

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



WILLIAN GARCIA VIEGA DOS SANTOS

**TRANSMISSÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA:
TOMADA INTELIGENTE**

VITÓRIA – ES
AGOSTO/2016

WILLIAN GARCIA VIEGA DOS SANTOS

**TRANSMISSÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA:
TOMADA INTELIGENTE**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Willian Garcia Vieg dos Santos**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Coorientador: Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva

VITÓRIA – ES
AGOSTO/2016

WILLIAN GARCIA VIEGA DOS SANTOS

**TRANSMISSÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA:
TOMADA INTELIGENTE**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Willian Garcia Vieg dos Santos**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 16, de setembro de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Orientador

Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Coorientador

Prof. Dr. Edson Pereira Cardoso
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Examinador

MEng. Leonardo Ribas Castor
Examinador

RESUMO

No contexto de Redes Inteligentes (*Smart Grids*) e devido à demanda de planos de eficiência energética, a medição remota de consumo de energia e até mesmo o monitoramento da qualidade de energia estão ficando cada vez mais indispensáveis e comuns. Em consequência, surgiram termos como “medição inteligente” e produtos como “medidores inteligentes”, que medem o consumo além de outros parâmetros de qualidade de energia. Devido à complexidade do sistema de uma Rede Inteligente e à diversidade de dispositivos, se faz necessário conectar e empregar diferentes tecnologias de Telecomunicações.

Diante disto, o trabalho aqui apresentado tem o intuito de implementar o protótipo de uma tomada inteligente que mede consumo, fator de potência e utiliza a própria rede elétrica como canal de comunicação de dados. Uma das vantagens do emprego desta tecnologia é que esta dispõe de infraestrutura pronta, já que utiliza a rede de distribuição elétrica como meio de comunicação. Este trabalho investiga o uso da modulação por chaveamento binário de frequência BFSK (*binary frequency-shift keying*) em banda estreita em uma rede montada para fins de implantação de uma rede doméstica. A partir de resultados experimentais foi possível confirmar que este modem apresenta alta imunidade a ruídos no receptor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de um sistema de automação usando PLC em banda estreita	13
Figura 2 - Modelo de uma rede de baixa tensão	17
Figura 3 - Classificação dos ruídos.....	20
Figura 4 - Comparação entre impedância em rede elétrica europeia e norte americana	23
Figura 5 -Modulação no domínio do tempo	26
Figura 6 - Arquitetura Arduino.....	30
Figura 7 - Arduino UNO - Hardware	31
Figura 8 – O <i>Mamba Shield</i>	32
Figura 9 - Arduino conectado com o <i>Mamba Shield</i>	32
Figura 10 - PLM-1 da Ariane Controls.....	33
Figura 11 - Diagrama de Blocos de um transceptor utilizando o modem PLM-1.....	34
Figura 12 - Diagrama de blocos funcional do PLM-1	35
Figura 13 - Estrutura do Pacote do PLM-1.....	36
Figura 14 - Geração e Seleção das frequências de comunicação	37
Figura 15 - Máquina de Estados Finitos de Operação do PLM-1	39
Figura 16 - Acoplamento Capacitivo.....	40
Figura 17 - Triângulo de Potências.....	42
Figura 18 - Sensor de Corrente ACS712	42
Figura 19 - Circuito de adequação de tensão.....	43
Figura 20 - Circuito Simulado no Multisim	44
Figura 21 - Resultado no osciloscópio da simulação no Multisim.....	44
Figura 22 - Esquema Experimental da Medição dos Parâmetros de Potência	46
Figura 23 - Fluxograma do algoritmo de cálculo dos parâmetros de potência.....	47
Figura 24 - Setup de comunicação Half Duplex.....	51
Figura 25 - Comunicação Half-Duplex pelo X-CTU	51
Figura 26 - Texto utilizado para testes de transmissão.....	52
Figura 27 - Texto recebido pelos testes de transmissão - 160bps (esquerda) - 400bps (direita)	53
Figura 28 – Setup do experimento de tamanhos de pacotes relacionados a taxa de bits.....	54
Figura 29 - Pacotes com 2 bytes - menor e maior valor	55
Figura 30 - Pacotes com 8 bytes - menor e maior valor	55
Figura 31 - Pacotes com 32 bytes - menor e maior valor	56

Figura 32 - Pacotes com 61 bytes - menor e maior valor	56
Figura 33 - <i>Setup</i> de teste com derivação no canal de comunicação.....	58
Figura 34 – Simulação de sensor – 2 potenciômetros	59
Figura 35 - Rede elétrica utilizada para testes de comunicação	60
Figura 36 - ScadaBR - Representação Gráfica	63
Figura 37 - Pacote com dados a serem enviados	64
Figura 38 - ScadaBR - Representação Gráfica Final.....	65
Figura 39 - Esquemático Final da Tomada Inteligente.....	66
Figura 40 - Setup para medição do espectro de frequência com MDO3012.....	67
Figura 41 – <i>Setup</i> para obtenção dos espectros de frequências nas fases A, B e C em alguns pontos da rede	71
Figura 42 - <i>Setup</i> para obtenção do espectro de frequências ao sinal percorrer toda a rede ..	72
Figura 43 – <i>Setup</i> para levantamento da resposta em frequência do canal de comunicação de 180m	83

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Formas de onda de tensão e corrente - FP unitário – Ferro de Roupa	49
Gráfico 2 - Formas de onda de tensão e corrente - Fator de potência não unitário - Circulador	49
Gráfico 3 - Formas de onda de tensão e corrente - Furadeira - Caso 3	50
Gráfico 4 - Relação entre taxa (bps) com porcentagem de bytes recebidos em relação aos transmitidos.....	54
Gráfico 5 - Tamanho do pacote e respectiva taxa de transmissão.....	57
Gráfico 6 - Leitura do sensor em tempo real com o Matlab	59
Gráfico 7 - Saída do transmissor – 80 kHz até 1 MHz.....	68
Gráfico 8 - Saída do transmissor e Entrada do receptor- 80 kHz até 1 MHz	68
Gráfico 9 - Saída do transmissor e Entrada do receptor- 80kHz até 210kHz.....	69
Gráfico 10 - Saída do transmissor e Entrada do receptor – Com e sem derivação.....	69
Gráfico 11 - Saída do transmissor e Entrada do receptor – Com e sem ramificação (derivação) - Zoom da região de interesse.....	70
Gráfico 12 – Espectros de frequências obtidos nos pontos 2, 3 e 4 nas fases A, B e C da figura 46 para linha desenergizada.....	71
Gráfico 13 – Comparação entre o sinal injetado pelo modem PLM-1 e do sinal recebido depois de percorrer todo o canal.....	73
Gráfico 14 - Espectros de frequências obtidos nos pontos 2, 3 e 4 nas fases A, B e C da figura 46 para linha energizada	74
Gráfico 15 - Respostas em frequência e impulsiva medidas na rede de testes com as derivações da Figura 45 mantidas em aberto, ou seja, sem cargas ligadas	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Amplitude e duração de ruídos gerados por alguns equipamentos eletroeletrônicos	19
Tabela 2 - Potência e impedância de eletrodomésticos	24
Tabela 3 – Tipo de Modulação	25
Tabela 4 – Resultados experimentais em diversos equipamentos testados	48
Tabela 5 - Relação de Taxa (bps) com bytes recebidos.....	53
Tabela 6 - Tamanho do pacote e respectiva taxa de transmissão	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre comunicação de dados via rede elétrica de banda estreita e de banda larga.....	15
Quadro 2 - Padrões internacionais de PLC em banda estreita.....	28
Quadro 3 - <i>String</i> de configuração em um vetor de byte no <i>Mamba Shield</i>	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PLC	<i>Powerline Communication</i> (Comunicação via rede elétrica)
NB-PLC	<i>Narrowband Powerline Communication</i> (PLC de banda estreita)
BPL	<i>Broadband Powerline Communication</i> (PLC de banda larga)
AWGN	<i>Additive white Gaussian noise</i> (Ruído aditivo branco e gaussiano)
SW	<i>Short-wave</i> (ondas curtas)
FM	<i>Frequency Modulation</i> (Modulação em frequência)
PSD	<i>Power Spectral Density</i> (Densidade espectral de potência)
ASK	<i>Amplitude-Shift Keying</i> (Modulação por chaveamento de amplitude)
PSK	<i>Phase-Shift Keying</i> (Modulação por chaveamento de fase)
FSK	<i>Frequency-shift keying</i> (Modulação por chaveamento de frequência)
bps	bits por segundo
BFSK	<i>Binary FSK</i> (binário FSK)
BPSK	<i>Binary PSK</i> (binário PSK)
SS	<i>Spread Spectrum</i> (Espalhamento espectral)
OFDM	<i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i> (Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais)
ASIC	<i>Application Specific Integrated Circuit</i> (Circuito integrado de aplicação específica)
CRC	<i>Cyclic redundancy check</i> (Verificação de redundância cíclica)
RMS	<i>Root mean square</i> (Raiz do valor quadrático médio)
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Aquisition</i> (Controle Supervisório e Aquisição de Dados)
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa do Projeto	13
1.2	Objetivos deste Projeto.....	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
2	A COMUNICAÇÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA	15
2.1	Conceitos Básicos.....	15
2.2	A Rede Elétrica como Canal de Comunicação.....	16
2.2.1	Propriedades da Rede Elétrica como Canal de Comunicação.....	18
2.2.1.1	Os Tipos de Ruídos e Interferências Comuns	18
2.2.1.2	Variação da Impedância na Rede PLC	22
2.3	Principais Esquemas de Modulações Empregados na Tecnologia PLC	24
2.4	Regulamentação e/ou Padronização para PLC.....	28
3	DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL.....	30
3.1	A Plataforma de Prototipagem Arduino	30
3.2	A Interface <i>Mamba Shield</i> entre o Modem e o Microcontrolador	31
3.2.1	O Modem PLC PLM-1	33
3.2.2	Acoplamento de Sinal na Rede Elétrica	39
3.3	Medição de Potência.....	40
3.3.1	O Sensor usado para Medição de Corrente	42
3.3.2	O Sensor usado para Medição de Tensão.....	43
4	DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS	45
4.1	Descrição do Aparato Experimental usado na Medição dos Parâmetros	45
4.2	Análise da Comunicação via Rede Elétrica.....	50
4.2.1	Comunicação <i>Half-Duplex</i>	51
4.2.2	Envio de um Arquivo de Texto	52
4.2.3	Avaliação do Tamanho do Pacote e da Taxa de Transmissão	54
4.2.4	Simulação de Envio de Dados de Sensores	58
4.2.5	Linha Real e Testes com Linha Energizada	60
4.3	A Interface com o Usuário e o Supervisório	61
4.4	Integração dos Subsistemas	64
4.5	Análise Espectral da Comunicação NBPLC	66

4.5.1 Análise Espectral com o Cabo de Testes e Desenvolvimento (4m).....	66
4.5.2 Análise Espectral da Rede de 180m Desenergizada	70
4.5.3 Análise Espectral da Rede de 180 m Energizada	73
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXO A – CIRCUITO ELETRÔNICO DO <i>MAMBA SHIELD</i>	81
APÊNDICE A – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA REDE ELÈTRICA DE 180 METROS.....	83

1 INTRODUÇÃO

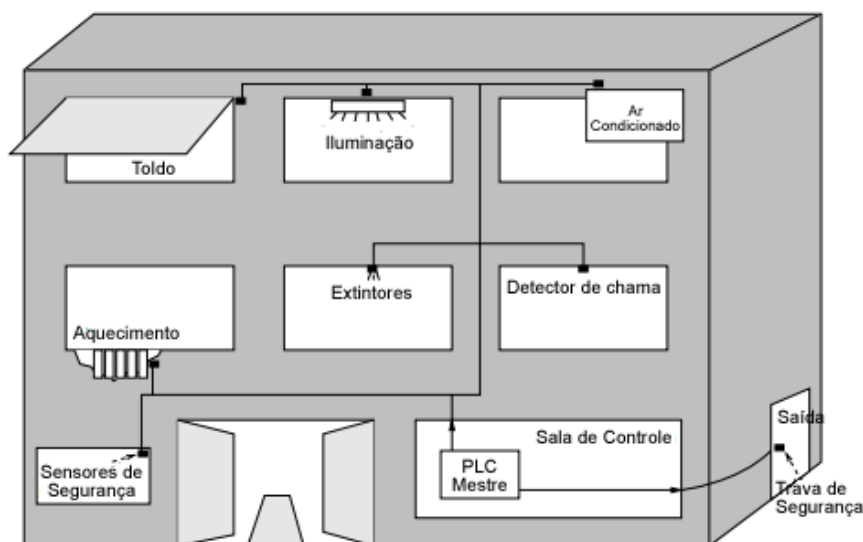
A ideia de transmitir dados utilizando a rede elétrica através da tecnologia PLC (*Power Line Communication*) não é nova. Esta teve sua origem em sistemas de distribuição e transmissão, onde era utilizada para proteção de seções em casos de falha. Por volta de 1922 o primeiro sistema operava em linhas de alta tensão, utilizando frequências entre 15 e 500 kHz, para propósitos de Telemetria. Nos anos de 1940 surge então o termo *Power Line Carriers* para se referir a esta tecnologia; porém, ela só se tornou viável comercialmente nas décadas de 1970 e 1980, quando também os primeiros padrões foram desenvolvidos. O interesse na área se intensificou a partir dos anos de 1990, com os padrões X-10, CEBus e LonWorks. Nos últimos vinte anos esta tecnologia vem se apresentando promissora, as pesquisas têm se intensificado, novas técnicas de modulação e correção de erros foram propostas e novos padrões foram desenvolvidos. (BARABOI, 2013) (YOUSUF; EL-SHAFEI, 2007) (CACCIAGUERRA, 2003).

No contexto de Redes Inteligentes, ou *Smart Grids*, a medição remota de consumo de energia e até mesmo o monitoramento da qualidade de energia estão ficando cada vez mais indispensáveis. Em consequência, surgiram termos como “medição inteligente” e produtos como “medidores inteligentes”, sendo esses, equipamentos que conectam as concessionárias aos consumidores. Devido à complexidade do sistema de uma Rede Inteligente e diversidade de dispositivos, se faz necessário conectar e empregar diferentes tecnologias, como Ethernet, Wi-Fi, ZigBee e a própria comunicação via rede elétrica. (BARABOI, 2013) (BERGER; SCHWAGER; ESCUDERO-GARZÁS, 2012).

Uma outra importante área para aplicação de PLC em banda estreita NBPLC (*narrow band powerline communication*) é automação residencial. Sistemas de automação baseado em comunicação via rede elétrica são feitos sem a instalação de meios adicionais para comunicação, como mostrado na Figura 1. Diferentes tarefas podem ser realizadas utilizando esta tecnologia, tais como: controle de vários dispositivos conectados ao sistema elétrico, como iluminação, aquecimento, refrigeração, elevadores, entre outros; Controle de abertura de janelas ou controle de iluminação com persianas e toldos além de controle de portas; tarefas de segurança com sensores de presença ou câmeras. A aplicação de todos estes exemplos de

automação é o que os autores comumente chamam de “casas-inteligentes”. (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004)

Figura 1 - Estrutura de um sistema de automação usando PLC em banda estreita



Fonte: HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004, modificado pelo autor

1.1 Justificativa do Projeto

Os dados referentes ao uso de energia de forma segmentada farão com que o consumidor repense no seu gasto com energia elétrica. Sabendo, por exemplo, o quanto o seu chuveiro dissipa, o consumidor poderá mudar o horário do banho, caso esteja enquadrado na tarifa horária, e assim poder ver a economia proveniente. Em outro exemplo, ele veria o consumo de energia do seu refrigerador aumentar sempre que abrisse a porta, pois o motor atua para resfriá-lo novamente. Portanto, “Tomada Inteligente” se enquadraria também em uma medida a ser adotada na gestão energética (SILVA, 2004).

Tentando unir automação residencial à Rede Inteligente, o projeto aqui proposto consiste em criar uma “Tomada Inteligente” que medirá a tensão e a corrente, e conseqüentemente a potência consumida por esta. Isto permitirá ao consumidor entender seu consumo de forma segmentada, já que ele poderá acompanhar o consumo em cada ponto de sua residência. Os dados medidos serão enviados via rede elétrica para um concentrador, sendo este o maior desafio do projeto.

Além disso, o projeto aqui proposto permitirá entender como funciona e como fazer um “medidor inteligente” que utilize a rede elétrica para comunicar-se com a concessionária. Isto abre caminho para novos projetos, adicionando a rede elétrica ao enlace de comunicação das Redes Inteligentes. Para isto basta interpretarmos os pontos de tomada como cada consumidor e o centralizador como a concessionária de energia.

1.2 Objetivos deste Projeto

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto é o de construir uma “Tomada Inteligente” para transmissão de dados de sensores de corrente e tensão via rede elétrica para um centralizador. Estes dados serão processados e então saber-se-á o consumo energético desta tomada que será apresentado ao consumidor numa interface intuitiva.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste projeto são:

- I. Desenvolver o *software* do Arduino para fazer as leituras dos sensores de tensão e corrente e com estes dados calcular fator de potência, potência ativa e aparente;
- II. Programar e configurar uma solução comercial para fazer uma comunicação via rede elétrica das variáveis medidas pelos sensores;
- III. Analisar a qualidade do sinal recebido em relação ao enviado pela rede elétrica usada como canal de comunicação de dados;
- IV. Elaborar uma interface simples e intuitiva para mostrar os dados de consumo de energia ao usuário.

2 A COMUNICAÇÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA

Neste capítulo serão expostos conceitos básicos da comunicação via rede elétrica, tipos de modulação e fundamentos para a transmissão de dados pela rede elétrica.

2.1 Conceitos Básicos

Existem duas classes de sistemas de comunicação via rede elétrica, ou *Powerline Communication*, esses são: sistema de banda estreita (*narrowband PLC*) e sistemas de banda larga (BPL, *broadband PLC*). Suas aplicações são diferentes, assim como a taxa de transmissão, a frequência de operação, a largura de banda e até mesmo a modulação. Uma comparação entre estas duas é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Comparação entre comunicação de dados via rede elétrica de banda estreita e de banda larga.

	NB-PLC	BPL
Taxa de transmissão	Até 200kbps	Acima de 1Mbps
Frequência de Operação	Até 500kHz	Acima de 2Mhz
Modulação	FSK, S-FSK, BPSK, SS, OFDM	OFDM
Aplicações	Automação Predial Energia Renovável Medições Avançadas Iluminação Pública Veículos Elétricos Redes Inteligentes	Internet HDTV Audio Gaming
Fornecedores	Ariane Controls Cypress Echelon Maxim ST Microelectronics Texas Instruments Yitran	Atheros Broadcom Lantiq Marvell Maxim Sigma Corinex

Fonte: BARABOI, 2013, modificado pelo autor.

Para aplicações que precisam de altas taxas de transmissão de dados, BPL deve ser utilizado enquanto que para aplicações que precisam de baixas taxas, como leitura de sensores, que é o escopo deste projeto, NB-PLC pode ser usado.

Comunicação de dados via rede elétrica pode ser empregada em todos os níveis de tensão: alta, média e baixa, sendo alta tensão para telemetria, proteção e controle; média tensão para medições avançadas e inteligentes, controle e otimização da rede pelas concessionárias e também para a internet; baixa tensão, para automação residencial, internet e medições, como a que foi feito neste projeto.

2.2 A Rede Elétrica como Canal de Comunicação

O uso de sistemas de Telecomunicações aumentou rapidamente nas últimas décadas. Devido à crescente necessidade de novos serviços e da necessidade de capacidades adicionais de transmissão, surge então uma demanda de uso e desenvolvimento de novas redes de Telecomunicações e tecnologias de transmissão. Uma solução alternativa que surge para atender esta demanda de novas redes de acesso é o uso da rede elétrica para trafegar dados além de energia. (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004)

A maior vantagem da tecnologia de comunicação via rede elétrica é a de utilizar a grande infraestrutura de cabeamento existente conectando casas, bairros, cidades, estados e até mesmo países. Com isto o custo de instalação fica reduzido e, além disto, não são necessário antenas e cabos dedicados. Para o projeto aqui descrito, significa que não será necessário a instalação de outros cabos na residência e nem de antenas, já que o canal de comunicação a ser utilizado será o mesmo que leva energia ao ponto onde a tomada está instalada.

O canal de comunicação é o meio físico por onde há a transmissão de informação. Dependendo do modo de transmissão usado, este pode ser caracterizado em dois grupos básicos: canais baseados em propagação guiadas e propagação em espaço livre. Dentro do primeiro grupo tem-se canais de par trançado, cabos coaxiais, fibra óticas ou até mesmo a rede elétrica. (HAYKIN, 2001). É importante saber as características do canal, tais como: atenuação, níveis de ruído, impedância característica, dentre outros, devido ao fato destes afetarem diretamente o desempenho do sistema de Telecomunicação.

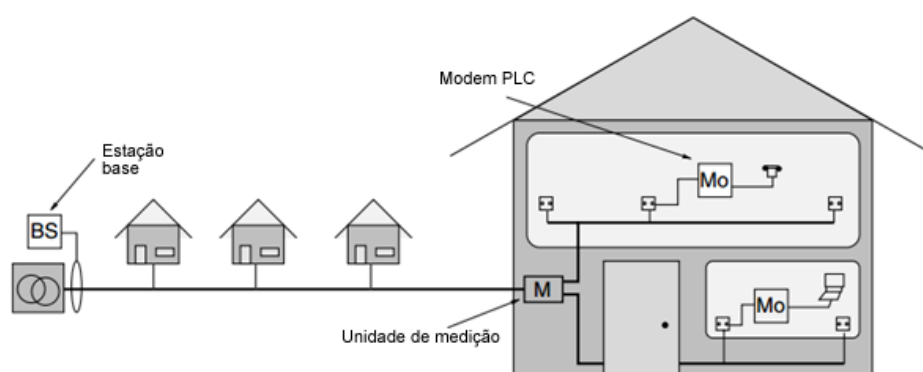
Pelo fato da rede de energia elétrica não ter sido concebida com o propósito de comunicação de dados, isto a torna um canal de comunicação muito específico e com características peculiares. Entre estes a grande atenuação do sinal e ruídos provenientes de fontes chaveadas ou de outros

equipamentos conectados à rede. Com estas limitações, torna-se difícil até modelar o canal de forma precisa, já que muitas variáveis são incluídas. (BERGER; SCHWAGER; ESCUDERO-GARZÁS, 2012) (BERGER et al., 2014). Para se explorar estas características únicas da rede elétrica e até mesmo otimizar a transmissão de dados na mesma, é importante o conhecimento deste canal de comunicação.

Alta atenuação do sinal e ruídos são os principais fatores que afetam a comunicação via rede elétrica. Há muitas fontes de atenuação e distorção do sinal e estes ocorrem comumente pelos seguintes fatores: impedâncias conectadas na rede variando no tempo; múltiplas fases, pois o sinal é transmitido em relação a uma fase e neutro; transformadores que atenuam o sinal e perdas na linha devido à impedância característica. Medidas feitas em testes e mostradas na literatura, demonstram que a atenuação do sinal pode variar entre 15 dB e 60 dB, ou mais. Como o sinal PLC é muito atenuado, o ruído passa a ser um grande problema para a recepção do mesmo (BARABOI, 2013).

No canal PLC de uma rede residencial, na mesma rede onde haverá tráfego de dados, há cargas (eletrodomésticos), painel de distribuição, medidores de potência e o transformador de distribuição. É importante observar que as cargas e fios de todas as outras residências da vizinhança podem interferir no sistema de comunicação, como pode ser visto na Figura 2, já que normalmente um transformador alimenta mais de uma residência. Diante disto torna-se relevante considerar a topologia do canal, já que no canal PLC é normal haver multi-percursos, isto é, um sinal transmitido de uma tomada para outra percorre vários os ramos do circuito.

Figura 2 - Modelo de uma rede de baixa tensão



2.2.1 Propriedades da Rede Elétrica como Canal de Comunicação

O canal PLC é um meio de transmissão provido de diversas interferências, ruídos e atenuação do sinal em frequências de interesse para comunicação. Isso torna este canal muito desafiador para a transmissão confiável de dados. Outro desafio é o fato dos parâmetros de comunicação alterarem-se de acordo com as cargas ligadas intermitentemente, isto é, este sistema de comunicação é variante no tempo. Cargas indutivas, capacitivas ou resistivas mudam de tempo em tempo através de intervenções humanas ou por acionamentos automáticos (BROEDEL et al, 2014) (AGUIAR, 2005).

2.2.1.1 Os Tipos de Ruídos e Interferências Comuns

É importante que se conheça a fundo os parâmetros do canal, de modo a determinar a banda do sistema de comunicação e desta forma as faixas de frequências em que há ruídos de alta intensidade a serem evitados, obtendo-se assim maior confiabilidade nas transmissões. Entretanto, nunca houve a preocupação com interferências de alta frequência em redes de distribuição de energia, pois os sistemas operam em 60 Hz ou 50 Hz. Deste modo, os cabos não têm nenhum tipo de proteção contra ruídos como uma malha metálica (blindado) ou sequer são trançados. (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004)

Ao analisar os resultados e medir-se o ruído de uma residência fica evidente que os níveis dependem dos aparelhos em uso na mesma ou em outras residências ligadas no mesmo transformador. Isso leva a estudos para determinar as principais fontes de ruídos e as características destas fontes. As principais fontes de ruídos em residências são motores (compressores em geladeiras, *freezers*, ventiladores, ar condicionado, entre outros), dimmers, lâmpadas fluorescentes e fontes chaveadas (monitores, televisões, computadores, carregadores, entre outros) (VINES et al., 1984) (MARUBAYASHI; TACHIKAWA, 1996).

A Tabela 1 mostra os valores típicos de amplitude e a duração dos principais ruídos medidos em (MARUBAYASHI; TACHIKAWA, 1996). Os resultados são classificados pela forma de onda do ruído, sendo pulso único o ruído gerado quando o eletroeletrônico muda de ligado para desligado ou vice-versa; pulsos periódicos os ruídos síncronos gerados na frequência

fundamental e harmônicos; pulsos contínuos os ruídos gerados durante o funcionamento de um eletroeletrônico.

