pátio de bauxita, devido às interferências, garante a alta confiabilidade dos dados, pois o mau funcionamento do sistema de comunicação causa parada indevidas que acarretam em multa contratual, quando os navios ficam atracados no porto sem poderem descarregar seus porões. Portanto, falhas no sistema de controle geram custos financeiros indevidos para a refinaria. Atualmente o sistema que é constituído por descarregadores de navios e equipamentos móveis (máquinas de pátio que transportam a matéria prima para a primeira etapa do processo de produção), utiliza comunicação via rádio. Esse tipo de comunicação funciona perfeitamente quando não se tem interferências físicas ou eletromagnéticas. No caso da refinaria onde foi realizado o estudo, as interferências aumentaram devido a empresa ter triplicado sua capacidade de produção nos últimos 4 anos a partir de grandes expansões em suas instalações físicas. Além do problema de multa contratual, outra consequência grave que

o sistema atual está trazendo é a perda de produção da refinaria quando as máquinas de pátio deixam de operar por falha de comunicação e não transportam a matéria prima para o processo produtivo.

Mostrar-se-á ao logo do trabalho, um estudo e análise do efeito da comunicação de dados a partir da utilização de uma tecnologia menos susceptível ao problema de interferência, que permite melhorar o desempenho do sistema de comunicação entre os equipamentos e conseqüentemente a garantia da produtividade da refinaria. A tecnologia analisada é baseada em transmissão de dados, através da linha de distribuição de energia elétrica entre os equipamentos. Esse tipo de transmissão de dados já é utilizado em concessionárias de energia elétrica para transmissão de voz e dados em projetos da ELETROPAULO (São Paulo, SP), CELG (Goiânia, GO), CEMIG (Belo Horizonte, MG), COPEL (Curitiba, PR) e LIGHT (Rio de Janeiro, RJ) todas com sucesso (CAMPOS, 2007) e é conhecida como tecnologia PLC (Power Line Communications) onde a comunicação é de forma *full-duplex* com multiplexação em frequências elevadas e baixo nível de potência transmitida. O estudo foi realizado em uma refinaria de Alumina, localizada em Barcarena no Estado do Pará. Sua produção anual é de 6,2 milhões por ano e seus insumos principais chegam através de navios que são descarregados em um porto das Companhias das Docas do Pará, próximo à refinaria.

1.2 MOTIVAÇÃO

A existência de um cenário preocupante, no qual o sistema de comunicação de dados para controle de máquinas rotativas de carregamento e descarregamento de bauxita, não

possuía uma alta confiabilidade, devido às constantes falhas no sistema, prejudicando assim o processo de produção.

A falha no sistema de comunicação eleva custo de produção, pois implica em pagamento de multas portuárias devido ao atraso no embarque e desembarque de bauxita. Com isso, buscou-se uma tecnologia de transmissão de dados mais robusta, que possibilitasse maior confiabilidade com baixo custo de implantação.

A solução mais adequada atualmente no mercado é a tecnologia *PLC – Power Line Communications*, pois utiliza a rede elétrica existente para comunicação de dados, fator importante devido ao ambiente hostil das máquinas rotativas e redução do custo de implantação.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é propor a utilização da tecnologia PLC como uma solução para substituir o sistema de comunicação de dados via rádio, existente na empilhadeira de bauxita da refinaria de alumina da Alunorte, marcado por sucessivas falhas devido à perda de comunicação que culminavam com desconforto operacional e custo financeiro para a empresa.

1.4 TRABALHOS RELACIONADOS

No atual estado da arte, diversos trabalhos que investigam as características e potencialidades da tecnologia PLC têm sido realizados, tanto por universidades e instituições de ensino, como por empresas e órgãos públicos do setor energético, assim como também o estudo de outras tecnologias de acesso para fins de inclusão digital.

A Celg – Companhia Energética de Goiás – promoveu dois projetos pilotos para instalação da tecnologia PLC em escolas públicas. Uma escola em Goiânia, outra em Aruanã, e um centro comunitário na capital tiveram acesso à internet em banda larga utilizando a tecnologia PLC. Em Goiânia, as entidades que tiveram oportunidade de testar a tecnologia PLC foram o Centro Comunitário da Paróquia São Francisco de Assis e a Escola Estadual São Cristóvão, ambas no Jardim Goiás. Em Aruanã, participou o Colégio Estadual Dom Cândido Penso [CELG].

A ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações – junto com a APTEL – Associação de Empresas Proprietárias de Infra-estrutura e Sistemas Privados de Telecomunicações – iniciaram o projeto Barreirinhas – Ilha Digital, na cidade de Barreirinhas no estado do Maranhão. Foram interligadas através de uma rede PLC instalada na cidade a oficina de artesanato do SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas), a escola Anacleto de Carvalho e a Secretaria de Saúde. Este projeto teve por objetivo avaliar, em termos práticos, os vários aspectos ligados ao acesso a novas tecnologias de informação e comunicação, incluindo a percepção do beneficiado – o cidadão – sobre o serviço [Barreirinhas Ilha Digital].

Em [Ntuli et al 2008], o autor realiza uma comparação entre tecnologias de diferentes fabricantes de equipamentos PLC (Intellon, Intelogis, DS2 e Ascom), em seguida realiza uma comparação entre a tecnologia PLC com demais tecnologias de rede de acesso (Ethernet, linhas discada e Wireless). Por fim, o autor descreve a experiência realizada na Universidade de Fort Hare, na África do Sul, na qual os laboratórios do Departamento de Ciência da Computação foram interligados através de uma rede PLC.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação se encontra dividida em mais cinco capítulos e a organização possui a seguinte forma: O capítulo 2 apresenta a contextualização do problema onde é apresentado o cenário, evidências do problema e a solução. O capítulo 3 aborda sobre a tecnologia PLC onde é apresentado um breve histórico, arquitetura, canal e vantagens e desvantagens. O capítulo 4 apresenta a implantação do PLC, através de um piloto, na empilhadeira de bauxita 2. O capítulo 5 apresenta os resultados da implantação do PLC, avaliando o desempenho da taxa de transmissão, disponibilidade, e custo benefício. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, relacionando as contribuições e os trabalhos futuros.

Esta dissertação se encontra formatada segundo os critérios da Associação Brasileira de Normas Técnicas que tratam de informação e documentação. Destacam-se, especificamente: NBR 6023 (2002), NBR 10550 (2002) e NBR 14724 (2002).

2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O objetivo deste capítulo é descrever os problemas ocasionados pela falha na comunicação de dados, via rádio, da empilhadeira de bauxita 2 na refinaria da Alunorte. Será descrito sucintamente o processo de produção de alumina da Alunorte, o cenário, as evidências e a solução proposta para o problema.

2.1 A ALUNORTE

A Alunorte – Alumina do Norte do Brasil S.A, empresa na qual o projeto foi implementado, é hoje a maior refinaria de alumina do mundo com capacidade para produzir 6,2 milhões de toneladas de alumina por ano. Está localizada no distrito industrial do município de Barcarena, distante 40 km em linha reta de Belém, capital do Pará,

A matéria-prima da alumina é a bauxita, minério retirado das reservas de 600 milhões de toneladas em Porto Trombetas, próximo ao município de Oriximiná, no Pará. A Mineração Rio do Norte é a empresa que extrai a bauxita de Trombetas, um minério caracterizado por sua excelente qualidade. Esta bauxita, depois de lavada e britada, é transportada para a refinaria da Alunorte por navios com capacidade de até 55 mil toneladas. O desembarque é feito no porto de Vila do Conde, em Barcarena. A Alunorte também recebe bauxita da CVRD em Paragominas, através de mineroduto distante 240 km (Alunorte, 2008).

O processo Bayer, desenvolvido por *Karl Josef Bayer* em 1888, é o principal processo industrial de produção de alumina (óxido de alumínio Al_2O_3). Esse processo é utilizado na Alunorte e pode ser visto na Figura 1.

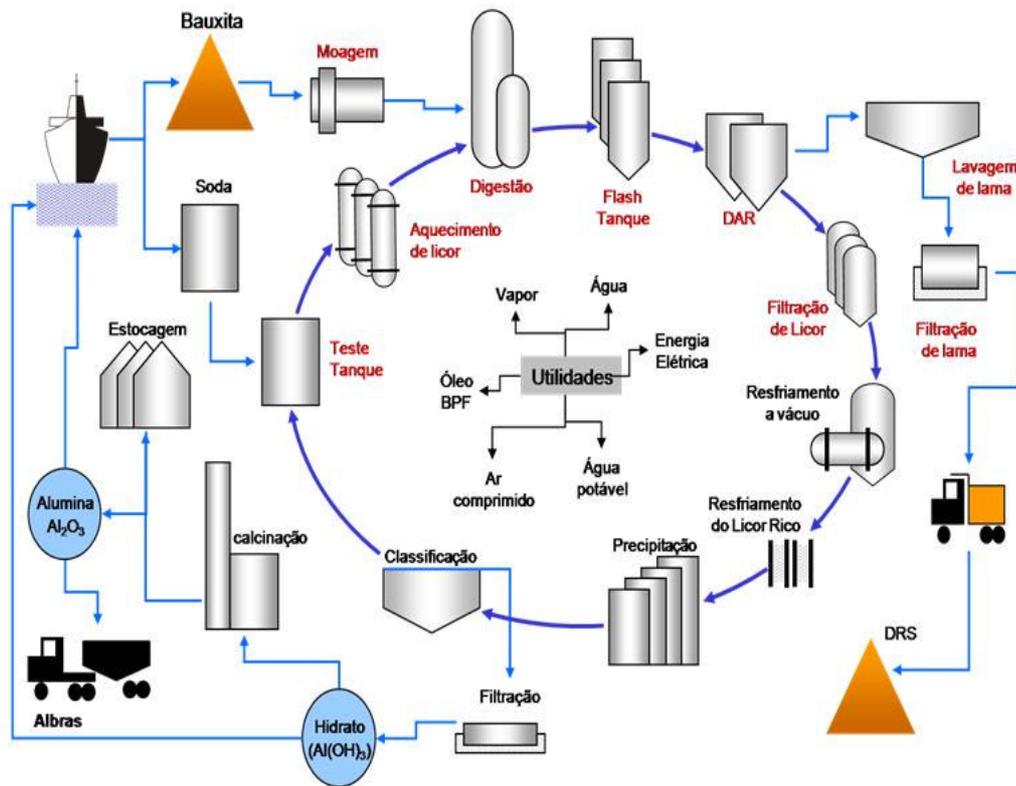


Figura 1: Visão geral do processo *Bayer*

A bauxita vinda de Porto Trombetas é descarregada no porto de Vila do Conde e é transportada por correias transportadoras ao pátio de estocagem, sendo direcionado à moagem. A moagem é a primeira etapa do processo *Bayer*, onde moinhos combinados de barras e bolas processam a bauxita já em mistura com solução de soda cáustica e leite de cal.

A etapa seguinte é digestão, na qual a bauxita é dissolvida por uma solução cáustica pré-aquecida, formando o aluminato de sódio. Na Alunorte, isto é feito em baterias de digestores que operam segundo o processo *Bayer* de baixa temperatura – cerca de 150°C – e asseguram a completa extração da alumina e a eliminação da sílica solúvel (Alunorte, 2008).

A descompressão da mistura que flui no último digestor é feita em tanques de expansão, que reduzem a temperatura da mistura e geram vapor, reutilizado no processo.

O produto do último tanque de expansão contém alumina em solução e resíduos de bauxita em suspensão, que precisam ser separados. Os resíduos de granulação mais grossa são facilmente retirados, mas a maior parte, composta de grânulos finos só é separada em espessadores e com o auxílio de agentes flocculantes, para acelerar a decantação.

Neste processo de separação, os resíduos de bauxita que formam a chamada lama vermelha passam por um circuito de espessadores e filtros que asseguram uma eficiência de lavagem superior a 99%. Em seguida, são descartados no depósito de rejeitos, dentro de um rígido controle ambiental, de forma que esta área possa ser reflorestada depois (Alunorte, 2008).

Ainda é necessário passar pela etapa da filtração. Nela são removidas as últimas partículas em suspensão através de uma bateria de filtros verticais, garantindo assim a alta qualidade do produto. Depois de filtrada, a solução de processo - também chamada de licor rico - é resfriada em tanques de expansão a vácuo, permitindo a recuperação de vapor que, como na digestão, é reutilizado no processo. Esse procedimento minimiza o consumo de energia. O licor rico é direcionado então para os precipitadores.

Nos precipitadores a solução filtrada se decompõe em uma reação química desencadeada pela adição de semente, que é o hidrato em granulação fina obtida no próprio ciclo de precipitação. Assim se obtém a alumina hidratada - o hidrato - e se recupera a soda cáustica, que é reciclada para a digestão.

Os cristais de hidrato formados na precipitação são classificados em duas partes (etapa de classificação): a fração grossa - hidrato produto, que seguirá para a etapa seguinte, a calcinação, e as partículas finas, as quais são recicladas como semente para a reação na precipitação.

Na calcinação toda a água livre ou combinada do hidrato é eliminada, formando o óxido de alumínio ou, simplesmente, alumina. Essa reação requer aquecimento em câmara de combustão com temperatura controlada em torno de 1000°C, localizada dentro dos calcinadores estacionários de leito fluidizado, equipamentos dentro dos quais acontece essa fase.

A alumina obtida nos calcinadores é transportada para os silos por correia transportadora. Dos silos, o produto é transferido e embarcado aos clientes no porto de Vila do Conde ou então segue para a Albrás, fábrica de alumínio situada próxima à refinaria.

A alumina pode ser utilizada também na fabricação de detergentes, produtos de limpeza, compostos para tratamento da água, supressores de fumaça, materiais ópticos e pastas de dente, além de atender também à indústria plástica, de mármore, granito sintético e isolante (Alunorte, 2008).

Para atender as necessidades de aquecimento dos processos, a Alunorte instalou sistemas de caldeiras a óleo, carvão e energia elétrica. Estes sistemas operam de forma alternada ou paralelamente, de acordo com a disponibilidade de energia secundária no sistema Eletronorte. Um fluxograma básico do processo pode ser encontrado na Figura 2 abaixo:

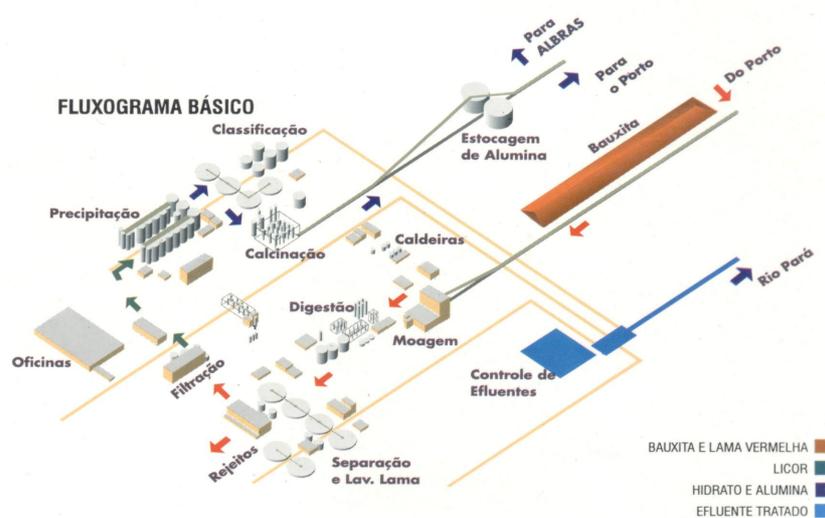


Figura 2: Fluxograma básico da Alunorte

2.2 CENÁRIO DO PROBLEMA

A bauxita que é enviada de Porto Trombetas é descarregada no porto de Vila do Conde por descarregadores de navios e é transferida para área de estocagem de bauxita por correias transportadoras. A área de estocagem possui capacidade de 360 mil toneladas de bauxita, distribuídas em 3 pátios (A, B e C), sendo 120 mil toneladas em cada pátio (Alunorte, 2004).

A estocagem da bauxita é feita por duas máquinas rotativas denominadas de empilhadeiras de bauxita 1 e 2, que são responsáveis em estocar a bauxita nos pátios, em várias pilhas, com altura de aproximadamente de 14 metros. As empilhadeiras alimentam os pátios conforme distribuição abaixo:

Pátio A - alimentado pela empilhadeira 1.

Pátio B - alimentado pela empilhadeira 2.

Pátio C - alimentado pela empilhadeira 2.

Após o empilhamento, a bauxita é recuperada das pilhas por duas máquinas rotativas denominadas recuperadoras de bauxita 1 e 2 que possuem capacidade 1000 t/h cada. A recuperadora 1, recupera a bauxita do pátio A e B, enquanto a recuperadora 2 recupera a bauxita do pátio C. Essa bauxita é transportada por correias transportadoras até os silos de alimentação dos moinhos, primeira etapa do processo Bayer denominada moagem. Na Figura 3 abaixo, temos uma visão geral da área de estocagem de bauxita (Alunorte, 2004).

Todo processo de empilhamento e recuperação da bauxita é totalmente automatizado e controlado remotamente de uma sala de controle. Esse controle é utiliza um sistema de comunicação de dados via rádio, instalados nas máquinas e na sala de controle. A Figura 4 mostra a layout do sistema de automação e controle da comunicação de dados via rádio.

