

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA**

LUIZ DA ROCHA FARIAS

**POWER LINE COMMUNICATION: ANÁLISE DA VIABILIDADE E
DESEMPENHO TÉCNICO DO PADRÃO G3-PLC PARA O
MONITORAMENTO DE VARIÁVEIS EM AMBIENTE INDUSTRIAL**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2017

LUIZ DA ROCHA FARIAS

**POWER LINE COMMUNICATION: ANÁLISE DA VIABILIDADE E
DESEMPENHO TÉCNICO DO PADRÃO G3-PLC PARA O
MONITORAMENTO DE VARIÁVEIS EM AMBIENTE INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, do Departamento de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Jr.

PONTA GROSSA

2017

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.21/17

F224 Farias, Luiz da Rocha

Power Line Communication: análise da viabilidade e desempenho técnico do padrão G3-PLC para o monitoramento de variáveis em ambiente industrial. / Luiz da Rocha Farias. -- 2017.

154 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Jr.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

1. Automação industrial. 2. Telecomunicações. 3. Engenharia elétrica. I. Stevan Jr., Sergio Luiz. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. III. Título.

CDD 621.3



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus de Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº **25/2017**

POWER LINE COMMUNICATION: ANÁLISE DA VIABILIDADE E DESEMPENHO TÉCNICO DO PADRÃO G3-PLC PARA O MONITORAMENTO DE VARIÁVEIS EM AMBIENTE INDUSTRIAL

por

Luiz da Rocha Farias

Esta dissertação foi apresentada às **14 horas** do dia **22 de fevereiro de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA, com área de concentração em Controle e Processamento de Energia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Eduardo Parente Ribeiro
(UFPR)

Prof. Dr. Angelo Marcelo Tusset (UTFPR)

Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Junior (UTFPR)
Orientador

Prof. Dr. Claudinor Bitencourt Nascimento
Coordenador do PPGEE

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho primeiramente à
mãe Marlene, meu pai Luiz, à minha irmã
Bruna e minha sobrinha Bianca, pois
confiaram e me fortaleceram em mais
essa caminhada da minha vida. Sei que
eles não mediram esforços para que esse
sonhe se concretizasse. Aos meus
familiares e em especial ao meu Avô (in
Memorian) que mesmo longe sempre
esteve presente em meus pensamentos.
Saudades Eternas Vô! Muito obrigado por
tudo!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade concedida, aos meus pais que sempre me incentivaram estudar e ir em busca dos meus sonhos. Aos meus familiares e amigos de Itariri que me deram forças para iniciar meu mestrado. Aos colegas bolsistas CAPES, em especial aos meus amigos David, Fernando, Jessimon e Régis, que sempre estiveram dispostos a ajudar nas dificuldades encontradas nas disciplinas específicas de Engenharia. Ao meu orientador Sergio Luiz Stevan Jr. que sempre me incentivou e me deu forças para continuar, afim de obter os melhores resultados.

RESUMO

FARIAS, Luiz da Rocha. **Power Line Communication: Análise da viabilidade e desempenho técnico do padrão G3-PLC para o monitoramento de variáveis em ambiente industrial.** 2017. 156 f. Mestrado - (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Este trabalho apresenta uma análise da utilização da comunicação de banda estreita via rede elétrica (*Power Line Communication* - PLC) em ambiente industrial. Para análise, utilizou-se um kit de desenvolvimento para aplicações baseadas em PLC de acordo com o padrão G3-PLC. Ensaios experimentais e resultados são apresentados para diferentes cenários que simulam diversas situações existentes em um ambiente industrial. Demonstra-se a influência da inserção de ruídos no canal PLC, através do acionamento de inversores e motores, afim de verificar a influência desses elementos no desempenho da comunicação PLC. Como base comparativa, utilizou-se a distância máxima de transmissão normalizada da rede AS-Interface, muito difundida em ambientes industriais. Recomendações relativas à técnica de modulação e tamanho do pacote de dados são apresentadas. Como resultado final, conclui-se que o padrão de comunicação G3-PLC e sua técnica de modulação ROBO atendem os requisitos de comunicação industrial, principalmente para aplicações de monitoramento de variáveis industriais, onde o tempo não é crítico.

Palavras-chave: Power Line Communication, PLC, Redes Industriais, PLC banda estreita, monitoramento industrial.

ABSTRACT

FARIAS, Luiz da Rocha. **Power Line Communication: Analysis of technical feasibility of the standard G3-PLC for data transmission in industrial environment.** 2017. 156 f. Mestrado - (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2017.

This work presents an analysis of the narrowband communication through the power line (PLC) in an industrial environment. For analysis, a development kit for PLC-based applications according to the G3-PLC standard was used. Experimental tests and results for different scenarios that simulate various situations existing in an industrial environment. An influence of the insertion of noise in the PLC channel is demonstrated by the drive of inverters and motors, in order to verify a non-performance influence of the PLC communication. As a comparative basis, a maximum standard transmission distance of the AS-Interface network was used, very widespread in industrial environments. Recommendations regarding the modulation technique and the size of the data packet are presented. As a final result, it is concluded that the G3-PLC communication standard and its ROBO modulation technique meet the requirements of industrial communication, especially for industrial variable monitoring applications where time is not critical.

Keywords: Power Line Communication, PLC, Industrial Networks, Narrowband PLC, Industrial monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração AS-I com 1 mestre e 31 escravos.....	33
Figura 2 - Diagrama de Comunicação através da Rede Elétrica.....	38
Figura 3 - Diagrama de blocos do transmissor operando no Padrão G3-PLC.	40
Figura 4 - Diagrama de blocos do receptor operando no Padrão G3-PLC.....	41
Figura 5 - Modulação OFDM.....	42
Figura 6 - Diagrama de constelação BPSK e ROBO.	44
Figura 7 - Diagrama de constelação QPSK.	45
Figura 8 - Diagrama de constelação 8PSK.	46
Figura 9 - Posicionamento e espessura do cabo esticado.	51
Figura 10 - Diâmetro e quantidade cabos enrolado em forma de bobina.....	52
Figura 11 - Espectro de frequência do dia que foram realizados a primeira fase dos experimentos.....	52
Figura 12 - Espectro de frequência do dia que foram realizados a segunda fase dos experimentos.....	53
Figura 13 - Kit de desenvolvimento para PLC TMDSPCKITV4-CEN da Texas Instruments.....	55
Figura 14 - Interface do Software Intermadite para configuração do modem PLC...56	
Figura 15 - Técnicas de modulação disponíveis para o modem TMDSPCKITV4-CEN.....	56
Figura 16 - Bandas de frequências disponíveis para o modem.....	57
Figura 17 - - Informações de estatísticas disponibilizadas pelo Software Intermediate da Texas Instruments.....	57
Figura 18 - Parâmetros relacionados ao envio de pacotes pelo software Intermediate.	58
Figura 19 - Interface do Software Zero Configuration para configuração do modem PLC.....	58
Figura 20 - Diagrama elétrico simplificado e ligações efetuadas do acionamento dos motores utilizando inversores de frequência.	60
Figura 21 - Diagrama unifilar do laboratório onde foram criados os cenários de ensaios.....	62
Figura 22 - Ilustração do cenário de ensaio 1.	63
Figura 23 - Ilustração do cenário de ensaio 2.	66
Figura 24 - Ilustração do cenário de ensaio 3.	67
Figura 25 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 1 motor acionado sobre 0 motor.....	109
Figura 26 - - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 2 motores acionados sobre 0 motor.	109
Figura 27 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 3 motores acionados sobre 0 motor.	110
Figura 28 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 4 motores acionados sobre 0 motor.	110