Tabela 1 - Amplitude e duração de ruídos gerados por alguns equipamentos eletroeletrônicos

Equipamento	Amplitude [mV]	Duração [μs]
Pulso Único		
Geladeira	285,4	755,9
Lâmpada Fluorescente	556,7	420,6
Lâmpada Incandescente	824,1	1047,4
Televisão	824,1	1047,4
Pulsos Periódicos		
Televisão	197.2	722.4
forno microondas	505.9	1008.8
dimmer	670.8	140
Pulsos Contínuos		
máquina de costura	41.6	148.2
Aspirador de pó	1457.5	Sempre

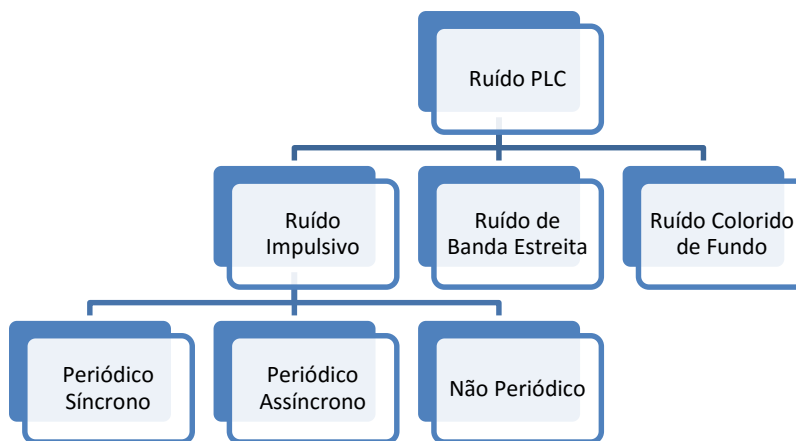
Fonte: MARUBAYASHI; TACHIKAWA, 1996, modificado pelo autor

Em Vines et al., (1984) é feito uma análise de ruídos que motores universais inserem na rede em diversas frequências. Motores universais podem operar tanto em corrente alternada como corrente contínua e devido ao seu pouco peso são ideais para pequenas aplicações. Dentro de residências são utilizados principalmente em aspiradores de pó, liquidificadores, máquinas de costura, furadeiras e serras, dentre outros.

Diferentemente de muitos outros canais de comunicação, o ruído no canal PLC não pode ser descrito como ruído branco gaussiano AWGN (*additive white Gaussian noise*), cuja densidade espectral de potência é constante ao longo de todo o espectro de transmissão (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004) (BERGER et al., 2014). O ruído observado em sistemas internos de PLC (*indoor PLC*), é normalmente categorizado em diversas classes, dependendo da origem, do nível e da assinatura no domínio do tempo. O ruído PLC pode também ser agrupado com base em características temporais e espectrais. A Figura 3 apresenta uma divisão das classes de ruídos: ruído colorido de fundo, ruído de banda estreita e ruído impulsivo; sendo este último

ainda é dividido em periódico síncrono, periódico assíncrono e não periódico. (BERGER et al., 2014)

Figura 3 - Classificação dos ruídos



Os **ruídos de banda estreita** são geralmente provenientes de fontes de radiodifusão, em particular de bandas de ondas curtas SW (*short-wave*) e moduladas em frequência FM (*frequency-modulation*). Outra forma de entrada deste tipo de ruído dá-se através de “vazamentos” de equipamentos elétricos e industriais. Este tipo de ruído produz interferências de longa duração em larguras de banda de baixa frequência na ordem de dezenas de kHz. (BERGER et al., 2014)

De acordo com Jie, Xiao e Kaiyu (2012) o ruído de banda estreita pode ser modelado como uma superposição de N senoides independentes, como mostrado na equação (1).

$$n_{narrow}(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cdot \text{sen}(2\pi f_i t + \varphi_i). \quad (1)$$

Cada portadora é descrita por uma frequência f_i com amplitude $A_i(t)$ e ângulo de fase φ_i . A fase da portadora pode ser escolhida arbitrariamente no intervalo $[0, 2\pi]$ e não depende do tempo. A sua amplitude varia com o tempo e tem maior intensidade durante a noite quando as propriedades de reflexão da atmosfera se tornam mais intensas. (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004) (JIE; XIAO; KAIYU, 2012)

O **ruído de fundo** apresenta o menor nível de interferência. Ele é geralmente colorido, no sentido que sua densidade espectral de potência PSD (*Power Spectral Density*), é normalmente maior em frequências mais baixas. A potência média deste ruído cai exponencialmente com a frequência e esse é causado principalmente pela sobreposição de numerosas fontes de ruído de intensidade mais baixa. Os parâmetros deste ruído variam ao longo do tempo em termos de minutos e horas. (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004) (BERGER et al., 2014)

Um bom modelo de ruído de fundo, segundo Jie, Xiao e Kaiyu (2012), é mostrado na equação (2) no plano Z.

$$H_{mod}(Z) = \frac{B(Z)}{A(Z)} = \frac{1 + \sum_{i=1}^m b_i \cdot Z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^m a_i \cdot Z^{-i}} \quad (2)$$

Nesta equação, a função de transferência consiste em uma média móvel MA (*moving average*) no numerador B(Z) e modelo autoregressivo AR (*autoregressive*) no denominador A(Z). Os parâmetros deste modelo são variância σ^2 da fonte de ruído e os coeficientes do filtro. Os parâmetros podem ser determinados a partir da medida do sinal de ruído com um analisador de espectro. Devido à densidade espectral de potência do ruído de fundo mudar lentamente com o tempo, os parâmetros só devem ser mudados quando as condições de simulação são diferentes. A vantagem do modelo autoregressivo é o uso de menos coeficientes que os outros modelos, o cálculo é simples e eficiente, e pode-se obter uma melhor aproximação ao usar o número de ordem superior. (JIE; XIAO; KAIYU, 2012)

Os **ruídos impulsivos** são gerados por dispositivos eletrônicos conectados à rede, tais como fontes chaveadas, dimmers de lâmpadas ou lâmpadas fluorescentes. Este tipo de ruído tem pequena duração (alguns μ s) porém intensidade alta, ordem de dezenas de mV. Os ruídos impulsivos podem ainda ser divididos em *periódico e síncrono* com a frequência da rede, *periódico e assíncrono* com a frequência da rede e *não periódico*. (BERGER et al., 2014)

De acordo com Temaneh-Nyah e Chifamba (2015) o ruído impulsivo pode ser modelado através da equação (3):

$$p(v) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\exp(-A) \cdot A^k}{k!} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k}} \cdot \exp\left(\frac{-v^2}{2\sigma_k^2}\right), \quad (3)$$

onde A é o índice impulsivo e $\sigma_k^2 = P \left(\frac{\binom{k}{A} + \Gamma}{1 + \Gamma} \right)$, $P = \sigma_G^2 + \sigma_I^2$, σ_G^2 é a potência do ruído Gaussiana, σ_I^2 é a potência do ruído impulsivo e $\Gamma = \sigma_G^2 / \sigma_I^2$. O índice impulsivo e potência total de ruído são variáveis que são escolhidos para atender um específico ruído impulsivo desejado.

Os ruídos interferem tanto no sistema de comunicação que, a título de exemplo, em 1997, a Nortel formou uma *joint venture*, a Nor.Web, com a United Utilities, companhia britânica de eletricidade para a utilização da rede elétrica como tecnologia de rede de acesso. Após vários testes, ocorreu um imprevisto: os postes de iluminação nas imediações funcionaram como antenas prejudicando os processos de downloads. Depois de anos de investigação e desenvolvimento, a Nor.Web acabou por fechar as portas no final de 1999, concluindo que, tecnicamente era possível a transmissão de dados sobre a rede elétrica, mas que, economicamente, tratava-se de um projeto inviável (BOLZANI, 2004).

2.2.1.2 Variação da Impedância na Rede PLC

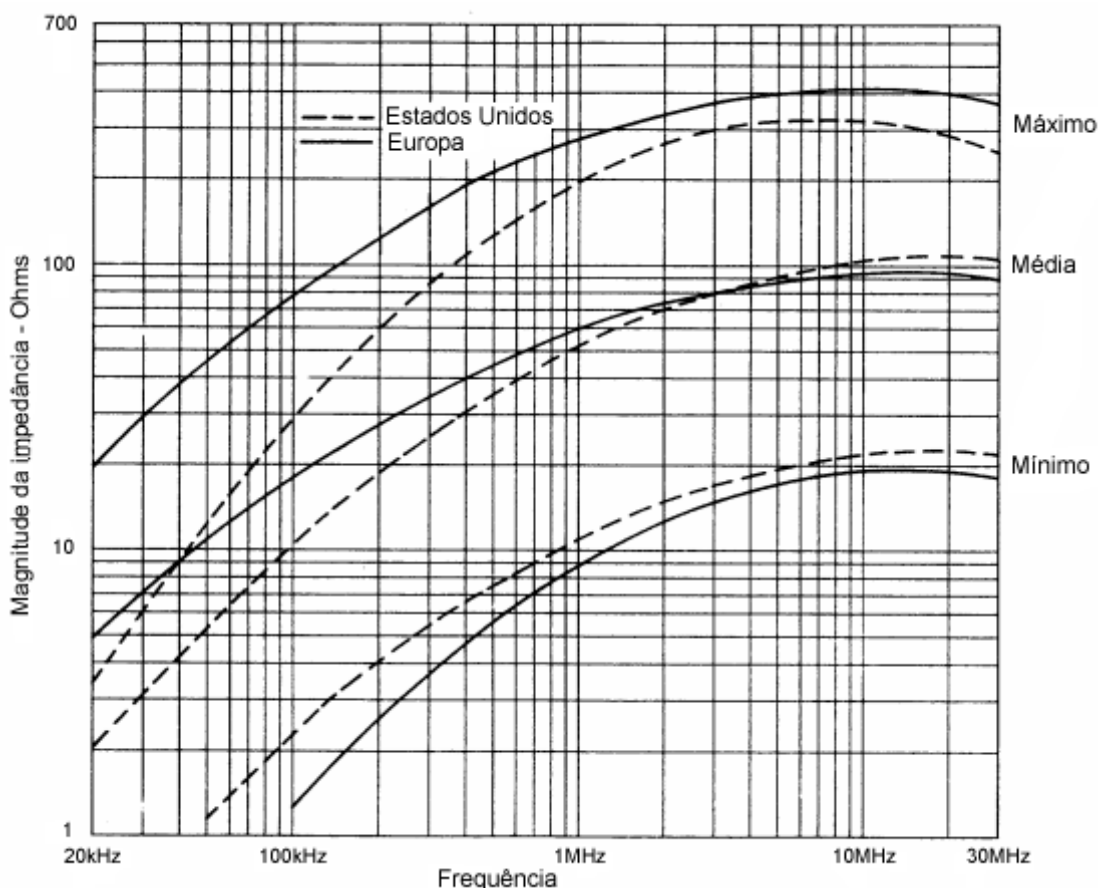
A impedância é um parâmetro muito importante ao se avaliar as interferências em um canal PLC, por estar intimamente relacionada com a frequência do sinal de transmissão. Uma vez que a indutância e a capacitância são distribuídas, a impedância aumenta com o aumento da frequência. Mas, devido aos diferentes tipos de carga conectando-se e desconectando-se da linha, seja automaticamente ou por interferências de pessoas, determinar esta impedância e suas mudanças pode ser muito complexo (JIE; XIAO; KAIYU, 2012).

O chaveamento aleatório de equipamentos pode mudar muito a impedância do canal PLC, de forma que a mesma varie com o tempo. Há muitos estudos sobre impedâncias de cargas no canal PLC na literatura. Em Tian et al. (2011) são apresentadas medidas da impedância da rede elétrica com diversas cargas ligadas em uma rede residencial, com análises feitas na faixa de frequência de 80kHz a 500kHz. Em Hooijen (1998), além do estudo de ruídos já apresentados,

foram feitas também análises da variação de impedância em circuitos residenciais e explicitadas as diferenças do nível de impedância durante o dia e a noite.

Além destes trabalhos já publicados, o que possui mais dados sobre este assunto foi publicado por Malack e Engstrom da IBM, onde foram medidas as impedâncias de 86 equipamentos comerciais em 6 diferentes países europeus e comparados os resultados com as impedâncias dos equipamentos ligados em redes dos Estados Unidos. A Figura 4 mostra os resultados em forma de comparação. A impedância em redes residenciais aumenta com a frequência em uma faixa que varia de 1.5 até 80 ohms em 100 kHz. Além disso, eles mostraram que a impedância é determinada basicamente por dois parâmetros: as cargas conectadas à rede elétrica e a impedância do transformador de distribuição. (MALACK; ENGSTROM, 1976)

Figura 4 - Comparação entre impedância em rede elétrica europeia e norte americana



Fonte: MALACK; ENGSTROM, 1976, tradução nossa

Nota-se pela Figura 4 que impedância é geralmente muito baixa em frequências abaixo de 100kHz. Por exemplo, a impedância de uma rede elétrica residencial pode ser tão baixa como 2Ω na faixa de frequência de 9-95kHz. Desta forma, para adquirir eficiência no acoplamento do sinal, o fim de um transmissor (sistema PLC) deveria ter uma baixa impedância de saída ($<1\Omega$) (WANG; GONG, 2003).

Um outro estudo foi feito com diversos equipamentos eletroeletrônicos na Turquia por Cavdar (2004). A Tabela 2 mostra os resultados na faixa de frequência de 50Hz até 200kHz. As impedâncias foram calculadas usando a tensão e corrente de entrada de cada carga. Neste artigo também é explicitado que a relação entre a frequência e a impedância não é linear.

Tabela 2 - Potência e impedância de eletrodomésticos

Eletrodoméstico	Potência (W)	Magnitude da impedância (k Ω)				
		Frequências (KHz)				
		50Hz	50	100	150	200
Cafeteira	1200	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Batedeira	127	8,25	23,5	10,4	6,43	4,91
Forno	2500	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Ferro de passar	1200	0,85	0,35	0,40	0,46	0,52
Ar condicionado	860	45,0	11,2	9,75	6,35	4,45
Televisão	240	0,05	0,06	0,02	0,01	0,006
Aspirador de pó	600	47,0	8,72	3,13	2,01	1,36
Lâmpada	75	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
Computador	500	6,00	0,27	0,30	0,315	0,33

Fonte: CAVDAR, 2004, modificado pelo próprio autor

2.3 Principais Esquemas de Modulações Empregados na Tecnologia PLC

As primeiras redes PLC em **banda estreita** usavam modulação por Chaveamento de Amplitude (ASK, *Amplitude-Shift Keying*). Este tipo de modulação, entretanto, não é ideal para comunicação via rede elétrica por não ser robusta contra distúrbios, e como visto anteriormente o canal PLC sofre os mais diversos tipos de interferências e distúrbios. Uma modulação mais robusta é o Chaveamento binário de Fase (BPSK, *Binary Phase-Shift Keying*). Entretanto a

detecção de fase no receptor, necessária neste tipo de modulação, é mais complexa. Sistemas baseados em BPSK não são comumente utilizados para essa aplicação. Os sistemas PLC em banda estreita mais recentes tem utilizado o esquema de modulação por Chaveamento de Frequência (FSK, *Frequency-Shift Keying*) e conseguem taxas maiores do que 1200bps. (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004)

Os sistemas de comunicação via rede elétrica que utilizam baixas taxas de dados podem usar esquemas de modulação tanto de banda estreita quanto de banda larga. As vantagens do uso de modulações de multiportadora estão na robustez contra ruídos de banda estreita e no efeito de atenuação seletiva que existem no canal PLC. Um esquema de modulação banda larga que pode ser utilizado é a Multiplexação de Divisão de Frequência Ortogonal (OFDM, *Orthogonal frequency-division multiplexing*) (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004) (CASTOR,2014) (CASTOR, 2015).

Em sistemas de comunicação **banda larga** via rede elétrica (BPL) consegue-se taxas altas de dados (maiores do que 2 Mbps). Enquanto sistemas em banda estreita só conseguem oferecer um número pequeno de canais e transmissão de dados com baixa taxa de transmissão. Sistemas BPL podem oferecer serviços de Telecomunicações mais sofisticados como múltiplos canais de voz, alta taxa de transmissão de dados, transferência de vídeo e até mesmo serviços em banda estreita. (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004)

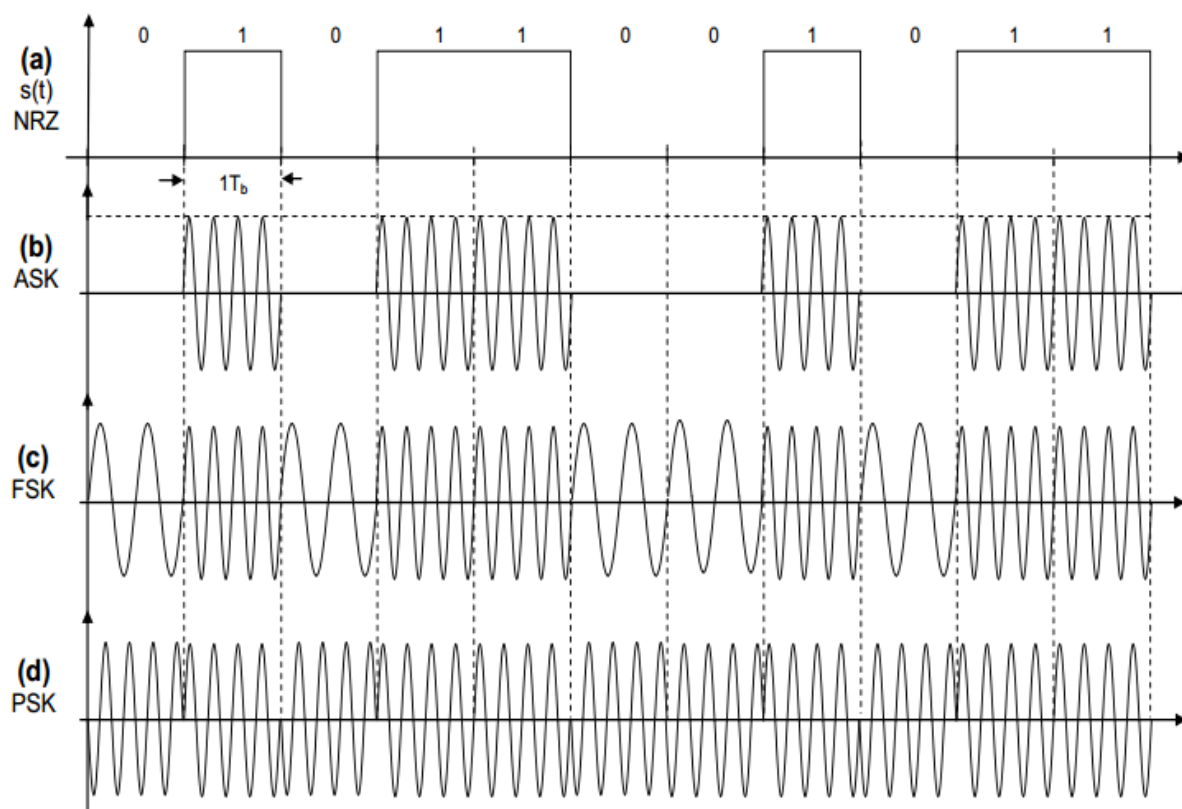
A Figura 5 mostra, no domínio do tempo, como são feitas as modulação ASK, FSK e PSK para a associação de parâmetros binários definidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Tipo de Modulação

Tipo de Modulação	Dígitos Binários NRZ	Associação a parâmetros binários da portadora
ASK (Amplitude Shift Keying)	0	$A_0 = 0$ Amplitude zero
	1	$A_1 = A$ Amplitude igual a A
FSK (Frequency Shift Keying)	0	$f_0 = f_c$ Frequência da portadora
	1	$f_1 = 2f_c$ Duas vezes Frequência da portadora
PSK (Phase Shift Keying)	0	$\theta_0 = 0^\circ$
	1	$\theta_1 = 180^\circ$

Fonte: ROCHOL, 2012.

Figura 5 -Modulação no domínio do tempo



Fonte: ROCHOL, 2012.

Como pôde ser visto na Tabela 3 e na Figura 5 a modulação por chaveamento de amplitude (ASK) consiste, simplesmente, em alterar o nível de amplitude da portadora em função de um sinal de entrada com níveis de amplitude discretos. As suas principais características são a facilidade de modular e demodular e a baixa imunidade a ruídos. (FOROUZAN, 2006).

A modulação ASK tem baixo desempenho em PLC devido ser afetada fortemente por interferências e ruídos, estes ruídos fazem que em alguns instantes o nível de amplitude do sinal seja alterado, afetando diretamente no reconhecimento do sinal do demodulador.

Já no processo de modulação FSK, a frequência do sinal da portadora varia de modo a representar os níveis binários. Quando comparada ao ASK, esta modulação apresenta boa imunidade a ruídos, visto que o dispositivo receptor é posicionado a “olhar” variações

específicas de frequência num certo intervalo de tempo. Deste modo o Receptor é capaz de ignorar surtos ou picos de tensão. Sua desvantagem está na capacidade física da portadora, em termos de banda. (FOROUZAN, 2006). Este método de modulação é o mais usado em comunicações via rede elétrica em banda estreita. (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004)

Na modulação PSK a informação do sinal digital é embutida nos parâmetros de fase da portadora. A modulação PSK não é susceptível às degradações provocadas por ruídos, que tanto afetam a técnica ASK ou as limitações de banda da técnica FSK. Pequenas variações no sinal podem ser facilmente detectadas por um receptor PSK. (FOROUZAN, 2006). É esperado que esta técnica, BPSK (*Binary PSK*), seja mais utilizada no futuro dos sistemas de comunicação em rede elétrica em banda estreita. (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004)

Quanto às direções de transmissão de dados entre dois equipamentos, em comunicações de dados, existem três modos: *Simplex*, *Half-Duplex* e *Full Duplex*. Na ***Simplex*** os dados são transmitidos em uma única direção. Um exemplo seria um sistema de monitoramento com leituras de sensores enviando os dados lidos em intervalos regulares, sem nenhuma solicitação de envio. No ***Half-Duplex*** dois dispositivos trocam informações alternadamente, sendo que um exemplo seria um sistema de automação residencial onde os equipamentos precisam responder o seu estado antes do outro ponto fazer uma solicitação. No modo de transmissão ***Full-Duplex***, ou simplesmente Duplex, dados são transmitidos pelos dois dispositivos, em ambas direções, simultaneamente, um exemplo é a comunicação de redes de telefonia, onde é possível falar e escutar ao mesmo tempo. Este modo é indicado quando aplicações exigem um *throughput* de dados alto, e que os sinais se propaguem em direções independentes. (CARVALHO, 2008)

2.4 Regulamentação e/ou Padronização para PLC

O Quadro 2 apresenta um resumo dos requisitos especificados pelos principais padrões regulatórios internacional para sistema de banda estreita através da rede elétrica:

Quadro 2 - Padrões internacionais de PLC em banda estreita

Padrão	Banda de frequência	Aplicação	Sinais transmitidos	Emissões conduzidas
US FCC Title 47 Part 15	9kHz até 490kHz	Sistemas PLC operados para utilitários em linhas de transmissão de energia	Potência mínima possível	Sem limites especificados
	9kHz até 535kHz 1705kHz até 30MHz	Sistemas PLC para usos residenciais, comerciais e industrias	Potência mínima possível	1000 μ V com banda de frequência 535-1705kHz
Canada ICES-006	9kHz até 535kHz	Sistemas PLC em linhas AC utilizados em edifícios comerciais e residenciais.	5.3 Vrms (15 Vpk-pk) max	1000 μ V com banda de frequência 535-1705kHz
European CENELEC EN50065-1:2001	3kHz até 95kHz	Restrito para os fornecedores de energia elétrica e seus licenciados	134 dBuV (5 Vrms) max	89 dB μ Vpico com banda de 3-9kHz 89 to 56 dB μ V quase-pico com banda de 9-500 kHz
	95kHz até 148,5kHz	Equipamentos de classe 122 para consumidores gerais	122 dBuV (1.26 Vrms) max	56 dB μ V quase-pico com banda de 500kHz - 5 MHz
		Equipamentos de classe 134 para aplicações específicas	134 dBuV (5 Vrms) max	60 dB μ V quase-pico com banda de 5 MHz - 30 MHz

Fonte: ARIANE, 2014a, modificado pelo autor

No Brasil, na resolução nº 527 de 8 de abril de 2009 da ANATEL aprova-se o regulamento sobre condições de uso de radiofrequências por sistemas de banda larga por meio de redes de energia elétrica (BPL). Para isto, a ANATEL estabelece o máximo nível de radiação que o equipamento deve emitir para não interferir no Serviço Móvel Aeronáutico e Radioamador (ANATEL,2016a). Embora haja uma resolução para a tecnologia BPL pela ANATEL, onde é definida a faixa de frequência de operação, não há nenhuma norma ou resolução para PLC

banda estreita. Entretanto, como será visto nos capítulos seguintes, a frequência central de operação do modem utilizado é de 143,8kHz. Ao consultar a ANATEL sobre a atribuição de faixas de frequência no Brasil, pôde-se constatar que a frequência central de operação do *Mamba Shield* está reservada para Serviço Telefônico Fixo e Serviço Móvel Marítimo através da seguinte nota:

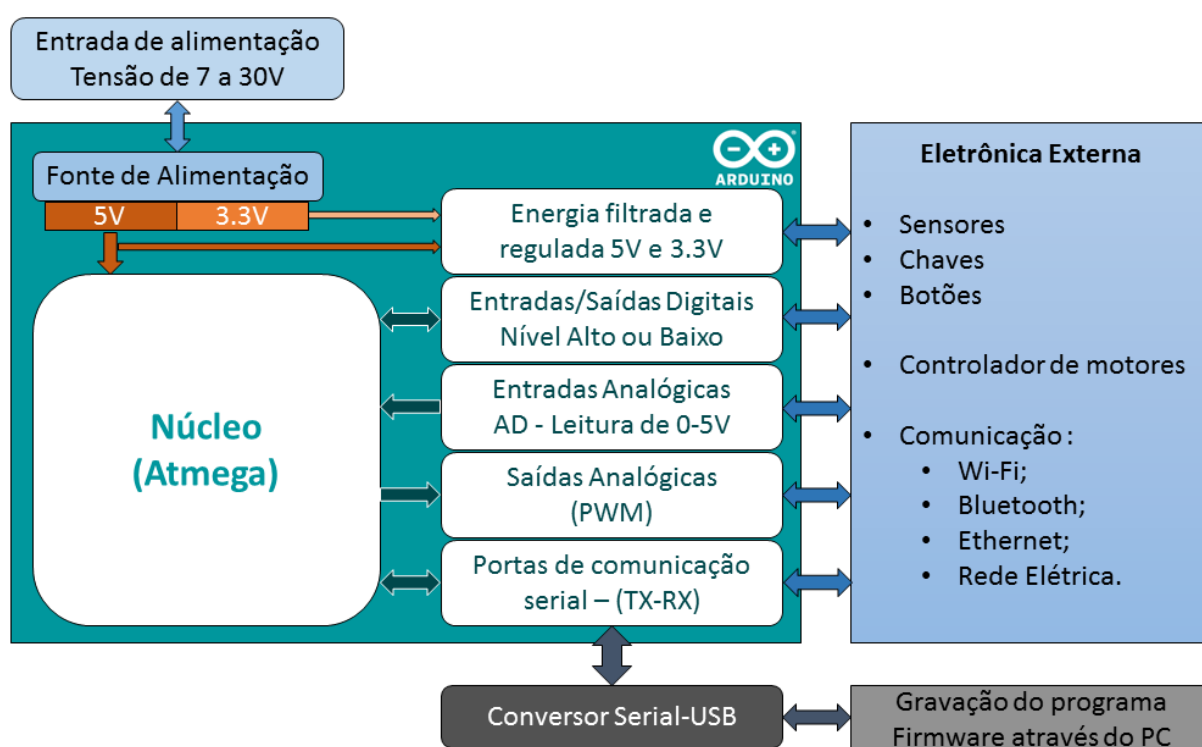
5.64 - Somente emissões de classe A1A ou F1B, A2C, A3C, F1C ou F3C estão autorizadas para estações do serviço fixo nas faixas atribuídas a este serviço entre 90 kHz e 160 kHz (148,5 kHz na Região 1) e para estações do serviço móvel marítimo nas faixas atribuídas a este serviço entre 110 kHz e 160 kHz (148,5 kHz na Região 1). Excepcionalmente, as emissões de classe J2B⁸ ou J7B⁹ estão, também, autorizadas nas faixas entre 110 kHz e 160 kHz (148,5 kHz na Região 1) para estações do serviço móvel marítimo. (ANATEL, 2016b)

3 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

3.1 A Plataforma de Prototipagem Arduino

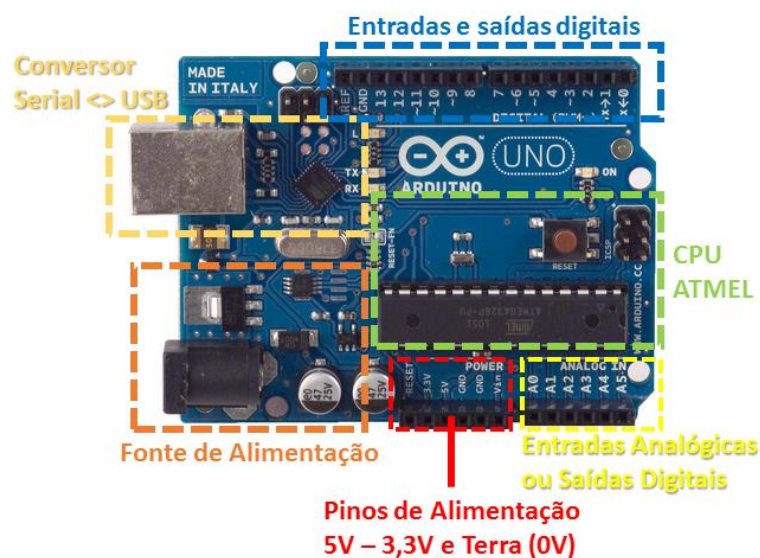
O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica totalmente aberta, que apresenta *hardware* e *software* flexíveis e de fácil utilização, criado com o objetivo de permitir o desenvolvimento de controle de sistemas interativos, de baixo custo e acessível a todos. A Figura 6 apresenta a arquitetura do Arduino.