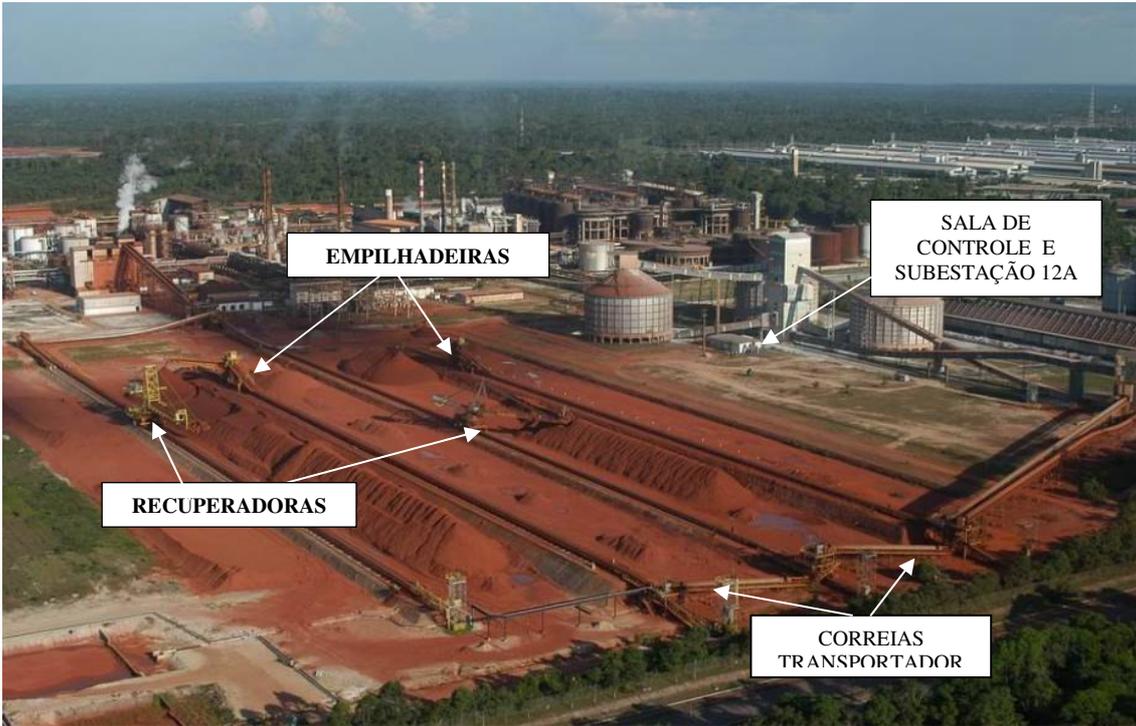


Figura 3: Área de Estocagem de Bauxita

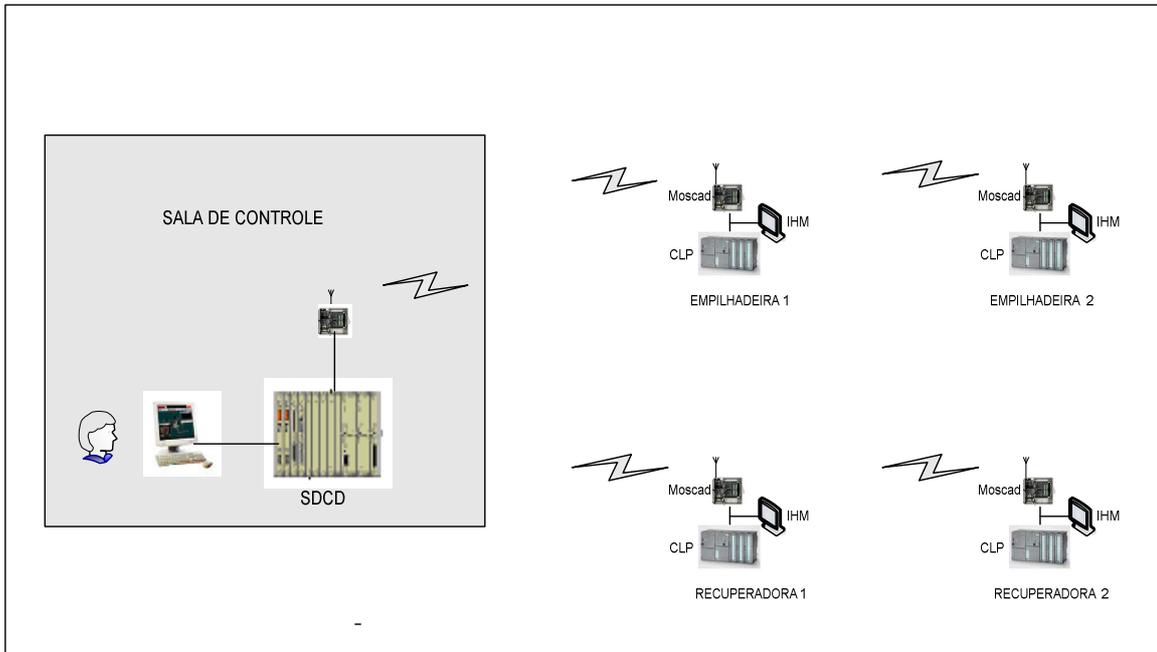


Figura 4: Layout do sistema de automação e controle da comunicação de dados via rádio

A Figura 4 apresenta layout do sistema de automação e controle da comunicação de dados via rádio das máquinas rotativas do pátio de bauxita, onde cada máquina possui os seguintes equipamentos:

- CLP (Controlador Lógico Programável);
- MOSCAD (Motorola SCADA);
- IHM (Interface Homem-Máquina).

O PLC é que é responsável pela aquisição de dados, execução dos algoritmos de controle/comando e executa a transferência de dados com o MOSCAD e IHM, através do protocolo Modbus.

O MOSCAD é um sistema de monitoramento e controle de equipamentos a distância que utiliza um sistema de comunicação de dados via rádio para transferência de informações entre a máquina rotativa e o SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído), localizado na sala de controle (SOFTBRASIL, 2005).

O IHM é um equipamento de supervisão que possui informações de algumas variáveis de processo dando suporte ao operador na operação local da empilhadeira.

Já na sala de controle estão instalados os seguintes equipamentos:

- SDCD;
- MOSCAD (Motorola SCADA).

O SDCD é um sistema de controle integrado e distribuído para automação industrial que consiste basicamente de estação de controle, operação e rede de comunicação

os quais se interligam (ABB, 2006). Ele é responsável pela aquisição de dados e execução dos algoritmos de controle e comando do processo do pátio de bauxita para transferência de informações com o sistema de monitoramento, instalado na sala de controle, através do protocolo Modbus, o qual troca dados com os MOSCAD das máquinas.

2.3 PROBLEMA.

Devido a Alunorte ter triplicado sua capacidade de produção, houve aumento da quantidade de bauxita, elevando o tamanho das pilhas de bauxita e exigência de maior desempenho das máquinas móveis, fazendo com que o número de manobras aumentasse. Isso ocasionou aumento de interferências RFI (múltiplos percursos, reflexão e chaveamento) no sistema de comunicação de dados via rádio das máquinas móveis, pois a comunicação através de radiofrequência é vulnerável a este tipo de interferência, provocando falhas na comunicação de dados prejudicando o processo de descarga do navio no porto, impedindo a entrada de matéria prima na refinaria, gerando pagamento de multas portuárias (*demurrege*) por atraso na descarga de navio, resultando em custo financeiro.

Para evidenciar este problema foram coletados dados, através do sistema de gerenciamento de navios da GEPOR, área responsável pelo carregamento e descarregamento de bauxita, do número de falhas de comunicação de dados da empilhadeira de bauxita 2, por ser a máquina que mais apresentou problema de comunicação, entre agosto de 2006 e agosto 2007(Alunorte, 2006/2007). A Figura 5 mostra o número de falhas de comunicação de dados entre agosto de 2006 e julho de 2007 da empilhadeira de bauxita 2.

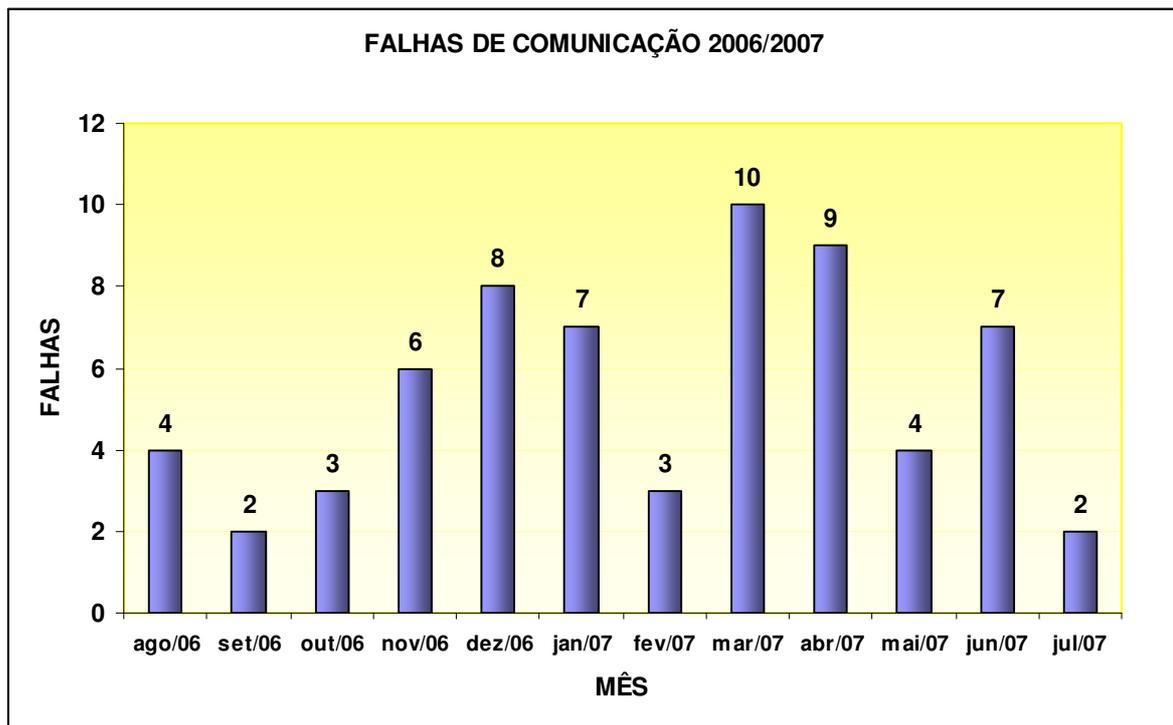


Figura 5: Falhas de comunicação entre agosto 2006 e julho 2007

A Figura 6 mostra que entre os meses de novembro e abril, onde a incidência de chuva é mais freqüente, o número de falhas é maior e conseqüentemente ocasionando interferências na comunicação de dados via rádio.

Também foi levantado, no mesmo período, dados dos valores das perdas financeiras devido às multas portuárias (*demurrege*) por atraso na descarga de navio. Esses valores de *demurrege* nem sempre acompanham proporcionalmente os números de falhas, devido à diferença de valores de contrato por navio (Alunorte, 2006/2007). Na Figura 6, estão demonstrados os valores da multas portuárias ocorridas entre agosto de 2006 e julho de 2007.

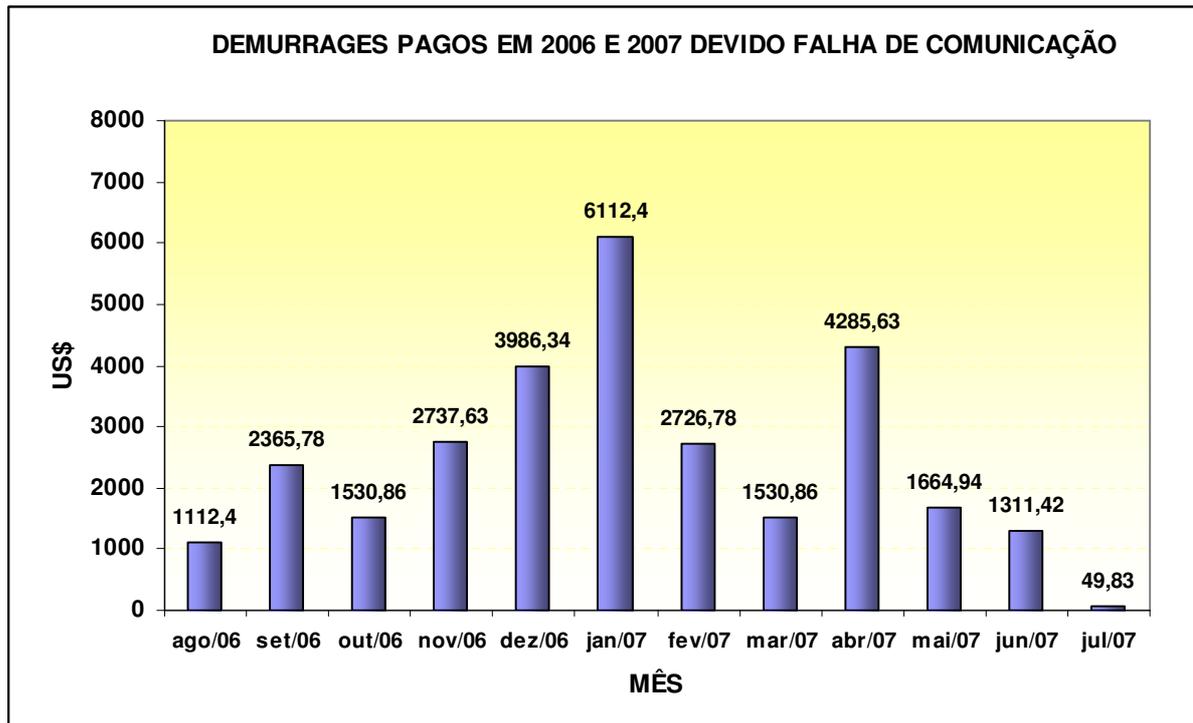


Figura 6: Multa portuária (demurrege) paga entre agosto 2006 e julho 2007.

A Figura 6 apresenta os valores de *demurrege* pago entre agosto de 2006 e julho de 2007, onde o valor de *demurrege* pago nesse período foi de US\$ 29.414,9 que corresponde a um valor de R\$ 61.771,29 (US\$ 2.1) (Alunorte, 2006/2007).

2.3 SOLUÇÃO PROPOSTA

Com os dados apresentados no item 2.2, ficou evidenciado a necessidade da utilização de outra tecnologia de comunicação de dados em substituição a existente, que minimizasse os problemas operacionais e financeiros. Buscou-se então no mercado técnicas que não utilizassem comunicação via rádio e que pudessem ser implementadas em máquinas móveis rotativas, pois as mesmas realizam movimento de translação e rotação dificultando a

instalação de tecnologias convencionais, que fossem implementadas com baixo custo e tempo de implantação reduzido, otimizando-se os transtornos operacionais durante sua implementação. Como alternativa, decidiu-se pela utilização do PLC que é uma tecnologia que utiliza a rede elétrica de distribuição como meio físico para transmissão de sinais de dados em alta frequência, aproveitando a estrutura física existente (ANDRADE; SOUZA, 2004) usa técnica de modulação OFDM de grande resistência a interferência de RFI e possui acesso a banda larga que permite acréscimo de informações como vídeo e voz.

A tecnologia PLC foi implementada e testada com sucesso por universidades e instituições de ensino, empresas e órgãos públicos do setor energético, para automação residencial e comercial. Porém, na indústria o uso a tecnologia PLC está iniciando, tendo alguns casos de sucesso como na indústria automobilística (TRNKA, 2005).

3 A TECNOLOGIA PLC

Neste capítulo serão apresentadas as principais características técnicas de funcionamento e operação da tecnologia PLC tais como: arquitetura e equipamentos específicos, canal PLC, modulação do sinal, segurança dos dados e legislação e regulamentação do PLC.

3.1 HISTÓRICO

A primeira técnica que possibilitou a utilização da rede de distribuição de energia elétrica para transmissão de alguns sinais de controle foi desenvolvida em 1930. Conhecida como RPC (*Ripple Control*), caracterizava-se pela utilização de baixas frequências (100 a 900 Hz), possibilitando comunicação a taxas bem baixas e potência elevada para transmissão. O sistema possibilitava comunicação unidirecional, sendo utilizados em tarefas simples como o acionamento da iluminação pública e o controle de carga. Até a década de 80, novos sistemas, com taxas ainda modestas, foram desenvolvidos. As primeiras investigações no sentido de analisar as características da rede elétrica e as reais capacidades da mesma como canal para comunicações foram conduzidas por algumas empresas de energia na Europa e Estados Unidos, ainda nos anos 80 (SUTTERLIN; DOWEY, 2003).

Em 1991, o *Dr. Paul Bronw da Norweb Communications* (empresa de energia elétrica da cidade de Manchester, Inglaterra) iniciou testes de transmissão digital com portadoras de altas frequências através das linhas de energia. Em 1992, **Bronw** demonstrou um serviço semelhante ao de telefonia utilizando cabos elétricos (TIBALDI; JUNIOR, 2007).

Entre 1995 e 1997, demonstrou-se que os problemas de interferências e ruídos poderiam ser resolvidos e que a transmissão de dados em alta velocidade seria um serviço viável.

Em março de 1998, a *Nortel* e a *Norweb* uniram-se criando a NOR. WEB DPL, empresa com o propósito de fabricar e comercializar produtos para sistemas PLC. A partir destes avanços, o PLC começou a ser usado em residências e em escritórios para compartilhar ou fornecer conexão a Internet e na automatização residencial (SILVA, 2006).