Figura 29 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 5 motores acionados sobre 0 motor.	111
Figura 30 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 6 motores acionados sobre 0 motor.	111
Figura 31 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 7 motores acionados sobre 0 motor.	112
Figura 32 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 8 motores acionados sobre 0 motor.	112
Figura 33 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 9 motores acionados sobre 0 motor.	113
Figura 34 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 10 motores acionados sobre 0 motor.	113
Figura 35 - Espectro de frequência do canal PLC da segunda bateria de testes, com 1 motor acionado sobre 0 motor.	114
Figura 36 - Espectro de frequência do canal PLC da segunda bateria de testes, com 2 motores acionado sobre 0 motor.	114
Figura 37 - Espectro de frequência do canal PLC da segunda bateria de testes, com 3 motores acionado sobre 0 motor.	115
Figura 38 - Espectro de frequência do canal PLC da segunda bateria de testes, com 4 motores acionado sobre 0 motor.	115
Figura 39 - Espectro de frequência do canal PLC com 5 motores acionado sobre 0 motor.	116
Figura 40 - Espectro de frequência do canal PLC com 6 motores acionado sobre 0 motor.	116
Figura 41 - Espectro de frequência do canal PLC com 7 motores acionado sobre 0 motor.	117
Figura 42 - Espectro de frequência do canal PLC com 8 motores acionado sobre 0 motor.	117
Figura 43 - Espectro de frequência do canal PLC com 9 motores acionado sobre 0 motor.	118
Figura 44 - Espectro de frequência do canal PLC com 10 motores acionado sobre 0 motor.	118

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valor da Indutância com relação ao tamanho do Cabo.	66
Gráfico 2 - Valor da Indutância com relação ao tamanho do Cabo	69
Gráfico 3 - Modulação 8PSK: Taxa de Média de transmissão de dados, enviando pacotes de 1 Byte.....	84
Gráfico 4 - Porcentagem dos pacotes recebidos com erros de acordo com a quantidade de ruído inserido na rede.	85
Gráfico 5 - Porcentagem de pacotes perdidos durante a transmissão dos dados. ...	86
Gráfico 6 - Modulação ROBO (Relação dos pacotes recebidos de acordo com o Ruído inserido na rede).	87
Gráfico 7 - Modulação BPSK (Relação dos pacotes recebidos de acordo com o ruído inserido na rede).	88
Gráfico 8 - Modulação ROBO (Relação dos pacotes recebidos de acordo com o Ruído inserido na rede).	89
Gráfico 9 - Modulação BPSK (Relação dos pacotes recebidos de acordo com o Ruído inserido na rede).	90
Gráfico 10 - Modulação ROBO: Alongando a distância do entre o modem emissor e a fonte ruidosa até 80 metros.	91
Gráfico 11 - Modulação BPSK: Alongando a distância do entre o modem emissor e a fonte ruidosa até 80 metros.	91
Gráfico 12 - Modulação ROBO: Alongando a distância entre o modem receptor e a fonte ruidosa até 80 metros.	92
Gráfico 13 - Modulação BPSK: Alongando a distância entre o modem receptor e a fonte ruidosa até 80 metros.	93
Gráfico 14 - Modulação ROBO: Pacotes recebidos e pacotes com erros de acordo com a indutância presente nas bobinas enroladas de 5 em 5 metros entre o modem emissor e a fonte ruidosa.	95
Gráfico 15 - Modulação BPSK: Pacotes recebidos e pacotes com erros de acordo com a indutância presente nas bobinas enroladas de 5 em 5 metros entre o modem emissor e a fonte ruidosa.	95
Gráfico 16 - Modulação ROBO: Bobinas enroladas de 5 em 5 metros entre o modem receptor e a fonte ruidosa.	96
Gráfico 17 - Modulação BPSK: Bobinas enroladas de 5 em 5 metros entre o modem receptor e a fonte ruidosa.	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Diferenças típicas entre redes comerciais e industriais.....	32
Quadro 2 - Características do protocolo DeviceNet.	34
Quadro 3 - Características do protocolo Ethernet.	35
Quadro 4 - Classificação dos protocolos de comunicação Wireless.	36
Quadro 5 - Faixas de frequências da banda e número de subportadoras.	48
Quadro 6 - Taxas de transferência x modulação.....	55
Quadro 7 - Características nominais do inversor Micromaster 420.....	61
Quadro 8 - Características dos motores elétricos de indução trifásicos utilizados para os ensaios.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ordem de acionamento crescente/decrescente e suas respectivas distâncias (em metros) entre as bancadas, a partir da bancada B10 (Emissor).	64
Tabela 2 – Dados obtidos com as médias dos pacotes recebidos com erros, variando a quantidade de inversores/motores acionados.	77
Tabela 3 - Análise de Variância (ANOVA).....	77
Tabela 4 - ANOVA entre 0 e 1 inversor/motor ligado.	78
Tabela 5 - ANOVA entre 1 e 2 inversores/motores ligados.	79
Tabela 6 - ANOVA entre 2 e 3 inversores/motores ligados.	79
Tabela 7 - ANOVA entre 3 e 4 inversores/motores ligados.....	80
Tabela 8 - ANOVA entre 4 e 5 inversores/motores ligados.....	80
Tabela 9 - ANOVA entre 5 e 6 inversores/motores ligados.....	81
Tabela 10 - ANOVA entre 4 e 6 inversores/motores ligados.....	81
Tabela 11 - ANOVA entre 6 e 7 inversores/motores ligados.....	81
Tabela 12 - ANOVA entre 7 e 8 inversores/motores ligados.....	82
Tabela 13 - ANOVA entre 8 e 9 inversores/motores ligados.....	82
Tabela 14 - ANOVA entre 9 e 10 inversores/motores ligados.....	83
Tabela 15 - Média de 5 envios de pacotes de 1 Byte, utilizando a modulação 8PSK.	121
Tabela 16 - Média de 5 envios de pacotes de 2 Bytes, utilizando a modulação 8PSK.	121
Tabela 17 - Média de 5 envios de pacotes de 4 Bytes, utilizando a modulação 8PSK.	121
Tabela 18 - Média de 5 envios de pacotes de 8 Bytes, utilizando a modulação 8PSK.	122
Tabela 19 - Média de 5 envios de pacotes de 16 Bytes, utilizando a modulação 8PSK.....	122
Tabela 20 - Média de 5 envios de pacotes de 32 Bytes, utilizando a modulação 8PSK.....	122
Tabela 21 - Média de 5 envios de pacotes de 64 Bytes, utilizando a modulação 8PSK.....	123
Tabela 22 - Média de 5 envios de pacotes de 1 Byte, utilizando a modulação QPSK.	123
Tabela 23 - Média de 5 envios de pacotes de 2 Bytes, utilizando a modulação QPSK.	123
Tabela 24 - Média de 5 envios de pacotes de 4 Bytes, utilizando a modulação QPSK.	124
Tabela 25 - Média de 5 envios de pacotes de 8 Bytes, utilizando a modulação QPSK.	124
Tabela 26 - Média de 5 envios de pacotes de 16 Bytes, utilizando a modulação QPSK.	124

Tabela 27 - Média de 5 envios de pacotes de 32 Bytes, utilizando a modulação QPSK.	125
Tabela 28 - Média de 5 envios de pacotes de 64 Bytes, utilizando a modulação QPSK.	125
Tabela 29 - Média de 5 envios de pacotes de 1 Byte, utilizando a modulação BPSK.	125
Tabela 30 - Média de 5 envios de pacotes de 2 Bytes, utilizando a modulação BPSK.	126
Tabela 31 - Média de 5 envios de pacotes de 4 Bytes, utilizando a modulação BPSK.	126
Tabela 32 - Média de 5 envios de pacotes de 8 Bytes, utilizando a modulação BPSK.	126
Tabela 33 - Média de 5 envios de pacotes de 16 Bytes, utilizando a modulação BPSK.	127
Tabela 34 - Média de 5 envios de pacotes de 32 Bytes, utilizando a modulação BPSK.	127
Tabela 35 - Média de 5 envios de pacotes de 64 Bytes, utilizando a modulação BPSK.	127
Tabela 36 - Média de 5 envios de pacotes de 1 Byte, utilizando a modulação ROBO.	128
Tabela 37 - Média de 5 envios de pacotes de 2 Bytes, utilizando a modulação ROBO.	128
Tabela 38 - Média de 5 envios de pacotes de 4 Bytes, utilizando a modulação ROBO.	128
Tabela 39 - Média de 5 envios de pacotes de 8 Bytes, utilizando a modulação ROBO.	129
Tabela 40 - Média de 5 envios de pacotes de 16 Bytes, utilizando a modulação ROBO.	129
Tabela 41 - Média de 5 envios de pacotes de 32 Bytes, utilizando a modulação ROBO.	129
Tabela 42 - Média de 5 envios de pacotes de 64 Bytes, utilizando a modulação ROBO.	130
Tabela 43 – Dados obtidos nos 5 envios de pacotescom nenhum motor acionado, utilizando a modulação BPSK.	132
Tabela 44 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 1 motor acionado, utilizando a modulação BPSK.	132
Tabela 45 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 2 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	133
Tabela 46 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 3 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	133
Tabela 47 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 4 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	133
Tabela 48 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 5 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	133