Figura 6 - Arquitetura Arduino



São vários modelos possíveis de utilização do Arduino, que se diferenciam na quantidade de memória e nas configurações e quantidades de saídas e entradas disponíveis. O Arduino UNO foi utilizado neste trabalho por ter um número de portas suficiente para a aplicação, mesmo sendo um modelo mais simples. A Figura 7 apresenta seu *hardware*, bem como as indicações dos componentes nele presentes.

Figura 7 - Arduino UNO - Hardware



O processamento da placa Arduino é realizado em um microcontrolador da ATMEL, o ATmega. O processador apresenta memória de acesso aleatório RAM (*random access memory*), memória programada memória somente de leitura ROM (*read-only memory*), unidade de processamento aritmética e portas de entrada e saída.

Uma das grandes vantagens do uso do Arduino está em sua popularidade, sendo que devido a ela inúmeros *Shields* são produzidos para as mais diversas finalidades. “*Shields*” são placas eletrônicas que podem ser conectadas a placa de circuito impressa (PCB) do Arduino, estendendo assim suas capacidades. Eles são acoplados nos pinos de alimentação, entradas analógicas e nos pinos de entradas e saídas digitais.

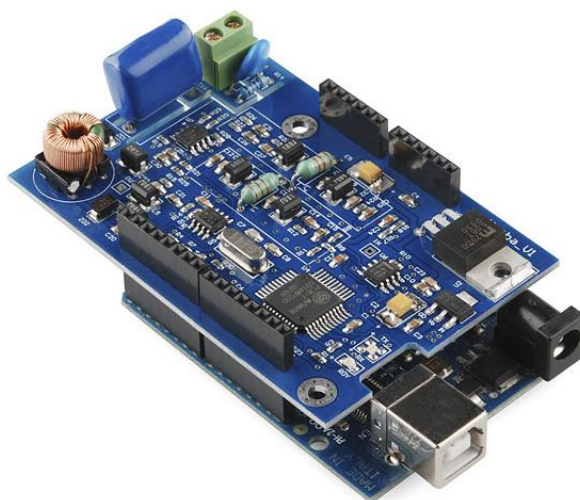
3.2 A Interface *Mamba Shield* entre o Modem e o Microcontrolador

Atualmente, a maior parte dos sistemas NB-PLC são baseados em modulação por chaveamento de frequência FSK (BERGER et al., 2014), assim como a solução comercial a ser utilizada por este projeto. O “*Mamba Shield*”, conforme visto na Figura 8, utiliza modulação BFSK e o circuito integrado “PLM-1”, desenvolvido pela Ariane Controls, onde a taxa de transmissão prometida chega a 185 kbps, sendo possível programar a frequência de operação e outros parâmetros. Este circuito integrado possui algoritmos de detecção e correção de erros, o que é indispensável em um meio de comunicações muito ruidoso como a rede elétrica.

Figura 8 – O *Mamba Shield*

Fonte: SPARKFUN, 2016

Desenvolvido pela LinkSprite, o “*Mamba Narrow Band Power Communication Shield for Arduino*” (*Mamba Shield* para Comunicação em Banda Estreita rede elétrica) pode ser controlado pelo Arduino usando interface SPI (*Serial Peripheral Interface*), que é um protocolo que permite a comunicação do microcontrolador com diversos outros componentes. Segundo o fabricante, este *shield* pode trabalhar tanto com tensões de 240 V como 110 V. Para o *shield* funcionar corretamente é necessário usar uma fonte de 1A já que a potência do Arduino pode não ser suficiente para alimentá-lo. Na Figura 9 pode-se ver o Arduino conectado ao *Mamba Shield* sendo que o circuito esquemático do *Mamba Shield* pode ser visto no Anexo A.

Figura 9 - Arduino conectado com o *Mamba Shield*

Fonte: SPARKFUN, 2016

3.2.1 O Modem PLC PLM-1

O circuito integrado de aplicação específica ASIC PLM-1 da Ariane Controls mostrado na Figura 10 é um modem digital que implementa função de transmissão e recepção de dados, *half-duplex*, para aplicações de comunicação via rede elétrica (ARIANE, 2014b).

Figura 10 - PLM-1 da Ariane Controls

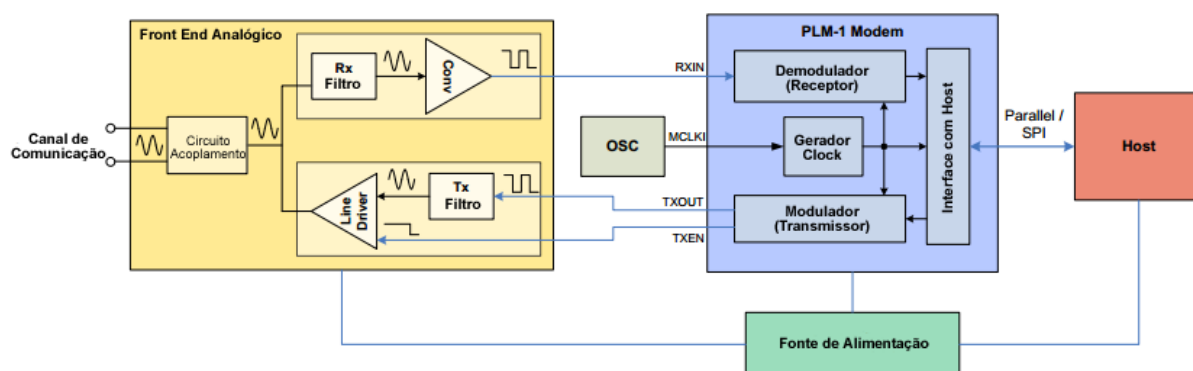


Fonte: ARIANE, 2014a

O PLM-1 foi projetado para ser controlado por uma unidade central de processamento externa, comumente um microcontrolador chamado de *host*. No *Mamba Shield* este *host* é o ATMega do Arduino. O PLM-1 implementa as camadas Física e Controle de Acesso ao Meio MAC. Ele provê modulação e demodulação dos pacotes de dados, além de dispor de detecção de colisão, bem como a correção automática de erros e verificação da integridade dos dados por CRC-16. Funções de nível superior, tais como endereçamento e de rede são tratadas pelo *host*, se necessário, pois o PLM-1 é uma tecnologia de protocolo neutro. (ARIANE, 2014b)

O modem PLM-1 pode ser usado para transportar dados em redes AC, DC e desenergizada. A Figura 11 mostra o diagrama de blocos de um transceptor típico utilizando o PLM-1. Os componentes externos para o funcionamento do modem são: o *host*, no caso desta aplicação este é o ATMega do Arduino; um Oscilador (OSC) externo, presente no *Mamba Shield*; um *front-end* analógico (AFE), também presente no hardware do *Mamba Shield*; e uma fonte de alimentação, sendo esta a fonte de alimentação do Arduino. (ARIANE, 2014b)

Figura 11 - Diagrama de Blocos de um transceptor utilizando o modem PLM-1

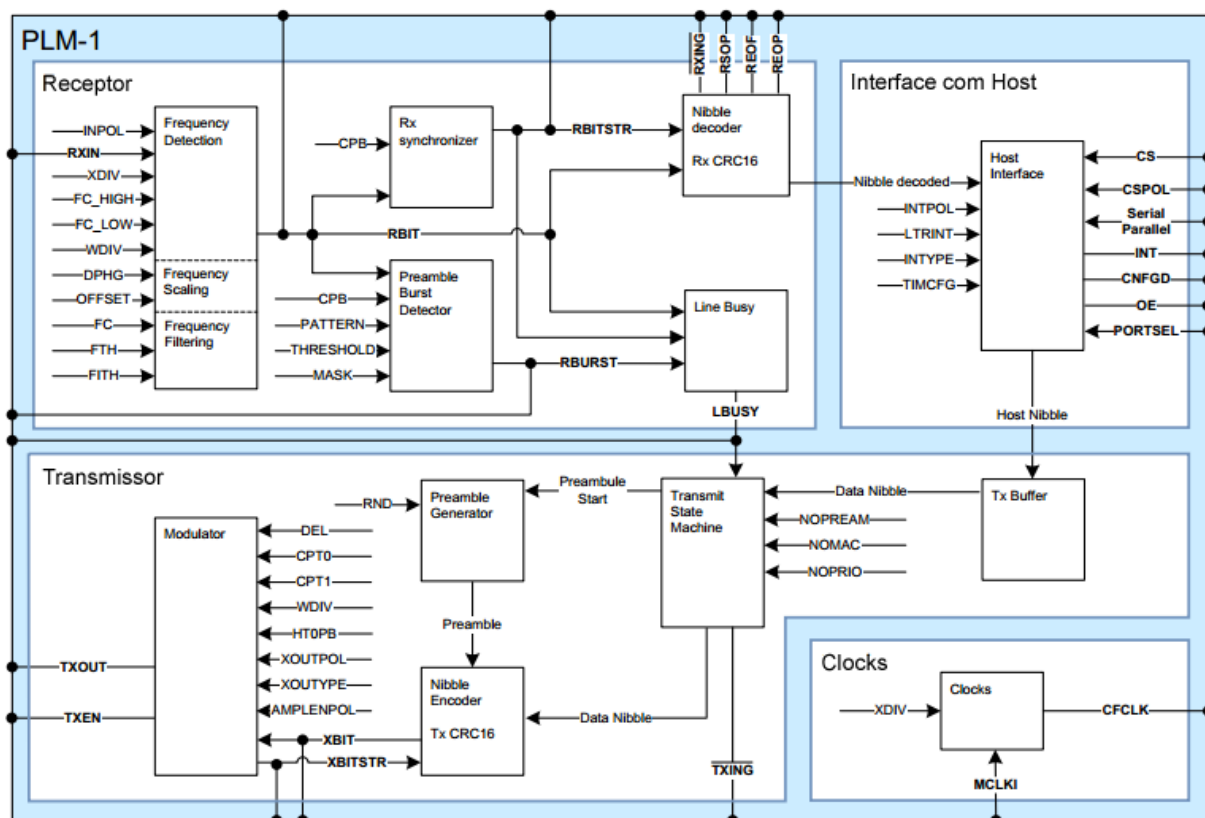


Fonte: ARIANE, 2014b, modificado pelo autor

Como mostrado também na Figura 11, a estrutura interna do modem consiste em quatro blocos: o **Gerador de Clock**, que é utilizado internamente para definir a frequência de operação do sistema, através de configuração de registradores conforme descrito. O sinal de *clock* externo MCLKI utilizado pelo *Mamba Shield* é de 6,144 MHz. O **Demodulador** receptor recebe o sinal pelo pino RXIN, decodifica-o e o entrega para a interface com o *Host*. O **Modulador** transmissor recebe os dados da **Interface com o Host** e executa a modulação FSK. Este sinal modulado é então enviado para o pino de saída de dados TXOUT. O sinal TXEN é usado para ativar o amplificador externo durante a transmissão, como pode ser visto no circuito do *Mamba* no Anexo A.

Um diagrama de blocos funcional e detalhado só do PLM-1 pode ser visto na Figura 12. O significado de todos os parâmetros e registradores mostrados nesta Figura é detalhado no Manual do Usuário do PLM-1, fornecido pela Ariane Controls. Neste trabalho apenas alguns relacionados à seleção de frequência de operação serão explicitados. O circuito *front-end* analógico é a interface entre o modem e a rede elétrica composta de isolador e filtros. No Manual do Usuário há vários exemplos de filtros para diferentes frequências de operação e configurações. (ARIANE, 2014a)

Figura 12 - Diagrama de blocos funcional do PLM-1



Fonte: ARIANE, 2014a, modificado pelo autor

Quando algum dado é enviado pelo *host* para o canal de comunicação, o **bloco de transmissão** é utilizado. Depois de definida a prioridade de envio do pacote pelos 4 primeiros bits, o PLM-1 automaticamente transmite o preâmbulo para assim ganhar acesso ao canal. Depois disto é transmitido um caractere interno especial chamado de “Início do Pacote”, que serve para notificar o receptor o início dos dados úteis que serão transmitidos. Isso é seguido pela transmissão do primeiro *nibble* de 4 bits, ao qual os códigos de correção de erro são automaticamente acrescentados. Depois que se inicia a transmissão do primeiro *nibble* do pacote a ser enviado, uma interrupção é gerada para o *host* saber quando enviar o próximo *nibble*. Quando não há mais dados do *host* a ser enviado, um último *nibble* é enviado junto ao pacote, contendo o valor da verificação de erro CRC-16 calculado durante o processo de transmissão.

Na Figura 13 há uma representação do pacote transmitido pelo PLM-1, cujo tamanho máximo é de 63 bytes. O primeiro *nibble* indica a prioridade sendo que o bit seguinte é reservado. O segundo item do cabeçalho do pacote representa o canal e ocupa 1 byte. Em seguida apresenta-

se os dados do usuário a serem transmitidos, sendo os dados úteis com tamanho máximo de 61 bytes. No final do pacote 4 bits são reservados para o CRC16. Note-se que não há no cabeçalho nenhum campo definido para endereçamento do pacote pois o PLM-1 trabalha nas camadas físicas e Controle de Acesso ao Meio MAC e ambas não suportam endereçamento. Esta tarefa deve ser feita pelo *host*, se necessário.

Figura 13 - Estrutura do Pacote do PLM-1

Prioridade	Reservado	Canal	Dados do usuário	Final do pacote
5 bits		1 byte	61 bytes	4 bits (CRC16)

Fonte: ARIANE, 2014a, modificado pelo autor

Sabendo que a técnica de modulação FSK usada pelo bloco transmissor do PLM-1 codifica os dados em duas frequências diferentes, há dois valores discretos: f_0 para lógica 0 e f_1 para lógica 1. A média entre estes dois valores é definido como frequência central f_c . Combinando uma frequência interna configurável f_{ref} , com frequências menores Δf_0 ou Δf_1 , o PLM-1 gera dois pares de frequência: (f_{L1}, f_{L0}) e (f_{H1}, f_{H0}) como exibidos nas equações (4), (5), (6) e (7):

$$f_{L0} = f_{ref} - \Delta f_0; \quad (4)$$

$$f_{L1} = f_{ref} - \Delta f_1; \quad (5)$$

$$f_{H0} = f_{ref} + \Delta f_0; \quad (6)$$

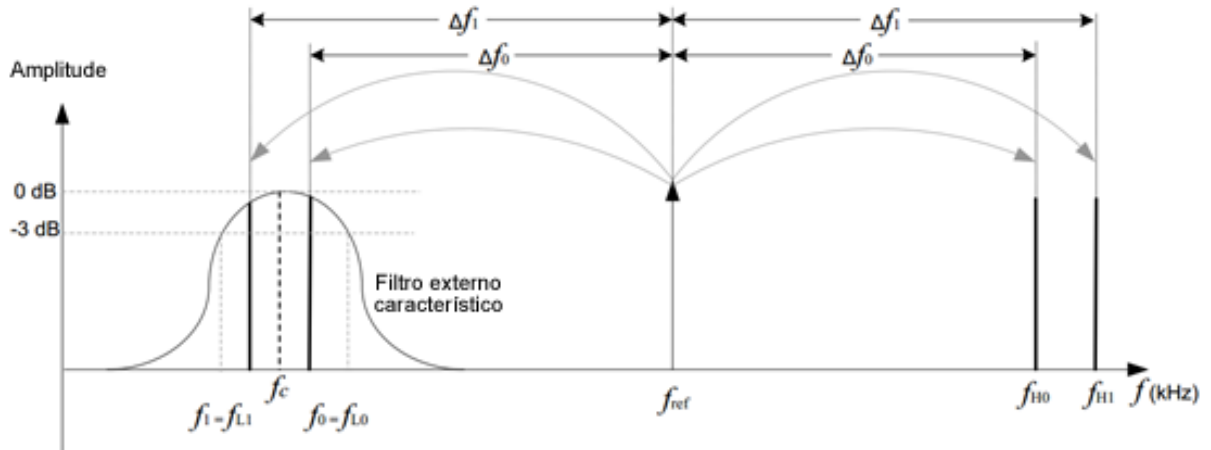
$$f_{H1} = f_{ref} + \Delta f_1. \quad (7)$$

Todas estas componentes de frequências são saídas no pino TXOUT. Um filtro externo analógico passa-banda é utilizado para selecionar um dos pares como f_0 e f_1 como frequência de comunicação. Na Figura 14 são mostradas as frequências geradas pela combinação de f_{ref} , Δf_1 e Δf_0 e também um filtro selecionado f_{L1} e f_{L0} como as frequências de comunicação f_1 e f_0 . Estas mesmas frequências são escolhidas como as frequências de comunicação no *Mamba Shield*.

A pequena diferença entre f_0 e f_1 (na ordem de alguns kHz) é um grande diferencial da tecnologia pois, segundo o fabricante, isto provê alta imunidade a ruídos no receptor. Filtros externos passa-faixa, com largura de banda mínima para a passagem de f_0 e f_1 são necessários na transmissão e recepção. Conforme descrito anteriormente o filtro na recepção rejeita ruídos provenientes da rede elétrica bem como todos os sinais de outras frequências. O filtro no

transmissor tem como objetivo remover a componente f_{ref} e as duas outras frequências que não foram selecionadas, assim como todas as harmônicas.

Figura 14 - Geração e Seleção das frequências de comunicação



Fonte: ARIANE, 2014a, modificado pelo autor

Para a explicação da geração e seleção das frequências de comunicação, é necessário saber como definir os valores de f_{ref} , Δf_0 e Δf_1 . O objetivo do bloco de clock é gerar CFCLK, um clock de frequência f_{ref} . Isto é obtido dividindo a f_{osc} do sinal de clock externo (MCLKI) pelo registrador de configuração XDIV, fazendo.

$$f_{ref} = \frac{f_{osc}}{XDIV}. \quad (8)$$

No *Mamba Shield* é recomendado usar $XDIV = 37$, e como o oscilador externo ligado ao PLM-1 é de 6,144 MHz, logo $f_{ref} = 166,05$ kHz.

As frequências internas Δf_0 e Δf_1 podem ser obtidas dividindo f_{ref} pelos dois números inteiros N_0 e N_1 , fazendo:

$$\Delta f_0 = \frac{f_{ref}}{N_0}; \quad \Delta f_1 = \frac{f_{ref}}{N_1}. \quad (9)$$

Os registradores de configuração CPT0 e CPT1 são utilizados para calcular os valores N_0 e N_1 , conforme:

$$CPT0 = N_0 - 2; \quad CPT1 = N_1 - 2. \quad (10)$$

Os valores de CPT0 e CPT1 utilizados ao configurar o *Mamba Shield* são 6 e 5, respectivamente. Substituindo os valores dos registradores de configuração nas equações acima obtém-se que $f_{LI}=142,33\text{kHz}$, $f_{LO}=145,3\text{kHz}$, $f_{HI}=186,81\text{kHz}$, $f_{HO}=189,78\text{kHz}$. Uma vez que o filtro do transmissor seleciona o menor valor do par de frequências e atenua todas as outras, a frequência central de operação será $f_c = 143,81\text{kHz}$.

O **bloco do receptor** está sempre ativo, exceto quando o modem está transmitindo. Este está constantemente monitorando a linha para detectar sinais do preâmbulo e verificar se a linha está ocupada. Sincroniza-se continuamente com os dados recebidos e espera o símbolo de início de pacote antes de transferir o sinal demodulado e corrigido para o *host*, se necessário. No **bloco receptor** são realizadas a demodulação, detecção de frequência, filtragem, sincronização e decodificação dos dados. Neste último é ainda aplicado o algoritmo de detecção de erros verificando-se no pacote recebido os 4 últimos bits com o CRC-16. Informações detalhadas sobre cada etapa podem ser encontrada no Manual do Usuário do PLM-1 (ARIANE, 2014a).

O PLM-1 só é capaz de transmitir ou receber pacotes depois de configurado. No Quadro 3 é apresentado o vetor de bytes de configuração. Cada um destes parâmetros e registradores pode ser encontrado com suas respectivas explicações de função no Manual do Usuário do PLM-1. Note-se que alguns parâmetros já foram descritos neste texto, apesar de todos os outros parâmetros serem também importantes tanto na transmissão como na recepção.

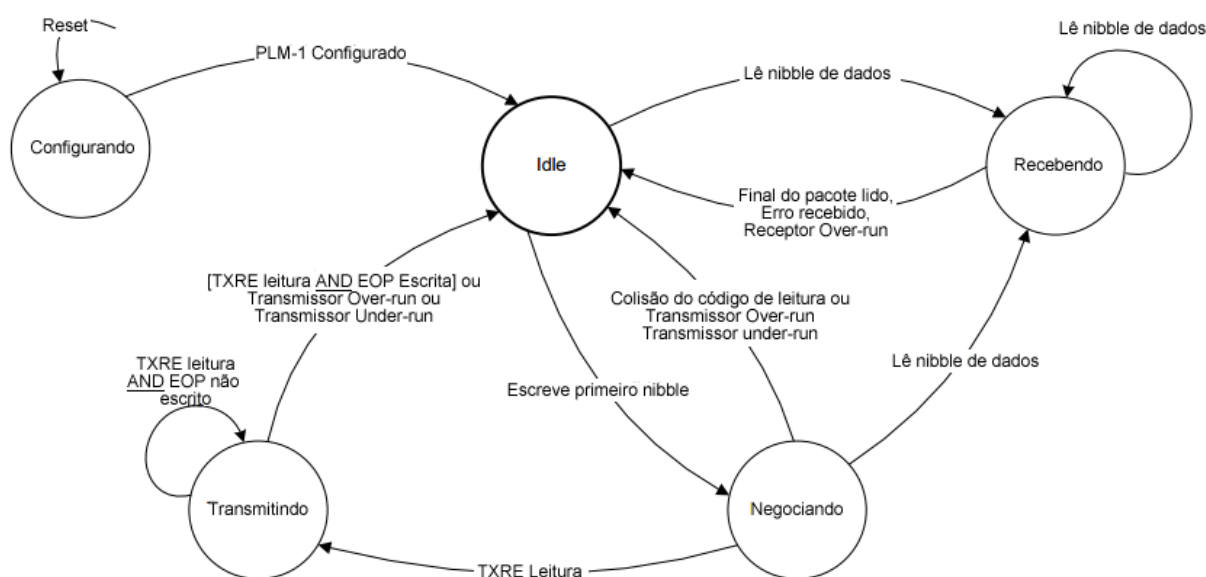
Quadro 3 - *String* de configuração em um vetor de byte no *Mamba Shield*

Configuration String							
0	PATTERN[7:0]						
1	MASK[7:0]						
2	THRESHOLD[4:0]			XDIV[6:4]			
3	XDIV[3:0]		DPHG[3:0]				
4	OFFSET[10:3]						
5	OFFSET[2:0]		FITH[7:3]				
6	FITH[2:0]		FTH[6:2]				
7	FTH[1:0]		FC[5:0]				
8	WDIV[1:0]	INPOL	LTRINT	INTPOL	INTYPE	XOUTPOL	XOUTYPE
9	TXENPOL	RSVB2	RSVB1	NOPRIO	NOPREAM	NOMAC	CPB[9:8]
10	CPB[7:0]						
11	DEL[6:0]					HTOPB[4]	
12	HTOPB[3:0]			CPT1[7:4]			
13	CPT1[3:0]			CPT0[7:4]			
14	CPT0[3:0]			RND[7:4]			
15	RND[3:0]			TIMCFG[7:4]			
16	TIMCFG[3:0]			FC_LOW[7:4]			
17	FC_LOW[3:0]			FC_HIGH[7:4]			
18	FC_HIGH[3:0]			CRC[3:0]			

Fonte: ARIANE, 2014a

A máquina de estados finitos do PLM-1 é apresentada na Figura 15. Depois de configurado, o PLM-1 fica inativo (*idle*), apenas monitorando o canal para detectar preâmbulo ou pacotes. O sistema fica em *idle*: depois da configuração; depois de um pacote ser recebido com sucesso; depois de uma recepção ter sido abortada; depois de um pacote ser transmitido com sucesso; depois de uma transmissão de pacote ter sido abortada. Mais informações sobre as transições de estados e detalhes de erros podem ser encontradas no Manual do Usuário do PLM-1 (ARIANE, 2014a).