Recentemente a tecnologia PLC tem sido comercializada em várias partes do mundo e no Brasil, conforme apresentado a seguir:

- Em setembro de 2005, na Austrália, a companhia energética Aurora Energy em conjunto com a empresa de telecomunicações TasCOLT e a empresa de telefonia TasTel realizaram testes comercializando BPL (“*BroadBand Over PowerLine*” – Acesso em Banda Larga sobre Rede Elétrica) para 500 domicílios no subúrbio de Tolmans Hill (AURORA, 2008).
- Em outubro de 2005, a cidade Manassas, nos Estados Unidos, realizou a primeira comercialização deste serviço em larga escala, oferecendo taxas de 10 Mbit/s por 30 dólares mensais para 35 mil residências (CIDADE, 2008).
- A Companhia Paranaense de Energia (Copel) está desenvolvendo projeto piloto com o *Power Line Communications* (PLC), tecnologia de acesso à internet pela rede elétrica. A cidade escolhida foi Santo Antônio da Platina, localizada no norte do Paraná, a 370 quilômetros da capital do Estado. Empresa e município

compartilham a mesma expectativa: modernização e aumento da eficiência dos serviços de telecomunicação oferecidos ao cidadão (GUIA, 2009).

3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

PLC é um sistema de telecomunicações através de rádio frequências (RF) que utiliza como meio de transporte a rede elétrica de distribuição (ANATEL; APTEL, 2007). O princípio básico de funcionamento da tecnologia PLC está na frequência dos sinais gerados, o PLC utiliza o espectro frequência de 1,7 MHz a 30 MHz e o sistema de energia elétrica um espectro de frequência de 50Hz a 60Hz. Devido à grande faixa de frequência que separa os dois sistemas, os dois sinais podem utilizar o mesmo meio de transmissão sem interferência (HRASNICA et al, 2004). A Figura 7 mostra o espectro de frequência do PLC.

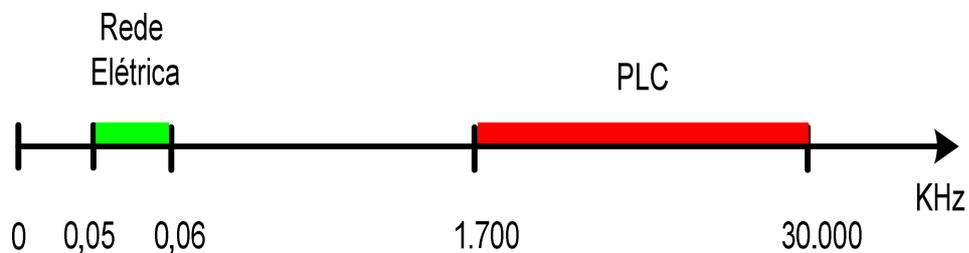


Figura 7: Espectro de Frequência do PLC

A atual regulamentação em estudo pela ETSI/CENELEC indica as seguintes faixas de frequências (ANATEL; APTEL, 2007):

- a) De 1 MHz a 10/13 MHz para o segmento Last Mile Access (outdoor);
- b) De 10/13 MHz a 30 MHz para o segmento Last Inch Access (indoor).

3.3 ARQUITETURA DO SISTEMA PLC

A arquitetura do sistema PLC, consiste em dois subsistemas: Outdoor e Indoor. Esses subsistemas levam em conta como será aplicada a tecnologia e como serão inseridos os equipamentos específicos que realizam a conversão e a transmissão do sinal através das redes elétricas, para que a disponibilidade da rede não seja afetada e haja prejuízo para os consumidores. Como mencionado, PLC utiliza a rede elétrica para transmitir informações para realizar diversas aplicações como comunicações e serviços de automatização. Porém, o sinal de comunicações tem que ser convertido em uma forma que permita a transmissão através da rede elétrica. Para este propósito as redes de PLC incluem alguns equipamentos específicos para assegurar a conversão dos sinais e sua transmissão. Os equipamentos que compõe da tecnologia PLC são: HE (*Head End*) ou Master PLC, Repetidor, HG (Home Gateway) e Modem PLC. Na Figura 8, apresenta-se a arquitetura do sistema PLC com os subsistemas outdoor e indoor.

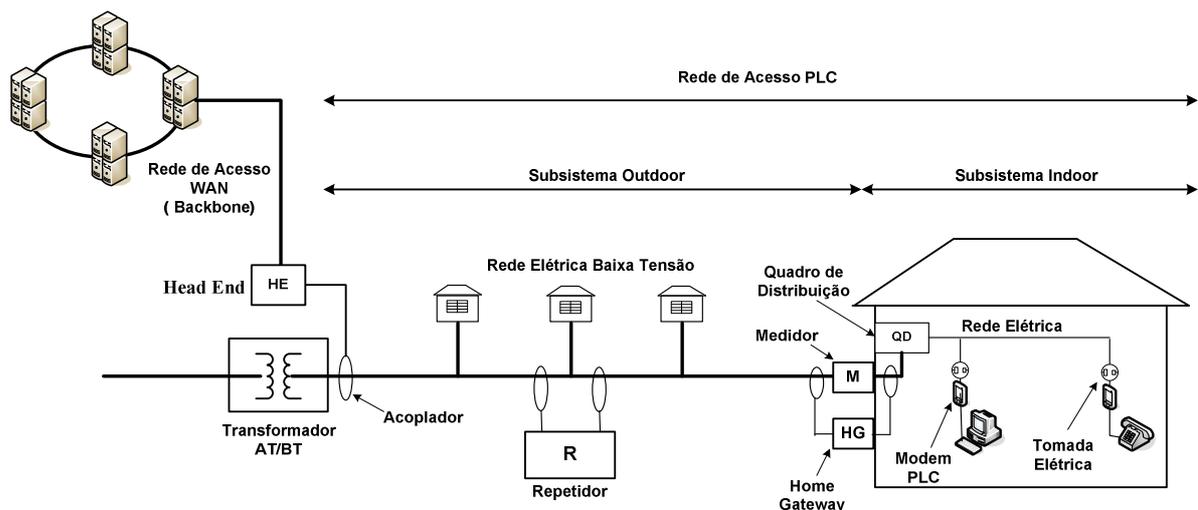


Figura 8: Arquitetura do sistema PLC.

3.3.1 Subsistema *Outdoor*

É o subsistema que possui a função de interface entre o *backbone* e a rede elétrica, ou seja, é a rede de acesso à residência, conecta os usuários com os provedores de acesso (Figura 9). Nesse seguimento o PLC apresenta-se como mais uma possibilidade tecnológica para o acesso à Internet. É nesse seguimento que as concessionárias de energia elétrica demonstram interesse, pois a tecnologia PLC utiliza as linhas de transmissão das mesmas possibilitando a abertura de um novo setor de mercado (SILVA; PACHECO, 2005). Os equipamentos utilizados neste subsistema são: HE ou Master PLC e Repetidor.

O HE ou Master é responsável pelo gerenciamento da rede de acesso PLC, autorizando ou negando o acesso dos usuários a rede, fazendo o controle da taxa de transmissão de cada usuário, além de realizar o controle de possíveis garantias de serviço. São instalados próximo dos transformadores de baixa tensão para os casos de aplicações externas (*outdoor*), são conectados com a rede elétrica de baixa/média tensão de um lado e do outro com a rede de acesso a WAN. Porém, não conecta dispositivos de usuários individuais, mas provê comunicações de rede múltiplas interfaces, como xDSL, Hierarquia Digital Síncrono (SDH) para conexão com uma rede de alta velocidade, WLL para interconexão sem fios, e assim por diante. Desta forma, um PLC estação base pode ser usado para receber conexão com *backbone* usando várias tecnologias de comunicação. A estação base controla a operação de acesso ao meio PLC com redes de acessos WAN (HRASNICA et al, 2004).

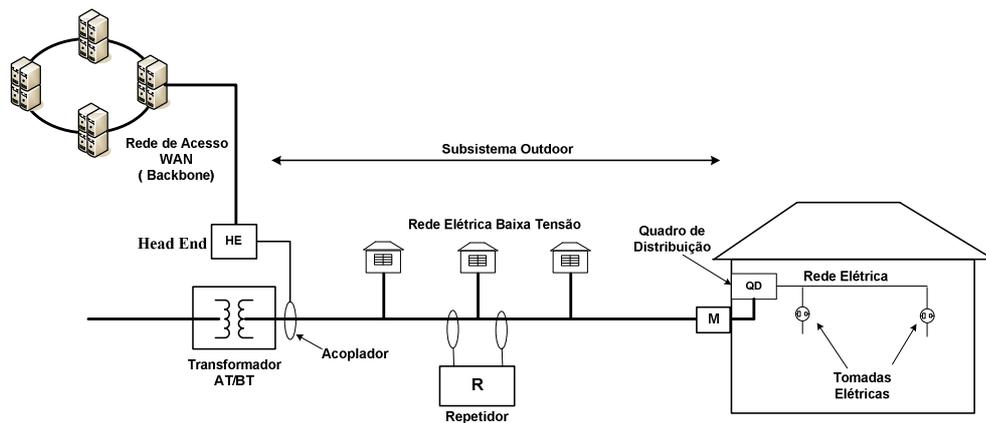


Figura 9: Subsistema outdoor

Em alguns casos, a distância entre o usuário do PLC colocados em uma rede de provisão de baixa-tensão ou dos usuários individuais (*indoor*) até o HE ou Master é muito grande para ser percorrida por uma rede PLC de acesso, sendo necessário então aplicar uma técnica de repetidor. Os repetidores dividem uma rede PLC de acesso em vários segmentos de rede, o comprimento da rede depende dos fabricantes dos dispositivos PLC. Os segmentos de rede são separados através do uso de diferentes frequências ou *timeslots* para cada segmento (HRASNICA et al, 2004).

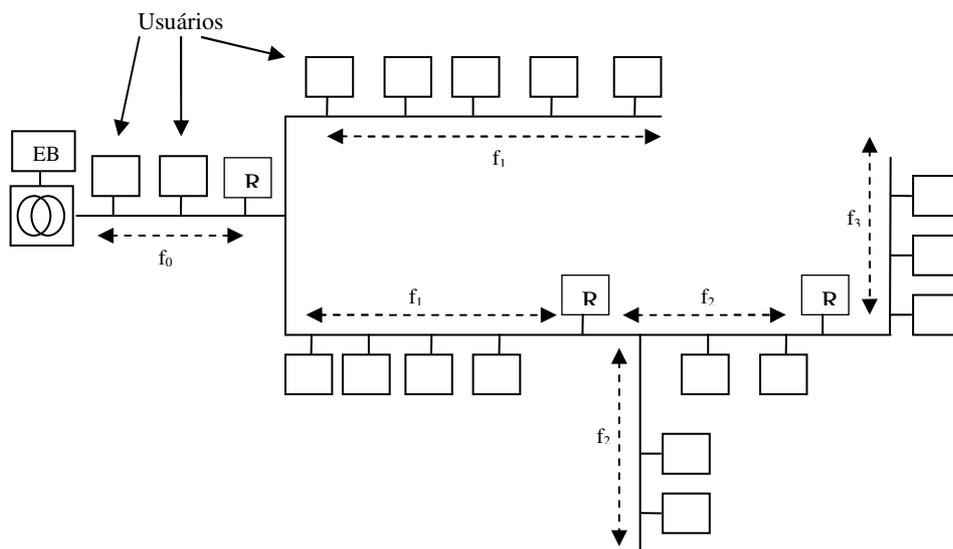


Figura 10: Divisão da rede em segmentos através do uso de diferentes frequências

A Figura 10 demonstra a divisão da rede em vários segmentos. O repetidor R1 recebe o sinal da estação base EB na frequência f_0 . Este repetidor amplifica e injeta o sinal de volta a rede em uma frequência diferente, f_1 . O repetidor R2 recebe o sinal de R1 na frequência f_1 , e novamente amplifica e injeta o sinal de volta a rede usando uma outra frequência, f_2 . Este processo continua até alcançar todos os usuários da rede. Observa-se que os repetidores não modificam a informação que está sendo transmitida, apenas amplificam e mudam a frequência de transmissão do sinal.

Observa-se que cada repetidor deve trabalhar em uma frequência diferente dos demais repetidores, entretanto a faixa de frequência que estes repetidores podem utilizar é limitada o que também limita o número de máximo de repetidores na rede. Por exemplo, se cada repetidor necessita utilizar uma banda de 5 MHz e a faixa do espectro de frequência utilizada pelo serviço PLC é de 1 MHz a 30 MHz, poderia utilizar no máximo 6 repetidores. Para aumentar o alcance da rede e, conseqüentemente, o número de usuários que podem ser atendidos pelo serviço, mesmo tendo um espectro de frequência limitado, pode-se, em alguns casos, utilizar a técnica de reuso de frequência. Por exemplo, se o sinal da estação base não interfere em R2 devido à grande atenuação do meio, então R2 pode utilizar a mesma frequência que a estação base (SILVA, 2006).

3.3.2 Subsistema *Indoor*.

É o subsistema que disponibiliza o PLC dentro das edificações (residenciais comerciais e industriais). Este seguimento possibilita ampliar gradativamente o espectro das redes prediais, pois transforma todas as tomadas elétricas em ponto de acesso de sinais de dados para computadores pessoais, telefones e impressoras, bem como para outros

dispositivos eletro-eletrônicos com este tipo de facilidade (MAJUMDER; CAFFERY, 2004).

Os equipamentos utilizados neste subsistema são: HG e Modem PLC.

O HG é usado conectar um usuário PLC (*indoor*) com a rede de acesso PLC (*outdoor*) dividindo os ambientes que operam com frequências diferentes. O HG converte o sinal transmitido entre as frequências que são especificadas para uso PLC (*indoor*), o ponto de instalação normalmente é próximo da unidade medidor. A Figura 11 mostra o subsistema *indoor*.

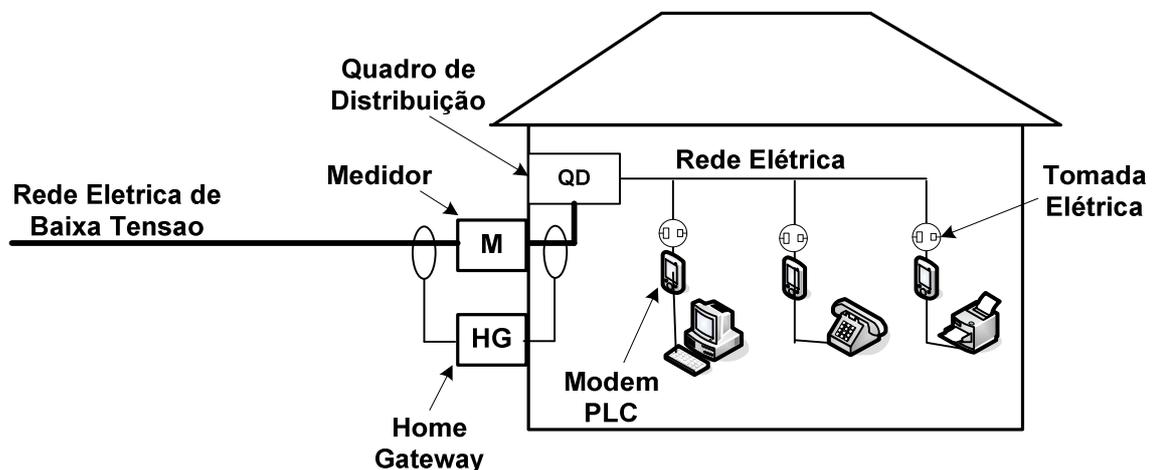


Figura 11: Subsistema *Indoor*

O modem PLC conecta equipamentos de comunicações padrões, usados pelos usuários com o meio de transmissão PLC. A interface do lado do usuário pode prover vários padrões de interfaces para dispositivos de comunicações diferentes, por exemplo, a Ethernet e USB. No outro lado, o modem PLC é conectado à rede elétrica através de uma junção específica que permite a sua alimentação, a transmissão e recepção de sinais no meio PLC. A junção tem que assegurar uma separação de tecnologia e agir como um filtro passa alto dividindo as comunicações que operam acima de 9KHz da rede elétrica 50 ou 60 Hz. O

modem PLC implementa todas as funções da camada física, modulação e codificando. A segunda camada também é implementada dentro do modem que inclui seu MAC (Controle de acesso Meio) e LLC (Ligação lógica Controla) de acordo com o OSI. (Interconexão de Sistemas abertos) modelo de referência (HRASNICA et al, 2004).

3.4 ACOPLAMENTO DO SINAL PLC

O acoplamento dos equipamentos PLC à rede elétrica é realizado através de equipamentos especificamente desenvolvidos, que oferecem o isolamento adequado entre os sinais de telecomunicações e a energia elétrica, garantindo a segurança operacional do sistema e dos usuários (ANATEL; APTEL, 2003). Acoplamento é o método utilizado para injetar ou extrair o sinal PLC na rede de energia elétrica. Os dispositivos de acoplamento foram especialmente desenvolvidos para permitir a injeção e extração do sinal PLC, tanto nas redes de média tensão quanto nas redes de baixa tensão. A principal função dos dispositivos 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. Existem 2 tipos de dispositivos de acoplamento:

a) Acoplamento indutivo que injeta e extrai o sinal PLC através de indução eletromagnética (ferrite).

b) Acoplamento capacitivo que injeta e extrai o sinal PLC através de contato direto (contato galvânico) com os cabos da rede de energia elétrica;

3.4.1 Acoplamento Indutivo.

Acopladores Indutivos, utilizados para injetar/extrair o sinal PLC sobre as linhas de energia elétrica de média ou baixa tensão onde não haja ponto de contato galvânico disponível. Conectado através de uma braçadeira denominada como “*Clamp*”, é utilizado como circuito magnético instalado em torno do condutor para que assim possam acoplar, por indução, o sinal PLC em banda larga com baixo nível de perdas (TROMPOWSKY, 2005). Este dispositivo possui um funcionamento idêntico a um transformador de tensão, onde não existe nenhum contato elétrico entre o enrolamento primário e o secundário, e somente as linhas de indução eletromagnética que atravessam os enrolamentos. Na fabricação deste dispositivo são utilizados dois tipos de material conforme segue: Para os acoplamentos em redes de baixa tensão é utilizado o ferrite, para os acoplamentos em redes de média tensão é utilizado um material magnético flexível, especial, de altíssima permeabilidade que, para aplicações em média tensão, reduz os problemas de saturação magnética quando comparado com o uso de ferrite (PINTO; ALBUQUERQUE, 2007). A Figura 12 mostra o acoplador indutivo.