Tabela 49 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 6 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	134
Tabela 50 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 7 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	134
Tabela 51 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 8 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	134
Tabela 52 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 9 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	134
Tabela 53 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	135
Tabela 54 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotessem nenhum motor acionado, utilizando a modulação ROBO.	135
Tabela 55 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 1 motor acionado, utilizando a modulação ROBO.	135
Tabela 56 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 2 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	135
Tabela 57 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 3 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	136
Tabela 58 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 4 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	136
Tabela 59 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 5 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	136
Tabela 60 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 6 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	136
Tabela 61 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 7 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	137
Tabela 62 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 8 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	137
Tabela 63 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 9 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	137
Tabela 64 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	137
Tabela 65 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotessem nenhum motor acionado, utilizando a modulação BPSK.	138
Tabela 66 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 1 motor acionado, utilizando a modulação BPSK.	138
Tabela 67 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 2 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	138
Tabela 68 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 3 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	139
Tabela 69 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 4 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	139
Tabela 70 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 5 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	139

Tabela 71 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 6 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	139
Tabela 72 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 7 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	140
Tabela 73 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 8 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	140
Tabela 74 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 9 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	140
Tabela 75 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.	140
Tabela 76 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, utilizando a modulação ROBO.	141
Tabela 77 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 1 motor acionado, utilizando a modulação ROBO.	141
Tabela 78 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 2 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	141
Tabela 79 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 3 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	141
Tabela 80 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 4 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	142
Tabela 81 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 5 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	142
Tabela 82 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 6 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	142
Tabela 83 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 7 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	142
Tabela 84 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 8 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	143
Tabela 85 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 9 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	143
Tabela 86 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.	143
Tabela 87 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 20 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.	144
Tabela 88 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 40 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.	144
Tabela 89 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 60 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.	144
Tabela 90 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.	145

Tabela 91 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 20 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.....	145
Tabela 92 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 40 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.....	145
Tabela 93 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 60 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.....	146
Tabela 94 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.....	146
Tabela 95 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 20 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.....	146
Tabela 96 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 40 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.....	147
Tabela 97 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 60 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.....	147
Tabela 98 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.....	147
Tabela 99 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 20 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.....	148
Tabela 100 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 40 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.....	148
Tabela 101 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 60 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.....	148
Tabela 102 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.....	148
Tabela 103 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 5 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.	149
Tabela 104 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 10 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.	149
Tabela 105 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 15 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.	150

Tabela 106 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 20 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.	150
Tabela 107 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 5 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.	150
Tabela 108 - - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 10 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.	151
Tabela 109 - - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 15 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.	151
Tabela 110 - - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 20 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.	151
Tabela 111 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 5 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.	152
Tabela 112 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 10 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.	152
Tabela 113 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 15 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.	152
Tabela 114 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 20 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.	153
Tabela 115 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 5 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.	153
Tabela 116 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 10 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.	153
Tabela 117 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 15 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.	154
Tabela 118 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 20 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.	154

LISTA DE SIGLAS

BPLC	Broadband Power Line Communication
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
ERDF	Électricité Réseau Distribution France
FCC	Federal Communications Commission
NBPLC	Narrowband Power Line Communication
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
PLC	Power Line Communication
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
8PSK	8 Phase-Shift Keying

LISTA DE ACRÔNIMOS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	Análise de Variância
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
CENELEC	Comité Européen de NormalisationÉlectrotechnique
LAN	Local Area Network

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_c	Condutividade do material condutor
μ	Condutividade do material dielétrico entre os condutores
D	Distância entre o centro dos condutores
f	Frequência do sinal
Z_L	Impedância característica do canal PLC
μ_c	Permeabilidade do material
μ	Permeabilidade do material dielétrico entre os condutores
ϵ	Permissividade do material dielétrico entre os condutores
L	Indutância em mH/Km
D_c	Diâmetro do condutor
DMG	Distância geométrica (em mm) entre os cabos
K_L	Quantidade de fios elementares que formam o condutor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVOS.....	26
1.1.1 Geral.....	26
1.1.2 Específicos.....	26
1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	27
1.3 METODOLOGIA	28
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	28
2 COMUNICAÇÃO DE DADOS NA INDÚSTRIA.....	30
2.1 REDES INDUSTRIAIS.....	31
2.2 AS-I – INTERFACE SENSOR ATUADOR.....	32
2.3 DEVICENET	34
2.4 ETHERNET INDUSTRIAL	34
2.5 TECNOLOGIAS EMERGENTES DE REDES DE COMUNICAÇÃO.....	36
2.5.1 Redes sem Frio (Wireless).....	36
2.5.1.1 ZigBee.....	37
2.5.1.2 WirelessHART.....	37
3 COMUNICAÇÃO VIA REDE ELÉTRICA (PLC - POWER LINE COMMUNICATION).....	38
3.1 FUNCIONAMENTO DO PADRÃO G3-PLC	40
3.2 MODULAÇÃO OFDM	41
3.2.1 Princípios da Modulação OFDM.....	42
3.2.2 Modulação Adaptativa OFDM.....	43
3.3 MAPEAMENTO PARA AS MODULAÇÕES BPSK E ROBO	44
3.4 MAPEAMENTO PARA MODULAÇÃO QPSK.....	45
3.5 MAPEAMENTO PARA MODULAÇÃO 8PSK.....	45
3.6 PADRÃO G3-PLC E SUA COMPATIBILIDADE COM AMBIENTES INDUSTRIAIS.....	47
3.7 ENTIDADES DE PADRONIZAÇÃO DA TECNOLOGIA PLC.....	48
3.7.1 CENELEC.....	48
3.7.2 FCC (Federal Communications Commission).....	49
3.7.3 ARIB.....	49
3.8 RUÍDOS PRESENTES NO ESPECTRO PLC	49
3.8.1 Indutância presente nos condutores da rede elétrica	50
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
4.1 HARDWARE DE COMUNICAÇÃO G3-PLC - TMDSPCKITV4-CEN	54
4.2 SOFTWARE DE CONFIGURAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO.....	55
4.3 CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DO AMBIENTE INDUSTRIAL.....	59
4.3.1 Cenários.....	62

4.3.1.1 Cenário 1: Avaliação da Interferência dos inversores/motores na qualidade da comunicação PLC	63
4.3.1.2 Cenário 2: Avaliação da distância entre o modem Emissor/Receptor e a fonte Ruidosa	64
4.3.1.3 Cenário 3: Avaliação da influência da Indutância do cabeamento entre o modem Emissor/Receptor e a fonte Ruidosa	66
4.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	69
4.5 MÉTODOS ESTÁTISTICOS UTILIZADOS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	71
4.5.1 Média.....	71
4.5.2 Desvio Padrão e Variância.....	72
4.5.3 Análise de Variância (ANOVA - <i>ANalysis Of VAriance</i>).....	72
4.5.3.1 Anova de fator único	73
4.5.3.1.1 <i>Processo geral para um teste de análise de variância</i>	73
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	76
5.1 ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA DA QUANTIDADE DE INVERSORES/MOTORES ACIONADOS NA QUALIDADE DA COMUNICAÇÃO..	76
5.1.1 Aplicando ANOVA entre os cenários: Sem ruído e com 1 inversor/motor ligado.....	78
5.1.2 Aplicando ANOVA entre os cenários: 1 inversor/motor e 2 inversores/motores ligados.....	78
5.1.3 Aplicando ANOVA entre os cenários: 2 inversores/motores e 3 inversores/motores ligados.....	79
5.1.4 Aplicando ANOVA entre os cenários: 3 inversores/motores e 4 inversores/motores ligados.....	79
5.1.5 Aplicando ANOVA entre os cenários: 4 inversores/motores e 5 inversores/motores ligados.....	80
5.1.6 Aplicando ANOVA entre os cenários: 5 inversores/motores e 6 inversores/motores ligados.....	80
5.1.7 Aplicando ANOVA entre os cenários: 6 inversores/motores e 7 inversores/motores ligados.....	81
5.1.8 Aplicando ANOVA entre os cenários: 7 inversores/motores e 8 inversores/motores ligados.....	82
5.1.9 Aplicando ANOVA entre os cenários: 8 inversores/motores e 9 inversores/motores ligados.....	82
5.1.10 Aplicando ANOVA entre os cenários: 9 inversores/motores e 10 inversores/motores ligados.....	83
5.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DAS QUATRO MODULAÇÕES UTILIZADAS NO TRABALHO	84
5.3 VERIFICANDO SE A QUALIDADE DA COMUNICAÇÃO PLC ESTÁ RELACIONADA COM O POSICIONAMENTO DO RUÍDO ENTRE O MODEM EMISSOR-RECEPTOR.....	86
5.3.1 Acionamento Crescente: Resultados obtidos com a modulação BPSK e ROBO.....	87