Figura 15 - Máquina de Estados Finitos de Operação do PLM-1

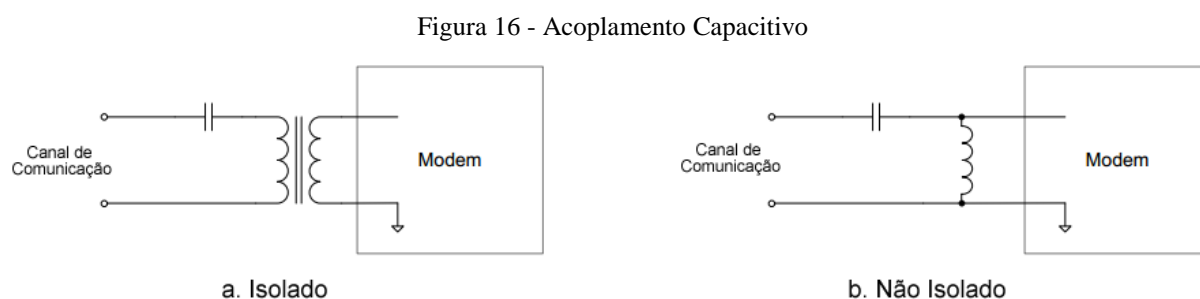


Fonte: ARIANE, 2014a, modificado pelo autor

3.2.2 Acoplamento de Sinal na Rede Elétrica

O circuito de acoplamento conecta o *Front-End* Analógico com o canal de comunicação. Este é normalmente composto de componentes passivos tais como capacitores, indutores e transformadores que estão dispostos em topologia do filtro para a transmissão eficiente dos sinais de comunicação, enquanto os sinais em frequências fora da banda de interesse são atenuadas. Além disso, o circuito de acoplamento deve prover uma isolação de segurança e proteção contra distúrbios em alta tensão, protegendo assim os equipamentos eletrônicos (ARIANE, 2014b).

Os métodos de acoplamento podem ser divididos em acopladores capacitivos e acopladores indutivos. No acoplamento capacitivo, um capacitor bloqueia a tensão da linha, enquanto permite a passagem dos sinais de comunicações em alta frequência. Adicionalmente ao acoplador capacitivo, um indutor ou transformador pode ser utilizado para criar o filtro passa altas. Acopladores capacitivos isolados e não isolados podem ser feitos. Conforme mostrado na Figura 16 (ARIANE, 2014b). O método de acoplamento utilizado pelo *Mamba Shield* é o capacitivo com um transformador como isolador (Figura 16.a). O circuito do *Mamba Shield* com o trecho do acoplamento pode ser visto no Anexo A.



Fonte: ARIANE, 2014b, modificado pelo autor

3.3 Medição de Potência

Em medições de potência os valores de tensão e corrente costumam ser apresentados na forma de valor eficaz RMS (*root mean square*). O valor RMS de uma função periódica é definido como a raiz quadrada do valor médio da função ao quadrado, como pode ser visto na equação (12), sendo $x(t)$ o valor instantâneo da grandeza tensão ou corrente e T o período do sinal (NILSSON, 2007),

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} [x(t)]^2 dt}. \quad (12)$$

Para o cálculo do consumo na tomada, serão medidos potência aparente, ativa e reativa. Para fazer estes cálculos com o Arduino é necessário medir a tensão e corrente na tomada de interesse, coletando os valores instantâneos e calculando o valor RMS.

Considerando a energia elétrica que flui entre duas redes, a potência instantânea é definida como o produto da tensão instantânea e da corrente instantânea, como mostrado em (13). As expressões para tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ são dadas em (14) e (15), respectivamente, onde V representa a tensão máxima e I a corrente máxima,

$$p(t) = v(t)i(t); \quad (13)$$

$$v(t) = V \sin(\omega t); \quad (14)$$

$$i(t) = I \sin(\omega t - \theta). \quad (15)$$

A partir disto, substituindo (14) e (15) em (13) e usando identidades trigonométricas, tem-se que:

$$p(t) = \frac{VI}{2} (\cos(\theta) - \cos(2\omega t - \theta)). \quad (16)$$

Como a potência instantânea muda a todo instante, é conveniente usar seu valor médio, a partir da equação (16). Utilizando identidades trigonométricas e substituições explicitados em NILSSON (2007), têm-se que

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p(t) dt = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\theta). \quad (17)$$

Este resultado representa a taxa de variação média da energia que flui na rede. Essa potência, denominada potência ativa, representa a taxa de energia consumida no circuito.

Como mostrado em NILSSON (2007) a potência complexa, pode ser calculada como apresentado em (18), cuja unidade é “volts-amperes”. Nesta equação P é a potência ativa e Q é a potência reativa. Esta última tem como unidade “var” e está relacionada ao armazenamento de energia em impedâncias capacitivas e indutivas e não contribui para o trabalho do sistema. Entretanto é necessária em sistemas de transmissão AC para que haja transferência de energia real (potência ativa).

$$S = V_{RMS} I_{RMS}^* = P + jQ. \quad (18)$$

A magnitude da potência complexa é denominada potência aparente e pode ser calculada fazendo:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} = V_{RMS} \times I_{RMS}. \quad (19)$$

Uma vantagem de se utilizar potência complexa é a interpretação geométrica que esta permite. Sendo P , Q e $|S|$ lados de um triângulo retângulo, como mostrado na Figura 17, o fator de potência é o cosseno do ângulo θ e, portanto, é a razão entre a potência ativa e a potência aparente ($|FP| = |P|/|S|$). Se um sistema possui baixo fator de potência em relação a outro, significa que este absorve mais corrente para realizar o mesmo trabalho. O aumento da corrente traz consequências como perdas de energia ao longo do sistema, aquecimento, demanda de fios mais grossos (encarecendo projetos), entre outros. Portanto é desejável que o fator de potência seja o mais próximo possível do valor unitário.

Figura 17 - Triângulo de Potências



3.3.1 O Sensor usado para Medição de Corrente

Para a medição de corrente foi utilizado o sensor intrusivo Allegro ACS712 mostrado na Figura 18. Este sensor provê uma boa precisão de medida da corrente DC e AC através do Efeito Hall e é capaz de medir correntes de até 30 Amperes. Mais informações podem ser encontradas em ALEGGRO (2016).

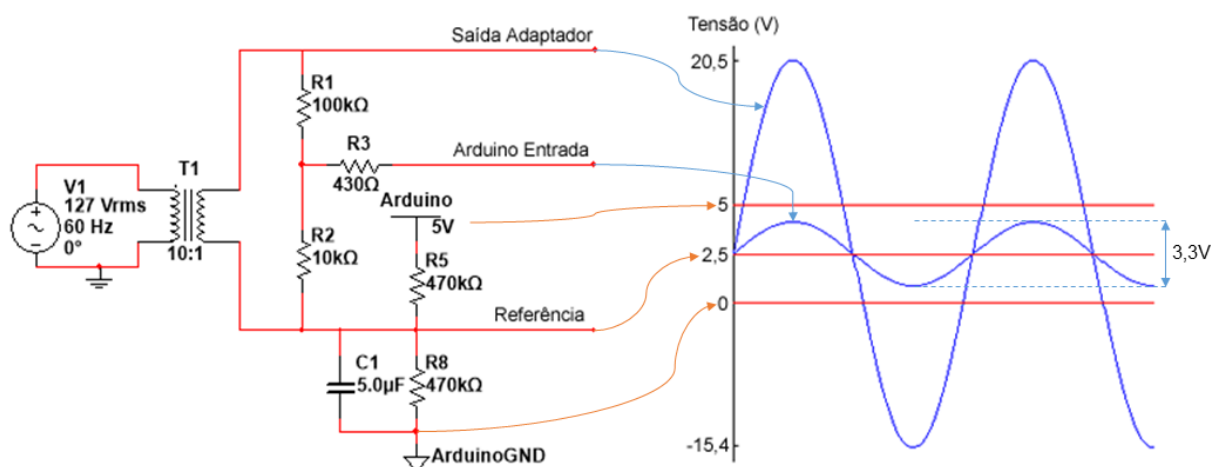
Figura 18 - Sensor de Corrente ACS712



3.3.2 O Sensor usado para Medição de Tensão

Para a medição da tensão foi utilizado um transformador comercial com relação 10:1 e um circuito de adequação do nível de tensão para esta ficar sempre positiva e dentro da faixa de leitura analógica do Arduino. Na Figura 19 é possível ver o circuito de adequação e as formas de ondas de tensão, sendo “Arduino Entrada” o valor que será lido pela porta analógica da plataforma de prototipagem.

Figura 19 - Circuito de adequação de tensão



Esta adequação é necessária pois o Arduino trabalha em sua porta analógica com valores entre 0V e 5V, e o objetivo deste circuito é fazer com que a referência, ou seja, quando não há tensão, fique em 2,5V e que este valor variasse senoidalmente entre 4,15V e 0,85V em condições normais (127V). Este circuito foi simulado no Multisim, o esquemático usado na simulação pode ser visto na Figura 20 e o resultado da simulação pode ser visto no osciloscópio simulado da Figura 21. Após ser simulado o circuito foi montado e conectado no Arduino.

Figura 20 - Circuito Simulado no Multisim

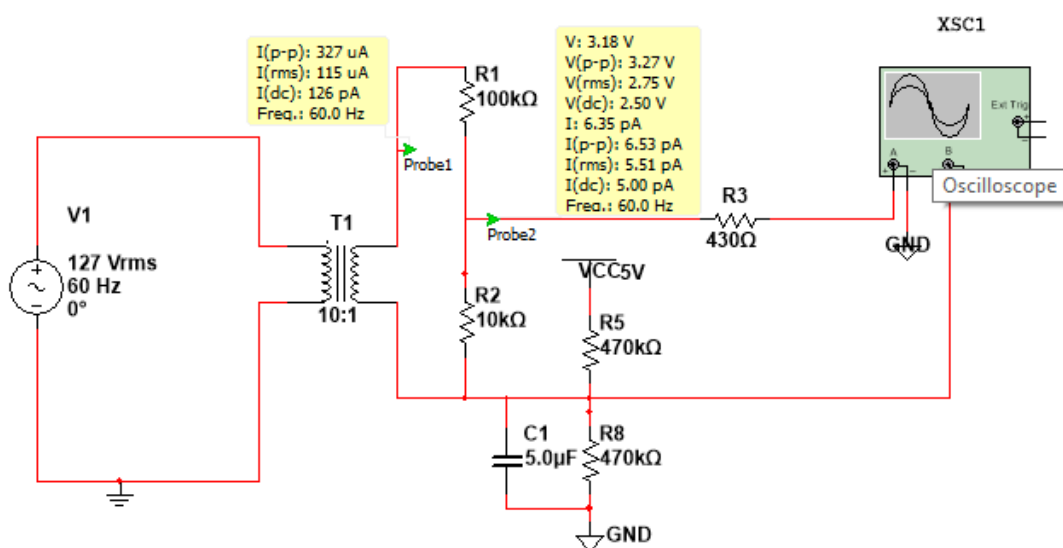
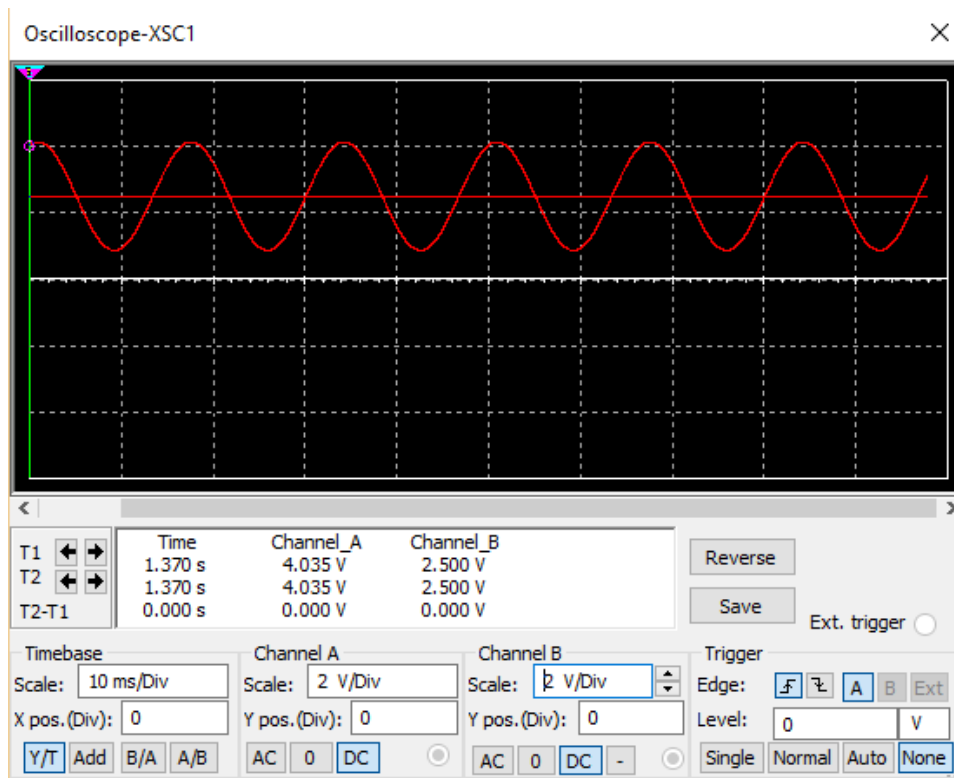


Figura 21 - Resultado no osciloscópio da simulação no Multisim



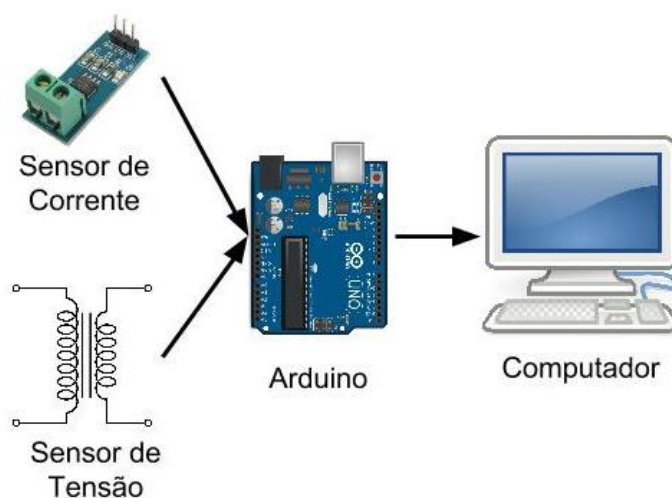
4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

O que torna a tomada “Inteligente” é sua capacidade calcular os parâmetros de potência e de transmitir estes dados para um outro ponto usando a tecnologia de comunicação na rede elétrica. Este outro ponto, além de receber os valores, poderá mostra-los em gráficos e armazená-los em um banco de dados em uma interface para o usuário, além de disponibiliza-los na rede local. Devido a essas diversas funções da tomada inteligente, os experimentos foram então separados em partes. A primeira parte foi voltada para a obtenção dos parâmetros e dados relativos ao consumo de energia e potência. Após esta etapa, a seguinte foi voltada para a comunicação, não necessariamente transmitindo os parâmetros de potência dos experimentos anteriores. Esta foi voltada para o desenvolvimento dos códigos de transmissão e medidas das máximas taxas possíveis. Depois disso outros testes foram feitos com o objetivo de desenvolver a interface do usuário. Finalmente, após todas estas etapas, houve uma para a integração de todas as etapas exploradas.

4.1 Descrição do Aparato Experimental usado na Medição dos Parâmetros

A Figura 22 ilustra o aparato experimental usado para medir tais parâmetros. Constatando-se que os sensores de tensão e corrente funcionavam adequadamente, disponibilizando ao Arduino os valores de tensão e corrente instantâneas quando solicitados. A próxima etapa foi o desenvolvimento do código em linguagem de programação C que será responsável pelos cálculos de tensão RMS e corrente RMS, além das potências. A biblioteca “EmonLib.h” do projeto de código aberto *OpenEnergyMonitor* foi utilizada para este propósito. (OpenEnergyMonitor, 2016)

Figura 22 - Esquema Experimental da Medição dos Parâmetros de Potência

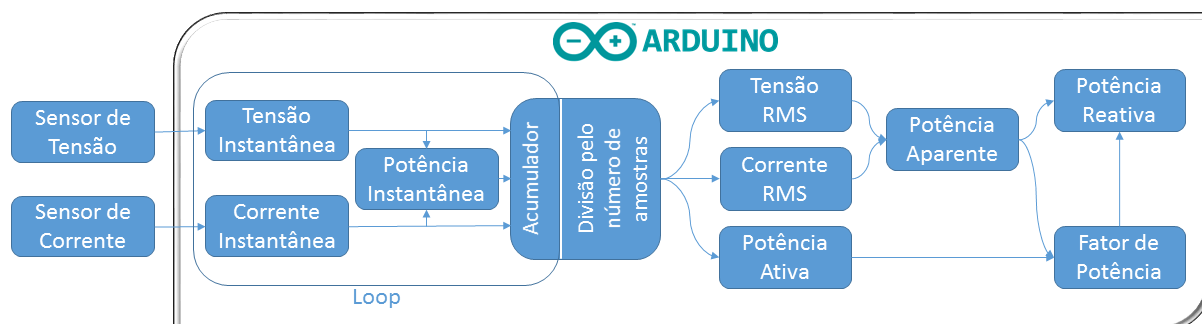


Os valores RMS de tensão e corrente são calculados da mesma forma, através da leitura dos valores instantâneos e acumulando o quadrado destes valores em uma variável. Este processo é repetido até que um número definido de passagem por zeros da onda seja atingido, ou depois que uma variável temporizadora chega a um valor determinado. Após isso a variável com os valores acumulados é dividida pelo número de amostras de valores instantâneos lidos, sendo que o valor resultante desta operação passa então pela operação, raiz quadrada. O valor resultante da raiz quadrada é a tensão ou corrente RMS e o produto da tensão RMS e corrente RMS é a potência aparente.

O valor da potência ativa é calculado de forma parecida com a anterior. Dentro do mesmo *loop* de iterações onde os valores instantâneos de tensão e corrente são acumulados para o cálculo do RMS, há outra variável acumuladora, a de potência instantânea, que nada mais é que o produto da tensão e corrente instantânea. Por estar dentro do mesmo *loop* do cálculo de tensão RMS e corrente RMS, este processo é também repetido até que um número definido de passagem por zeros da onda seja atingido, ou então depois que uma variável temporizadora chega a um valor determinado. Depois disto o valor acumulado de potências instantâneas é dividido pelo número de amostras, obtendo-se assim o valor de potência ativa.

Com a potência aparente e a potência ativa calculada é possível então facilmente calcular o fator de potência e a potência reativa no microcontrolador. Um esquemático mostrando todas as operações que acontecem no Arduino e a interface com os sensores é mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Fluxograma do algoritmo de cálculo dos parâmetros de potência



Após calibração dos sensores foram realizados experimentos com duas lâmpadas de potências diferentes, um ferro de solda, um ferro de passar roupas, um circulador Arno sem especificação e com potência desconhecida, um circulador em paralelo com uma lâmpada e por fim uma furadeira. A Tabela 4 mostra os resultados experimentais com diversos equipamentos. Durante a execução do programa no microcontrolador do Arduino, foram coletadas aproximadamente 425 amostras para em cada *loop* do acumulador, e todos resultados levam aproximadamente 170 ms para serem calculados. Nota-se que a furadeira tem três valores na Tabela. Em “1” são os valores lidos quando a furadeira começava a funcionar, portanto a corrente de partida do motor é maior e conseqüentemente a potência consumida. Em “2” o valor lido quando a furadeira já estava funcionando há algum tempo e com o controlador de velocidade totalmente apertado. Em “3” a furadeira funcionava com o controlador de velocidade atuando, apertado próximo à metade.

As formas de onda de tensão e corrente que estão na entrada analógica do Arduino são mostradas no Gráfico 1 para o ferro de passar roupa. Nota-se que pelo fator de potência ser unitário os valores estão em fase. A forma de tensão e corrente para as lâmpadas incandescentes e qualquer outra carga puramente resistiva são similares a esta.

No Gráfico 2 pode-se ver as formas de onda de tensão e corrente quando o fator de potência não é unitário, gráfico este que ilustra as formas de onda para o circulador Arno.

O Gráfico 3 ilustra as formas de tensão e corrente quando testou-se a furadeira no caso “3” onde uma eletrônica é responsável pelo controle de velocidade. Observa-se uma distorção no sinal de corrente que faz com que o valor do fator de potência seja prejudicado.

Tabela 4 – Resultados experimentais em diversos equipamentos testados

Item Testado, Potência Descrita	Valores Medidos com Multímetro		Valores Medidos no Arduino				
	Tensão RMS (V)	Corrente RMS (A)	Potência Aparente (VA)	Potência Ativa (W)	Fator de Potência (Ind.)	Tensão RMS (V)	Corrente RMS (A)
	Lâmpada 40W	126,2	0,31	36,52	36,49	1,00	125,44
Lâmpada 60W	124,5	0,42	53,11	53,24	1,00	124,36	0,43
Fer. Solda 60W	123,8	0,64	76,85	77,13	1,00	123,45	0,62
Circulador Arno	124,2	1,88	235,96	166,23	0,70	128,22	1,84
Circ. Arno/ Lamp. 40W	126,1	2,15	272,36	218,51	0,80	129,27	2,11
Ferro Roupas 1200W	121,2	8,62	1036,8	1034,8	1,00	120,84	8,58
Furadeira-1 600W	126,8	7,16	908,40	545,61	0,60	127,66	7,12
Furadeira-2 600W	129,1	2,09	260,99	250,58	0,96	129,65	2,01
Furadeira-3 600W	129,6	1,24	158,48	52,29	0,33	130,86	1,21

Gráfico 1 - Formas de onda de tensão e corrente - FP unitário – Ferro de Roupa

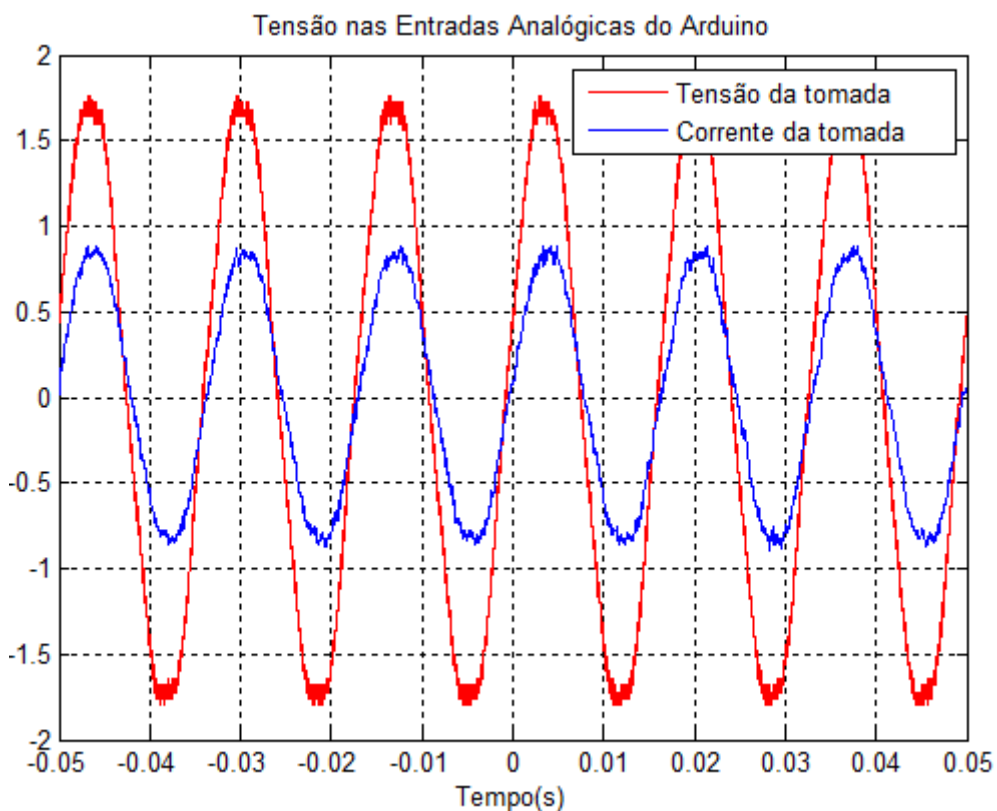


Gráfico 2 - Formas de onda de tensão e corrente - Fator de potência não unitário - Circulador