Figura 12: Acoplador Indutivo

Fonte: (Integradores, 2007)

3.4.2 Acoplamento Capacitivo

Acopladores Capacitivos, utilizados para injetar/extrair o sinal PLC sobre as linhas de energia elétrica de média ou baixa tensão onde haja um bom ponto de contato galvânico disponível. A qualidade do contato galvânico influencia diretamente na qualidade do acoplamento. Portanto, o ponto de contato deve ser o melhor possível. O tipo de acoplamento instalado deve ser definido com base na qualidade do sinal e facilidade de instalação nas condições específicas da rede de distribuição utilizada. As soluções de acoplamento têm evoluído bastante, otimizando tempos, procedimentos, desempenho e segurança de instalação (TELECO, 2007).

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 (ARTECHE, 2007). A Figura 13 mostra o acoplador capacitivo (INTEGRADORES, 2007).

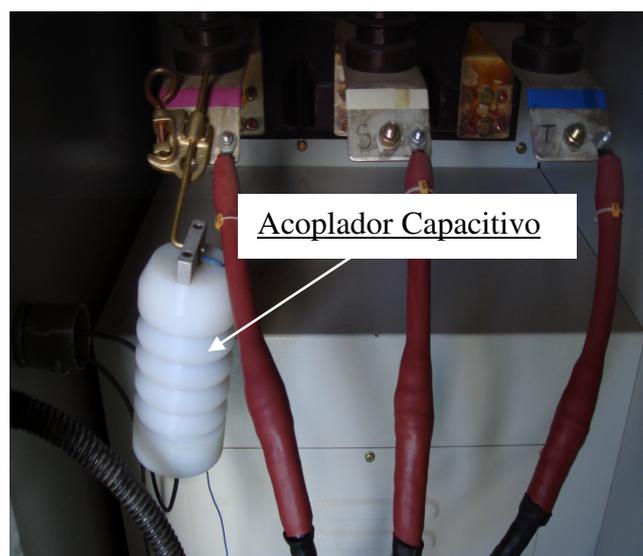


Figura 13: Acoplador Capacitivo

Fonte: (Integradores, 2007)

3.5 CANAL PLC

A topologia das redes de distribuição de energia elétrica difere consideravelmente das redes de comunicações tradicionais, como par trançado, cabo coaxial ou fibra óptica. Como já informado o canal PLC recebe numerosas interferências como: ruído, interferência, atenuação e impedância que devem ser entendidas para que fique clara a hostilidade da rede elétrica para uso do PLC. Essas restrições são fatores determinantes para estabelecer o espectro disponível para utilização do sistema PLC.

Devido a esta característica, numerosas reflexões do sinal são recebidas, e ocorrem principalmente devido à junção de cabos de diferentes impedâncias. Desta forma a função de transferência torna-se:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N A(f, l_i) \exp(-j2\pi f \tau_i) \quad (3.1)$$

Sendo $A(f, l_i)$ a atenuação e $\exp(-j2\pi f \tau_i)$ o atraso de propagação do sinal para cada percurso i .

Analisando-se no domínio do tempo, tem-se que a canal PLC possui a forma:

$$h(t) = \sum_{i=1}^N A_i \delta(t - \tau_i) \quad (3.2)$$

O exemplo a seguir mostra uma topologia de rede elétrica simples com apenas uma ramificação (Figura 14). [Zimmermann et al 2000].

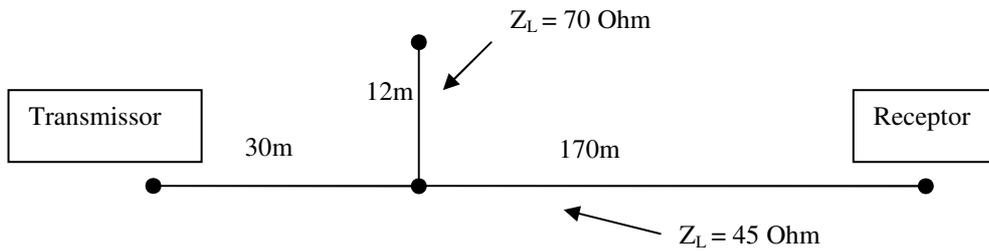


Figura 14: Exemplo de topologia de uma rede de distribuição de energia elétrica.

3.5.1 Ruídos

As características hostis do canal PLC, multipercurso e alta atenuação, tornam o sistema muito sensível a ruídos e interferências. Várias investigações e medições demonstraram que os ruídos nos sistemas PLC não são do tipo AWGN (“*Additive White Gaussian Noise*” – Ruído Branco Gaussiano Aditivo) (HOOIJEN, 1998). Uma interessante descrição é dada em (ZEMMERMANN et al, 2002), que caracteriza o ruído como uma superposição de cinco tipos de ruído, que se distinguem por sua origem, duração, largura de faixa de frequência e intensidade (Figura 15). A seguir tem-se uma breve descrição de cada tipo segundo (ZEMMERMANN et al, 2002):

1. Ruído de fundo colorido: possui uma *PSD* (*Power Spectral Density*) relativamente baixa, variando com a frequência. Sua causa é a superposição de numerosas fontes de ruídos com baixas potências;
2. Ruído de faixa estreita: sinal de forma senoidal, com amplitude modulada, causado pelo ingresso de estações de radiodifusão. Sua intensidade varia de acordo com o horário do dia.

3. Ruído impulsivo periódico assíncrono com frequência da rede elétrica: possui a forma de um impulso com uma taxa de repetição entre 50 e 200 kHz. São geralmente causados por fontes chaveadas.
4. Ruído impulsivo periódico síncrono com a frequência da rede elétrica: possui uma taxa de repetição de 60 ou 120 Hz. Os impulsos possuem uma curta duração de tempo (alguns microssegundos) e possui uma PSD que decresce com a frequência. Geralmente causado por fontes de alimentação, principalmente por diodos retificadores que trabalham em sincronia com a rede elétrica.
5. Ruído impulsivo assíncrono: geralmente causado por chaveamentos transitórios na rede. Estes impulsos possuem duração que variam de alguns microssegundos a poucos milissegundos, com um intervalo entre chegadas aleatórias. Possui uma PSD capaz de atingir valores maiores que 50 dB dos apresentados pelo ruído colorido, tornando-se assim, a principal fonte de erros nos sistemas de transmissão PLC.

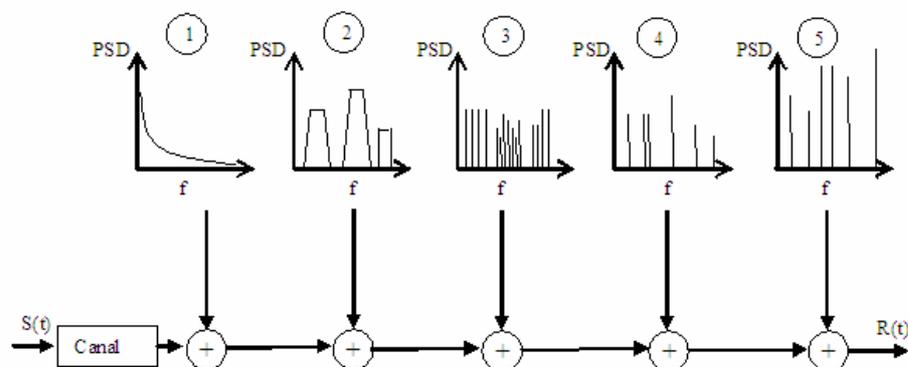


Figura 14: Adição de diferentes tipos de ruídos na transmissão PLC. [Zimmermann et al 2002].

Os três primeiros tipos de ruídos se mantêm estacionários por longos períodos de duração (segundos, minutos, ou até mesmo horas) e são classificados como ruídos de fundo. Os tipos de ruídos 4 e 5, ao contrário dos primeiros, possuem uma taxa de variação de microssegundos ou milissegundos, e são classificados como ruídos impulsivos. Os ruídos impulsivos possuem amplitudes maiores que os ruídos de fundo, sendo considerados assim as principais fontes de erros nos sistemas PLC (SILCA et al, 2006).

3.5.1.1 Relação Sinal/Ruído.

Do nosso conhecimento, não existe nenhum estudo ou publicação no Brasil sobre as características de ruído de linhas de distribuição de baixa e média tensão e como estas influenciam no desempenho de um sistema PLC.

A faixa de frequências utilizada pelos produtos atualmente ofertados ao mercado brasileiro foi determinada por estudos, considerando características existentes na Europa e Estados Unidos. Aspectos peculiares das instalações brasileiras, tais como, projeto/implementação da fiação interna das residências (diagramas unifilares), utilização de dispositivos de proteção à pessoa, 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 um sistema PLC no Brasil (APTEL, 2008).

Outro grande problema são os capacitores para correção do fator de potência das lâmpadas de iluminação pública a vapores metálicos, os quais necessitam de reatores de alto fator de potência e são alimentados diretamente na rede de baixa tensão, atenuando

fortemente o sinal. A solução para estes problemas é a utilização de métodos de modulação especiais conforme citado no item 2.8.

A relação *signal-to-noise* (SNR) é um parâmetro chave ao estimar o desempenho de um sistema de comunicações (SILVA et al, 2006). O SNR é obtido conforme equação (3.3).

$$\text{SNR} = \frac{\text{Received Power}}{\text{Noise Power}} \quad (3.3)$$

Este parâmetro é relacionado ao desempenho de um sistema de comunicações. Quanto mais elevado o SNR, melhor é a comunicação.

3.5.2 Interferência

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

O primeiro caso relaciona-se 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, ainda não existe um padrão definido e certamente acompanhará uma das definições (Europeu-Americana). Nos EUA equipamentos e sistemas PLC devem se submeter aos limites de emissão estabelecidos pela Norma FCC - Parte 15. Na Europa se aplica a Regulamentação estabelecida na Norma CISPR 22 que está sendo revista para a inclusão de equipamentos PLC (APTEL, 2008).

O PLC está sujeito a limites de radiação de 30 mV/m, medidos a uma distância de 30 metros (conforme a norma alemã NB30 – o que será seguido pela regulamentação brasileira).

Com relação à interferência provocada por outros usuários licenciados no sistema PLC a preocupação neste caso é a redução do espectro disponível para o sistema, causado pela interferência provocada por outros sistemas licenciados, implicando em taxas de transmissão muito baixas, e inviabilizando sua aplicação. Considerando que 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 (APTEL, 2008).

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.

3.5.3 Atenuação

Outro problema que limita a transmissão em alta velocidade é a atenuação. Geralmente, o valor da atenuação de um sinal é relacionado com a frequência e com a distância percorrida pelo sinal. Este fato limita consideravelmente a distância de transmissão

em altas frequências. Na rede elétrica, as cargas e as descontinuidades de impedância também contribuem para a atenuação do sinal, e podem variar com o tempo e com a localização. Os causadores destas descontinuidades são: as emendas nos fios, os interruptores e as tomadas (FERREIRA, 2005).

Ao serem conectados, os equipamentos também contribuem para a carga total da rede. Devido à diferença de impedância entre os equipamentos, há um descasamento que provoca a reflexão do sinal transmitido. Isto causa uma maior atenuação do sinal, pois parte do mesmo será perdida. Esta atenuação está relacionada com a frequência, pois os aparelhos eletro-eletrônicos possuem filtros capacitivos que limitam consideravelmente os sinais de baixa frequência.

3.5.4 Impedância de Rede Elétrica.

A impedância de rede exerce grande influência na qualidade da transmissão de sinais (SUTTERLIN; DOWNEY, 1999). O transmissor do modem deve inserir uma tensão na rede elétrica que atinja o nível máximo de amplitude permitido pela norma. Portanto, a potência de transmissão é facilmente calculada quando a impedância da rede é conhecida. Quanto menor for a impedância, maior terá que ser a potência de transmissão. Todavia, sabe-se que a impedância da rede pode variar com o tempo e com a frequência, tornando maior o custo do estágio de saída dos transmissores. A impedância de rede resulta de três fatores (FERREIRA, 2005):

- Impedância do transformador de distribuição – aumenta com a frequência;

- Impedância característica do cabo – deve levar em consideração este fato, pois, existem diversos tipos de cabos, os quais podem ser modelados de maneiras diferentes a partir de indutores e resistores em série;
- Impedância dos equipamentos conectados – pode variar entre 10 e 100. O descasamento de impedância aumenta o índice de reflexão do sinal transmitido, acarretando em uma diminuição da potência do sinal original.

3.6 MODULAÇÃO DO SINAL

Um fator importante relativo à imunidade do sistema é o tipo de modulação utilizada, que põe em foco outro importante requisito da transmissão de informação que é a multiplexação, ou seja, é o processo de combinar vários sinais para transmissão simultânea sobre o mesmo canal (TROMPOWSKY, 2005). Existem uma variedade de técnicas para acoplar o sinal ao canal de comunicação, cada uma com suas vantagens e desvantagens o qual destaca-se três técnicas utilizadas na tecnologia PLC: Espalhamento Espectral (SS - *Spread Spectrum*), Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (*OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e Modulação Estreita da Faixa (GMSK – *Gaussian Minimum Shift Keying*).

3.6.1 Espalhamento Espectral.

A tecnologia Espalhamento Espectral é uma técnica para uso em sistemas de comunicações confiáveis, seguros e de missão crítica e é caracterizada pela habilidade de rejeitar interferências na transmissão de informação. Fornece uma densidade espectral da

potência muito baixa espalhando a potência do sinal sobre uma faixa de frequência muito larga. Este tipo de modulação requer, conseqüentemente, uma largura de faixa muito grande para transmitir diversos Mbs/s. Como a largura de faixa disponível é limitada, esta técnica é ideal para transmitir taxas de dados mais baixas nos cabos de energia elétrica (ANDRADE; SOUZA, 2004).

O *Spread Spectrum* é realizado antes de transmissão do sinal através do uso de um código, independente da informação, esse mesmo código é usado pelo receptor para recuperar a informação original. Essa modulação compromete a eficiência em termos de banda e potência em função da segurança nas transmissões em ambientes hostis. Quando o sinal é espalhado no espectro de potência, ele fica com aparência de um sinal de ruído, podendo ser transmitido pelo canal sem ser detectado por quem possa estar monitorando a comunicação (VARGAS, 2004). A Figura 16 ilustra como fica o espectro de potencia para um sinal espalhado e um sinal de banda base.

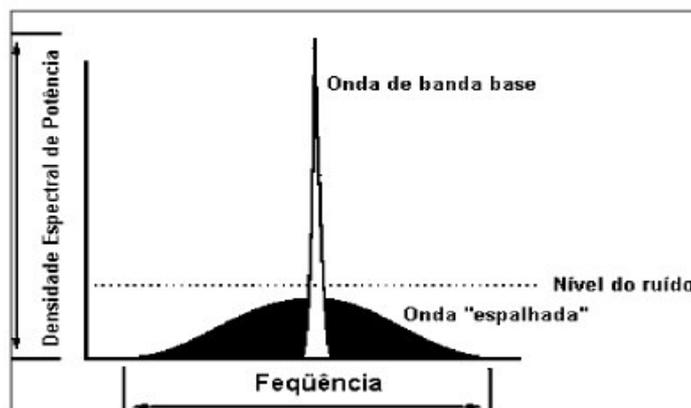


Figura 15: Densidade espectral de um sinal em banda base e um sinal espalhado.

3.6.2 Divisão de Frequência Ortogonal

A técnica de modulação OFDM é uma técnica de modulação no qual existe um número amplo de frequência subportadoras, que são transmitidas simultaneamente. Essas subportadoras são sobrepostas em diferentes ângulos de fase (ortogonalmente espaçadas), a fim de carregarem um número mais amplo de frequências numa área o menor possível. Uma quantidade menor de dados é transmitida em cada subportadora, porém a soma total é consideravelmente alta e proporciona uso eficiente do espectro.

A multiplexação OFDM é uma das melhores soluções para combater os ruídos impulsivos do canal PLC provocados por múltiplos percursos, radiodifusão, reflexão, chaveamento, bancos de capacitores, etc (HRASNICA et al, 2004). Devido a sua complexidade, a modulação OFDM agrega confiabilidade ao canal PLC através das seguintes características (SILVA et al, 2007):

- Possibilidade de se adaptar às condições do meio de transmissão através da avaliação da relação sinal/ruído;
- Melhor aproveitamento do espectro de frequências;
- Redução significativa da necessidade de equalização do canal;
- Menor suscetibilidade aos problemas de sinais advindos de múltiplos percursos;
- Menor sensibilidade *Inter-Symbol Interference* (ISI);
- Maior imunidade aos ruídos impulsivos e aos rápidos enfraquecimentos de sinal;
- Menor sensibilidade à seletividade em frequência causada por múltiplos percursos e altas taxas de transmissão.