5.3.2 Acionamento Decrescente: Resultados obtidos com a modulação ROBO e BPSK.....	89
5.3.3 Alongando a distância entre o modem Emissor/Receptor e a fonte Ruidosa.....	90
5.3.3.1 Alongando a distância entre o modem emissor e a fonte ruidosa.....	90
5.3.3.2 Alongando a distância entre o modem receptor e a fonte ruidosa	92
5.3.3.3 Avaliando a Indutância do cabeamento entre o Emissor/Receptor e a fonte Ruidosa	94
5.3.3.3.1 <i>Inserção de bobinas entre o modem emissor e a fonte ruidosa.....</i>	94
5.3.3.3.2 <i>Inserção de bobinas entre o modem receptor e a fonte ruidosa</i>	96
5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	97
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
REFERÊNCIAS.....	102
APÊNDICE A - Espectros de frequência obtidos durante a realização dos experimentos	107
APÊNDICE B - Primeira fase de ensaios experimentais.....	119
APÊNDICE C - Segunda fase de ensaios experimentais	131

1 INTRODUÇÃO

A comunicação via rede elétrica não é considerada uma tecnologia recente no mundo e sim sua utilização para aplicações industriais. O primeiro registro do uso dessa tecnologia foi em 1922 utilizando a linha de alta tensão como meio, cujo a finalidade era realizar a transmissão de dados entre subestações, embora em 1838 o uso dessa técnica foi proposto pelo Inglês Edward Davy para monitorar os níveis de baterias de estações longes da linha de telégrafo, entre Londres e Liverpool (CARCELLE, 2009; FERREIRA et al., 2010).

De acordo com FERREIRA et al. (2010), o desenvolvimento da tecnologia PLC ocorreu junto com o avanço das técnicas de modulação, considerando que a rede elétrica é um canal de comunicação muito ruidoso, pois em redes de corrente alternada existe: ruído harmônico, ruído impulsivo e atenuação de acordo com a frequência utilizada.

Diante dessa evolução e os recentes estudos sobre a fusão da rede de distribuição de energia com infraestruturas de comunicação, denominada *Smart Grids*, a comunicação via rede elétrica tornou-se uma forte área de estudos para interligar esses meios, pelo principal fato de não necessitar da instalação de fios adicionais. Trata-se de uma alternativa mais econômica e de fácil instalação.

A utilização da tecnologia *Power Line Communication* (PLC) possibilita diversas vantagens quando comparada a comunicação sem fio (MLYNEK et al., 2014). A transmissão sem fio (*wireless*), embora de fácil instalação, oferece um alto custo e está sujeito às variações climáticas e a localização do transmissor/receptor, visto que sinais de alta frequências utilizados nesses transmissores normalmente necessitam de visada direta da antena, ou seja, paredes e elevações podem prejudicar a transmissão e diminuir a confiabilidade do sistema (PEREIRA, 2014).

Os sistemas PLC podem ser divididos em grupos de acordo com as bandas de frequências alocadas para operação. Pode-se classificar de maneira geral os sistemas PLC em dois grupos: NBPLC (*Narrowband Power Line Communication Scorecard*), também conhecido como PLC de banda estreita, e BPLC (*Broadband Power Line Communication*), conhecido como PLC de banda larga (MLYNEK et al., 2014).

PLC de banda larga é recomendado para aplicações e soluções para *Smart Home* (MLYNEK; MISUREC,; KOUTNY, 2012), enquanto a utilização de sistemas

PLC de banda estreita, parece ser mais apropriada para aquisição de dados remota e sistemas automáticos de medição (OKSA et al., 2006).

No Brasil, ainda não existe uma regulamentação para a comunicação PLC de banda estreita. A ANATEL que é a entidade Brasileira vinculada ao Ministério das Telecomunicações, criada em 1997, tem como missão promover o desenvolvimento das telecomunicações do País visando adotar uma moderna e eficiente infraestrutura de telecomunicações (ANATEL, 2015).

Segundo a resolução nacional nº 527/2009 da ANATEL, que trata do Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências por Sistemas de Banda Larga por meio de Redes de Energia Elétrica, a faixa do espectro de frequências regulamentada para operação está compreendida entre 1,705 MHz e 30 MHz e limitada a aplicações de banda larga.

De acordo com Hoch (2011), a tecnologia PLC não foi padronizado por um longo tempo a nível mundial também, mas algumas normas foram estabelecidas como a EN 50065-1. Além dos esforços para padronização do PLC de banda larga, utilizado para acesso à internet (padrão: IEEE P1901.1). Também vem sendo discutido a padronização do PLC de banda estreita (padrão: IEEE 1901.2), para aplicações de redes inteligentes, denominadas *Smart Grids*.

O padrão IEEE 1901.2 tem como objetivo ser um padrão mundial para comunicação de PLCs que operem em frequências de até 500 kHz com taxa de transmissão de dados de até 500 kbps (IEEE, 2016). Segundo a associação de padrões IEEE, o padrão deve coexistir com outras tecnologias garantindo a interoperabilidade e também segurança. Para o emergente padrão IEEE 1901.2 para PLCs de banda estreita existem duas propostas relacionadas a camada física e controle de acesso ao meio PLC conhecidas como PRIME e G3-PLC (HOCH, 2011).

De acordo com Xiaolin e Oliver (2012), o padrão G3-PLC (detalhado na Seção 3.1) torna-se mais atrativo devido à maior robustez apresentada, visto que o sistema PLC deve operar em diferentes tipos de ambientes com vários tipos de interferências. A característica do padrão G3-PLC em atravessar transformadores sem o uso de acopladores, também é uma característica extremamente importante para o uso em ambiente industrial.

O padrão G3-PLC, modula o espectro de frequência utilizando a técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), a transmissão acontece de forma paralela ou multiplexada como uma alternativa para aliviar os problemas do

sistema serial (como o desvanecimento seletivo) que utiliza modulação com portadora simples. A técnica de transmissão OFDM consiste na transmissão paralela de dados em subportadoras ortogonais e podem ser moduladas utilizando técnicas conhecidas como BPSK, QPSK ou 8PSK. Pode-se ainda modular as subportadoras utilizando o modo ROBO, modo intitulado robusto (ERDF, 2009). A modulação ROBO é uma variação da modulação BPSK, especialmente desenvolvida para operar sob condições de ruídos elevados.

A tecnologia PLC pode ser utilizada como uma alternativa em ambiente industrial sem a necessidade de instalação de um meio físico específico para transmissão de dados, tornando uma hipótese financeiramente viável. Entretanto, além do aspecto financeiro, o ambiente industrial necessita de outros requisitos como confiabilidade, qualidade de sinal, segurança, distância de transmissão, atraso de sinal, entre outros parâmetros.