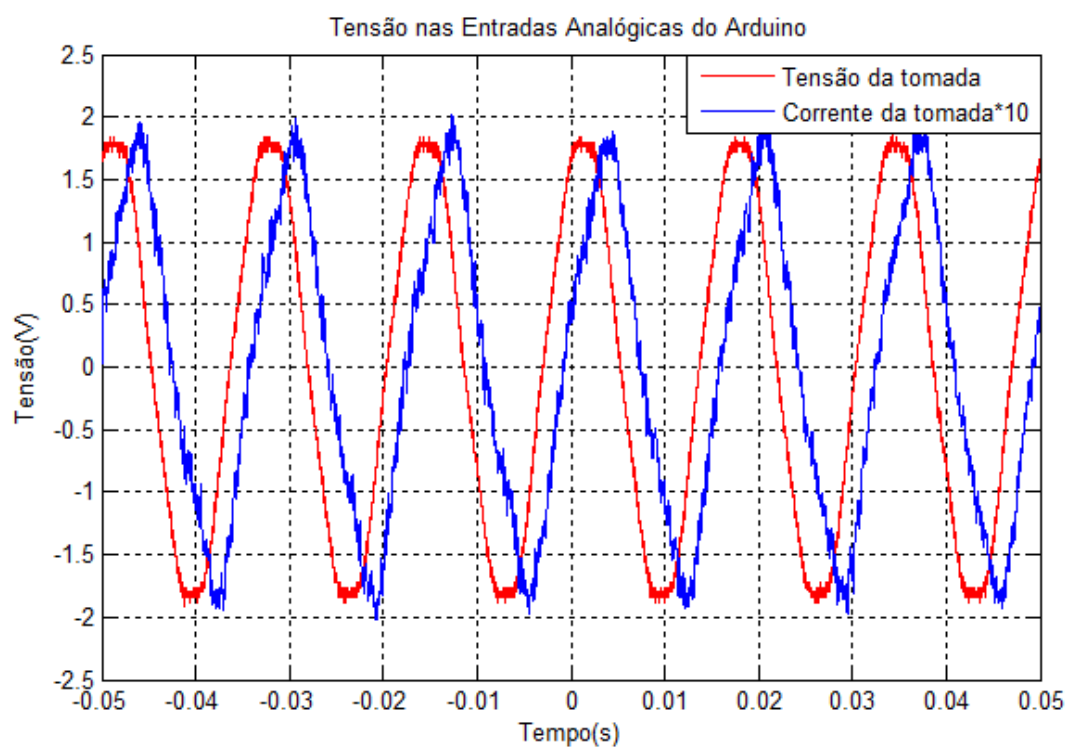
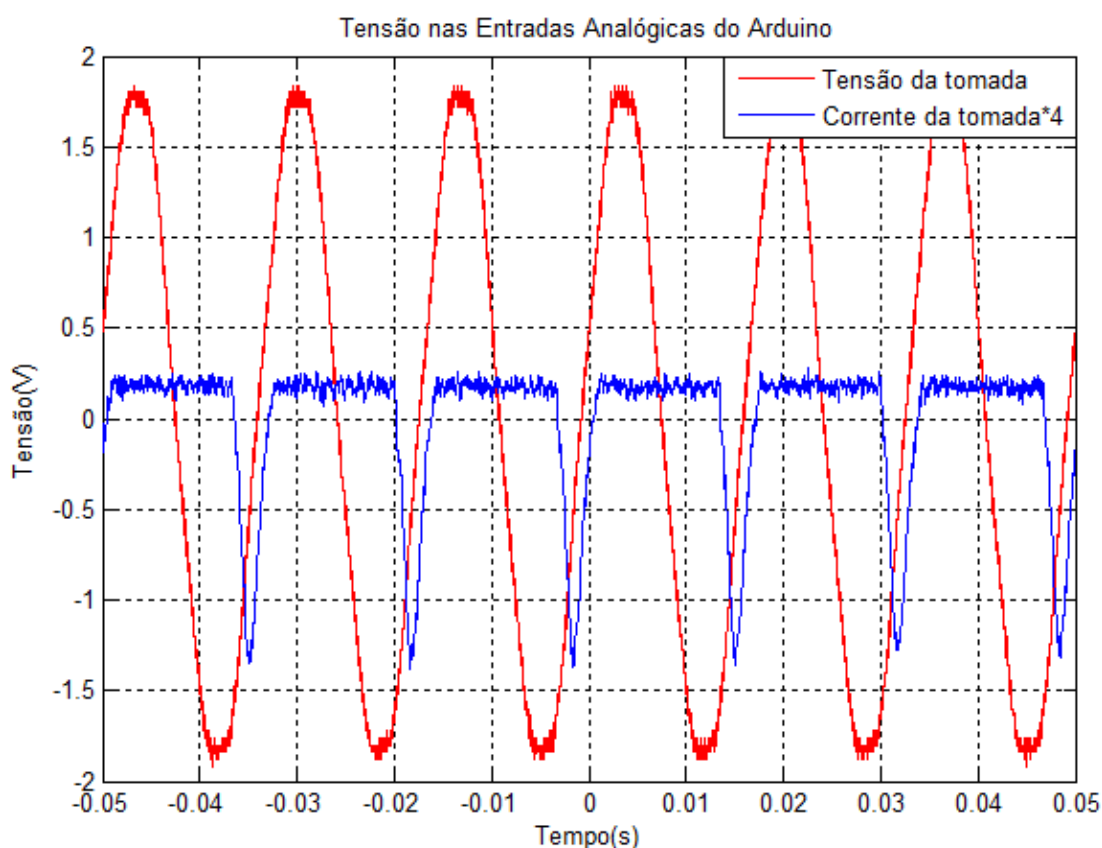


Gráfico 3 - Formas de onda de tensão e corrente - Furadeira - Caso 3



4.2 Análise da Comunicação via Rede Elétrica

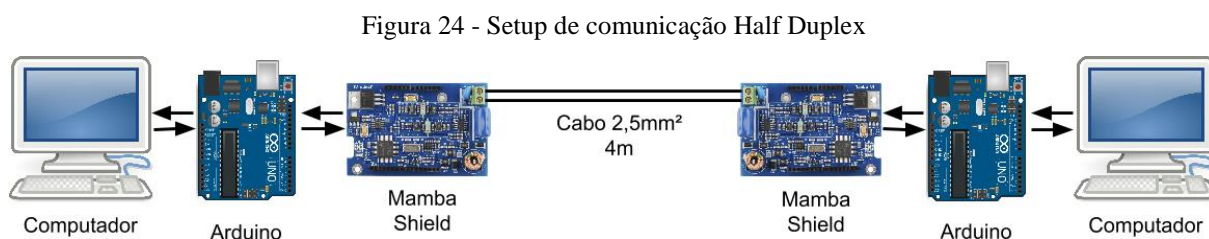
Depois dos testes dos parâmetros de potência, realizou-se uma avaliação do sistema de comunicação. Foram feitos diversos experimentos com objetivos diferentes, desde avaliar o funcionamento do *Mamba Shield* em um cabo de 4 metros até a avaliação de desempenho numa rede elétrica de testes com até 180 metros.

Por questões de segurança dos equipamentos envolvidos, os experimentos de comunicação realizados foram divididos em mais duas etapas. Em um primeiro momento todos os experimentos foram feitos com a linha desenergizada, para depois com a linha energizada.

Para os experimentos de comunicação entre os modems PLM-1 presentes nos *Mamba Shields* foi utilizado a biblioteca em C “plm1.h” para ATmega, o qual é fornecida pelo fabricante do circuito integrado de aplicação específica ASIC (*Application Specific Integrated Circuits*) Ariane Controls.

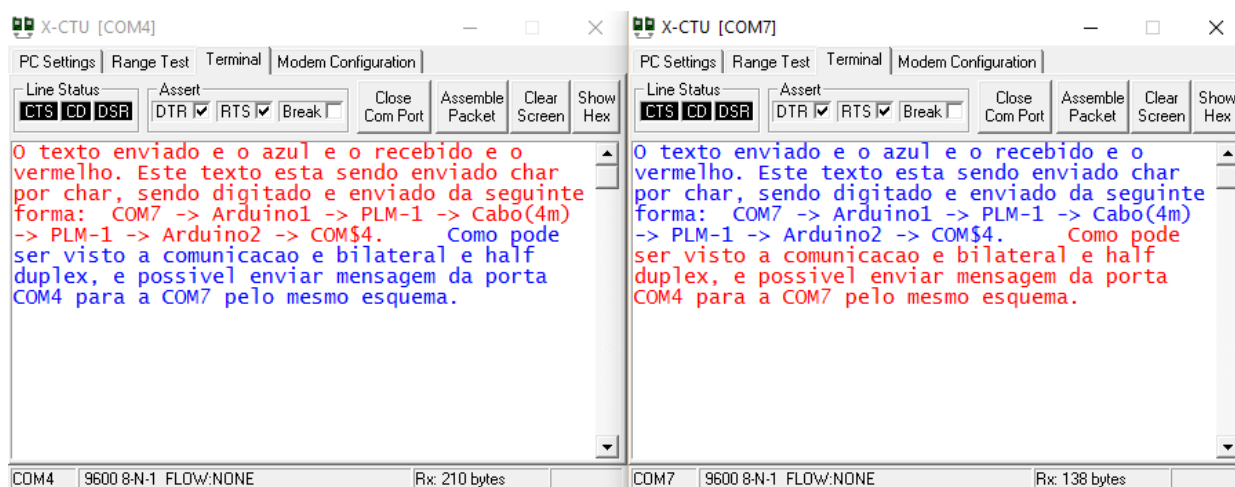
4.2.1 Comunicação *Half-Duplex*

Os primeiros experimentos na comunicação foram feitos com o *setup* mostrado na Figura 24. Para o desenvolvimento do código foi utilizado um cabo de cobre de 4 metros como canal de comunicação. O principal objetivo deste primeiro experimento foi analisar se realmente era possível transmitir dados pelo cabo utilizando o *Mamba Shield* e estudar como executar a comunicação de dados utilizando o PLM-1 e sua biblioteca. Não foi feito nenhum teste de velocidade de transmissão aqui, sendo que a única avaliação permite avaliar se os pacotes transmitidos (com carga útil de 1 byte) de um computador chegariam no outro, tanto de um lado quando do outro (*duplex*).



Os dois Arduinos com seus respectivos *shields* foram conectados em portas diferentes do computador. O programa utilizado para monitorar e enviar dados pelas portas seriais foi o X-CTU. Ao enviar dados com este programa, é possível simplesmente digitar no campo em branco, como mostrado na Figura 25, e o byte é transmitido pela porta previamente configurada.

Figura 25 - Comunicação Half-Duplex pelo X-CTU



4.2.2 Envio de um Arquivo de Texto

Utilizando o mesmo setup da Figura 24, foi desenvolvido um script em Matlab que auxilia na transmissão de um arquivo “.txt” pela porta serial escolhida, caractere por caractere até o final do arquivo. É possível controlar a velocidade de envio de cada caractere e, portanto, a sua taxa de transmissão. Na outra porta serial, com o modem que recebe os dados do texto, é possível monitorar a chegada dos caracteres, byte por byte, utilizando também o X-CTU. Com isto é possível fazer o controle da velocidade de transmissão e verificar quantos bytes estão chegando no receptor em relação ao número de bytes transmitidos

O arquivo de texto utilizado para este experimento é mostrado na Figura 26. Possui 999 caracteres e conseqüentemente 999 bytes. As mais diversas taxas de transmissão foram testadas assim como quantos deste total de bytes chegavam ao receptor com esta taxa.

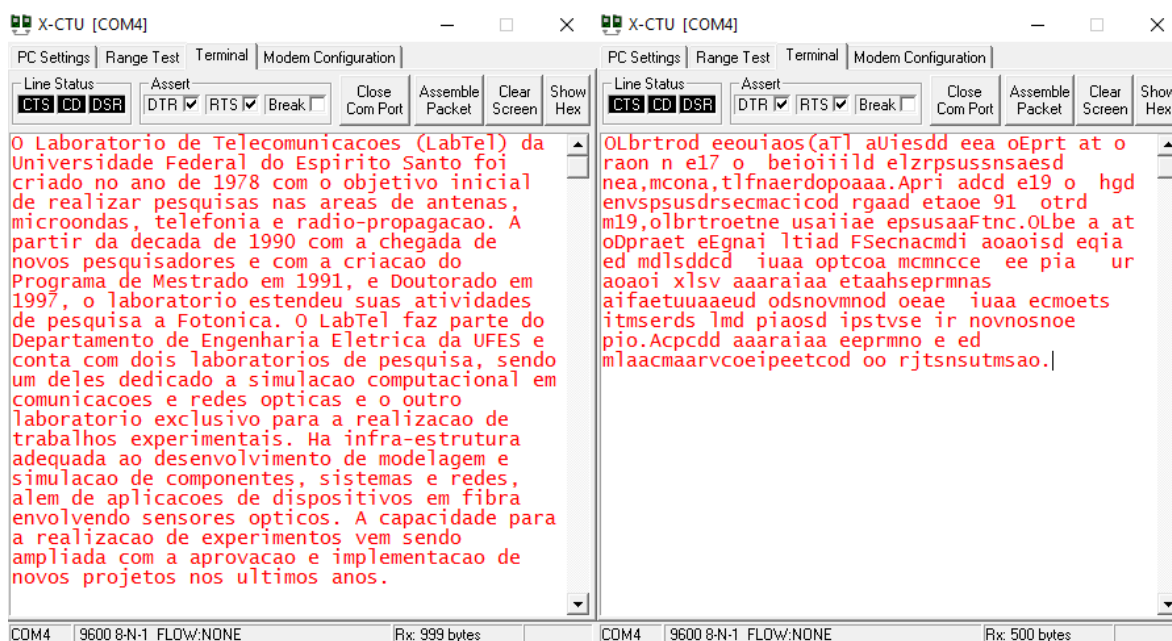
Para ficar visualmente claro, dois dos textos que chegaram ao receptor são mostrados na Figura 27. Nesta imagem pode-se ver o texto recebido em duas taxas, sendo a da esquerda com taxa transmissão 160 bps onde não houve nenhuma perda de dados, e à da direita com uma taxa de transmissão de 400 bps onde apenas 500 bytes dos 999 foram recebidos.

Figura 26 - Texto utilizado para testes de transmissão

. O Laboratorio de Telecomunicacoes (LabTel) da Universidade Federal do Espirito Santo foi criado no ano de 1978 com o objetivo inicial de realizar pesquisas nas areas de antenas, microondas, telefonia e radio-propagacao. A partir da decada de 1990 com a chegada de novos pesquisadores e com a criacao do Programa de Mestrado em 1991, e Doutorado em 1997, o laboratorio estendeu suas atividades de pesquisa a Fotonica. O LabTel faz parte do Departamento de Engenharia Eletrica da UFES e conta com dois laboratorios de pesquisa, sendo um deles dedicado a simulacao computacional em comunicacoes e redes opticas e o outro laboratorio exclusivo para a realizacao de trabalhos experimentais. Ha infraestrutura adequada ao desenvolvimento de modelagem e simulacao de componentes, sistemas e redes, alem de aplicacoes de dispositivos em fibra envolvendo sensores opticos. A capacidade para a realizacao de experimentos vem sendo ampliada com a aprovacao e implementacao de novos projetos nos ultimos anos.

Fonte: LABTELUFES,2016

Figura 27 - Texto recebido pelos testes de transmissão - 160bps (esquerda) - 400bps (direita)

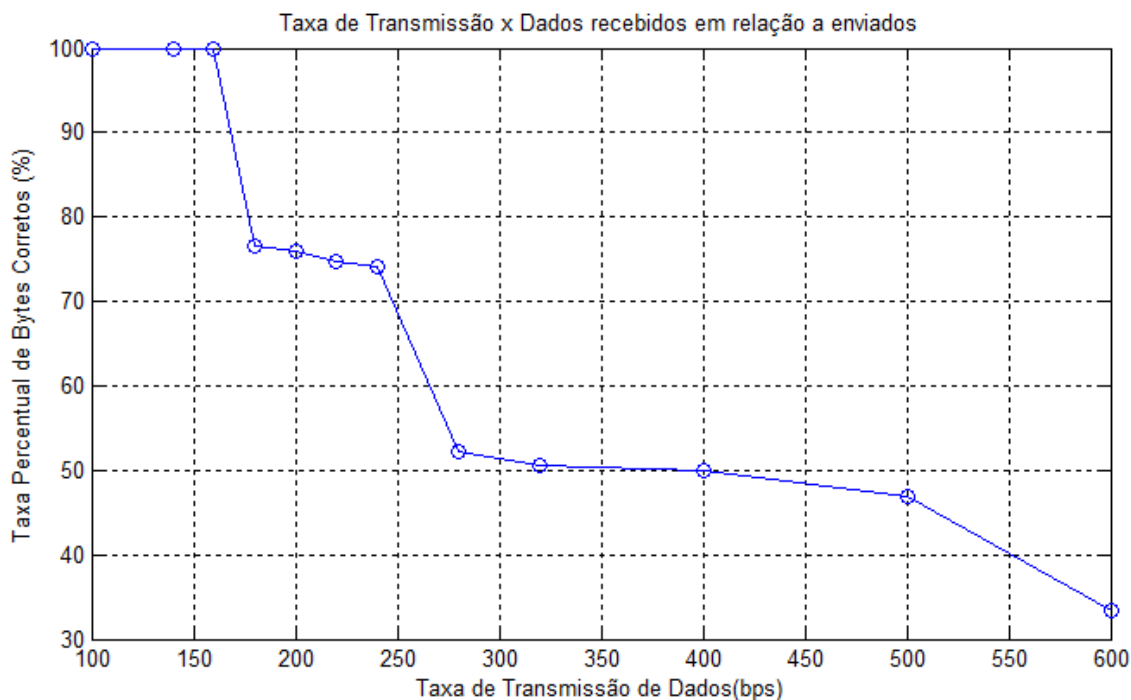


Pode-se ver na Tabela 5 as taxas testadas e quantos dos bytes enviados foram recebidos, além da porcentagem de bytes que alcançaram o destino final. Com os dados desta Tabela criou-se o Gráfico 4 que mostra a relação entre bytes enviados e recebidos por taxa de transmissão.

Tabela 5 - Relação de Taxa (bps) com bytes recebidos

Taxa (bps)	Bytes recebidos	Bytes Recebidos (%)
100	999	100,00%
140	999	100,00%
160	999	100,00%
180	765	76,58%
200	759	75,98%
220	747	74,77%
240	741	74,17%
280	521	52,15%
320	506	50,65%
400	500	50,05%
500	468	46,85%
600	333	33,33%

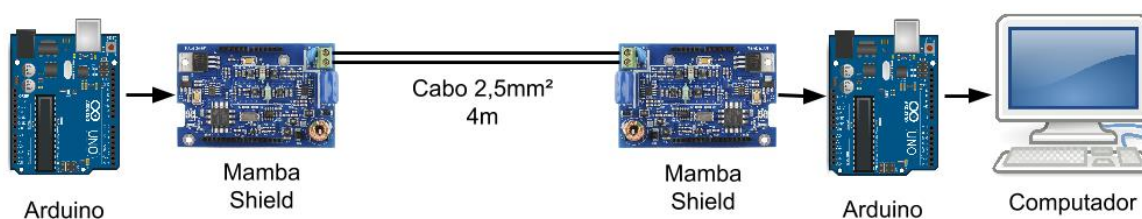
Gráfico 4 - Relação entre taxa (bps) com porcentagem de bytes recebidos em relação aos transmitidos



4.2.3 Avaliação do Tamanho do Pacote e da Taxa de Transmissão

Este experimento consistiu em programar o Arduino para enviar repetidamente uma sequência conhecida de números, de 0 a 1024 por exemplo. Como a sequência é conhecida, é possível comparar os números recebidos com os transmitidos e assim saber se houve perda de pacote. O objetivo deste experimento é variar não apenas a taxa de transmissão, mas também o tamanho dos pacotes enviados e analisar como isto impacta na velocidade de transmissão. É possível que ao enviar pacotes maiores do que um byte aumente-se a taxa de dados, até então limitada em 160 bps, para que não haja erros. O *setup* deste experimento é mostrado na Figura 28, em que tamanhos de pacotes iguais a 2, 8, 32 e 61 bytes foram testados.

Figura 28 – Setup do experimento de tamanhos de pacotes relacionados a taxa de bits



No experimento com pacotes de 2 bytes, o Arduino incrementa um contador de 0 até 1023, valor este baseado na resolução do conversor AD do Arduino, que possui 10 bits. Constata-se na Figura 29 o menor e o maior valor do pacote.

Figura 29 - Pacotes com 2 bytes - menor e maior valor

Byte 1								Byte 0							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Decimal: 0								Decimal: 0							
0															
....								...							
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Decimal: 3								Decimal: 255							
1023															

Enviando 2 bytes por pacote a taxa máxima conseguida sem que houvesse perdas de dados foi 290 bps. Quando aumentado para 320 bps, 1 pacote foi perdido a cada 24, resultando em uma taxa de pacotes errados PER (*packet error ratio*) de 4,17%. Aumentando a taxa de envio para 350 bps, metade dos pacotes foram perdidos, resultando numa PER de 50%.

No experimento enviando pacotes de 8 bytes, o Arduino incrementa um contador de 0 até 1023. O valor é replicado em pares de bytes, o que significa que é enviado o mesmo número 4 vezes em pares diferentes de bytes. É possível ver o formato dos pacotes de dados enviados na Figura 30, onde o menor e o maior valor estão representados.

Figura 30 - Pacotes com 8 bytes - menor e maior valor

Byte 7	Byte 6	Byte 5	Byte 4	Byte 3	Byte 2	Byte 1	Byte 0
00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
Dec.: 0	Dec.: 0	Dec.: 0	Dec.: 0	Dec.: 0	Dec.: 0	Dec.: 0	Dec.: 0
0		0		0		0	
...
00000011	11111111	00000011	11111111	00000011	11111111	00000011	11111111
Dec.: 3	Dec.: 255	Dec.: 3	Dec.: 255	Dec.: 3	Dec.: 255	Dec.: 3	Dec.: 255
1023		1023		1023		1023	

Enviando 8 bytes por pacote a taxa máxima conseguida foi de 850 bps, sendo que acima disto houve perdas. Com taxa de envio de 910 bps, 1 pacote a cada 4 era perdido, resultando numa PER de 25%. Aumentando-se a taxa para 980 bps, metade dos pacotes eram perdidos (PER 50%).

O próximo teste consiste em repetir o experimento, mas usando pacotes com 32 bytes, e assim determinar qual a taxa máxima de transmissão sem que haja perda de pacotes. Neste experimento o contador no Arduino varia de 0 até 255 e apenas os bytes pares são preenchidos com este número antes do pacote ser transmitido. O formato do pacote, assim como seu valor máximo e mínimo, são mostrados na Figura 31.

Figura 31 - Pacotes com 32 bytes - menor e maior valor

Byte 31	Byte 30	...	Byte 3	Byte 2	Byte 1	Byte 0
00000000	00000000	...	00000000	00000000	00000000	00000000
Dec.: 0	Dec.: 0	...	Dec.: 0	Dec.: 0	Dec.: 0	Dec.: 0
...
00000000	11111111	...	00000000	11111111	00000000	11111111
Dec.: 0	Dec.: 255	...	Dec.: 0	Dec.: 255	Dec.: 0	Dec.: 255

Enviado os pacotes a uma taxa de 1550 bps, todos os pacotes transmitidos foram recebidos corretamente. Ao aumentar a taxa para 1600 bps 1 em 5 pacotes era perdido resultando em uma PER de 20%. Ao aumentar a taxa de transmissão para 1700 bps, metade dos pacotes foram perdidos.

Por fim o mesmo procedimento foi repetido para pacote de 61 bytes, sendo o preenchimento deste pacote deu-se da mesma forma que o de 32 bytes e sua representação pode ser vista na Figura 32. A velocidade máxima sem perda de pacotes foi 1800 bps. A 1840 bps, 1 em cada 3 pacotes era perdido. Por fim com uma taxa de 1870 bps a PER foi de 50%.

Figura 32 - Pacotes com 61 bytes - menor e maior valor

Byte 60	Byte 59	...	Byte 3	Byte 2	Byte 1	Byte 0
00000000	00000000	...	00000000	00000000	00000000	00000000
Dec.: 0	Dec.: 0	...	Dec.: 0	Dec.: 0	Dec.: 0	Dec.: 0

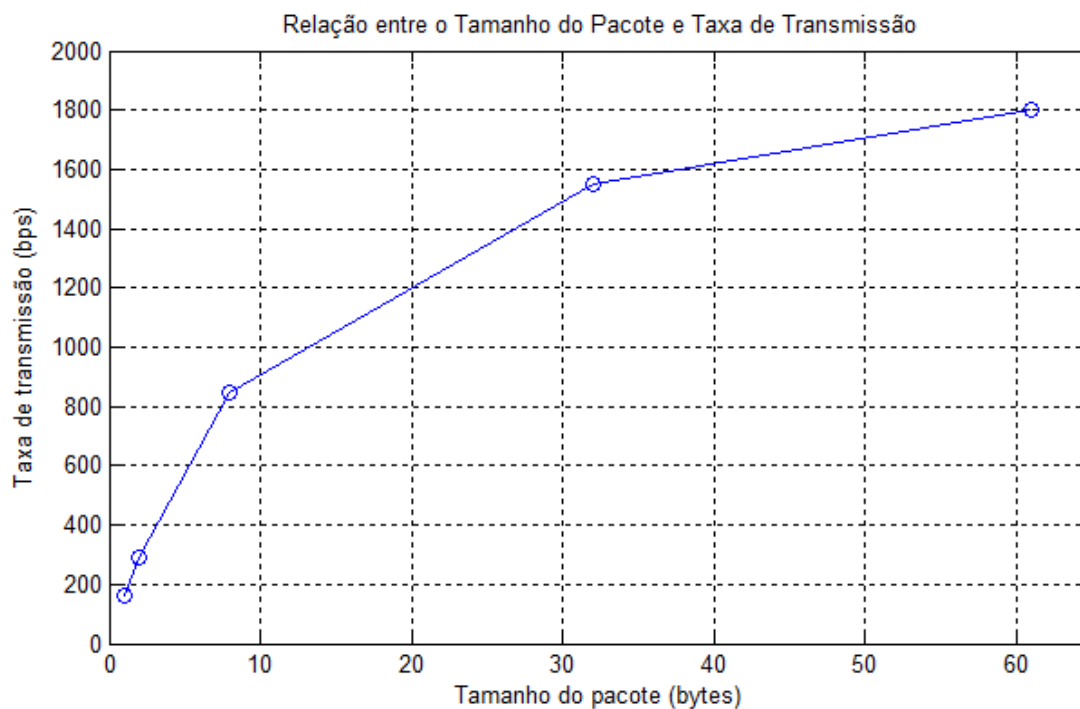
...
11111111	00000000	...	00000000	11111111	00000000	11111111
Dec.: 255	Dec.: 0	...	Dec.: 0	Dec.: 255	Dec.: 0	Dec.: 255

A Tabela 6 apresenta a relação entre todos os tamanhos de pacotes testados e suas respectivas taxas máximas de dados. Esta informação pode ser melhor visualizada no Gráfico 5.

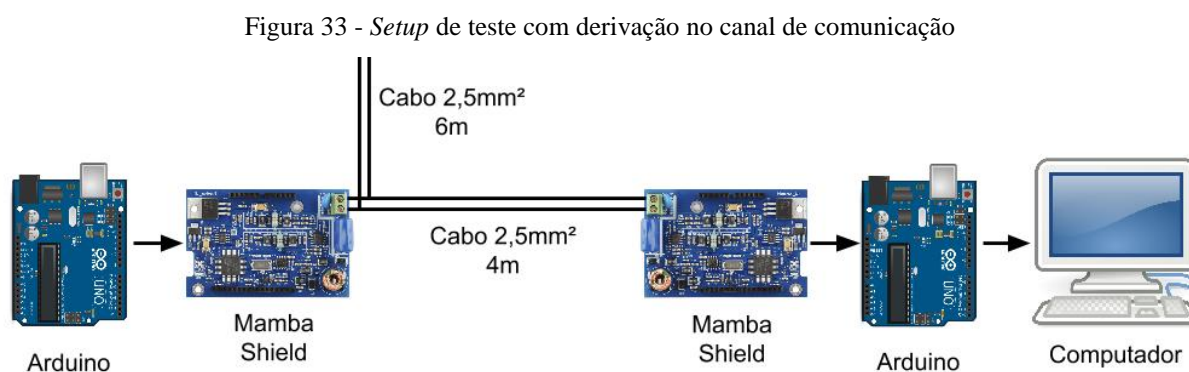
Tabela 6 - Tamanho do pacote e respectiva taxa de transmissão

Tamanho do pacote (Bytes)	Taxa de transmissão (bps)
1	160
2	290
8	850
32	1550
61	1800

Gráfico 5 - Tamanho do pacote e respectiva taxa de transmissão



Para avaliar se a adição de uma derivação no canal de comunicação impactaria nestas taxas de transmissão, uma derivação de 6 metros de condutor foi colocada inicialmente na saída do transmissor (como mostrado na Figura 33) e depois antes do receptor. Observa-se que em ambas as configurações não houve nenhuma alteração nas taxas em ambos os testes.