No método OFDM as sub-portadoras são espalhadas de forma que fiquem centradas nos zeros das sub-portadoras adjacentes, conforme Figura 17.

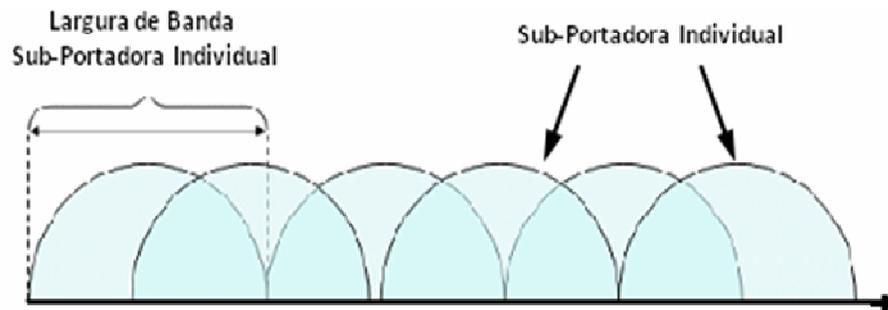


Figura 16: Representação simbólica OFDM.

Fonte: (Hrasnica; Haidine; Lehnert, 2004)

Este tipo de modulação oferece grande adaptabilidade ao sistema, pois é possível suprimir portadoras interferentes ou interferidas ou variar o carregamento (número de bits) de cada portadora de acordo com a relação sinal/ruído ou atenuação do enlace. A Figura 18 mostra as subportadoras de um sinal OFDM (CORREA, 2004).

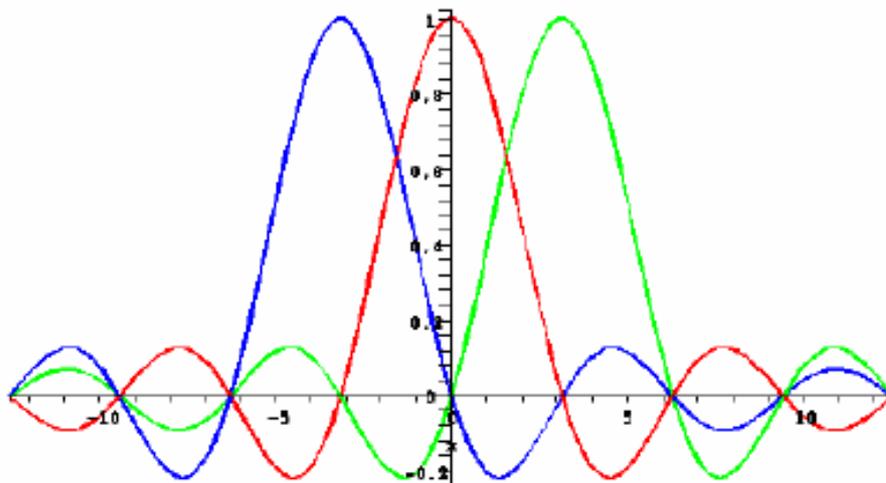


Figura 17: Subportadoras de um sinal OFDM.

OFDM proporciona alto desempenho num ambiente ruidoso, pois encontra sincronização em ambiente hostil; não requer equalização de canal, otimiza a relação sinal/ruído e utiliza um método de correção de erro para surtos de ruído. A modulação ocorre em até 1280 portadoras diferentes simultaneamente, garantindo uma melhor adequação à rede elétrica, pois de acordo com o nível de ruído e frequência em que estes ruídos se encontram, estes equipamentos alternam o carregamento dos dados automaticamente entre estas várias portadoras, garantindo assim estabilidade de comunicação mesmo sob condições de rede desfavoráveis (SILVA; PACHECO, 2005).

A Figura 19 mostra um exemplo de como a modulação em OFDM pode se adequar às diversas condições da rede em tempo real. Na medida em que a relação sinal/ruído diminui o carregamento de bits na portadora também diminui (APTEL, 2008).

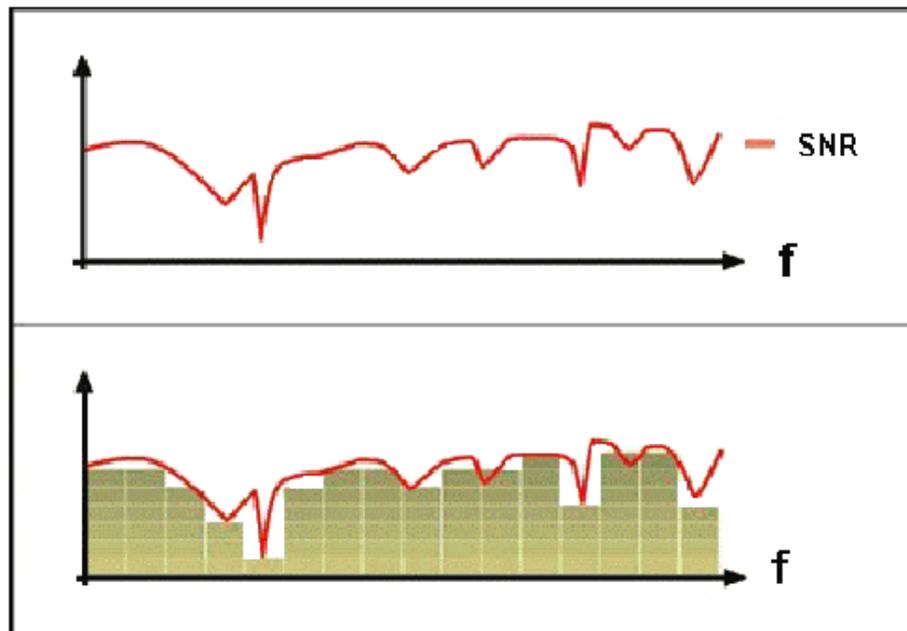


Figura 18: Relação sinal/ruído na modulação OFDM.

Fonte: (ANATEL/APTEL, 2004)

Utilizar a modulação OFDM é uma das melhores soluções para combater os ruídos impulsivos do canal do PLC provocados por múltiplos percursos, radiodifusão, reflexão, chaveamento, bancos de capacitores, etc. Devido sua robustez, a modulação OFDM garante a confiabilidade na transmissão via rede elétrica.

3.6.3 Modulação Estreita da Faixa

A Modulação GMSK é o mesmo método de modulação utilizado na modulação GSM (*Global System for Mobile Communications*). O GMSK é um tipo especial de modulação de faixa estreita que transmite os dados na fase da portadora, resultando um sinal de envelope constante. Isto permite o uso de amplificadores menos complexos, sem produzir distúrbios harmônicos. O sistema multi-portadoras GMSK pode ser considerado como um sistema OFDM banda larga. O GMSK tem um formato de espectro do tipo Gaussiano, daí a origem do seu nome (TIBALDI;JUNIOR,200?).

3.7 SEGURANÇA DOS DADOS NO SISTEMA PLC

Para executar a comunicação através da rede de energia elétrica que tem topologia em forma de barramento, que aplicar uma análise da segurança da rede devido ao risco inerente à solução. O risco pode ser identificado não somente em relação à confidencialidade dos dados transmitidos, mas também às tentativas de acessos indevidos e de fraudes aos serviços que solicitam autorizações.

Os dispositivos PLC atuais para proteger as informações transmitidas operam com criptografia DES 56 bits e sistema de detecção de intrusão para que nenhum acesso seja feito sem o conhecimento da administração da rede. Portanto, para garantir à confidencialidade, a integridade, a disponibilidade e acessos não autorizados os seguintes itens de segurança devem ser verificados (DS2, 2007):

- a) Controle de acesso;
- b) Vulnerabilidade;
- c) Controles de criptografia;
- d) Proteção contra *softwares* maliciosos;
- e) Controle de acesso à rede;
- f) Controle de acesso ao sistema operacional.

3.8 SERVICOS SUPORTADOS PELA TECNOLOGIA PLC

Considerando o atual estágio que a tecnologia se encontra e se considerar as possibilidades de exploração de serviços que ela oferece, e pela conseqüente pressão para aumentar os resultados nos mercados de energia dado o anuncio de novas competições, forçam as empresas de energia elétrica a buscar fontes alternativas de receita. Outra razão é redução de custos operacionais que a implantação desta tecnologia proporciona.

A implantação da tecnologia contribui para a realização desses dois objetivos, possibilitando a exploração dos seguintes serviços (ANATEL; APTEL, 2003):

- a) Serviços de Monitoramento de Trânsito (Câmeras e Comandos);

- b) Automação Residencial;
- c) Serviços de Monitoração e Vigilância;
- d) Monitoramento de processos produtivos on-line;
- e) Acesso em Banda Larga à Internet;
- f) Vídeo sob demanda;
- g) Telefonia IP (VoIP);
- h) Telemedicina.

3.9 VANTAGENS DA TECNOLOGIA PLC

Embora a tecnologia PLC ainda não esteja totalmente consolidada e regulamentada, ela é uma alternativa viável para transmissão de dados em banda larga, pois possui as seguintes vantagens (CORREA, 2009):

- Alta capilaridade do sistema elétrico para diminuição dos custos de implantação;
- Não há necessidade de nova cabeação (a rede já está pronta);
- Barramento compartilhado (significa custo compartilhado);
- Oportunidade de novos negócios e diversificação de atividades;
- Rede doméstica com novas e múltiplas aplicações;
- Fácil instalação.

3.10 DESVANTAGENS DA TECNOLOGIA PLC

As desvantagens que atualmente impedem uma massificação da tecnologia PLC estão ligadas principalmente à padronização e regulamentação e, em parte, pela diversificação e qualidade das redes de distribuição de energia elétrica (CORREA, 2009):

Mesmo nos países onde já existe exploração comercial, não existe uma regulamentação forte aceita mundialmente. Cada país vem condicionando regulamentação conforme os avanços da tecnologia. No Brasil, ainda não existe sequer uma regulamentação. Existe apenas uma autorização da ANATEL para realização de testes com a tecnologia;

1. A padronização também é outro grande empecilho, apesar das tentativas do PLCForum, HomePlug Alliance, ANATEL e outros órgãos;
2. A qualidade das redes elétricas é um problema para algumas concessionárias brasileiras que possuem redes antigas e com necessidade de melhorias até mesmo para o fornecimento de energia elétrica;
3. Falta escala de produção, o que torna os equipamentos mais caros.
4. O excesso de ruído na rede elétrica brasileira diminui a velocidade de transmissão e pode até silenciar o sinal.

3.11 LEGISLAÇÃO E REGULAMENTO

A Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é o órgão governamental, no Brasil, que estabelece as normas, procedimentos para a utilização do PLC e homologação de equipamentos, emitindo licenças específicas para cada caso.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão governamental, no Brasil, responsável pela normatização do setor de energia elétrica. Conforme já informado muitos equipamentos retornam ruídos para a rede de energia elétrica, para reduzir este ruído basta os fabricantes de equipamentos colocarem filtros de frequências como é feito nos Estados Unidos e outros Países. Algumas entidades na Europa, EUA, Brasil e outras partes do mundo desenvolvem atividades de pesquisa, desenvolvimento tecnológico, padronização e regulamentação para o PLC. Na Europa o projeto Opera (*Open PLC European Research Alliance for New Generation PLC Integrated Network*) ou Aliança Européia para uma Rede PLC Banda Larga Integrada, de Nova Geração, é um exemplo de atividade que busca desenvolver a padronização e regulamentação do PLC, o projeto Opera tem como objetivos:

- Realizar a necessária pesquisa, demonstração e disseminação, numa escola Européia, de modo a possibilitar aos cidadãos europeus o uso de suas vantagens mesmo diante dos obstáculos da tecnologia PLC;
- Melhorar os atuais sistemas PLC de baixa tensão (BT) e media tensão (MT), atendendo aos requisitos de banda, distância, facilidade de operação, EMC (electromagnetic compatibility), gerência de rede e modelamento de canal;
- Desenvolver soluções ótimas para conexões das redes de acesso PLC às redes Backbone;
- Desenvolver “serviços prontos para venda” sobre a tecnologia PLC e desenvolver ou melhorar os terminais de usuários (FITEC, 2005).

3.11.1 Regulamentação para o sistema *Indoor*

Atualmente, várias tecnologias proprietárias foram desenvolvidas para o sistema *indoor*. A característica de interoperabilidade dos dispositivos de diferentes tecnologias não conseguirem se comunicar motivou a criação, em abril de 2000, do HomePlug Fórum, que criou um novo padrão denominado HomePlug 1.0. Esse especifica a subcamada de acesso ao meio e a camada física para redes de baixa tensão. O Fórum industrial HomePlug tem como principais objetivos:

- Fornecer um fórum para o desenvolvimento de normas abertas;
- Patrocinar programas de educação do mercado e de usuários para acelerar a demanda por essa tecnologia;
- Publicar especificação de rede interna de powerline classe Ethernet 10 Mbps.

Já existe nova versão do padrão HomePlug versão 2 para a transmissão de dados via canais indoor que atende as aplicações de alta velocidade (HDTV, videoconferência e outras aplicações multimídia) com taxas iguais a 200 Mbps.

3.11.2 Regulamentação para o sistema *Outdoor*

As redes elétricas de baixa e média tensão das distribuidoras de energia elétrica que compõem a solução PLC – *last miles* também estão sendo analisadas. Para esses ambientes nenhuma padronização foi definida, pois se trata de ambientes com bastante concorrência.

De acordo com as estimativas da ANEEL, a regulamentação para a Internet via rede elétrica ficou pronta em 2008. Os equipamentos para operar no Brasil devem ser homologados pela ANATEL, os equipamentos geração II estão em processo de homologação (ANATEL; APTEL, 2008).

4 IMPLANTAÇÃO DO ENLACE PLC

Neste capítulo serão apresentadas as etapas de implementação do enlace PLC piloto para substituição do sistema de comunicação via rádio da empilhadeira de bauxita 2. Essas etapas consistem de *Site Survey* e instalação da topologia final.

4.1 *SITE SURVEY*

O *site survey* teve como objetivo obter informações sobre a infra-estrutura do local de implantação e realizar medições de níveis de potência e SNR, para se determinar a topologia, equipamentos e as interfaces com os sistemas elétricos a serem utilizados. Dessa forma seria possível reduzir ao máximo as interferências, para alcançar os propósitos e objetivos da tecnologia PLC. Para isso, foi contratada uma empresa com *know how* em sistema PLC a qual determinou algumas etapas para garantir a implementação do sistema com segurança e confiabilidade. Essas etapas encontram-se listadas abaixo e serão detalhadas nos itens posteriores (INTEGRADORES, 2007).

- Inspeção do local de implantação;
- Equipamentos e Configuração;
- Medição de nível de sinal potência.

4.1.1 Inspeção do local de implantação

Como a comunicação PLC utiliza como meio de transmissão de dados na rede de energia elétrica, foi realizada uma inspeção do encaminhamento do cabo de alimentação de energia de 4.16 KVA da empilhadeira de bauxita. Na inspeção, utilizou-se uma planta baixa

do pátio de bauxita para identificar os locais por onde passa o cabo de energia, e em loco, foram observadas as condições das caixas de passagem, caixa de conexão da berma, cubículos dos disjuntores na subestação 12A e subestação da empilhadeira de bauxita 2.

Os cubículos dos disjuntores nas subestações e caixa de conexão da berma estavam em condições favoráveis para instalação dos acopladores capacitivos e modems PLC com isso, não houve necessidade de serviços adicionais nesses locais.

Essa inspeção mostrou que a infra-estrutura do local de implantação do enlace PLC piloto apresentava condições favoráveis para instalações dos equipamentos, porém só as medições de potencia iriam determinar a melhor topologia para o enlace PLC.

4.1.2 Equipamentos e Configuração

Para realização as medições foram definidos alguns instrumentos, equipamentos e software, utilizando-se como critério de escolha experiências anteriores da empresa contratada. Os instrumentos e equipamentos utilizados estão listados abaixo (INTEGRADORES, 2007):

- 02 Modem PLC;
- 02 Acopladores capacitivos;
- 01 Espectrógrafo.

O modem PLC foi utilizado como gerador de sinal nos teste de medição de nível de potencia e SNR. Para isso, o *software* haneWIN DHCP Server foi utilizado para acessar e configurar os parâmetros como endereço IP, modo de operação e modo de faixa de frequência de trabalho. A Figura 20 mostra a janela do *software* haneWIN DHCP Server.