Uma outra alternativa de expansão de rede sem a instalação de novos cabos poderia ser a utilização de comunicação sem fio. Entretanto, a comunicação sem fio (*wireless*) oferece um alto custo de instalação, devido a necessidade de utilizar equipamentos específicos (roteadores, repetidores, etc.) e apresenta vários limitadores em ambientes com ruídos eletromagnéticos e com a necessidade de transposição de estruturas físicas como paredes e lajes.

De modo a verificar alguns requisitos industriais, diversos aspectos devem ser avaliados para se atender aos requisitos de utilização da tecnologia PLC em ambientes industriais, os quais dependem diretamente da aplicação. Segundo Leme, Trojan e Xavier, (2015), essa tecnologia pode ser utilizada com robustez e segurança na realização de manutenção preventiva das máquinas presentes em ambientes industriais ou até mesmo em leituras de variáveis que não sejam críticas.

A escolha de parâmetros como o protocolo de comunicação adequado, a técnica de modulação e demodulação do sinal e as características físicas do cenário onde o sistema PLC é utilizado influenciam no desempenho do sistema.

Neste contexto, a análise experimental do comportamento e do desempenho do protocolo G3-PLC de comunicação que possibilite a transmissão de dados via rede elétrica em ambiente industrial é apresentado nesse trabalho, de modo a avaliar a viabilidade técnica desta técnica em ambientes industriais através da análise da interferência dos ruídos causados pelos inversores/motores inseridos controladamente neste ambiente.

1.1 OBJETIVOS

Esta sessão apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação de mestrado.

1.1.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica da utilização do padrão G3-PLC de comunicação pela rede elétrica, para o monitoramento de variáveis em ambiente industrial, através da variação de topologia, inserção de ruídos e avaliação de técnicas de modulação.

1.1.2 Específicos

Para atingir o objetivo proposto, alguns objetivos específicos são requeridos, entre eles:

- Estudar as características da comunicação via rede elétrica de banda estreita (PLC), visando seu uso em aplicações industriais;
- Estudar o funcionamento do padrão G3-PLC e suas modulações;
- Estudar o funcionamento do kit de desenvolvimento PLC (TMDSPCKITV4-CEN) da Texas Instruments utilizado nesse trabalho, bem como, as possibilidades de parametrizações e configurações para realizar os experimentos;
- Propor diferentes cenários que possam simular o ambiente industrial em laboratório;
- Definição de uma metodologia que permita avaliar de forma empírica a comunicação PLC para monitoramento de variáveis em ambientes industriais, avaliando inserção controlada de ruído, posição da fonte de ruído e distância entre transmissor e receptor;
- Avaliar os resultados obtidos nos diferentes cenários de ensaios propostos.

1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Com o aumento dos serviços de comunicação de dados, torna-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para realizar a transmissão dos dados gerados em diferentes ambientes. A transmissão de dados através da rede elétrica, conhecida como PLC (*Power Line Communication*) possibilita a criação de uma rede de transmissão de dados sem a necessidade da instalação de novos cabos para o estabelecimento da comunicação.

A transmissão de dados através da rede elétrica pode ser aplicada nos mais diferentes ambientes, sendo mais comum no ambiente residencial. Diante do estado da arte levantado sobre essa tecnologia, constatou-se a escassez de materiais que abordam a utilização de PLC em ambientes industriais.

Um ambiente industrial é caracterizado por normalmente ser suscetível a elevados níveis de ruídos eletromagnéticos e diversas fontes de ruídos que distorcem o sinal da rede elétrica como a inserção de transitórios e variação de impedâncias, o que pode afetar diretamente qualquer sistema de comunicação inserido neste ambiente.

A partir da constatação de que ainda há poucas pesquisas sobre aplicações industriais para PLC, surgiu a oportunidade de explorar essa tecnologia aplicada em ambiente industrial, buscando uma avaliação experimental.

No Brasil, os sistemas PLC foram regulamentados para aplicações de banda larga através das resoluções normativas número 527/2009 e 375/2009 das agências ANATEL e ANEEL, respectivamente. Diretrizes e horizontes para utilização de sistemas PLC que operem na faixa de banda estreita ainda não foram estabelecidos.

Face ao exposto acima, este trabalho foi iniciado com uma pesquisa qualitativa através do levantamento de bibliografias relacionadas à comunicação PLC, sistemas de transmissão de dados e protocolos de comunicação. Após essa etapa, foi realizado um trabalho quantitativo com diversos testes utilizando o kit PLC TMDSPCKITV4-CEN, configurado com o padrão G3-PLC para realizar o envio/recebimento dos dados através de uma rede elétrica industrial simulada no laboratório de acionamento de máquinas da UTFPR-PG, utilizando uma metodologia de controle de inserção de ruídos baseado no acionamento controlado de inversores de frequência e motores.

1.3 METODOLOGIA

Utilizou-se uma metodologia exploratória baseada em métodos empíricos para desenvolvimento das análises propostas nesta dissertação. Para tal, foi utilizado o kit de desenvolvimento C2000 *Power Line Communication* TMDSPCKITV4-CEN da Texas Instruments. A versão TMDSPCKITV4-CEN é destinada ao desenvolvimento de aplicações de comunicação PLC de banda estreita através da banda de frequência CENELEC (35 kHz – 121 kHz). Esta plataforma de desenvolvimento é compatível com os padrões G3-PLC e PRIME.

Foi utilizado o software de envio/recebimento de pacotes nominado “Intermediate”, fornecido pela própria fabricante do kit (Texas Instruments). Nessa ferramenta foi possível ajustar os diversos parâmetros de configuração dos modems (modo transmissor ou receptor, banda de frequência, técnica de modulação e tamanho do pacote) e o monitoramento da comunicação, entre eles (estimação da velocidade de comunicação de dados, taxa de pacotes com erro e taxa de bits com erro).

Para realizar os experimentos foram elaborados diferentes cenários com o objetivo de simular diferentes situações oriundas dos ambientes industriais. Nestes cenários, a simulação da variação de ruído industrial foi realizada através do acionamento controlado de diversos inversores de frequência e motores. Nestes ensaios, foram considerados os ruídos de iluminação, ruídos aleatórios inerentes da rede de alimentação e também foram averiguados os comprimentos de cabo elétrico e posição do transmissor e receptor nas topologias analisadas. A metodologia experimental é descrita em detalhes no capítulo 4.

Para avaliar os resultados, utilizaram-se métricas estatísticas apresentadas na seção 4.5 e os resultados obtidos são apresentados no capítulo 5.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além dessa introdução, este trabalho contém mais 5 (cinco) capítulos.

O **Capítulo 2** apresenta uma breve descrição sobre a comunicação de dados em ambiente industrial, bem como algumas características.

O **Capítulo 3** apresenta o funcionamento da tecnologia PLC e suas características. Em especial, descreve detalhadamente o protocolo G3-PLC e aborda a questão de ruído em uma linha de energia.

O **Capítulo 4** descreve a metodologia experimental e os cenários avaliados, métodos estatísticos e também descreve os materiais e equipamentos utilizados nesse trabalho, em especial o kit de comunicação PLC TDMSPLCKIT-V4 e o software de análise utilizado.

O **Capítulo 5** apresenta os resultados obtidos nos diferentes cenários de ensaios. Esses experimentos visam extrair o comportamento da comunicação PLC em ambientes com diferentes características físicas existentes em um ambiente industrial.

O **Capítulo 6** apresenta as considerações e algumas propostas para trabalhos futuros.

2 COMUNICAÇÃO DE DADOS NA INDÚSTRIA

Comunicação de dados são as trocas de dados entre dois ou mais dispositivos por intermédio de um meio de transmissão, como um cabo condutor formado por fios. Na indústria, a comunicação de dados surgiu da necessidade de interligar computadores e CLP (Controladores Lógicos Programáveis). Essa conexão em rede possibilitou o compartilhamento de recursos e base de dados, que passaram a serem únicos, o que possibilitou mais segurança aos usuários.

Uma rede é um conjunto de dispositivos (normalmente conhecido como nós) conectados por links de comunicação. Segundo Forouzan (2009), um nó pode ser um computador, uma impressora ou outro dispositivo de envio/recepção de dados, que estejam conectados a outros nós da rede. E ainda, deve ser capaz de atender alguns critérios, como: desempenho, confiabilidade e segurança.