4.2.4 Simulação de Envio de Dados de Sensores

Depois de verificar o funcionamento, a taxa máxima de dados e a relação desta taxa com o tamanho dos pacotes, a atenção foi voltada para a aplicação da proposta do uso do modem, transmissão de dados de sensores. A ideia deste experimento foi simular a leitura de portas analógicas do Arduino e transmitir estes dados pelo cabo de 4 metros, além de definir o tamanho do pacote utilizado na configuração final. Os dados entregues pelos sensores ao Arduino nada mais são do que valores analógicos que são convertidos pelo conversor analógico-digital com resolução de 10 bits e depois processados. Portanto, nestes experimentos foram utilizados potenciômetros conectados às portas analógicas.

Prevendo que os dois sensores seriam conectados ao Arduino, um de corrente e outro de tensão, o *setup* foi montado conforme a Figura 34. Dois potenciômetros foram conectados nas portas analógicas do Arduino. Um *script* em Matlab foi feito para exibir um gráfico que mostrasse em tempo real as leituras da porta serial. O tamanho do pacote para este primeiro experimento foi 2 bytes para cada sensor, já que o conversor tem 10 bits e apenas 1 byte não cobriria todos os valores. Além disso a velocidade de transmissão é maior com o aumento do tamanho do pacote. A exibição do valor digital da leitura do sensor com valores entre 0 até 1023, foi exibida em um gráfico que varia em tempo real no Matlab, conforme mostrado no Gráfico 6.

Figura 34 – Simulação de sensor – 2 potenciômetros

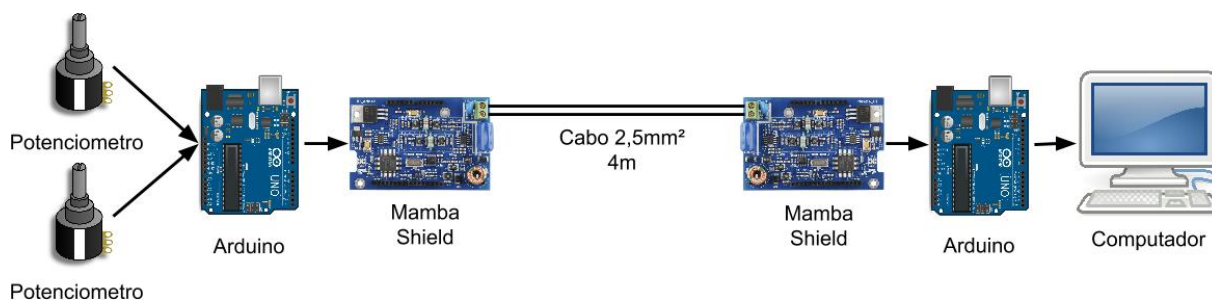
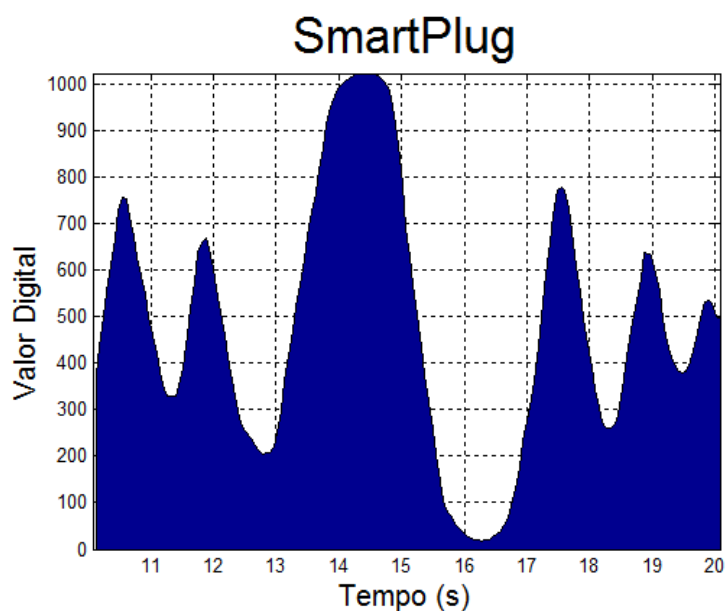


Gráfico 6 - Leitura do sensor em tempo real com o Matlab



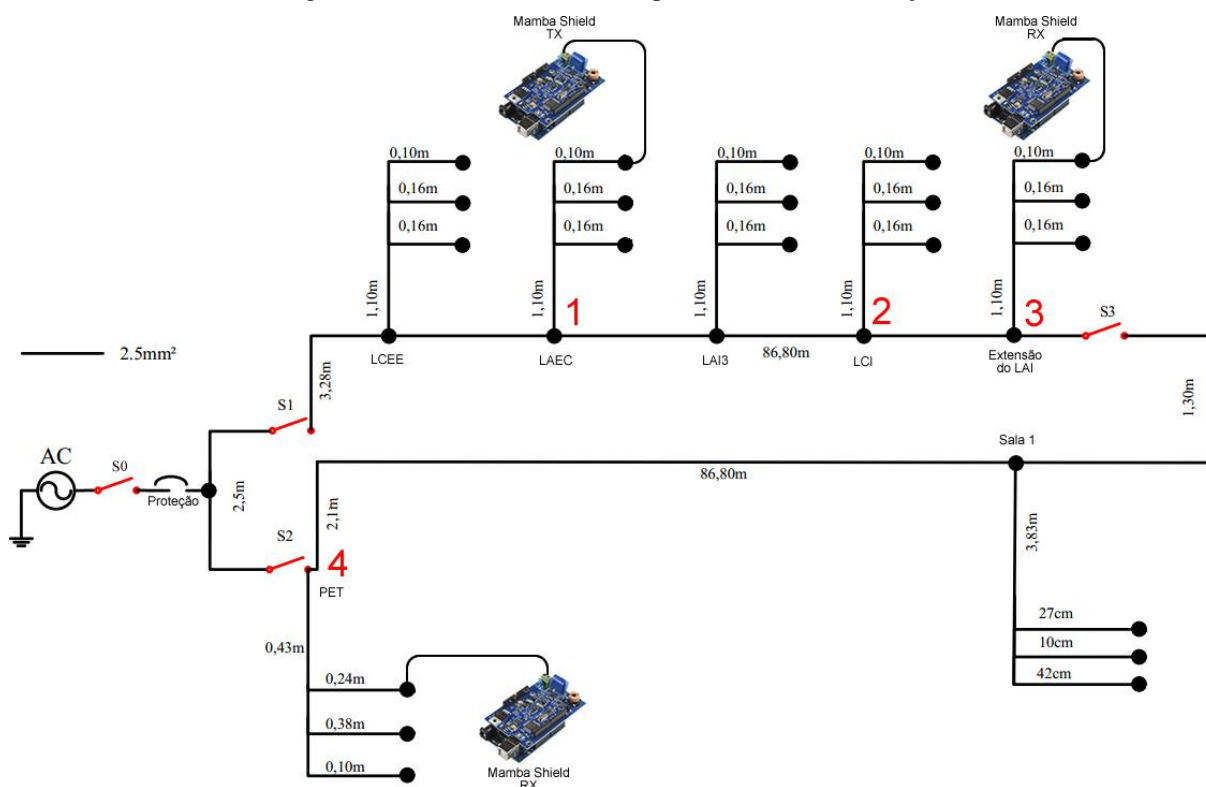
Em um segundo experimento, um potenciômetro fez com que uma variável chamada “corrente” variasse de 0 até 30, simulando o sensor de corrente. Outro fez com que a variável “tensão” variasse de 122 até 132, simulando a leitura de tensão da rede. O produto destas duas variáveis foi armazenado em uma outra chama “potenciaAparente”. As três variáveis foram colocadas em um pacote de 8 bytes e transmitidas pelo cabo. Conforme esperado os dados chegaram ao destino final com a taxa máxima e sem perdas de pacote.

4.2.5 Linha Real e Testes com Linha Energizada

Finalizada a etapa de desenvolvimento dos códigos de comunicação utilizando cabos de 4 metros, os testes de comunicações foram feitos em uma rede elétrica de baixa tensão que foi propositalmente construída no passado nas dependências do prédio Centro Tecnológico 2 (CT2) da Universidade Federal do Espírito Santo para testes de comunicação com tecnologia PLC. As topologias da linha usada para estes testes, assim como o aparato experimental utilizado são mostradas na Figura 35. Esta rede elétrica (SILVA, 2006)

O transmissor foi conectado na fase C do ponto 1 exibido na Figura 35. A chave S0 foi mantida aberta, desenergizando a rede. A chave S1 foi mantida aberta e as chaves S2 e S3 fechadas. Foram feitos testes de recepção dos pacotes nos pontos 2, 3 e 4. A distância entre os pontos 1 e 2 é de aproximadamente 24 metros. Entre os pontos 1 e 3 é de aproximadamente 46 metros. Por fim, a rede tem aproximadamente 139 metros entre os pontos 1 e 4. (SILVA, 2006). Em todos os pontos testados, todos os pacotes de 8 bytes foram recebidos com a mesma taxa máxima conseguida para pacotes com este tamanho no canal de 4 m, isto é, 850 bps.

Figura 35 - Rede elétrica utilizada para testes de comunicação



Fonte: CASTOR, 2015, modificado pelo autor

Além de conseguir receber e decodificar os pacotes corretamente sempre que conectado à fase C, o modem receptor também conseguia fazer o mesmo quando conectado as fases A e B, mesmo o transmissor sendo mantido na C. Isto ocorre devido ao acoplamento de sinais entre as fases e este fenômeno pôde ser observado em todos os pontos testados, inclusive no mais distante ponto 4. Ao se adicionar uma fonte chaveada (carregador de celular) no ponto 2, também não houve nenhum problema de comunicação com o receptor no ponto 4.

Após os testes com a linha desenergizada, a chave S0 foi fechada, energizando toda a rede, e todo o procedimento foi repetido. No ponto 2, o sinal chegou sem nenhuma perda de pacotes. O receptor, além de conseguir obter o sinal na fase C onde originalmente foi enviado o dado, fase C, também conseguia receber os pacotes nas fases A e B. Nos pontos 3 e 4 não conseguiu-se medir o sinal por acoplamento corretamente, pois muitos pacotes chegavam errados e eram descartados pelo modem. Ao conectar o modem receptor na fase C, ainda nos pontos 3 e 4, não houve problemas de comunicação, sendo que os pacotes de 8 bytes chegavam na taxa esperada.

4.3 A Interface com o Usuário e o Supervisório

Um ponto importante a ser considerado no desenvolvimento de um protótipo desta tomada inteligente é o acabamento e a interface final do possível produto para o consumidor. A interface deve ser simples e trazer as informações necessárias, sendo atualizadas periodicamente e armazenadas num banco de dados para consultas posteriores. A princípio pensou-se em fazer a interface inteiramente em Matlab, como foi feito em 4.2.4, mas a ideia foi descartada após analisar-se que sistemas de supervisório já vêm sendo utilizados há bastante tempo na indústria e em outros setores, para sistemas de Telemetria e outras diversas finalidades, sendo explorados e existindo soluções software livre (*open source*).

Um sistema de supervisório permite que variáveis e informações de um processo produtivo ou instalação física sejam monitorados. Estes sistemas também são conhecidos como Controle Supervisório e Aquisição de Dados SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*). O objetivo principal dos sistemas SCADA é propiciar uma interface de alto nível para o operador do processo, informando-o em tempo real de todos os eventos de importância da planta (PINHEIRO, 2016).

O sistema supervisório deve possuir algumas funcionalidades básicas, como aquisição e visualização de dados, relatórios e processamentos de alarmes. Estes alarmes podem ser classificados por níveis de prioridade em função da sua gravidade e estão relacionados a questões de segurança (PINHEIRO, 2016).

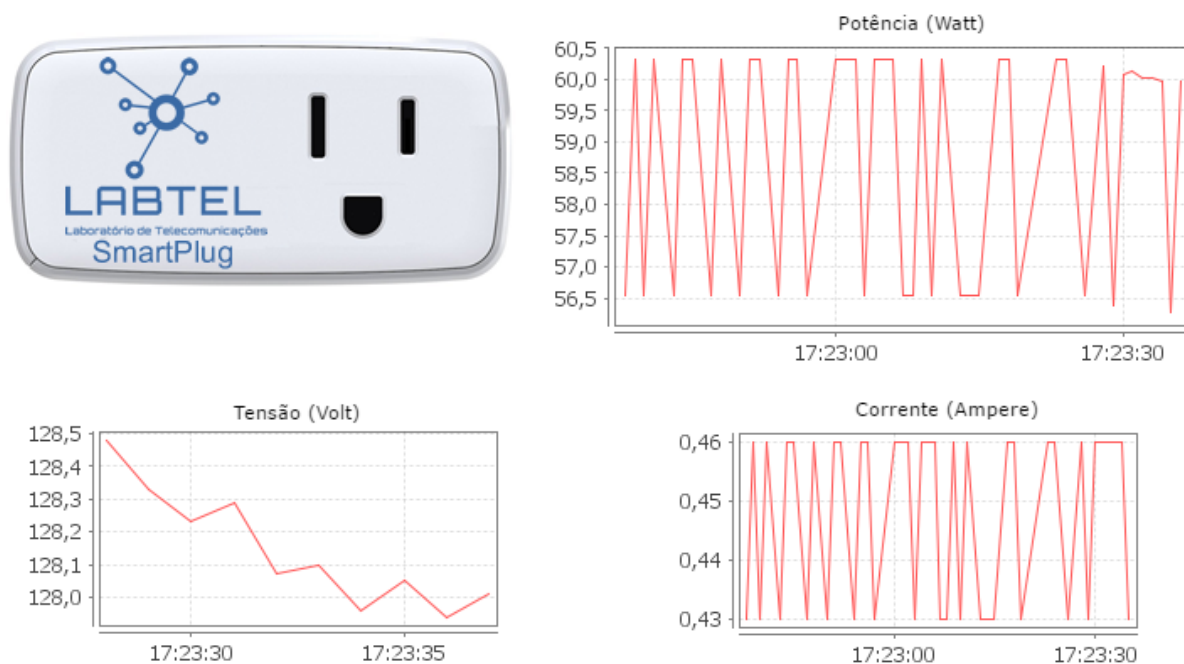
A interface do sistema supervisório desenvolvida para a tomada inteligente foi feita utilizando o ScadaBR. Este é um sistema supervisório completo, disponibilizado em licença *open source* e com vários casos de uso nas áreas de automação de processos industriais, redes de distribuição de água e energia, automação predial e residencial e aplicações de sensoriamento diversas. Sua interface é de fácil utilização e já possui ferramentas de visualização de gráficos, variáveis, configurações, alertas, protocolos, estatísticas, entre outros (SCADABR, 2016).

A forma de acesso ao supervisório funciona através de um sistema *web server* que visa disponibilizar os dados do processo através da rede. Com isto, os clientes em vez de acessarem os dados através de um *software* instalado no computador ou smartphone, podem acessar via *browser* de internet. O banco de dados utilizado é o *Apache Derby*, também *open source*, porém *mySQL* também pode ser utilizado (SCADABR, 2016).

No desenvolvimento da interface da tomada inteligente com o ScadaBR, utilizou-se o setup mostrado na Figura 34, onde os dados recebidos são corrente, tensão e potência aparente. Configurou-se a fonte de dados (*data-source*) como uma porta USB do computador, que por sua vez está conectada ao Arduino com o modem que recebe os dados. Para que o *data-source* do ScadaBR funcione corretamente é necessário enviar os dados das variáveis utilizando o protocolo Modbus na comunicação entre o Arduino e o computador que será o servidor. O *data-source* enviar requisições de leitura a cada 500 ms e todas as leituras adquiridas são armazenadas em *data-points*.

Pode-se monitorar dados de duas maneiras, sendo que uma delas consiste em fazer uso da *watch list*, uma lista dinâmica das variáveis e suas respectivas leituras. Nesta interface há também um botão que leva ao histórico de valores armazenados no banco de dados e uma representação gráfica destes. Outra maneira consiste em criar uma representação gráfica desses pontos, com gráficos, imagem de fundo, botões e outras funcionalidades. A representação gráfica desenvolvida para monitorar as variáveis simuladas está na Figura 36.

Figura 36 - ScadaBR - Representação Gráfica



Como foi dito, é necessário utilizar o protocolo Modbus no Arduino que se comunica com o ScadaBR. Este é protocolo da camada de aplicação do modelo OSI, projetado para transportar mensagens e fornece comunicação cliente/servidor onde os dispositivos podem estar conectados a diferentes tipos de rede e barramentos. É um protocolo padrão na indústria desde 1979, muito bem aceito por ter sido desenvolvido com o foco em aplicações industriais, *open-source*, fácil de implantar e manter e permite transmitir dados pela rede sem restrição de fornecedor ou fabricante (MODBUS, 2016).

O Modbus é um protocolo de requisição/resposta de mestre/escravo que oferece serviços e funcionalidades especificadas por um *function code*. Neste trabalho utiliza-se o modo de transmissão serial com portas USB e principalmente a função “Ler registrador de *holding*” código 3. O servidor rodando o ScadaBR é o mestre enquanto o Arduino que recebe os dados pela rede elétrica e transmite para o computador é o escravo (MODBUS, 2016).

4.4 Integração dos Subsistemas

Depois da escolha do *hardware* e desenvolvimento do *software* para medição dos parâmetros de potência, estudar o *Mamba Shield*, o PLM-1, desenvolver os códigos para comunicação, estudar as taxas máximas e desenvolver a interface de usuário no supervisor, chega o momento de unir todos estes “subsistemas”.

Em um Arduino são conectados os sensores de tensão e corrente sendo que, as bibliotecas de comunicação via rede elétrica e de cálculo dos parâmetros de potência foram utilizadas em conjunto. Note-se que apenas os parâmetros tensão RMS, corrente RMS e potência ativa, são enviados no pacote com o objetivo de diminuir o fluxo de dados desnecessários.

Um parâmetro importante a se definir nesta etapa final, é o tamanho do pacote utilizado para transmitir estes dados, já que este está diretamente relacionado com a velocidade máxima de transmissão sem que haja perda de pacotes. Como foi dito em 4.1, leva-se aproximadamente 170 ms para obter amostras e calcular os valores dos parâmetros de potência. Isto significa que só há dados para serem transmitidos a uma taxa máxima de 380 bps com pacotes de 8 bytes e a velocidade máxima de transmissão com pacotes deste tamanho é de 850 bps. Portanto, a capacidade de transmitir dados é maior do que o número de dados que há para se transmitir.

O pacote enviado tem 8 bytes, sendo os dois primeiros reservados para corrente RMS, os dois seguintes reservados para tensão RMS e os quatro últimos reservados para potência ativa. Porém, nem todos estes bits precisam ser utilizados e alguns foram reservados para aplicações futuras, tais como endereçamento dos pacotes. Uma imagem do pacote e de quais bits são reservados podem ser vistos na Figura 37. Todos os *nibbles* reservados foram preenchidos por 1 e 0 alternadamente, totalizando 16 bits reservados.

Figura 37 - Pacote com dados a serem enviados

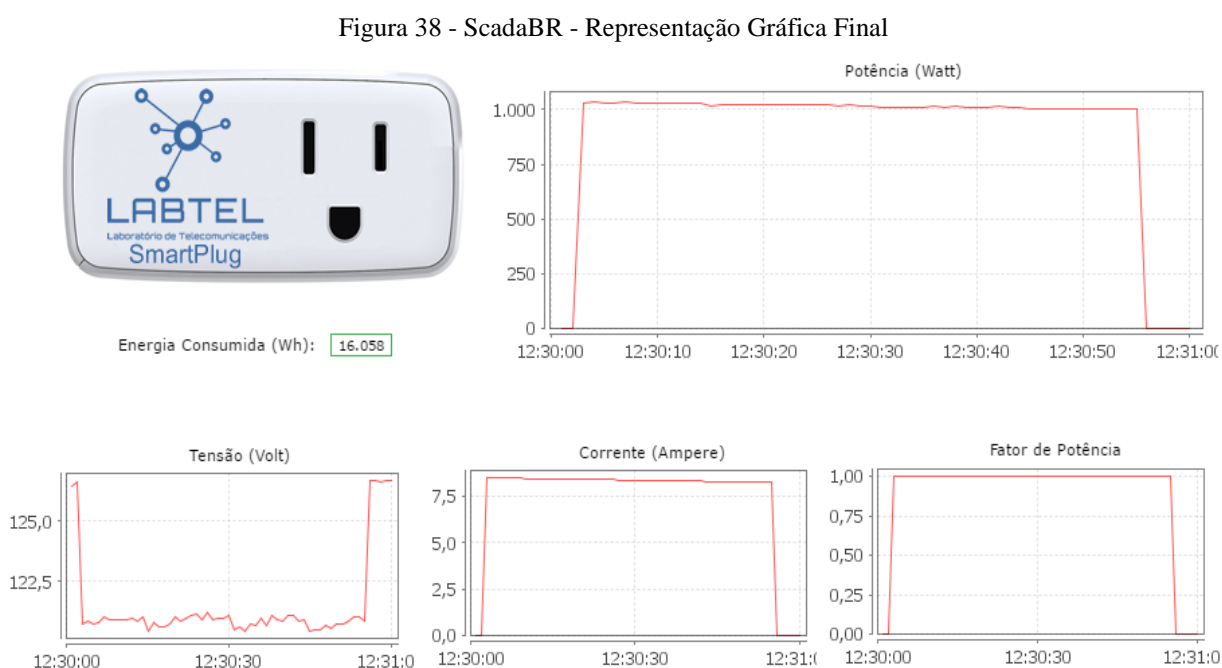
Byte 7	Byte 6	Byte 5	Byte 4	Byte 3	Byte 2	Byte 1	Byte 0
10101010	1010 0000	00000000	00000000	1010 0000	00000000	00000000	00000000
Reservado		Potência Ativa		Res.	Corrente RMS	Tensão RMS	

O Arduino que recebe os dados foi conectado ao computador com o ScadaBR. Neste são utilizadas a biblioteca de comunicação via rede elétrica e a de comunicação Modbus serial. Ele

é responsável por receber o pacote e “desmembrar” a informação em variáveis, além de calcular as informações restantes com as recebidas. Estes valores calculados e recebidos são atribuídos a registradores que são enviados ao computador quando solicitados, já que este Arduino é o escravo e o computador é o mestre.

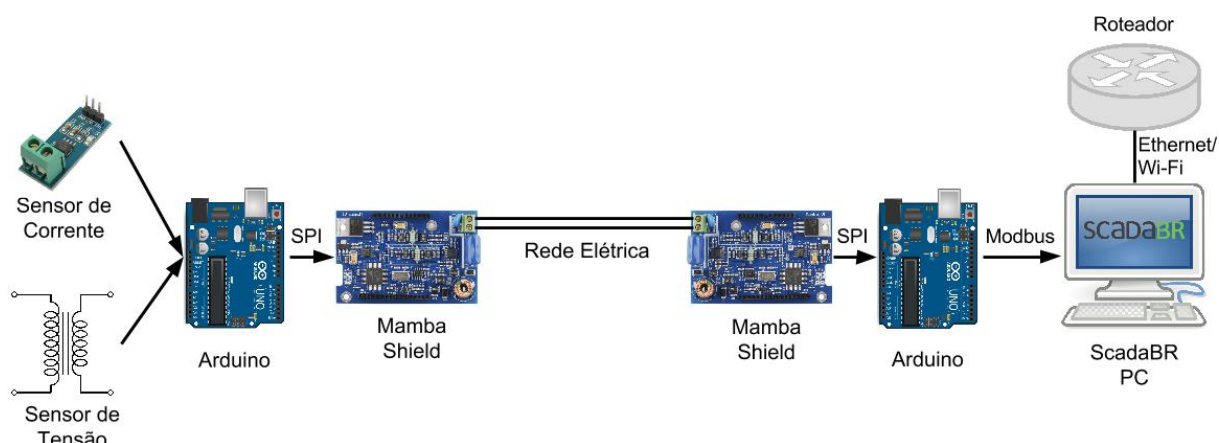
O computador, por sua vez, solicita os valores a cada 500 ms, e os armazena no banco de dados. As informações solicitadas e armazenadas são: tensão RMS, corrente RMS, fator de potência, potência ativa e potência aparente. Na representação gráfica feita para o usuário final são exibidos apenas a tensão, a corrente, o fator de potência e a potência ativa. Só é exibido o gráfico de potência ativa pelo fato de esta ser a única tarifada em contratos residenciais. Outro gráfico com potência aparente pode ser adicionado, se preciso.

A Figura 38 mostra a representação gráfica final para o usuário, para o uso de um ferro de passar roupas de 1200 W.



A Figura 39 apresenta o esquemático final de todas as partes integradas. Observa-se que o computador com o Scada rodando está conectado ao roteador, deixando a interface com usuário disponível para toda a rede interna através de acesso por navegador.

Figura 39 - Esquemático Final da Tomada Inteligente



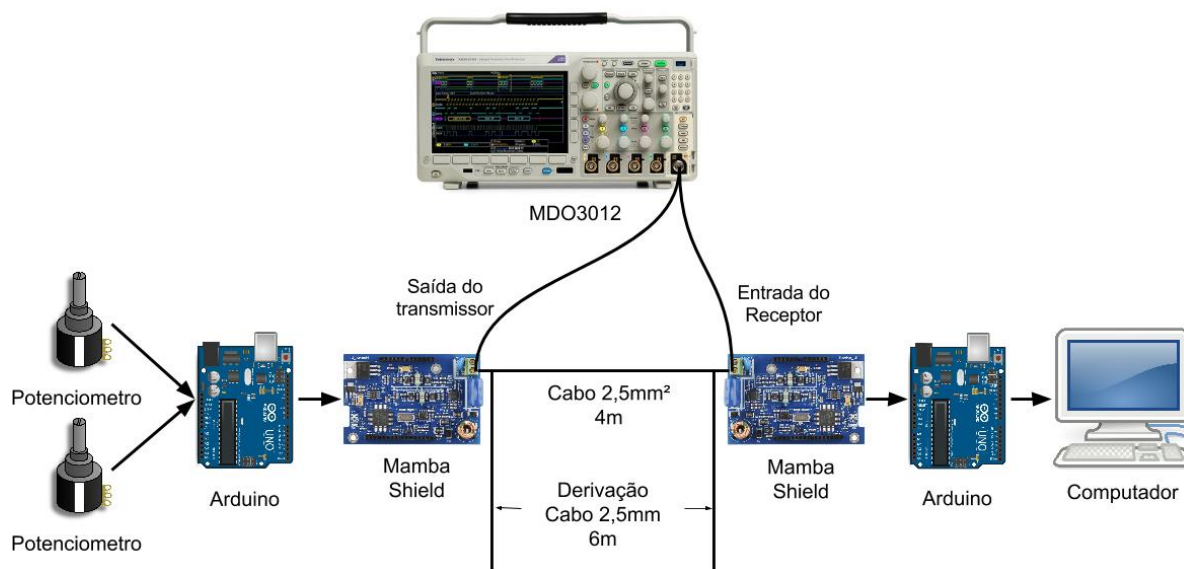
4.5 Análise Espectral da Comunicação NBPLC

O objetivo destes experimentos é analisar os espectros de frequência dos sinais transmitidos e compará-los com os recebidos, em diversos pontos das redes experimentadas.