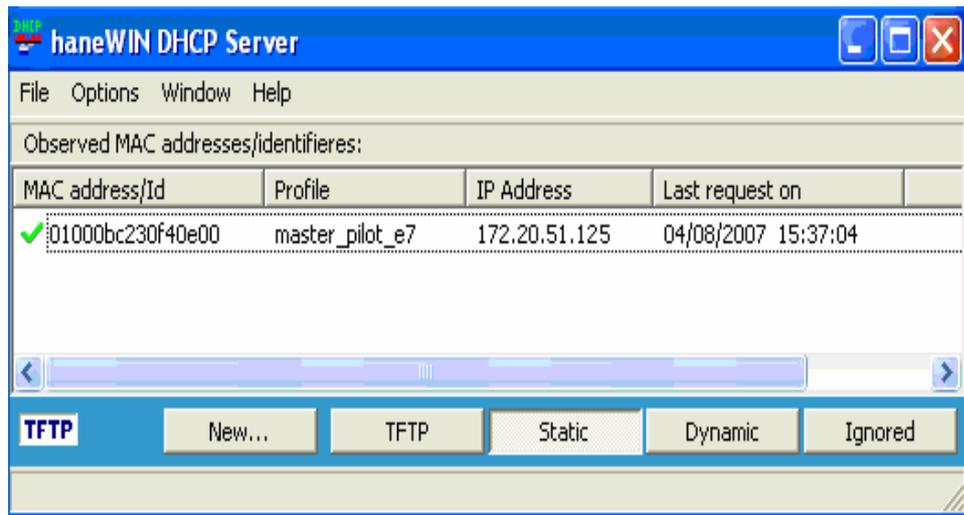
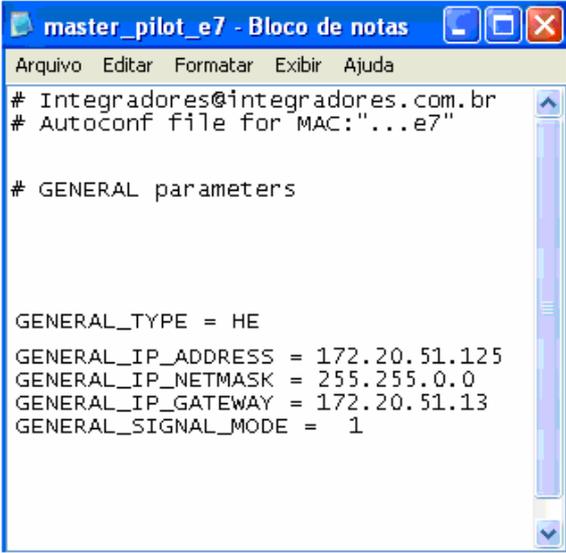


Figura 19: Janela do software hane WIN DHCP Server

A Figura 21 mostra o arquivo com os parâmetros de configuração do modem PLC no qual está informado o endereço IP (172.20.51.125), modo de operação em master (GENERAL_TYPE = HE) e faixa de frequência de trabalho de 3 a 13 MHz (GENERAL_SINAL_MODE = 1) (Corinex, 2007). Faixa de trabalho escolhido, devido estar dentro da faixa de trabalho *outdoor*, conforme item 3.1.

O parâmetro GENERAL_TYPE possui três tipos de configuração: Repetidor (TDREPEATER), Master (HE) e Slave (CPE). Eles podem ser alterados conforme sua utilização dentro do enlace PLC.

Já o parâmetro GENERAL_SINAL_MODE pode ser configurado dentro dos 13 modos de frequências da faixa de 2 a 34 MHz, conforme quadro 4.1. Essa disponibilidade de 13 modos de frequência é para adequar o modem PLC quando é utilizado como repetidor, conforme seção 3.3.1, obtendo assim um melhor desempenho do enlace.



```

master_pilot_e7 - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
# Integradores@integradores.com.br
# Autoconf file for MAC:"...e7"

# GENERAL parameters

GENERAL_TYPE = HE
GENERAL_IP_ADDRESS = 172.20.51.125
GENERAL_IP_NETMASK = 255.255.0.0
GENERAL_IP_GATEWAY = 172.20.51.13
GENERAL_SIGNAL_MODE = 1

```

Figura 20: Parâmetros de configuração do modem PLC máster

Os acopladores capacitivos, conforme seção 3.4, foram utilizados para injetar e extrair o sinal PLC no cabo de energia elétrica.

O espectrógrafo foi utilizado para medir o nível de sinal de potência gerado pelo modem PLC.

4.1.3 Medição de nível de sinal de potência

Para realização das medições de nível de sinal de potência, com o objetivo de encontrar a configuração de topologia de rede mais adequada, foram escolhidos três trechos ao longo do encaminhamento do cabo de energia de alimentação da empilhadeira de bauxita 2, que são:

- Trecho 1 - Subestação 12A e subestação da empilhadeira de bauxita 2;
- Trecho 2 - Subestação 12A e caixa de conexão da berma (Figura 4.3);

- Trecho 3 - Caixa de conexão da berma e subestação empilhadeira de bauxita 2 (Figura 22).

A Figura 22 apresenta a distância do trecho 2 que é de 614 m compreendendo entre a subestação 12A e caixa de conexão da berma. Esse é o encaminhamento da parte fixa do cabo de energia de alimentação da empilhadeira de bauxita 2. Já a Figura 23, apresenta a distância do trecho 3 que é de 300 m compreendendo entre a caixa de conexão da berma e a subestação da empilhadeira de bauxita 2 e é o trecho da parte móvel do cabo de energia de alimentação.

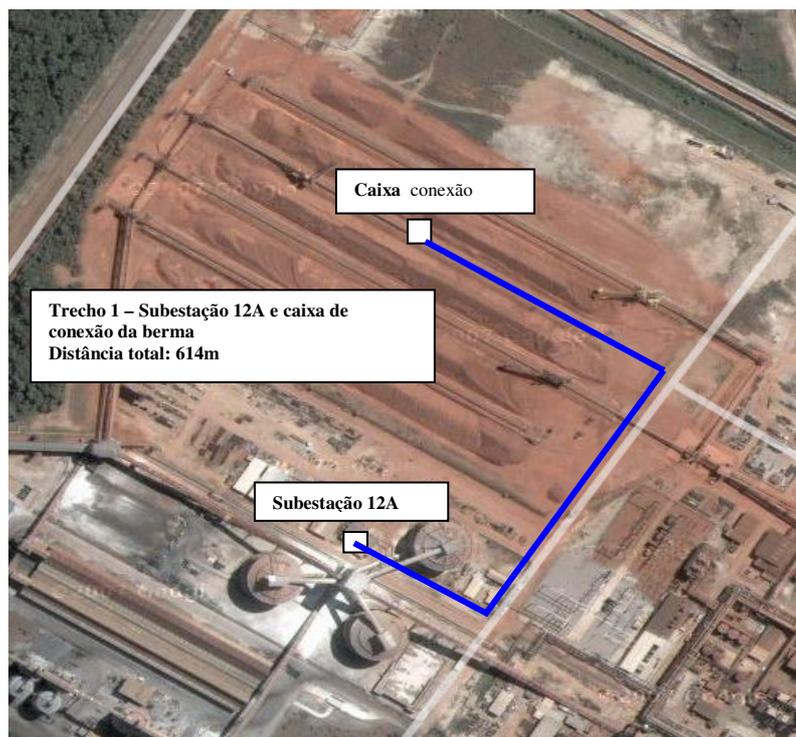


Figura 21: Distância do trecho 2



Figura 22: Distância do trecho 3

O trecho 1 é o trecho mais longo, compreende a distância entre a subestação 12A e a subestação da empilhadeira de bauxita 2. Essa distância é de 914 m

As medições de nível de sinal de potência de um enlace PLC é conceituado qualitativamente conforme quadro 1 mostrado abaixo (LEAL, 200).

Quadro 1 – Conceito Enlace PLC (Leal, 2008)

Nível Sinal	Conceito
Menor - 40 dbm	Ruim
Entre - 40 e - 30 dbm	Regular
Maior - 30 dbm	Ótimo

4.1.3.1 Medição no trecho 1

Para realizar a medição no trecho 1, um modem e um acoplador capacitivo foram instalados na fase R do cabo de energia de alimentação da empilhadeira de bauxita 2 no cubículo do disjuntor na subestação 12A (Figura 24 - A) e outro acoplador capacitivo na mesma fase no cubículo do disjuntor da subestação da empilhadeira de bauxita 2 (Figura 24 - B).

A medição foi realizada no acoplador capacitivo, através do espectrógrafo, na subestação da empilhadeira de bauxita 2 e o resultado obtido foi um valor de sinal menor que -50dbm, considerado ruim para um enlace PLC, conforme quadro 1 (INTEGRADORES, 2007).



(A)



(B)

Figura 23: Cubículo subestação 12A (A) e da empilhadeira de bauxita (B)

4.1.3.2 Medição no trecho 2

A medição no trecho 2, foi retirado o acoplador capacitivo que foi instalado na subestação da empilhadeira de bauxita 2 e instalado na fase R na caixa de conexão da berma (Figura 25). A medição foi realizada no acoplador capacitivo, através do espectrógrafo, na caixa de conexão da berma e o valor de sinal obtido foi menor que -40 dbm, um valor regular, conforme quadro 1, mas ainda baixo para estabelecer um enlace PLC, pois dependendo do nível de ruído o enlace é inviável (INTEGRADORES, 2007).



Figura 24: Acoplador capacitivo na caixa de conexão da berma

4.1.3.3 Medição no trecho 3

Para medição do trecho 3, foi retirado o acoplador capacitivo que estava instalado na subestação 12A e foi instalado na fase R no cubículo do disjuntor da subestação da empilhadeira de bauxita 2. O modem foi instalado na caixa de conexão da berma e a medição foi realizada na subestação da empilhadeira de bauxita 2 (Figura 26). Neste trecho obteve-se um sinal de nível de -10 dbm, valor ótimo, adequado para estabelecer enlace PLC conforme quadro 1 (INTEGRADORES, 2007).

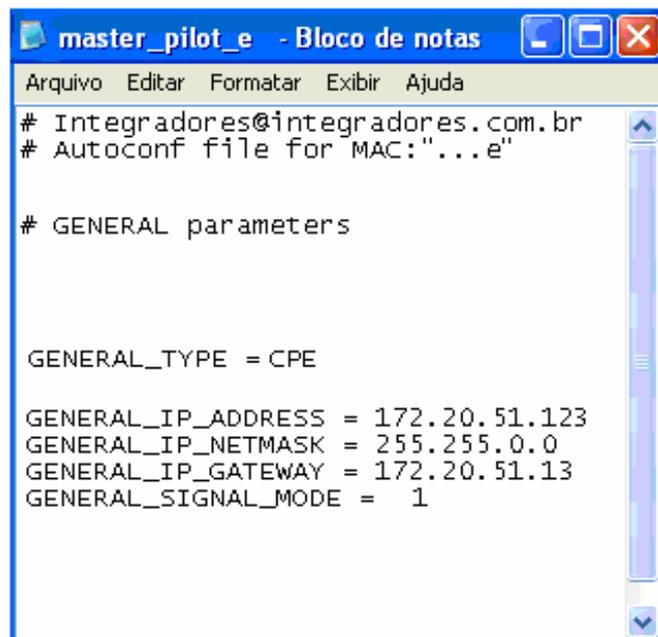


Figura 25: Modem na caixa de conexão na berma

Com esse valor de nível de sinal encontrado (-10dbm), foi possível avaliar a desempenho do enlace PLC, através do *software* *SNR-Viewer*. Este *software* é uma ferramenta

de propriedade do fabricante do modem PLC, DS2, utilizada para avaliação de desempenho e estado do enlace.

Para avaliar o enlace, foi instalado outro modem PLC na subestação da empilhadeira de bauxita, configurado conforme Figura 27.



```
master_pilot_e - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
# Integradores@integradores.com.br
# Autoconf file for MAC:"...e"

# GENERAL parameters

GENERAL_TYPE = CPE

GENERAL_IP_ADDRESS = 172.20.51.123
GENERAL_IP_NETMASK = 255.255.0.0
GENERAL_IP_GATEWAY = 172.20.51.13
GENERAL_SIGNAL_MODE = 1
```

Figura 26: Parâmetros de configuração do modem PLC *slave*

A Figura 27 mostra o arquivo com os parâmetros de configuração do modem PLC *slave* no qual está informado o endereço IP (172.20.51.123), modo de operação em *slave* (GENERAL_TYPE = CPE) e faixa de frequência de trabalho de 3 a 13 MHz (GENERAL_SINAL_MODE = 1). Faixa de trabalho igual ao do modem master.

O valor de SNR obtido foi em média 28.36 e banda física 51 Mbps. A Figura 28 mostra o desempenho do enlace através do software SNR-Viewer DS2.

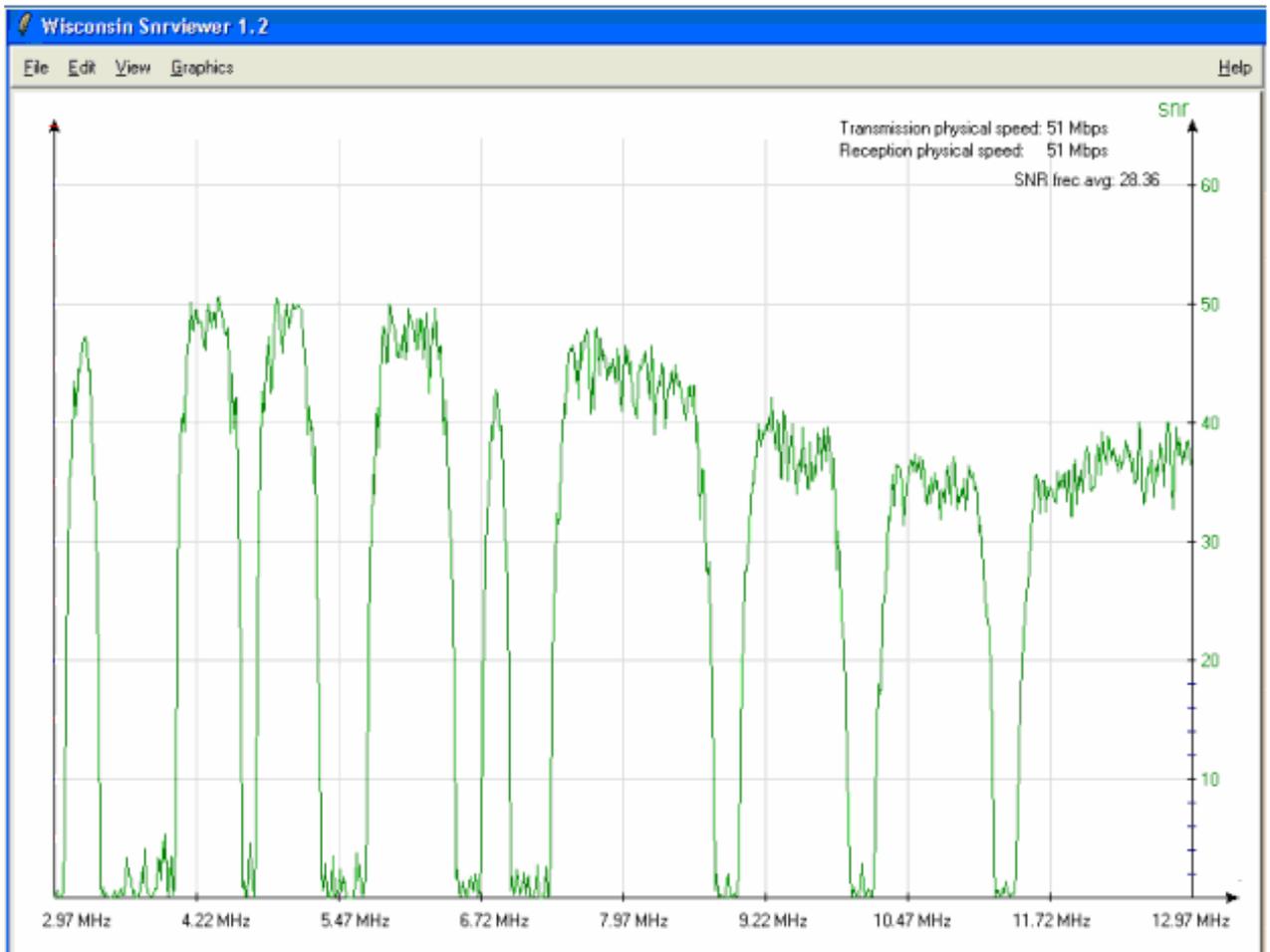


Figura 27: SNR do enlace PLC

Como pode ser observado na Figura 28, o canal PLC tem a característica de ser seletivo à frequência, ou seja, em certas frequências a atenuação do sinal é muito alta, o que impede que estas frequências possam ser utilizadas para a transmissão de sinais de informação. Para contornar tal problema, é necessário que se utilizem técnicas de modulação robustas, tais quais: OFDM (“*Orthogonal frequency-division multiplexing*” – Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (MA et al 2005) (SILVA et al 2006) (HRASNICA et al 2004)).

Como conclusão das medições, ficou evidente que para implementar um o enlace ponto-a-ponto, entre a subestação 12A e a subestação da empilhadeira de bauxita, seria necessário a instalação de um repetidor a cada 300m, ou seja, instalar dois repetidores, pois o nível de sinal potência encontrado nessa distância (-10 dbm) e ótimo.

Para realizar esta configuração seria necessário seccionar o cabo de energia de 4.16 kva de alimentação da empilhadeira de bauxita 2 na caixa de passagem à 300 m da subestação 12A e montar um painel para instalar o acoplador capacitivo e um repetidor PLC, bem como montar um painel junto a caixa de conexão da berma , para instalar o repetidor PLC. Essa configuração não foi aceita pela engenharia da GEPOR, pois devido à instalação do cabo de energia de alimentação da empilhadeira de bauxita ser instalado por envelopamento subterrâneo, isto poderia comprometer o isolamento do cabo causando sérios problemas futuros.

Para contornar esse problema a tecnologia deveria ser implementada somente na parte móvel da máquina, ou seja, o modem PLC *master* (HE) deveria ser instalado na subestação da empilhadeira de bauxita e o modem PLC *slave* (CPE) na caixa de conexão da berma.