O desempenho das redes depende de vários fatores, como número de usuários, tipos de meios de transmissão, capacidades de hardware conectado e a eficiência da rede pode ser medida por vários parâmetros, como: tempo de envio/recebimento da mensagem, tempo entre a solicitação e a resposta. Esses parâmetros geralmente são avaliados por duas métricas, capacidade de vazão (*throughput*) e atraso (*delay*). Normalmente é necessária mais capacidade de vazão e menos atraso, entretanto se for enviado mais dados para a rede, pode aumentar o *throughput*, mas o *delay* acaba aumentando em virtude do congestionamento da rede.

A confiabilidade das redes é medida pela frequência de falhas, pelo tempo que um link leva para se recuperar de uma falha e pela robustez da rede em caso de uma catástrofe. E entre as principais questões de segurança que uma rede deve atender, destaca-se: proteção ao acesso não autorizado de dados, proteção dos dados contra danos e o desenvolvimento e implementação de políticas e procedimentos para a recuperação de violações e perda de dados.

Para tornar possível a implementação de qualquer tipo de rede, seja de curta, média ou longa distância. Onde existem equipamentos de diversos fabricante, que operam de maneira diferente, a Organização Internacional de Normalização (ISO – *International Standards Organization*), uma das principais organizações no que se refere ao desenvolvimento de padrões de comunicação de âmbito mundial,

aprovou, no início da década de 1980, um modelo de arquitetura para sistemas abertos, visando permitir a comunicação entre máquinas heterogêneas, definindo diretivas diretas para a construção de redes independente da tecnologia implementada.

A arquitetura de uma rede é formada por camadas (níveis), interfaces e protocolos. As camadas são processos implementados por hardware ou software que se comunicam com o processo correspondente na outra máquina. Cada camada oferece um conjunto de serviços ao nível superior, usando funções realizadas no próprio nível e serviços disponíveis nos níveis inferiores.

2.1 REDES INDUSTRIAIS

Com o desenvolvimento da indústria, tornou-se cada vez mais necessário interligar os equipamentos presentes em uma planta industrial. Para que assim, os mesmos possam se comunicar e compartilhar informações no intuito de aperfeiçoar o processo de produção, aumentando o processo produtivo, diminuindo insumo e até mesmo mão de obra.

A rede de controle industrial é um sistema de equipamentos interconectados usados para monitoramento e controle de equipamentos físicos em ambiente industrial (GALLOWAY; HANCKE, 2013). Essas redes são de grande importância para as empresas, em virtude da grande quantidade de informação que são utilizadas para as mais diversas aplicações, supervisionar e controlar um determinado processo, uma troca rápida e precisa de informações entre sensores, atuadores, computadores, CLPs, entre outros.

A diferença essencial entre redes comerciais e industriais é que redes industriais estão conectadas a equipamentos físicos e são usadas para controlar e monitorar condições e ações do mundo real (STOUFFER; FALCO; SCARFONE, 2008).

De acordo com Albuquerque e Alexandria (2009), as redes utilizadas para aplicações industriais possuem características peculiares a este tipo de aplicação. Modularidade, confiabilidade, interoperabilidade e grande desempenho, são características essenciais. Algumas das principais diferenças entre as redes comerciais e redes industriais são ilustradas no Quadro 1.

Quadro 1 - Diferenças típicas entre redes comerciais e industriais.

	Redes Industriais	Redes Comerciais
Função Principal	Controle de equipamentos físicos	Processamento e transferência de dados
Domínio de Aplicação	Manufatura e processamento de dados	Ambiente corporativo ou residencial
Gravidade de Falhas	Grave	Baixa
Nível de Confiabilidade	Alta	Baixa
<i>Roud Trip Time</i>	250 μ s - 10 ms	Podendo ser maiores que 50 ms
Determinismo	Alto	Baixo
Composição dos Dados	Pequenos pacotes, tráfego periódico e aperiódico	Grandes pacotes, tráfego aperiódico
Consistência Temporal	Necessária	Não necessita
Ambiente de operação	Condições hostis, muitas vezes com elevados níveis de poeira, calor e vibração	Ambientes limpos, muitas vezes especialmente destinados a equipamentos sensíveis
Nível	Profundo, funcionalidade separadas hierarquicamente com vários protocolos e padrões físicos	Raso, hierarquias integradas com um protocolo uniforme e utilização de um padrão físico

Fonte: Adaptado de Galloway e Hancke (2013).

Segundo Moyne e Tilbury (2007) as informações transmitidas em redes industriais podem ser classificadas em três tipos: informações de controle, diagnóstico e segurança.

As informações relacionadas ao controle e segurança de equipamentos devem apresentar características como alto determinismo e tempo real, ao contrário de informações de diagnóstico que são utilizadas para monitorar o estado de equipamentos presentes nos mais diversos processos industriais.

Visando atender as especificações da indústria diversas tecnologias foram desenvolvidas ao longo dos anos. Segundo Lugli e Santos (2010), atualmente existem diversas tecnologias para realizar a comunicação dos dispositivos presentes em ambientes industriais, tais como: AS-I, DeviceNet, Ethernet, entre outras.

2.2 AS-I – INTERFACE SENSOR ATUADOR

O protocolo AS-I (*Actuador Sensor Interface*) foi desenvolvido através de um consórcio de 11 empresas europeias e introduzida no mercado como uma das mais inovadoras soluções de redes para sensores e atuadores.

De acordo com Smar (2016a), existem 3 (três) especificações para esse protocolo:

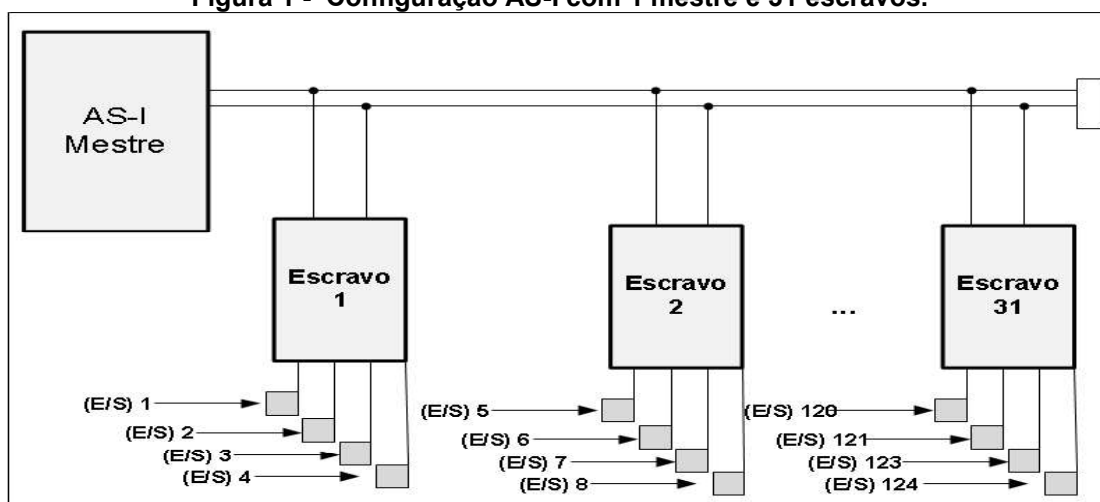
- a) Especificação original (1994, Versão: 2.04): Os módulos (escravos) de interligação dos elementos finais permitem a conexão de quatro entradas digitais e quatro saídas digitais, resultando no total de 124

entradas e 124 saídas em uma única rede. Porém, nessa arquitetura, o número máximo de escravos é limitado a 31.

- b) Inclusão de melhorias (1998, Versão: 2.14): Foi ampliado de 31 para 62 escravos, a capacidade máxima do barramento passou para 248 + 168 E/S, mas o tempo de ciclo passou para 10 ms.
- c) Características adicionais (2005/2007, Versão: 3.0): Por conta do sucesso mundial da rede AS-I, com aproximadamente 10 milhões de nós em operação, promoveu a operação de novos requisitos para a rede, tais como: nós de E/S discretas suportando endereçamento estendido (A/B) com 4 entradas e 8 saídas; nós de E/S discretas suportando endereçamento estendido (A/B) com 8 entradas e 8 saídas; canal analógico configurável (8,12 ou 16 bits); canal de dados discreto com comunicação serial *full-duplex*;

Uma configuração típica dessa tecnologia é ilustrada na Figura 1, onde os módulos escravos (de no máximo 31 unidades) são os periféricos com interfaces de Entrada e Saída (E/S) que recebe informações do processo mestre para atuar na planta industrial através de suas portas de saída (S), onde se encontram os atuadores. As portas de entrada (E) servem para fazer a leitura de variáveis que monitoram o ambiente para que o sistema possa atuar.