4.5.1 Análise Espectral com o Cabo de Testes e Desenvolvimento (4m)

O *setup* montado para os experimentos no cabo de 4 metros é mostrado na Figura 40. Para tal, a função “analisador de espectro” do osciloscópio MDO3012 da Tektronix foi utilizada para fazer as medições necessárias. A Figura 40 é uma representação genérica do *setup*, o que significa que não havia necessariamente uma derivação na “entrada do receptor” e nem outra na “saída do transmissor” durante as medições. Estas poderiam ou não estar ligadas se este fosse o objetivo. Primeiro foram feitas medições sem nenhuma derivação e depois com derivação ou na entrada ou na saída. O cabo do analisador de rede também não está conectado simultaneamente na ‘saída do transmissor’ e na ‘entrada do receptor’, só que ligado apenas onde se estava realizando a medição.

Figura 40 - Setup para medição do espectro de frequência com MDO3012



Note-se que, invés de montar todo o sistema da tomada inteligente com sensor de corrente e tensão, foi utilizado apenas os potenciômetros simulando estes valores. O uso do potenciômetro no lugar de sensores não faz diferença para este experimento de comunicação, já que o pacote transmitido tem o mesmo tamanho e o mesmo formato em ambos.

Antes de analisar os espectros do sinal é importante lembrar onde é esperado que haja o sinal. Como já foi apresentado em 3.2.1, as frequências esperadas são $f_{L1} = 142,33\text{kHz}$, $f_{L0} = 145,3\text{kHz}$, $f_{ref} = 166,05\text{kHz}$, $f_{H1} = 186,81\text{kHz}$, $f_{H0} = 189,78\text{kHz}$. Sabendo das frequências de comunicação $f_0 = f_{L0}$ e $f_1 = f_{L0}$, logo, as outras três frequências são atenuadas pelo filtro do transmissor. A frequência central nada mais é do que uma média entre as de comunicação, portanto $f_c = 143,81\text{kHz}$.

O espectro de frequências na faixa de 80 kHz até 1 MHz, na saída do transmissor e quando nenhuma derivação é adicionada, pode ser visto no Gráfico 7. A marcação vertical é a frequência central de comunicação. Note-se que é possível observar os harmônicos do sinal atenuado em outras frequências. No Gráfico 8, é possível observar o sinal na entrada do receptor do *Mamba Shield* juntamente com o sinal na saída do transmissor.

Gráfico 7 - Saída do transmissor – 80 kHz até 1 MHz

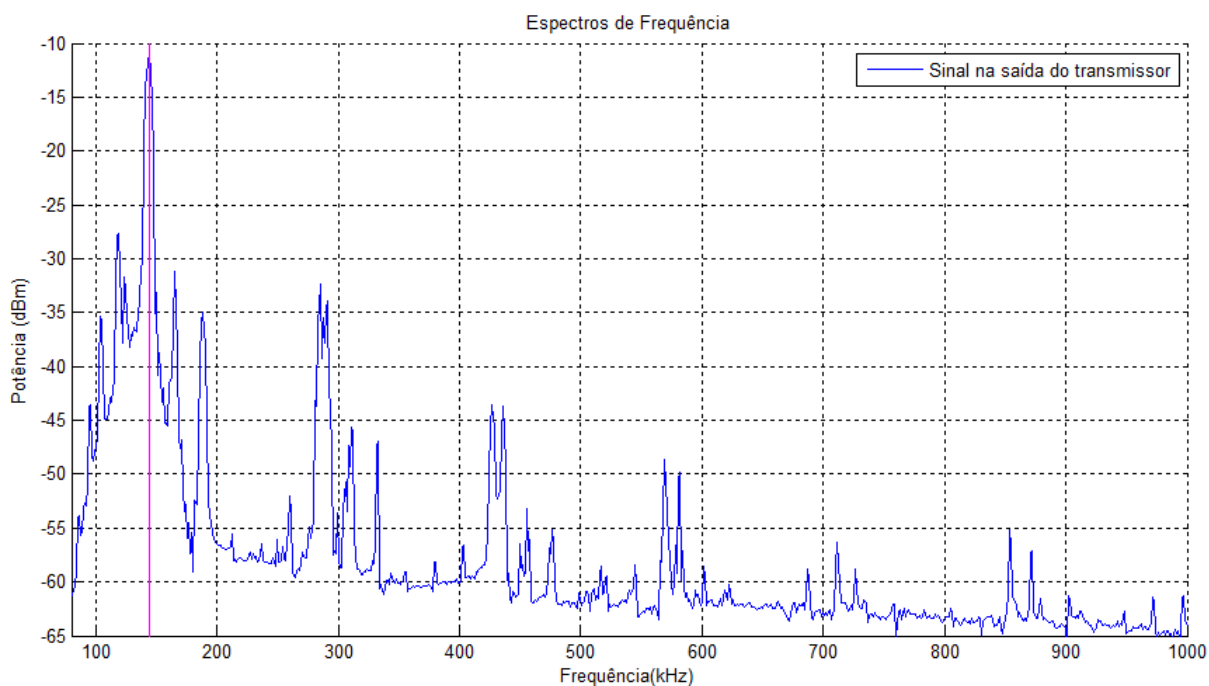
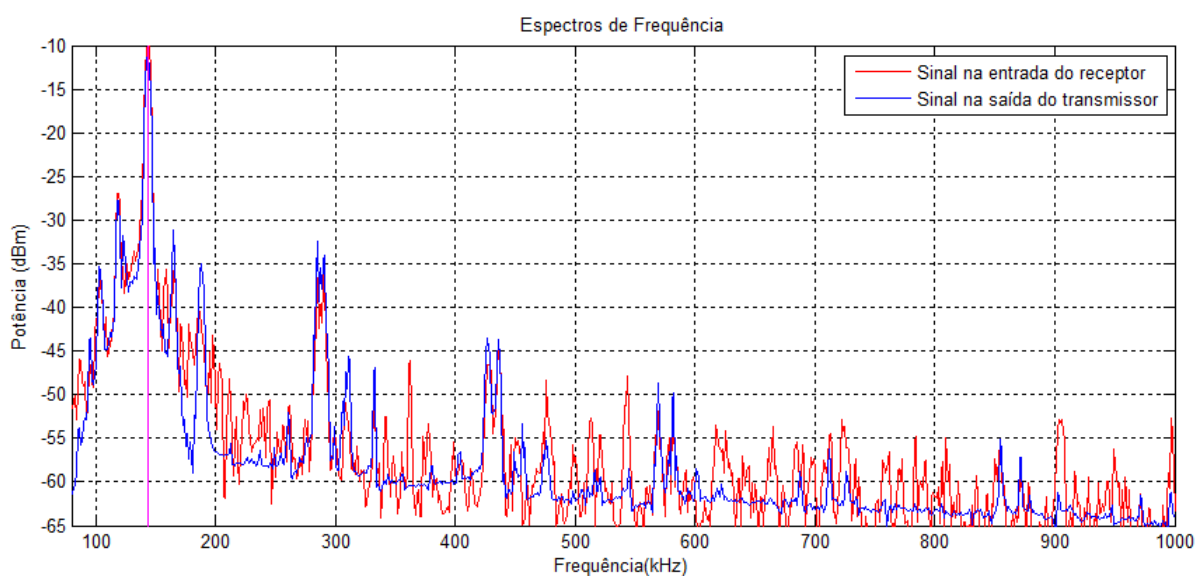


Gráfico 8 - Saída do transmissor e Entrada do receptor- 80 kHz até 1 MHz



Ampliando-se a região de interesse e arredores, observa-se com mais clareza as frequências entre 80 e 210kHz conforme ilustra o Gráfico 9. É possível observar nas marcações verticais a frequência central, assim como a frequência de referência, o par de frequências que representam o bit 1 e o par de frequência que representa o bit 0. Conforme esperado, as outras frequências que não são as de interesse foram atenuadas pelo filtro passa faixa do *Mamba Shield*.

Gráfico 9 - Saída do transmissor e Entrada do receptor- 80kHz até 210kHz

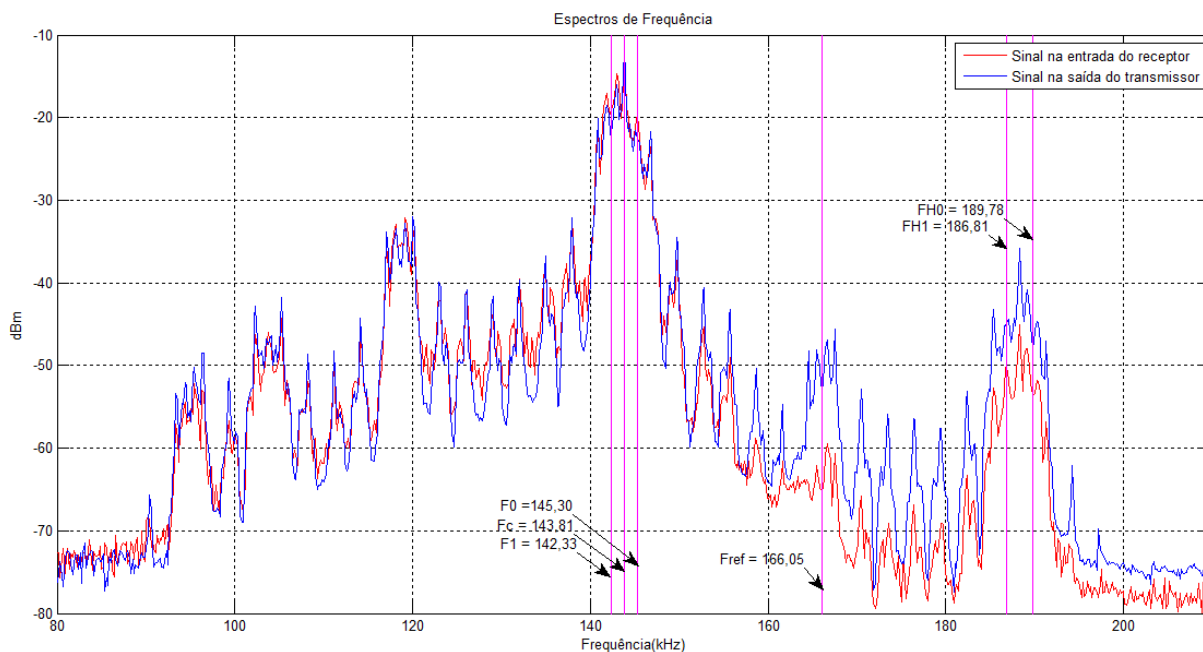
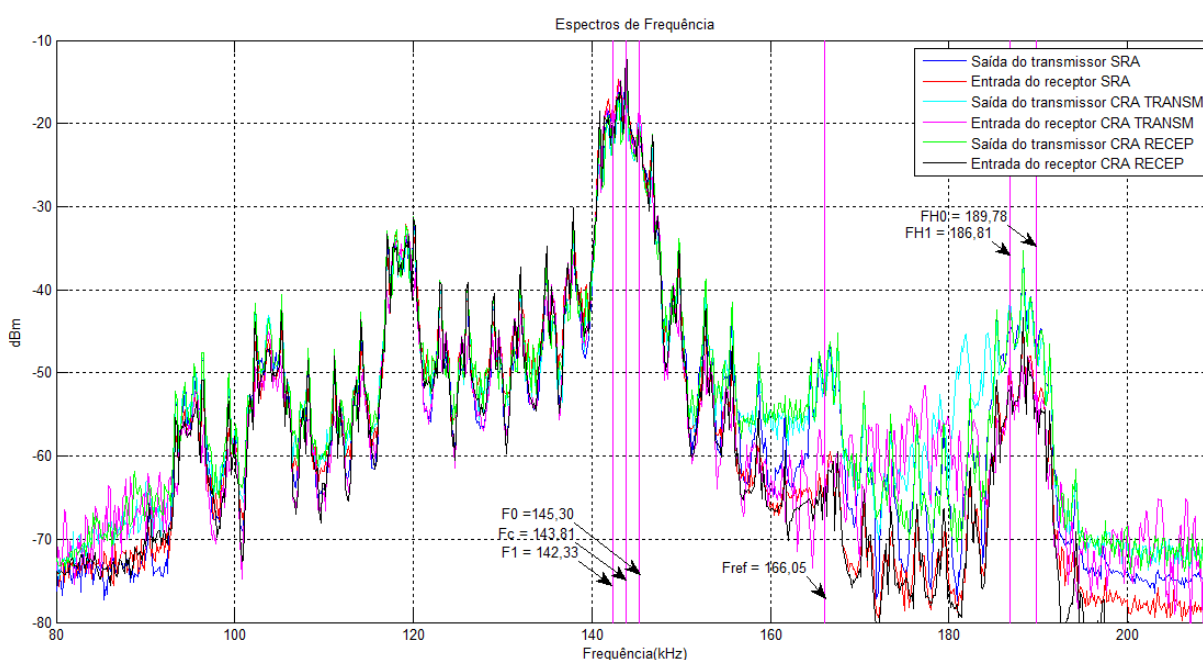


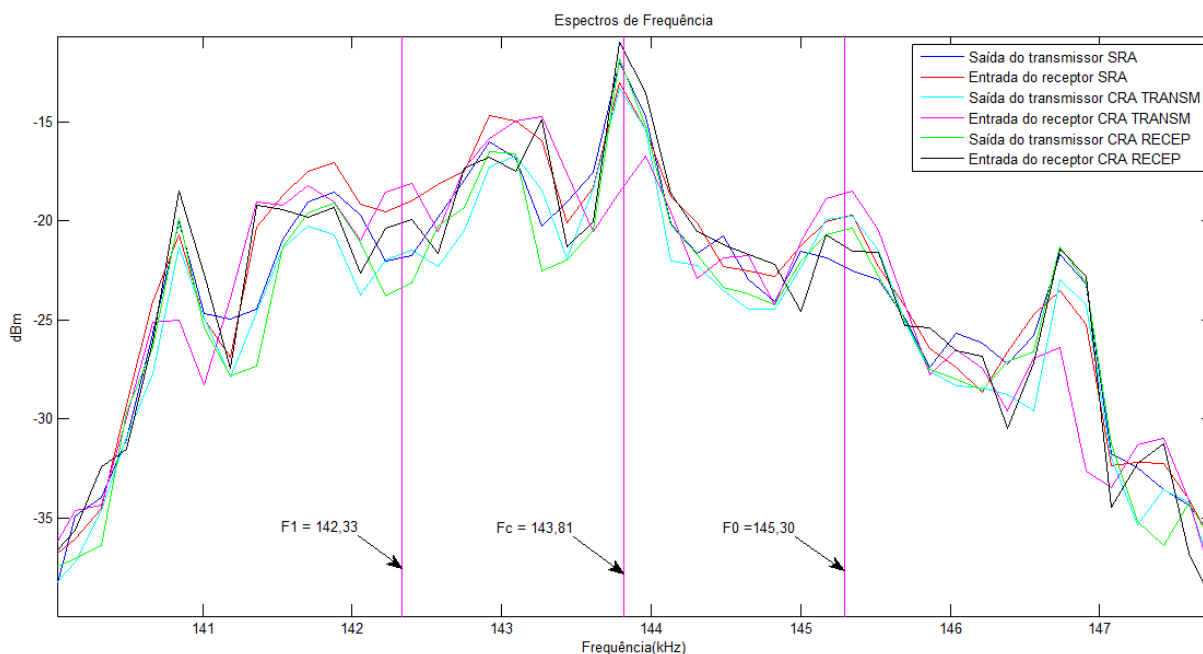
Gráfico 10 - Saída do transmissor e Entrada do receptor – Com e sem derivação



Adicionando então uma derivação de 6 metros na saída do transmissor, foi coletado o espectro de frequência na saída do transmissor e na entrada do receptor. Depois disto a derivação foi mudada para a entrada do receptor e novamente coletado o espectro de frequência na saída do transmissor e na entrada do receptor. Os resultados obtidos podem ser mostrados no Gráfico

10, onde as siglas SRA, CRA TRANSM e CRA RECEP significam, respectivamente, “sem derivação”, “com derivação no transmissor” e “com derivação no receptor”. Ampliando-se apenas na região de interesse, frequência central de comunicação e frequências que representam os bits 0 e 1, são mostrados o espectro ilustrado no Gráfico 11.

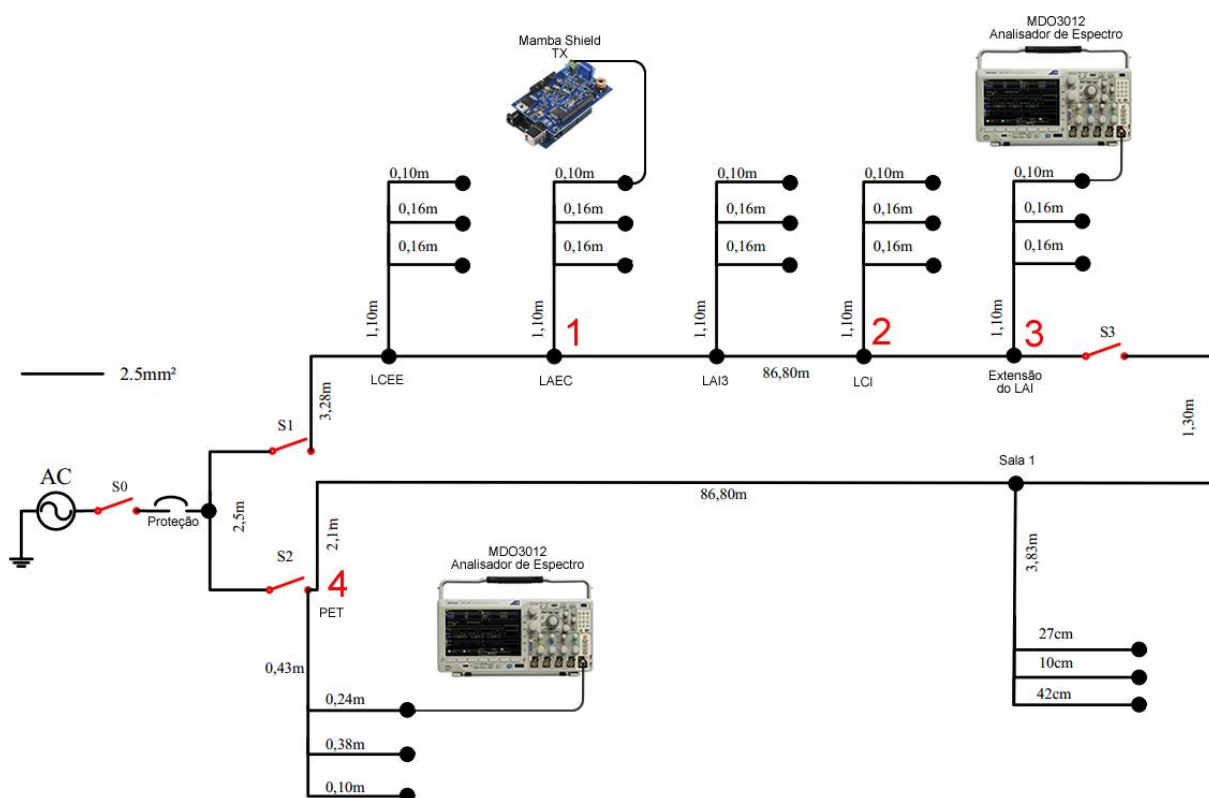
Gráfico 11 - Saída do transmissor e Entrada do receptor – Com e sem ramificação (derivação) - Zoom da região de interesse



4.5.2 Análise Espectral da Rede de 180m Desenergizada

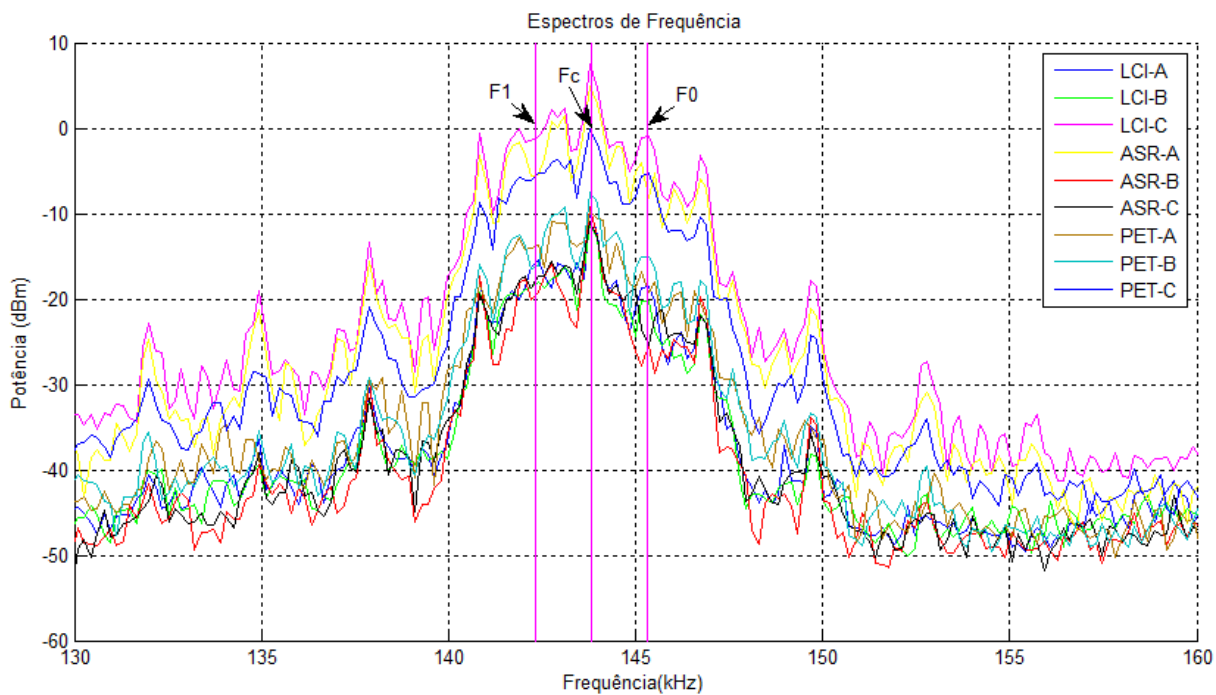
O aparato experimental usado neste experimento é mostrado na Figura 41 onde o transmissor é conectado no ponto 1 e fase C, injetando os pacotes de 8 bytes da tomada inteligente, a chave S0 é mantida aberta para que a linha fique desenergizada, a chave S1 é mantida aberta e S2 e S3 fechadas. A diferença entre este e o de 4.2.5 é que, em vez de se conectar o modem receptor nas fases A, B e C dos pontos 2, 3 e 4, o MDO3012 como analisador de espectro foi conectado. Os espectros obtidos em todos os pontos e todas as fases podem ser vistos no Gráfico 12. Note-se que existem diferenças de atenuação até maiores que 15 dB entre sinais em fases acopladas e os sinais nas fases onde foram injetados. Porém em todas as medidas foi possível encontrar a frequência de operação do sistema.

Figura 41 – Setup para obtenção dos espectros de frequências nas fases A, B e C em alguns pontos da rede



Fonte: CASTOR, 2015, modificado pelo autor

Gráfico 12 – Espectros de frequências obtidos nos pontos 2, 3 e 4 nas fases A, B e C da figura 46 para linha desenergizada

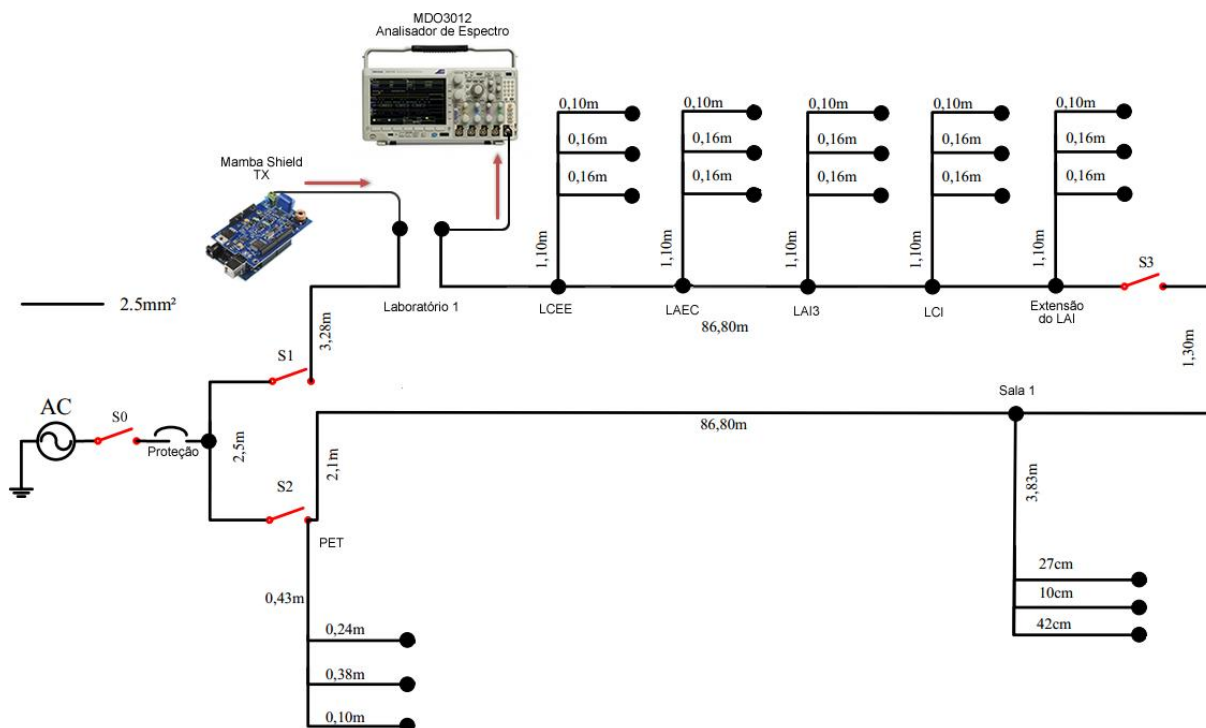


Um outro experimento com um *setup* similar ao realizado para levantar a resposta de frequência do canal como feito no Apêndice A foi realizado com o modem conectado e injetando na rede os pacotes de comunicação da tomada inteligente na fase C. A chave S0 foi mantida aberta e as chaves S1, S2 e S3 fechadas. O *setup* pode ser visto na Note-se no Gráfico 13 que ao percorrer toda a rede e suas derivações, o sinal é atenuado em aproximadamente 10 dB. Porém conforme ilustram as linhas verticais destacadas no gráfico, foi possível medir as frequências de operação do sistema.

Figura 42 e o Gráfico 13 apresenta o os espectros de frequência do sinal injetado no canal de comunicação e do sinal recebido após percorrer os 180 metros com derivações, assim como as marcações das frequências de comunicação utilizadas pelo modem.