Essa solução é a mais adequada, pois resolve o problema da comunicação em máquina móvel, devido o movimento de translação realizada pela mesma, que requer uma tecnologia de comunicação dados não convencional e também pelo nível de sinal de potência encontrado nesse trecho.

Na parte fixa, que compreende o trecho entre a sala de controle e o caixa de conexão da berma, seria utilizado cabo de fibra ótica, eliminando o risco no cabo de alimentação, ou seja, seria implementada uma topologia híbrida. Com uma topologia híbrida, aumenta-se a disponibilidade e a confiabilidade do sistema de comunicação.

A Figura 29 mostra a topologia híbrida sugerida para o enlace empilhadeira de bauxita no qual teremos os seguintes equipamentos:

- 1- Modem PLC;
- 2- Conversor RS232/Ethernet;
- 3- Acoplador capacitivo;
- 4- Conversor FO/Ethernet.

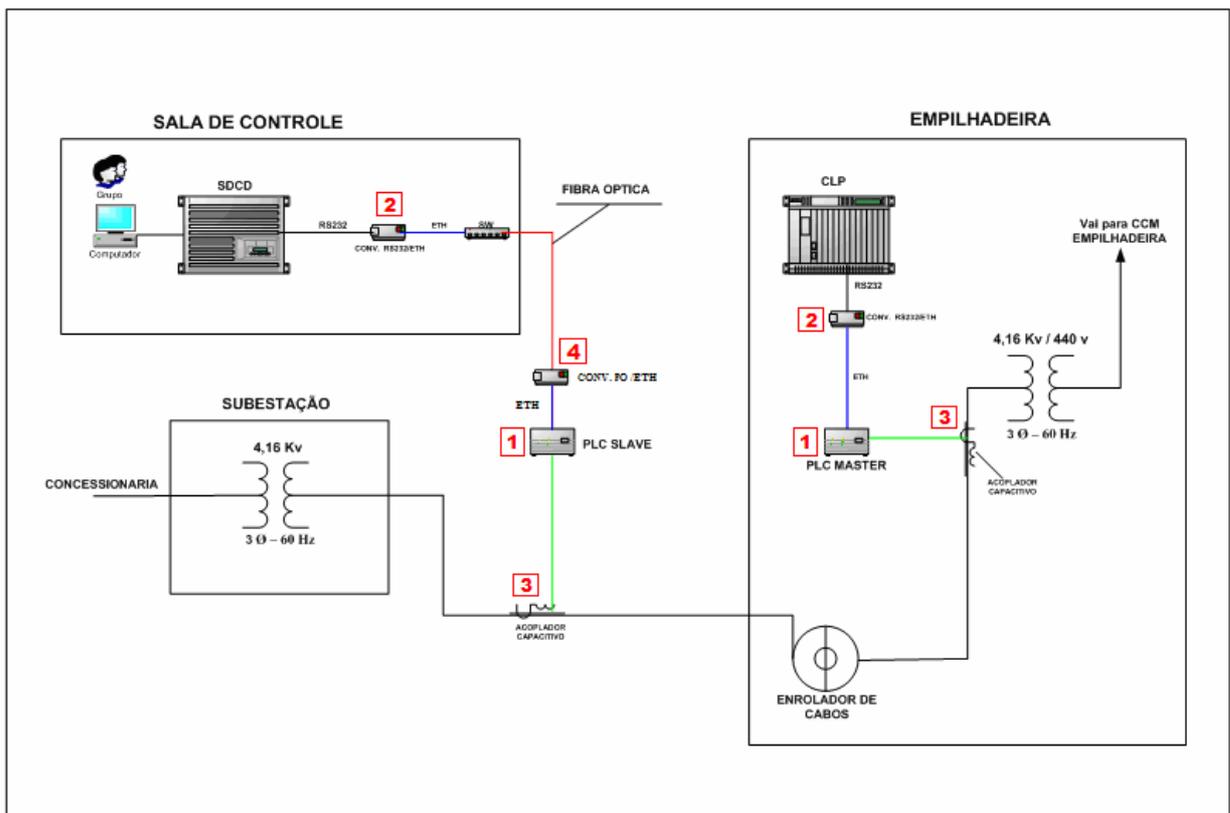


Figura 28: Topologia da tecnologia PLC sugerida para empilhadeira de bauxita

4.2 INSTALAÇÃO DO ENLACE PLC

Para instalação dos equipamentos, conforme topologia sugerida na Figura 29 foi necessário montar uma estrutura para o cabo de fibra óptica entre a sala de controle e a caixa de conexão da berma e para abrigar os equipamentos na brema, foi instalado um painel. Já para os equipamentos instalados na sala de controle e subestação da empilhadeira de bauxita 2, utilizou-se a infra-estrutura existente.

4.2.1 Equipamentos utilizados na topologia híbrida

Os equipamentos utilizados na instalação do enlace PLC além do modem PLC e do acoplador capacitivo, utilizados no *site survey*, um conversor de mídia responsável pela conversão de fibra óptica para ethernet e um conversor de protocolo, pois a comunicação entre o CLP e o SDCD é através do protocolo *ModBus*, foram necessários

4.2.2 ConFiguração dos equipamentos

As conFigurações dos equipamentos PLC, *master* e *cpe*, foram realizadas conforme item 4.1.3. A Figura 30 mostra os arquivos de conFiguração dos modems (INTEGRADORES, 2007).

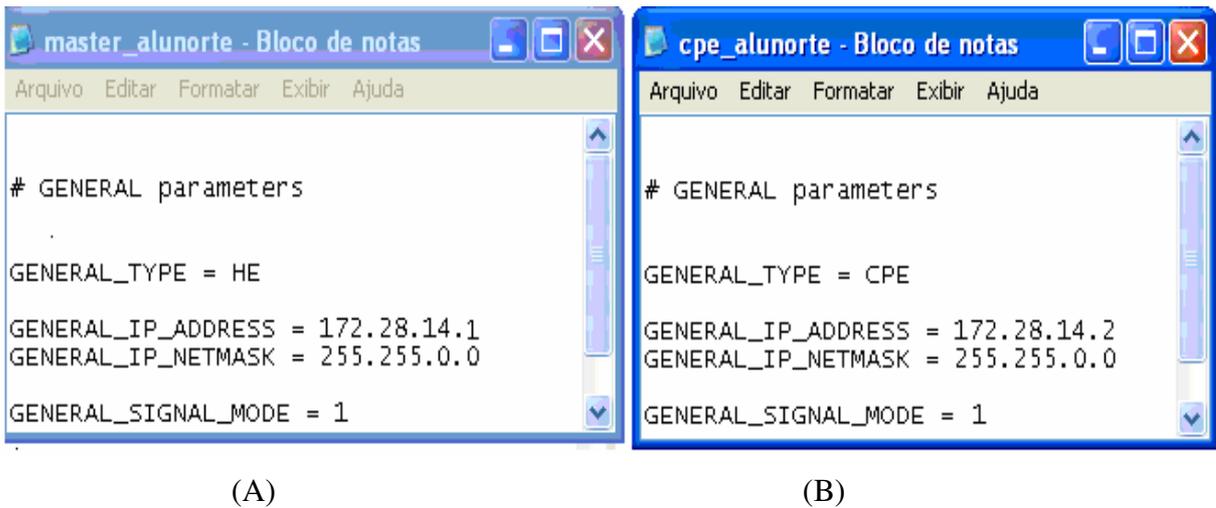


Figura 29: Arquivos de configuração do modem PLC máster (A) e slave (B)

Os conversores de protocolo foram configurados utilizando o *software Digi Connectware* no qual foram inseridos os IP's dos mesmos (INTEGRADORES, 2007). A Figura 31 mostra a configuração do conversor instalado na berma e a Figura 32, a configuração do conversor instalado na subestação da empilhadeira de bauxita.

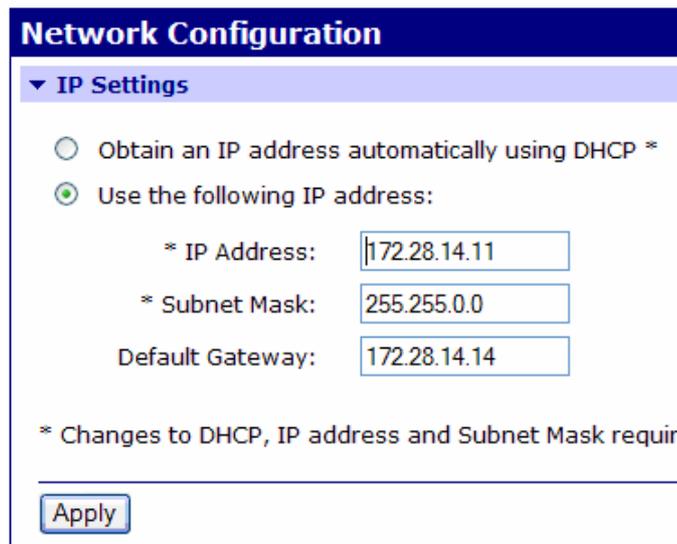
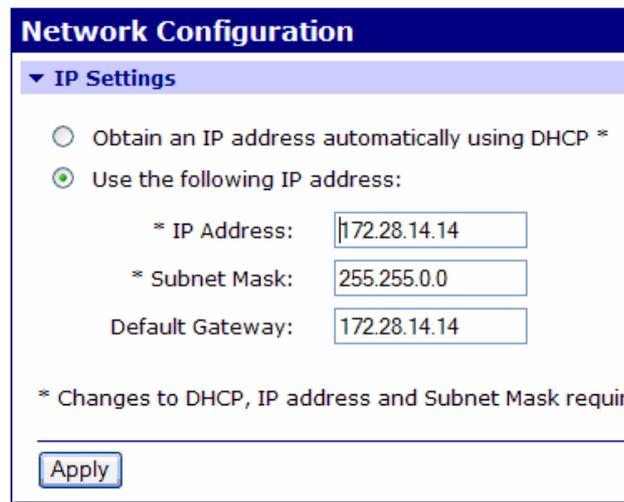


Figura 30: Configuração do conversor da berma



Network Configuration

▼ IP Settings

Obtain an IP address automatically using DHCP *

Use the following IP address:

* IP Address:

* Subnet Mask:

Default Gateway:

* Changes to DHCP, IP address and Subnet Mask require

Figura 31: ConFiguração do conversor da subestação da empilhadeira de bauxita2

4.2.2 Detalhes das instalações

A Figura 33 apresenta detalhe da instalação do painel PLC com modem e conversor de FO/ETH e acoplador capacitivo na caixa de conexão.



Figura 32: Detalhes do painel PLC e acoplador capacitivo na caixa de conexão

A Figura 34 apresenta detalhe da instalação do modem na subestação da empilhadeira de bauxita, CLP e conversor de FO/ETH no painel do CLP e acoplador capacitivo do cubículo do disjuntor.

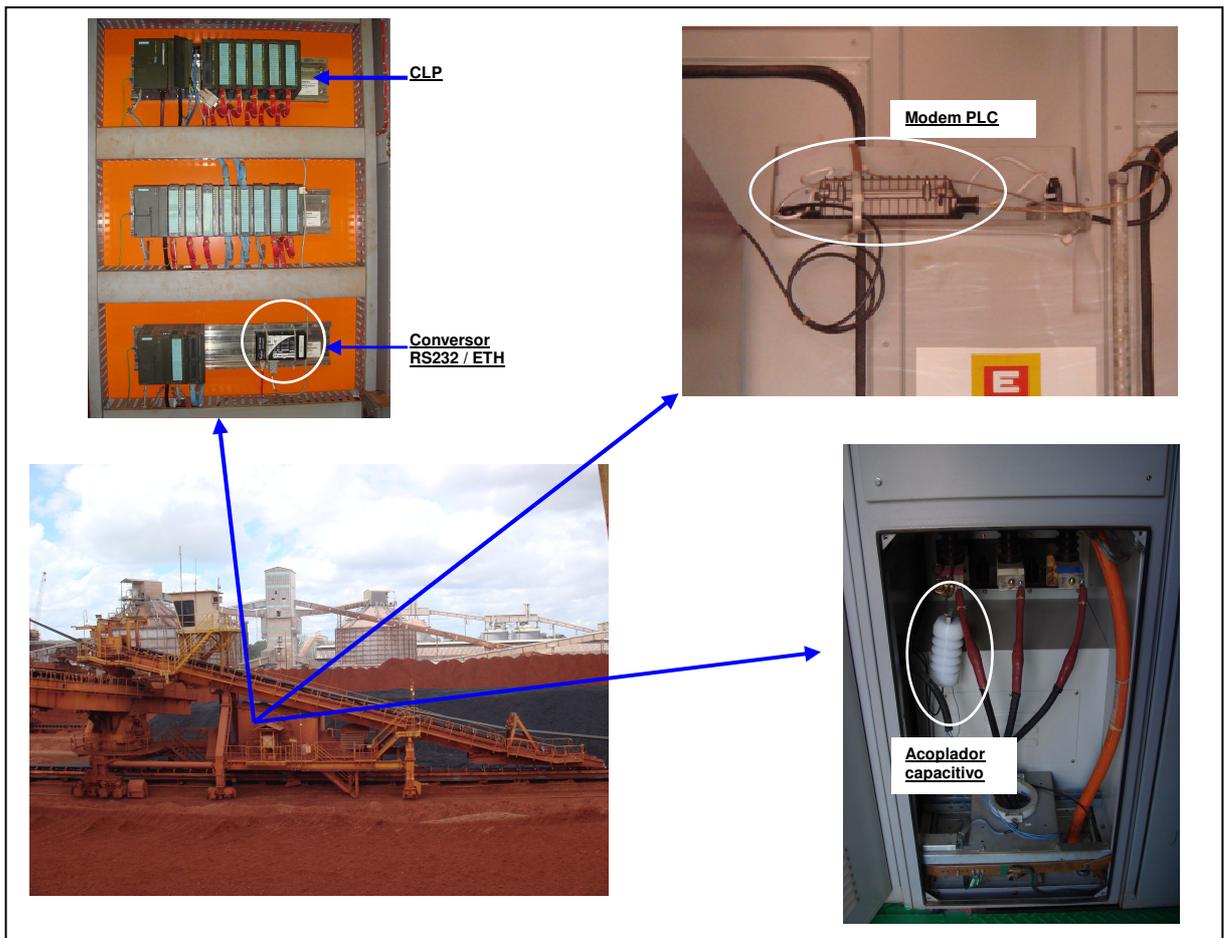


Figura 33: Detalhes do painel PLC e acoplador capacitivo na empilhadeira

5 RESULTADOS OBTIDOS

Após a implementação os parâmetros SNR, taxa de transmissão e disponibilidade foram monitorados para avaliação do enlace PLC e certificação da consistência da tecnologia. Também foi analisado o número de falhas de comunicação de dados do sistema de empilhamento de bauxita e custo financeiro.

5.1 SNR

O resultado obtido de SNR foi de 28.36 em média, mesmo do *site survey*, resultado favorável para a confiabilidade do sistema de comunicação da empilhadeira de bauxita, pois o valor de SNR considerado como crítico para transmissão dos dados usando a tecnologia PLC é abaixo de 12 (Integradores, 2007). A Figura 35 apresenta o valor de SNR do enlace PLC implementado na empilhadeira de bauxita.

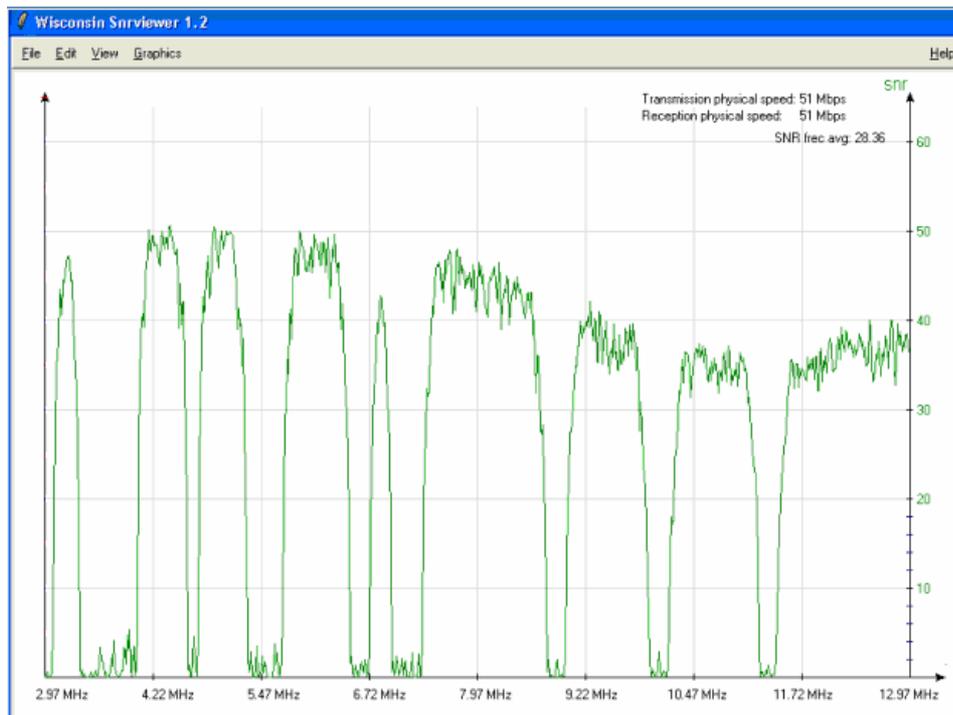


Figura 34: SNR do enlace PLC do enlace da empilhadeira de bauxita (SNRViewer DS2)

5.2 TAXA DE TRANSMISSÃO

A tecnologia PLC alcança uma taxa de transmissão de até 200 Mbps. Na implantação realizada na empilhadeira, obteve-se uma taxa média de 51 Mbps (Figura 5.1). Essa taxa muito acima da necessária para o sistema de comunicação da empilhadeira, que é em torno de 2 Kbps observada através do *software ManageEngine OpManager*, conforme Figura 36.