Figura 1 - Configuração AS-I com 1 mestre e 31 escravos.



Fonte: Borges (2007).

Segundo Borges (2007), o comprimento máximo de cabo para cada escravo é de 100 metros sem repetidores, com repetidores pode ir até 300 metros. E durante a operação normal é possível adicionar escravos, sem interferir na comunicação dos outros nós.

2.3 DEVICENET

O protocolo DeviceNet foi desenvolvido pela Allen-Bradley, tornou-se um protocolo aberto com a criação da *Open DeviceNet Vendors Association (ODVA)*. Permite conectar sensores, atuadores e sistemas de automação industrial em geral à uma rede e realizar a comunicação entre os dispositivos e diagnóstico de falhas. A transferência de dados se dá segundo o modelo produtor e consumidor (SMAR, 2016b). As características desse protocolo são apresentadas Quadro 2.

Quadro 2 - Características do protocolo DeviceNet.

Número de Nós	No máximo 64	
Taxa de Comunicação e Distância Máxima (ou alcance)	Taxa de Comunicação	Distância Máxima
	125 Kbps	500 metros
	250 Kbps	250 metros
	500 Kbps	100 metros
Tamanho do Pacote de Dados	0 a 8 Bytes	
Meio Físico	Barramentos separados de par trançado para a distribuição de sinal e de alimentação (24VCC), ambos no mesmo cabo	

Fonte: Adaptado de Smar (2016b).

2.4 ETHERNET INDUSTRIAL

O protocolo Ethernet não foi inicialmente desenvolvido para aplicações industriais, pois não apresentava algumas características necessárias em ambientes de controle em tempo real, como determinismo e segurança na transmissão de dados. Entretanto, o protocolo Ethernet é considerado a tecnologia de rede mais difundida, permitindo uma grande escala de produção e disponibilidade,

consequentemente proporcionando baixo custo. Tornando-se uma alternativa bastante atrativa para interconexões de dispositivos de automação.

De acordo com Seixas Filho (2003), a rede Ethernet passou por uma longa evolução nos últimos anos se constituindo na rede de mais faixa e desempenho para uma variada gama de aplicações industriais. O protocolo Ethernet foi inicialmente concebido para ser uma rede de barramento *multidrop* (10Base 5) com conector do tipo vampiro (*piercing*), mas este sistema mostrou-se de baixa praticidade. A evolução se deu em direção de uma topologia estrela com par trançado, aumentando a velocidade de 10 Mbps para 100 Mbps e agora já alcança 1 Gbps (IEEE802.3z ou Gigabit Ethernet).

Outra evolução se deu no uso de *hubs* inteligentes com capacidade de comutação de mensagens e no uso de cabos *full-duplex*, substituindo os cabos *half-duplex*. Tornando a rede determinística, reduzindo a probabilidade de colisão de dados. Algumas características desse protocolo são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Características do protocolo Ethernet.

Número de Nós	2 ¹¹ ou 2 ²⁹ em modos estendidos	
Taxa de Transmissão	A taxa de transmissão varia de acordo com o cabeamento utilizado: 10/100 Mb/s e 1 Gb/s	
Tamanho da Rede	Tipo	Comprimento
	10Base5	500 metros
	10Base2	200 metros
	10BaseT, 100BaseTx	100 metros
	Fibra Ótica mono modo com <i>switches</i>	Até 50 km
Conectores	RJ45 ou coaxiais	
Tamanho dos Pacotes de Dados	Até 1500 Bytes	

Fonte: Adaptado de Seixas Filho (2003).

2.5 TECNOLOGIAS EMERGENTES DE REDES DE COMUNICAÇÃO

Esta Seção apresenta um breve relato sobre as tecnologias de comunicação emergentes que vem sendo utilizadas em ambientes industriais.

2.5.1 Redes sem Fio (Wireless)

As tecnologias de redes sem fio têm apresentado grande potencial para aplicações industriais, comerciais e de consumo. Principalmente no controle de variáveis do tipo (pressão, umidade, temperatura, vazão, nível, densidade, viscosidade, medições de intensidade de vibração e etc.), que são coletados através de unidades de detecção e transferidos sem fio para um sistema de controle para operação e gestão. As redes sem fio, assim como as redes cabeadas são classificadas de acordo com a sua abrangência (TELECO, 2016a). O Quadro 4 apresenta a divisão desses grupos.

Quadro 4 - Classificação dos protocolos de comunicação Wireless.

Classificação	Padrão (IEEE)	Distâncias Máximas	Denominação
WMAN (rede sem fio metropolitana)	802.16	Quilômetros	WiMax
WLAN (rede sem fio local)	802.11	Centenas de metros	Wi-Fi
WPAN (rede sem fio pessoal)	802.15	Dezenas de Metros	ZigBee, WirelessHART, Bluetooth, Wimedia

Fonte: Adaptado de Teleco (2016a).

Para uso industrial, existem alguns padrões de comunicação sem fio utilizados e dentre os principais estão: ZigBee (Padrão IEEE 802.15.4), Wireless HART, entre outros.

2.5.1.1 ZigBee

O protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4) foi desenvolvido pelo *ZigBee Alliance*, permite comunicação robusta e opera na frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), 868 MHz (1 canal), 915 MHz (10 canais) e 2,4 GHz (16 canais), e não requer licença para funcionamento.

Este protocolo proporciona boa imunidade contra interferências e a capacidade de hospedar milhares de dispositivos em uma só rede (cerca de 65.000) com taxa de transferência de dados variando entre 20 kbps e 250 kbps (ZIGBEE ALLIANCE, 2016).

2.5.1.2 WirelessHART

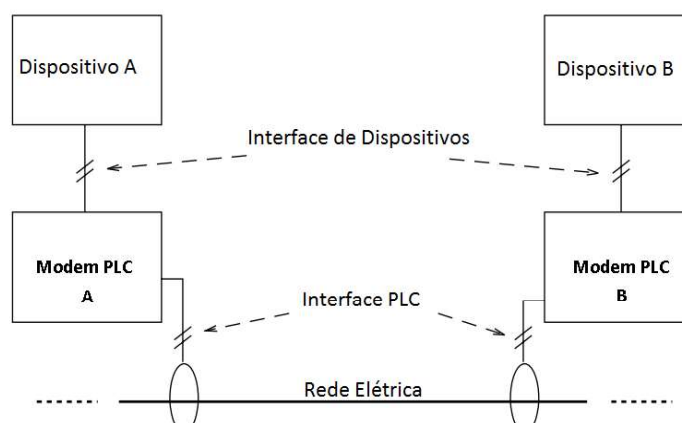
O protocolo WirelessHART (IEEE 802.15.4) foi desenvolvido pela *HART Communication Foundation*, trabalha na frequência de 2,4 GHz, proporciona uma comunicação robusta para toda a gama de medição de processo, controle e aplicativos de gerenciamento de ativos. Segundo Fieldcomm (2016), o dispositivo WirelessHART é autônomo, eliminando as conexões analógicas, podendo ser instalado em qualquer local da planta industrial sem a necessidade de fios.

As variáveis lidas estão conectadas a um sistema de controle ou de gerenciamento através de um *Gateway*, possibilitando a comunicação dos instrumentos e o sistema de controle.

3 COMUNICAÇÃO VIA REDE ELÉTRICA (PLC - POWER LINE COMMUNICATION)

A comunicação de dados via rede elétrica teve suas primeiras implementações desenvolvidas no século anterior para automação das redes de distribuição de alta e média tensão (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004). A Figura 2 mostra um sistema de comunicação PLC, onde a informação a ser transmitida é modulada em alta frequência e então transportada pela rede elétrica através da sobreposição do sinal modulado com o sinal presente na rede elétrica.