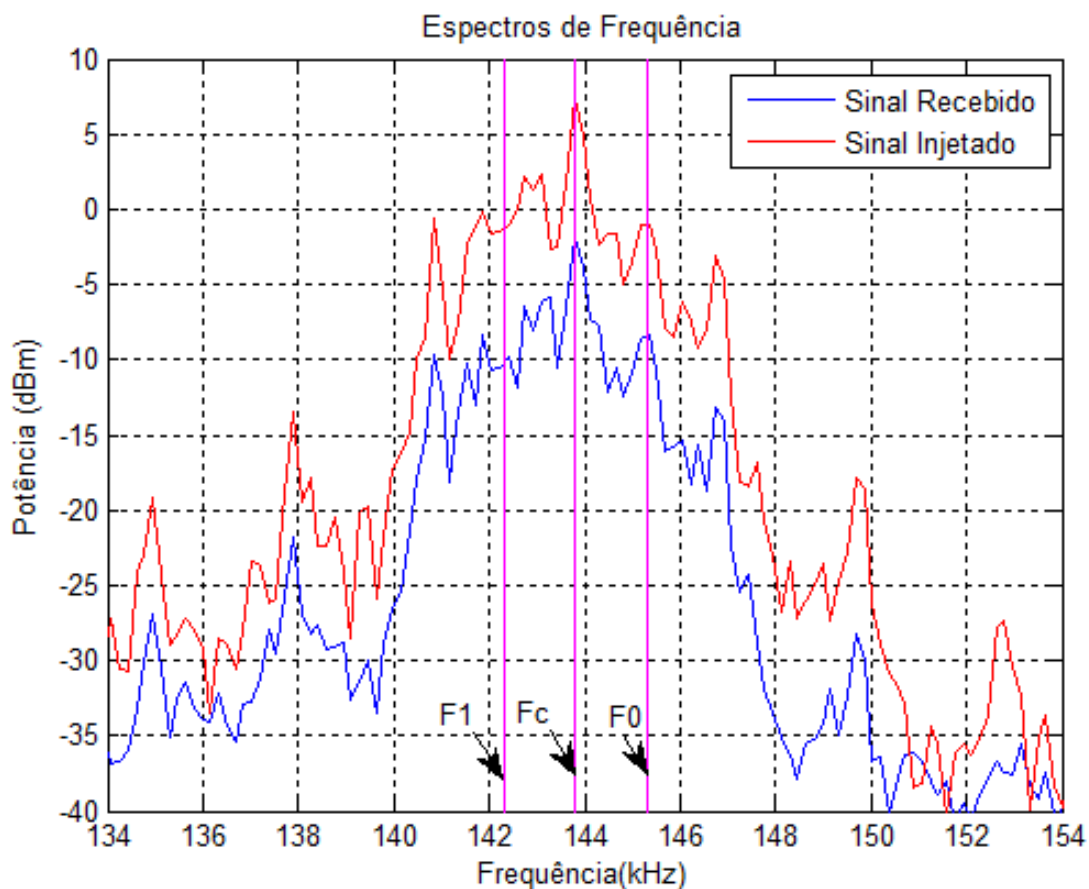
Note-se no Gráfico 13 que ao percorrer toda a rede e suas derivações, o sinal é atenuado em aproximadamente 10 dB. Porém conforme ilustram as linhas verticais destacadas no gráfico, foi possível medir as frequências de operação do sistema.

Figura 42 - *Setup* para obtenção do espectro de frequências ao sinal percorrer toda a rede



Fonte: CASTOR, 2015, modificado pelo autor

Gráfico 13 – Comparação entre o sinal injetado pelo modem PLM-1 e do sinal recebido depois de percorrer todo o canal



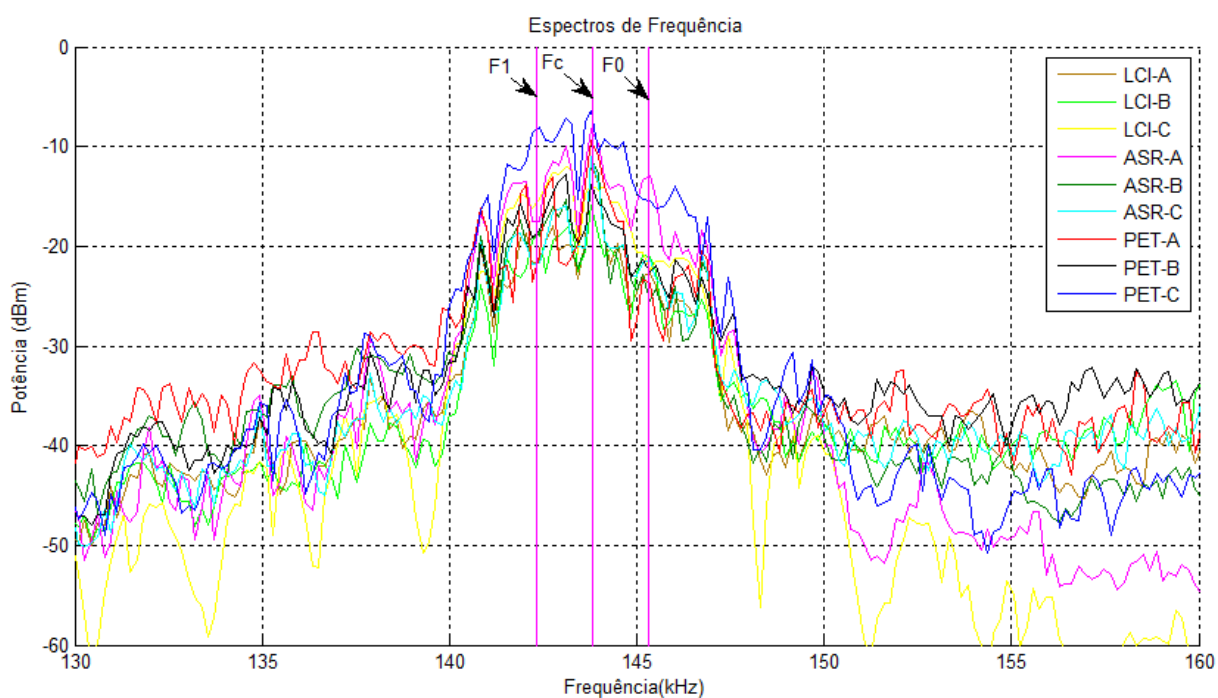
4.5.3 Análise Espectral da Rede de 180 m Energizada

Este experimento foi exatamente igual ao primeiro realizado em 4.5.2 e como mostrado no *setup* na Figura 41, a chave S1 estava aberta e S2 e S3 fechadas. A grande diferença é que a chave S0 foi fechada, fazendo com que toda a linha fosse energizada. Ao se conectar o MDO3012 à linha foi necessário o cuidado de usar um acoplador capacitivo entre o equipamento e a rede, impedindo assim que a alta tensão desta danificasse o equipamento. Os espectros obtidos em todos os pontos e todas as fases podem ser vistos no Gráfico 14.

Ao fechar a chave S0 a linha não é apenas energizada, pois além disso, todas as cargas conectadas no CT-2, sendo estas diversos computadores, sistemas de ar refrigerado e outros equipamentos, são ligadas em paralelo com o canal de comunicação, alterando assim a impedância da linha e inserindo ruídos de diversas naturezas.

Comparando-se os espectros ilustrados nos Gráficos 12 e 14, referentes aos instantes em que a chave S0 foi ligada e desligada respectivamente, percebe-se que apesar de diferença na atenuação de 10 dB entre eles, é possível detectar as frequências de operação do sistema em ambos os casos.

Gráfico 14 - Espectros de frequências obtidos nos pontos 2, 3 e 4 nas fases A, B e C da figura 46 para linha energizada



5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de uma tomada inteligente, capaz de medir tensão RMS, corrente RMS, potência ativa e fator de potência, além de mostrar estes dados em uma interface SCADA e disponibilizá-los na rede. O diferencial da tomada inteligente deste trabalho é a comunicação de dados através da rede elétrica usando tecnologia NBPLC. Foram feitos o desenvolvimento dos códigos assim como os mais diversos testes de comunicações para se estabelecer uma taxa de dados satisfatória para as aplicações proposta nos mais diversos comprimentos de rede elétrica. Avaliações experimentais de redes elétricas desenergizadas com 4 metros e sem derivações bem como uma rede energizada de 180 metros com várias derivações foram realizadas com sucesso.

Os resultados obtidos mostraram a viabilidade do modem PLM-1 da Ariane Controls para a aplicação proposta. A modulação por chaveamento de frequência BFSK em banda estreita e baixa frequência mostrou-se altamente imune a ruídos no receptor, como prometido pelo fabricante. Em todos os cenários testados foi possível estabelecer comunicação entre o transmissor e o receptor conectados na mesma fase. As taxas máximas conseguidas foram satisfatórias em torno de 850 bps, e atendem à demanda de taxa de dados da tomada inteligente. Em testes na rede de 180 metros desenergizada foi possível receber o sinal por acoplamento; porém, ao energizar a rede reduziu-se a qualidade do sinal acoplado a ponto do modem receptor descartar os pacotes. Isso, entretanto, não prejudica o objetivo final do projeto, já que receber e demodular corretamente sinais acoplados não era o objetivo.

A plataforma de prototipagem Arduino foi plenamente capaz de fazer o processamento de dados dos sensores de tensão e corrente e fornecer os valores de qualidade de energia com precisão aceitável para um consumidor residencial. Com novas tendências tecnológicas, tais como *Smart Grids*, surge então mais uma alternativa para a popularização de medidores de consumo e parâmetros de qualidade de energia elétrica. Outro princípio fundamental de redes inteligentes é a medição remota, sendo esta feita neste trabalho através da rede elétrica e com interface com a rede local e remota graças ao supervisor ScadaBR.

Um possível e interessante trabalho futuro constituirá em adicionar vários modems na mesma rede de comunicação. Desta forma, todas as tomadas enviarão para uma outra tomada centralizadora os pacotes com dados referentes a seus respectivos consumos e fator de potência.

Como o modem PLM-1 é uma tecnologia de protocolo neutro e só implementa as camadas físicas e de controle de acesso ao meio do modelo OSI, as funções de nível superior necessárias para este projeto, como endereçamento, deverão ser tratadas pelo microcontrolador usado como *host* no projeto. Durante o desenvolvimento do projeto, já pensando nos projetos futuros foram reservados 16 bits para endereçamento, *flags*, e outras possíveis necessidades da implementação de um protocolo. Um protocolo interessante para esta aplicação que pode ser implementado pelo *host* é o mestre-escravo Modbus, onde a tomada centralizadora solicitará os pacotes para cada tomada ligada na rede, evitando assim colisão entre os pacotes.

Um outro possível trabalho futuro prevê conectar não apenas tomadas inteligentes na rede elétrica como canal de comunicação, mas também outros diversos equipamentos, criando uma rede de automação residencial. Assim, é possível fazer o controle e monitoramento de diversos dispositivos conectados ao sistema elétrico como iluminação, aquecimento, refrigeração, segurança, entre outros. Além disso, devido a exigências de melhorias na robustez do sistema para atender tais demandas torna-se necessário empregar técnicas de modulação mais robustas, como multiplexação por divisão de frequências ortogonais também para comunicação via rede elétrica em banda estreita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARABOI, B. **Narrow Powerline Communication Applications and Challenges**. 2013. Ariane Controls Inc., 2013. Disponível em: <http://www.arianecontrols.com/documents/Narrowband_Powerline_Communication_Applications_and_Challenges_March2013.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2014.
- YOUSUF, M. S.; EL-SHAFEI, M. Power Line Communications: An Overview – Part I. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIONS IN INFORMATION TECHNOLOGY, 2007, Dubai. **IEEE**. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4430363>>. Acesso em: 05 nov. 2014.
- CACCIAGUERRA, F. **Introduction to power line communications (PLC)**. Kioskea, 2003. Disponível em: <<http://en.kioskea.net/contents/126-introduction-to-power-line-communications-plc>>. Acesso em: 06 nov. 2014
- BERGER, L. T.; SCHWAGER, A.; ESCUDERO-GARZÁS, J.J. Power Line Communications for Smart Grid Applications. **Hindawi Journal of Electrical and Computer Engineering**, v. 2013, p. 1-16, dec. 2012. Disponível em: <<http://downloads.hindawi.com/journals/jece/2013/712376.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2014.
- SILVA, J. A. L.; MUNARO, C. ; SEGATTO, M. E. V.; SALLES, Evandro Ottoni Teatini ; SIQUEIRA, T. . Telemetria e Supervisão via Rede Elétrica de Distribuição de Energia Elétrica de Baixa Tensão: Estudo de Caso. In: **IEEE/PES - Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin América**, 2004, São Paulo. IEEE/PES, 2004.
- BROEDEL, D. ; SANTOS, W. ; SILVA, JAIR A.L. ; SEGATTO, M. E. V.; . **Modelagem de Canal para Comunicação de Dados via Rede Elétrica de Média Tensão**. In: MOMAG 2014: 16º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2014, Curitiba-PR. MOMAG 2014: 16º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2014.
- AGUIAR, R. O. ; Silva, Jair A. L. ; SIQUEIRA, T. ; SEGATTO, M. E. V. . **Modelando Redes Elétricas como Canais de Comunicação**. In: XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações ? SBRT'05, 2005, Campinas. SBRT2005, 2005.
- HRASNICA, H.; HAIDINE, A.; LEHNERT, R. **Broadband powerline communications networks design**. Chichester: Wiley, 2004.
- CASTOR, L. R. ; SILVA, J. A. L. ; SEGATTO, M. E.V. . Medium Voltage Overhead Power-line as a Smart Distribution Grid for Onshore Oil & Gas Industries Automation and Broadband Data Transport. In: **INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES**

CONFERENCE LATIN AMERICA, 2015, Montevideo - Uruguai. IEEE PES Conference on Innovative SMART GRID Technologies (ISGT-LA 2015) Latin American, 2015.

CASTOR, L. R. ; NATALE, R. ; SEGATTO, M. E. V. ; SILVA, J. A. L. . Experimental Investigation of Broadband Power Line Communication Modems for Onshore Oil & Gas Industry: A Preliminary Analysis. In: 18th **IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Application**, 2014, Glasgow-Scotland. IEEE ISPLC 2014, 2014.

HAYKIN, S. **Communication systems**, 4 ed. New York: Wiley, 2001.

BERGER, L. T. et al. **MIMO Power Line Communications**, 1st ed. Boca Raton: CRC Press. 2014.

VINES, R. et al. **Noise on Residential Power Distribution Circuits**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. EMC-26, n. 4, p. 161-168, 1984.

MARUBAYASHI; TACHIKAWA, S. **Spread spectrum transmission on residential power line**. IEEE Conference on Spread-Spectrum Techniques, p. 1082–1086, Janeiro 1996.

JIE, Z.; XIAO, Y.; KAIYU, Q. Research on characteristics of low voltage power line communication channel. 2012 **IEEE Power Engineering and Automation Conference**, 2012.

HOOIJEN, O. A channel model for the residential power circuit used as a digital communications medium. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 40, n. 4, p. 331-336, 1998.

TEMANEH-NYAH, C.CHIFAMBA, P. An investigation of the effects of impulsive noise and channel distortion in narrow band power line communication. 2015 **Third International Conference on Digital Information, Networking, and Wireless Communications (DINWC)**, 2015.

Bolzani, C. **Residências inteligentes**. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2004.

TIAN, H. et al. Measurement on narrow band power line communication channel impedance of distribution network. 2011 **International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)**, 2011.

Malack, J.Engstrom, J. RF Impedance of United States and European Power Lines. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. EMC-18, n. 1, p. 36-38, 1976.

WANG Q.; GONG S,. Communication reliability design of low-voltage power line communication system. SMC'03 Conference Proceedings. 2003 **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme - System Security and Assurance** (Cat. No.03CH37483), 2003.

CAVDAR, I. Performance Analysis of FSK Power Line Communications Systems Over the Time-Varying Channels: Measurements and Modeling. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 1, p. 111-117, 2004.

CARVALHO, R. M. **Comunicações Analógicas e Digitais**, 1ed, Vitória: LTC, 2008.

ROCHOL, J. **Comunicação de Dados**, 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

FOROUZAN, B. A. **Comunicação de Dados e Redes de Computadores**, 3. ed. Porto Alegre: Bookman. 2006

ARIANE Controls. **User Manual PLM-1 Powerline Modem**: Manual do usuário, Versão 4.2, Abril 2014a.

ANATEL, **Resolução nº 527, de 8 de abril de 2009** - Portal de Legislação da Anatel (Resoluções, Leis, Decretos e Normas). Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2009/101-resolucao-527>>. Acesso em: 16 ago. 2016.

ANATEL, **Plano de destinação de faixas de frequência**. Disponível em: <<http://sistemas.anatel.gov.br/pdff/Consulta/NotaConsulta.asp?inpCodNota=5.64>>. Acesso em: 16 ago. 2016.

SPARKFUN Electronics, **Mamba Shield** - DEV-10918 -. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/retired/10918>>. Acesso em: 16 ago. 2016.

ARIANE Controls. **Datasheet AC-PLM-1 Powerline Communication Modem**: folha de dados do PLM-1. Ariane Controls, 2014b

NILSSON, J. **Electric circuits (8th Edition)**. Upper Sadle River: Prentice Hall, 2007.

ALLEGRO Microsystems, LCC. **Datasheet Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC**: folha de dados - Disponível em: <<http://www.allegromicro.com/~media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx>>. Acesso em: 18 ago. 2016.

OpenEnergyMonitor, **Open-source energy monitor**. Disponível em: <<https://openenergymonitor.org/emon/>>. Acesso em: 18 ago. 2016.

LABTEL, **Laboratório de Telecomunicações**, Disponível em: <<http://labetelufes.net/>>. Acesso em: 18 ago. 2016.

SILVA, J. A. L. **Análise de Desempenho de um Sistema COFDM para Comunicação via Rede Elétrica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo,.

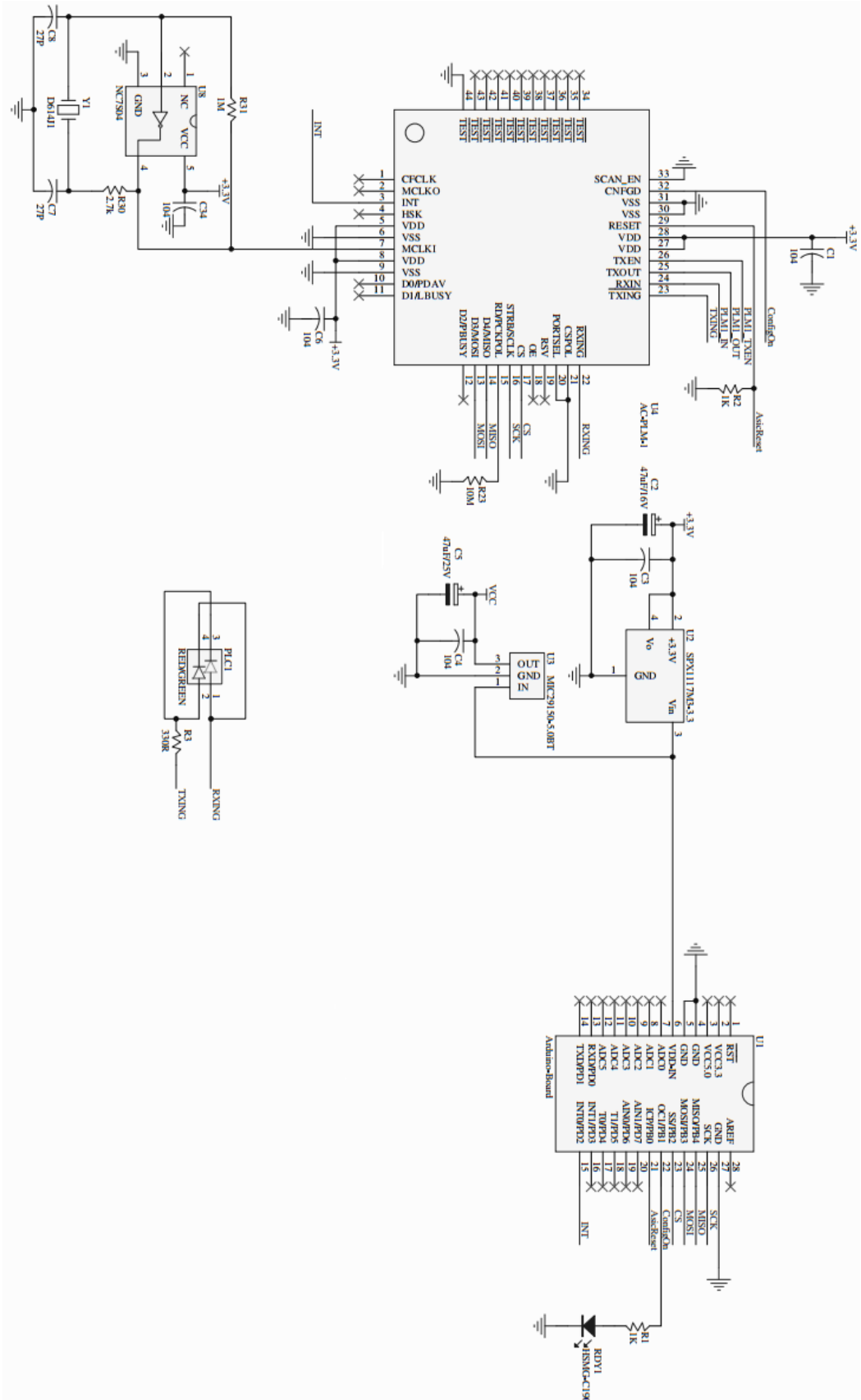
CASTOR, L. R. M. **A Rede de Média Tensão como Meio de Transporte de Dados em Redes Smart Grid**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, 2015.

PINHEIRO, J. M. S., Artigo - **Introdução às Redes de Supervisão e Controle**. Disponível em: <http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_redes_de_supervisao_e_controle.php>. Acesso em: 22 ago. 2016.

SCADABR, **Supervisório Open-Source**. Disponível em: <<http://www.scadabr.com.br/>>. Acesso em: 22 ago. 2016.

MODBUS, **The Modbus Organization**. Disponível em: <<http://www.modbus.org/>>. Acesso em: 22 ago. 2016.

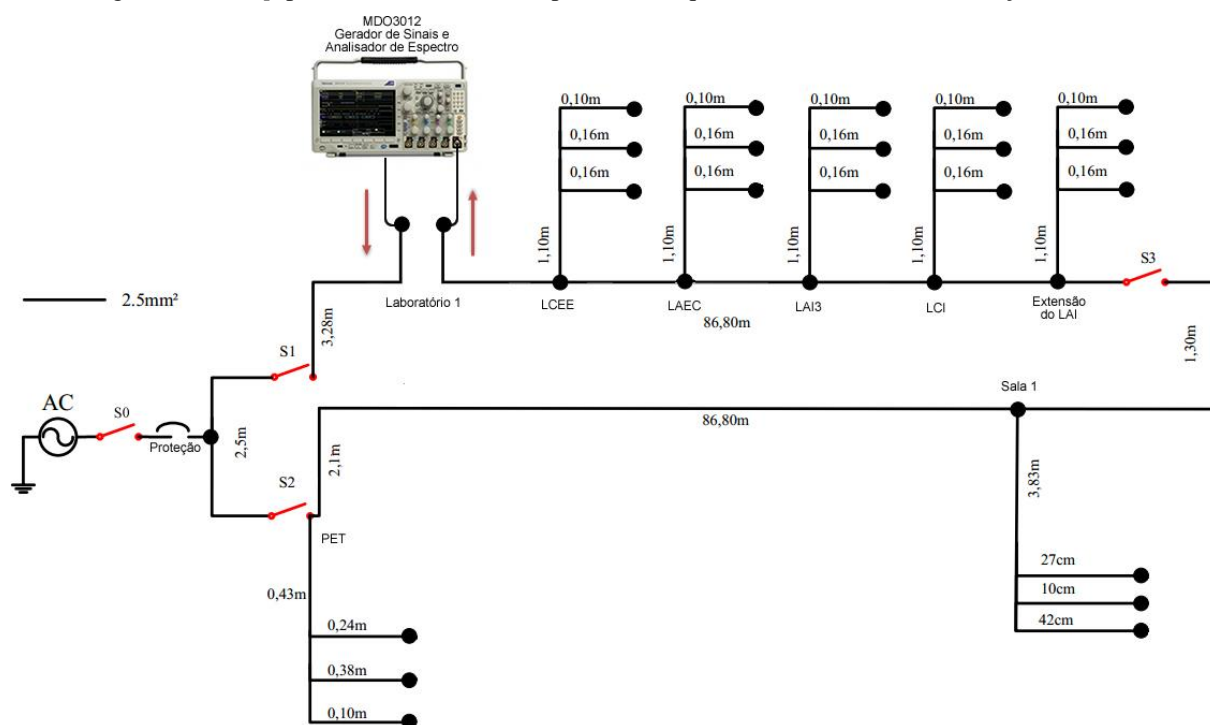
ANEXO A – CIRCUITO ELETRÔNICO DO MAMBA SHIELD



APÊNDICE A – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA REDE ELÉTRICA DE 180 METROS

Para o levantamento desta resposta do canal, foram utilizadas as funções de gerador de sinais e analisador de espectro do MDO3012. A chave S0 foi aberta, desenergizando a rede, e as chaves S1, S2 e S3 foram fechadas, de forma que a rede estivesse em anel. No “Laboratório 1” o anel foi aberto e em um ponto um sinal foi injetado e recebido no outro depois de percorrer toda a linha de 180m e suas ramificações, como mostrado na Figura 43. O sinal injetado foi ruído branco gaussiano aditivo AWGN (*additive white Gaussian noise*) com amplitude de 5 V_{pp} e offset 2.5 V. O receptor, como analisador de espectro, estava configurado para detectar o espectro de 80 kHz até 30 MHz.

Figura 43 – Setup para levantamento da resposta em frequência do canal de comunicação de 180m



Fonte: CASTOR, 2015, modificado pelo autor

É possível ver no Gráfico 15 a resposta em frequência da rede, com a atenuação crescente em altas frequências e os nulos existentes em algumas frequências. Estes nulos estão diretamente relacionados com o multipercurso originados pelas derivações. Como a frequência utilizada para comunicação do *Mamba Shield* está na ordem de kHz, a atenuação não é alta quando

comparada com dezenas de MHz mostrados no Gráfico 15. Pelo espaçamento entre as frequências de comunicação f_0 e f_1 ser pequena e o sistema ser banda estreita, não há tanto risco da frequência de comunicação corresponder a um nulo. Na elaboração de projetos de sistemas para comunicação via rede elétrica, um fator importante a ser considerado é a duração da resposta impulsiva. A resposta impulsiva apresentada no Gráfico 15 contém informações importantes para projeto de sistemas em banda larga. (SILVA, 2006)

Gráfico 15 - Respostas em frequência e impulsiva medidas na rede de testes com as derivações da Figura 45 mantidas em aberto, ou seja, sem cargas ligadas