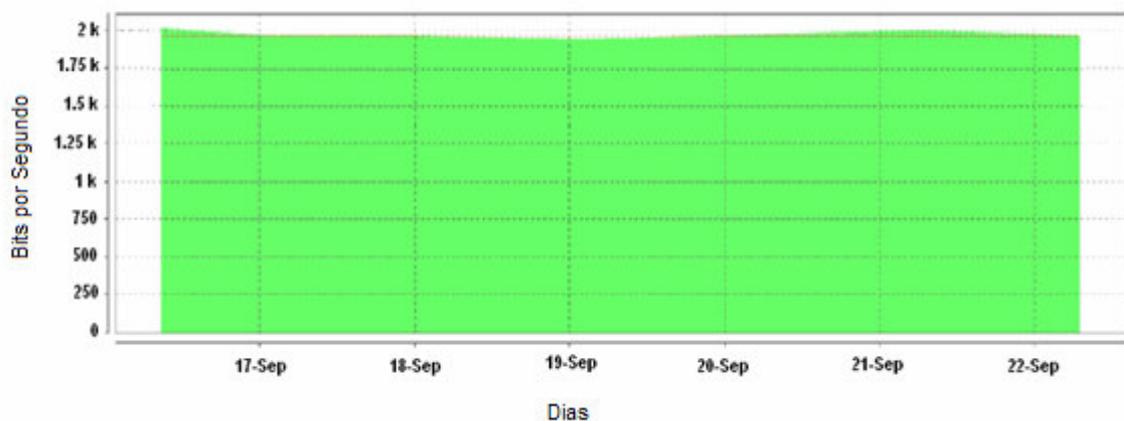


Figura 35: Taxa transmissão do enlace PLC (ManageEngine OpManager, 2007)

A Figura 36 apresenta a taxa de transmissão da comunicação de dados entre a empilhadeira de bauxita e a sala de controle 12A no período de 1(uma) semana.

5.3 DISPONIBILIDADE

A disponibilidade do enlace PLC foi observada em 30 dias utilizando o software ManageEngine OpManager, com a empilhadeira de bauxita executando todas as manobras operacionais (translação, rotação e empilhamento) em plena carga, obtendo índice de 100%, dado que comprova a confiabilidade da tecnologia PLC. A Figura 37 apresenta a disponibilidade do enlace PLC em 30 dias.

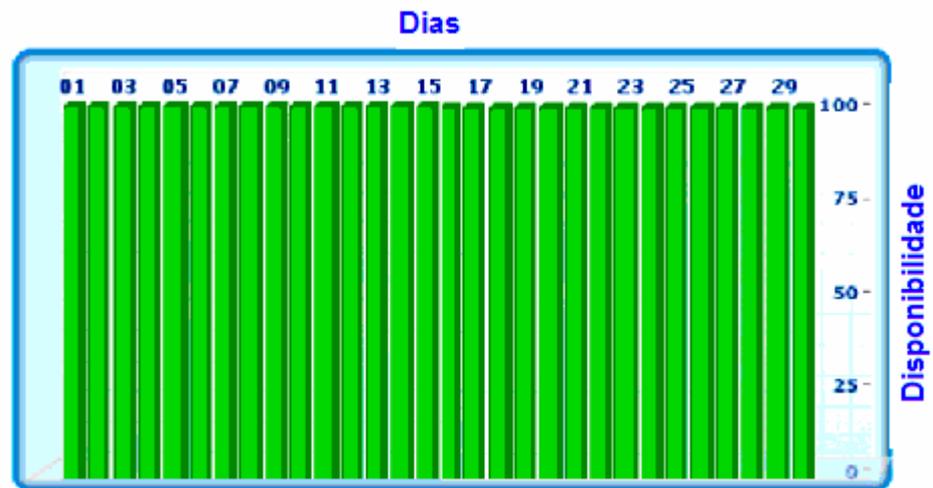


Figura 36: Disponibilidade do enlace PLC (ManageEngine OpManager, 2007)

5.3 FALHA DE COMUNICAÇÃO

Após a implantação do enlace PLC foi observado que não houve falha no sistema de comunicação de dados da empilhadeira de bauxita, ou seja, o número de falha caiu para zero, conforme Figura 38.

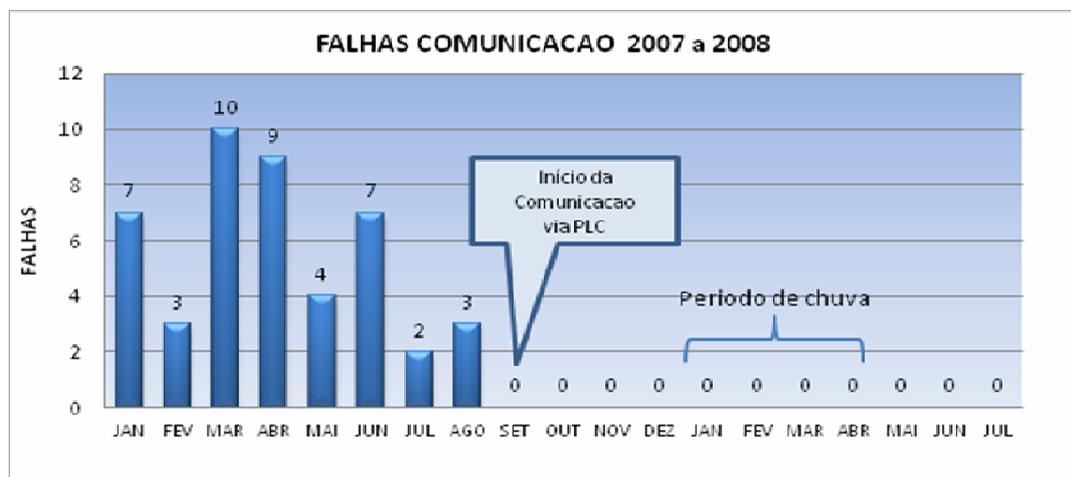


Figura 37: Falha de comunicação da empilhadeira de bauxita 2 entre jan/2007 a jul/2008

A Figura 38 apresenta as falhas no sistema de comunicação de dados da empilhadeira de bauxita de janeiro de 2007 a julho de 2008 com destaque para o início da implantação do enlace PLC onde as falhas caíram para o nível zero, mesmo no período de chuva.

Os valores dos parâmetros (SNR, Taxa de transmissão e Disponibilidade) obtidos acima, garantiram o bom desempenho do enlace, pois suportou com plena estabilidade todas as manobras típicas do equipamento (translação, rotação, empilhamento, etc.) confirmando a robustez da tecnologia PLC, garantindo a disponibilidade e confiabilidade do sistema de empilhamento de bauxita.

5.4 CUSTOS BENEFÍCIOS

O investimento para implantação da tecnologia PLC foi de R\$ 65.000,00 composto conforme abaixo:

- Serviços: R\$ 29.000,00
- Equipamentos: R\$ 28.000,00
- Logística: R\$ 8.000,00

Na seção 2.3 foi demonstrado o valor de *demurrage* pago no período de agosto 2006 a julho de 2007 que foi de R\$ 61.771,29 e que no período de janeiro a julho de 2007 o valor foi pago foi de US\$ 17.681,9 que corresponde a R\$ 37.131,99. Foi realizada uma projeção até dezembro 2007 e o valor encontrado foi de US\$ 27.000,00 ou R\$ 56.700,00, valor que corresponde a 87,23 % do investimento. Esses valores demonstram que o investimento obteve um retorno em 1 ano, ou seja, o valor custo benefício do investimento foi positivo.

6 CONCLUSÃO

A aplicação da tecnologia PLC na indústria ainda é tímida, devido à falta de recursos técnicos que minimizem os efeitos causados por ambientes hostis, como por exemplo, nossa estrutura da rede de distribuição de energia elétrica existente no Brasil, porém este trabalho mostrou resultados surpreendentes da aplicação do PLC na indústria em questão, graças a modulação de sinais (OFDM).

A implantação do PLC na empilhadeira de bauxita foi um passo primordial para atender uma necessidade de correção em um sistema de comunicação de dados via rádio, marcado por sucessivas falhas que culminavam com desconforto operacional e custo financeiro.

A tecnologia PLC possui a implantação muito rápida quando comparada com a maior parte das tecnologias competitivas, já que se utiliza a infra-estrutura existente. Esse ponto foi determinante e positivo durante a implantação já que a perda de produção foi mínima durante a implantação.

Com relação ao sistema anteriormente implantado, o PLC demonstrou aplicabilidade favorável, uma vez que após sua implementação, não houve paradas da empilhadeira de bauxita por motivo de perda de comunicação.

O investimento realizado no piloto mostrou um custo benefício bastante significativo. Pois o retorno do mesmo, foi em curto prazo e o custo com *demurrege* por perda de comunicação, foi eliminado.

Assim como tudo que utiliza tecnologia de ponta requer uma curva de aprendizado que vai desde os primeiros passos até a obtenção do *Know-how* necessário,

muitas vezes este tempo transcende os limites desejados. A contratação de uma empresa de consultoria com *know-how* em PLC para implementação da tecnologia também foi crucial para o sucesso do piloto.

Os resultados obtidos asseguram a confiabilidade para instalação da tecnologia PLC para as demais máquinas móveis existentes no pátio da refinaria.

Como trabalho futuro, está à integração de voz e vídeo no sistema já implementado e integração das máquinas rotativas do Píer (Descarregador e Carregador de navios) bem como análise da influência da taxa de perda de pacotes transmitidos, na comunicação de sinais da empilhadeira de bauxita.

7 REFERÊNCIAS

ABB – Asea Brown Boboverly do Brasil, Industrial IT Sistema 800Xa – Administracao do Sistema 800xA, Setembro 2006.

ALUNORTE – Alumina do Norte do Brasil, <http://www.alunorte.net>, Acesso em setembro 2008.

ALUNORTE – Alumina do Norte do Brasil, Operação de Estocagem e Recuperação de Bauxita, Apostila de Treinamento, Abril 2004.

ALUNORTE – Alumina do Norte do Brasil, Planilha de acompanhamento diário de operações portuarias, Janeiro 2006 a Dezembro 2007.

ANATEL. Power Line Communications-PLC ou Broadband Over Power Lines-BPL, 2003, <http://www.afrr.qsl.br/plc-anatel.pdf>, Acesso em novembro 2007.

ANDRADE, R. P. SOUZA, R. K. **Uma Visão Geral sobre a Tecnologia PLC**, pg.24, Goiânia 2004.

APTEL – Associação de Empresas Proprietárias de Infra-Estrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações, Seminários e eventos sobre a tecnologia PLC, [http:// www.aptel.com.br](http://www.aptel.com.br), Acesso em julho 2008.

ARTECHE. Acopladores PLC/BPL para MT Linhas aéreas, <http://www.artech.com/web/frontoffice/prodsysoluciones.aspx?idioma=3>, Acesso em maio 2007.

AURORA Energy, <http://www.auroraenergy.com.au>. Acesso em outubro 2008.

CAMPOS, A. L. P. S. et al. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Análise da Influência de Redes PLC na Qualidade da Energia Elétrica**, II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica João Pessoa - PB - 2007

CEMIG – Companhia Energética do Estado de Minas Gerais, <http://www.cemig.com.br/plc>, acesso em julho 2008.

CIDADE de Manassas, <http://www.manassacity.org/index.asp?NID=18>, acesso em outubro 2008.

CORINEX – AnyWire Connectivity, <http://www.corinex.com>, acesso em outubro 2008.

CORREA, J. R. **PLC – Power Line Communications**, Trabalho de Conclusão de Curso, UNIMINAS – União Educacional de Minas Gerais, Uberlândia, Junho de 2004.

DOSTERT, K. **Powerline Communications**, Pretine Hall PTR, Krickenback, Dezembro 2000.

DS2. Desenvolvido pela DS2 - Design of Systems on Silicom. Apresenta a tecnologia DS2 PLC. Disponível em: <http://www.ds2.es>. Acesso em: 20 out. 2007.

FERREIRA, M.V.A. **PLC – Power Line Communication**, UFF-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2005.

FITEC INOVACOES TECNOLOGICAS. Projeto OPERA. In: Seminário PLC: Powerline Communications, 2005, São Paulo. Proceedings... São Paulo, nov. 2005, p. 1-48.

FRAMIL, R.R., CESAR, L.S., SANTOS, P.R. **Aplicação de Tecnologia PLC para Melhoria de Eficiência Energética e Recuperação de Perdas Comerciais – Portal Billings**, Seminário de Automação de Sistemas Elétricos, 2005.

GUIA das cidades digitais. Disponível em: <<http://www.guiadascidadesdigitais.com.br/site/busca/power%20line%20communication/>>. Acesso em setembro 2009.

HOOIJEN, O. **A channel model for the residential power circuit used as a digital communications medium**. In: IEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 40, No. 4, November 1998.

HRASNICA H., HAIDINE A. Lehnert, R. **Broadband powerline communications networks: network design**. Londres: John Wiley & Sons, 2004.

HUSSAIN, Z., K. **Powerline Carrier (PLC) Communication Systems**, Máster Thesis, KTH, Stockholm, 2003.

ILEVO PLC System, Power Line Communication, Head End/Repeater Installation Guide, Abril 2007.

INTEGRADORES – Soluções em Tecnologia, Relatório Técnico de Implantação do PLC, Agosto 2007.

INTEGRADORES – Soluções em Tecnologia, Relatório Técnico de Implantação do PLC, Agosto 2008.

LARS, S. **Power-Line Communications-Channel Properties and Communication Strategies**, Ph.D Thesis, Lund University, 1999.

LEAL, D.S. Relatório Técnico Consolidado de Implantação de PLC, Integradores – Soluções em Tecnologia, São Paulo, Janeiro 2008.

MA, Y. H., SO, P.L. Performance Analysis of OFDM Systems for Broadband Power Line Communication Under Impulsive Noise and Multipath Effects, In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, Abril 2005.

MAJUMDER A., CAFFREY J. **Power Line Communications: An Overview**. IEEE Potentials, v.23, p. 4-13, out./nov. 2004, http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all, Acesso em marco 2008.

OLIVEIRA, L.A.A. **Comunicação de Dados e Teleprocessamento : Uma Abordagem Básica**, Altas, 2ª edição , 1987.

PINTO, E. L., ALBUQUERQUE, C. P. **A Técnica de Transmissão OFDM**. PLCOUPPING Produtos. 2007, http://www.plcoupling.com/productos_i.php?aid=2, Acesso em maio 2007.

SILVA A., PACHECO J. A. **Transmissão de dados via rede elétrica**, artigo SENAI/SC – Florianópolis, 2005.

SILVA, J. A. L.,SIQUEIRA, T. M., RIBEIRO, M. R. N., ANDREAO, R. V., SALLES, E. O. T., SEGATTO, M. E. V. **A Comparative Analysis of the Performance of OFDM and COFDM Indoor PLC Systems**. In: ICT 2006 - 13th Conference on Telecommunications, Funchal, Portugal, 2006.

SILVA, J. L. et al. **Técnica OFDM Aplicada a Power Line Communications**.2003, <http://citenel.aneel.gov.br/historico/IIcitenel/Anais%20do%20II%20Citenel%20-%20VOLUME%20II/Telecomunicacao.pdf> , Acesso em julho 2007.

SILVA, M. S. **Estudo de Viabilidade da Tecnologia Power Line Communication para Inclusão Digital**, Trabalho de Conclusão de Curso, UFPa – Universidade Federal do Pará, Belém, Outubro de 2006.

SOFTBRASIL – Treinamento UTR Motorola MOSCAD e MOSCAD-L, Outubro 2005).

SUTTERLIN P., DOWEY W. **A power carrier (PLC) communications systems**, Dissertação de Mestrado, IT-Universitet, Suécia, setembro de 2003.

SUTTERLIN, P.,DOWNEY, W. **A power line communication tutorial – challenges and technologies**, Relatório Técnico, Echelon Corporation,1999.

TELECO. **Conexões Banda Larga**, 2007, <http://www.teleco.com.br/blarga.asp>, Acesso em novembro 2007.

TIBALDI, C. M. G., JUNIOR, C. E. M. **PLC - Power Line Communications**, Centro Federal de Educação Tecnológica de Mato Grosso, 2007.

TROMPOWSKY, J.F.M.V. **Estudo da Interferência Eletromagnética Gerada por Redes PLC (Power Line Communication) no Interior de Edificações**, Dissertação de Mestrado, UFSC- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis , Dezembro de 2005.

TRNKA, M. **Power Line Communications in Automotive Industry**, Tese de Doutorado, Czech Technical University in Prague, Dezembro de 2005.

VARGAS, A.A. **Estudo sobre comunicação de dados via rede elétrica para aplicação de automação residencial e predial**, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Janeiro 2004.

ZIMMERMANN, M., DOSTERT, K. **Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broad-Band Powerline Communications**. In: IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 44, No. 1, February 2002.

ZIMMERMANN, M., DOSTERT, K. The low voltage power distribution network as last mile access network-signal propagation and noise scenario in the HF-range. In: AEÜ Int. J. Electron. Communications, Vol. 54, No. 1, 2000.