Figura 2 - Diagrama de Comunicação através da Rede Elétrica



Fonte: Adaptado de Hrasnica, Haidine e lehnert (2004).

O canal PLC apresenta condições hostis para transmissão de sinais de comunicação, tais como a presença de ruídos e interferências (GALLI; SCAGLIONE; WANG, 2011). De modo geral, os sistemas PLC podem se dividir em duas classes: PLC de banda estreita (*Narrowband PLC*) e banda larga (*Broadband PLC*) (MLYNEK et al., 2014).

O PLC de banda estreita opera em bandas de baixa e médias frequências (3-500 kHz), suas faixas de frequências são determinadas por entidades regulamentadoras tais como a ARIB, US FCC e também a CENELEC (GALLI; SCAGLIONE; WANG, 2011). A utilização do canal PLC de banda estreita apresenta-se como uma técnica apropriada para aquisição de dados e sistemas de medição inteligentes (OKSA et al., 2006).

O PLC de banda larga opera em frequências consideradas altas e que podem variar entre 1,8 e 250 MHz, superiores as utilizadas para banda estreita

(GALLI; SCAGLIONE; WANG, 2011). O canal PLC de banda larga é adequado para aplicações *Smart Home* e também para construção de pequenas redes LAN (Local Area Network) (MLYNEK; MISUREC; KOUTNY, 2013).

Corroborando, um sistema PLC é caracterizado por tornar possível a transmissão de dados, utilizando o mesmo meio físico que é usado para distribuição da energia elétrica. Por meio dessa tecnologia, os sinais de telecomunicação se propagam por redes de energia elétrica sem que haja interferência nos mesmos.

Diversos estudos e propostas vem sendo apresentados pelas agências regulamentadoras da tecnologia PLC para que haja um padrão de comunicação comum a todos. De acordo com a associação de padrões IEEE (CHANDNA; ZAHIDA, 2010), o padrão 1901.2 tem como objetivo ser um padrão mundial para comunicação de PLC's que operem em frequências de até 500 kHz com taxa de transmissão de dados de até 500 kbps. Ainda, segundo a associação de padrões IEEE, o padrão deve coexistir com outras tecnologias garantindo a interoperabilidade e também segurança.

Esta tecnologia, dependendo do estado das linhas de transmissão de energia elétrica pode alcançar a partir de centenas de metros até alguns quilômetros (SENDIN; PEÑA; ANGUEIRA, 2014). A tecnologia PLC de banda estreita podem ser classificadas ainda como:

- Baixa taxa de transmissão (*Low Data Rate* - LDR): Tecnologia que utiliza apenas uma portadora, capaz de transmitir alguns kbps.
- Alta taxa de transmissão (*High Data Rate* - HDR): Tecnologia que utiliza multiportadoras capazes de transmitir centenas de kbps.

Segundo o padrão IEEE 1901.2 para PLC's de banda estreita existem duas propostas relacionadas a camada física e controle de acesso ao meio PLC conhecidas como G3 e PRIME (HOCH, 2011).

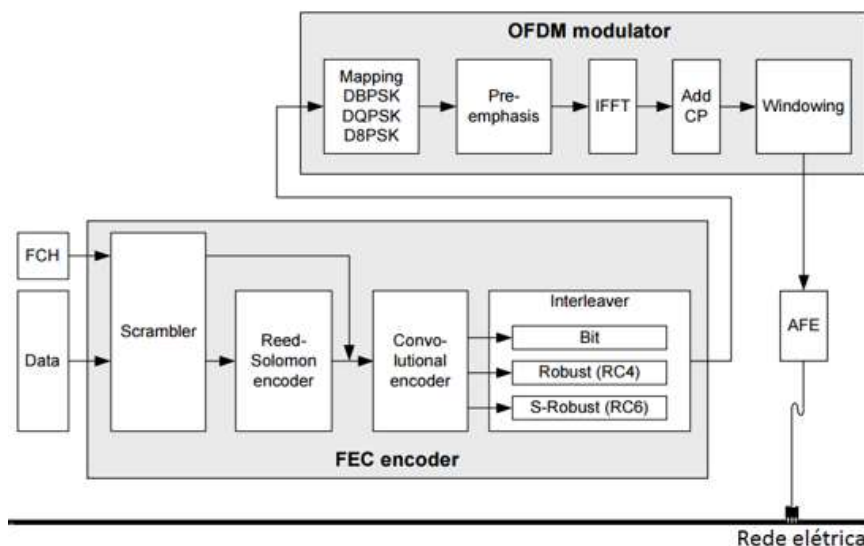
De acordo com Xiaolin e Oliver (2012), o padrão G3-PLC torna-se mais atrativo devido a maior robustez apresentada, visto que o sistema PLC deve operar em diferentes tipos de ambientes com vários tipos de interferências. A característica do padrão G3-PLC em atravessar transformadores sem o uso de acopladores, também é uma característica extremamente importante para o uso em ambiente industrial.

3.1 FUNCIONAMENTO DO PADRÃO G3-PLC

O padrão G3-PLC, pode operar em dois diferentes modos, intitulados normal e robusto. A banda alocada para comunicação do sistema PLC é dividida em subportadoras que são moduladas utilizando a técnica de modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), descrito em detalhes na Seção 3.2. Através dos blocos de codificação convolucional e Reed-Solomon preveem-se bits de redundância, tornando o receptor capaz de recuperar bits perdidos em função de ruídos no canal (ERDF, 2009).

O diagrama de blocos do transmissor do sinal PLC é ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama de blocos do transmissor operando no Padrão G3-PLC.

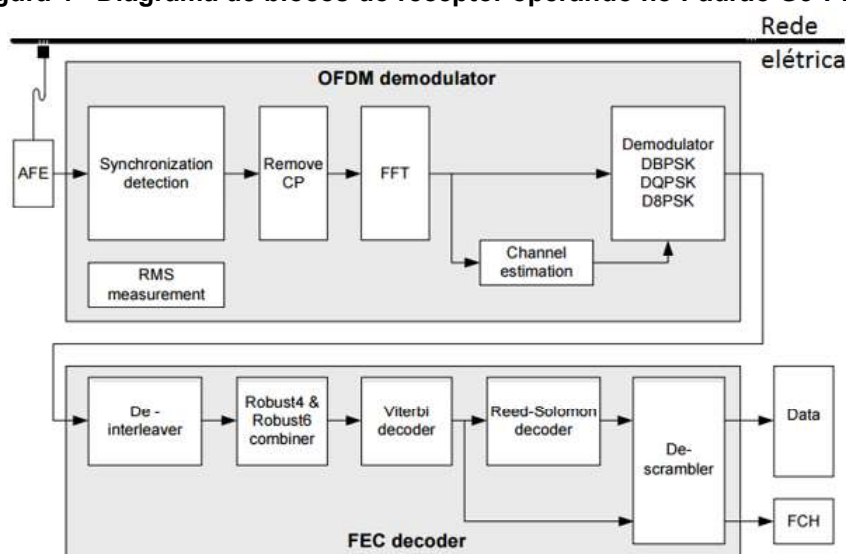


Fonte: Adaptado de Erdf (2009).

O diagrama de blocos do receptor do sinal no padrão G3-PLC é apresentado na Figura 4.

No modo normal, o codificador FEC é composto por um codificador de Reed-Solomon (com 16 bytes de paridade) e um codificador convolucional. No modo robusto (ROBO), o codificador FEC é composto por um codificador Reed-Solomon (com 8 bytes de paridade) e um codificador convolucional seguido de um código de repetição (RC). Quando operando em modo robusto, o codificador RC repete cada bit 4 vezes, tornando o sistema mais robusto a condições adversas, entretanto a taxa de transferência é menor que a das outras modulações (ERDF, 2009).

Figura 4 - Diagrama de blocos do receptor operando no Padrão G3-PLC.



Fonte: Adaptado de Erdf (2009).

Abaixo é descrito em detalhes o funcionamento das quatro modulações utilizadas nesse trabalho, além da modulação OFDM utilizada para dividir as subportadoras.

3.2 MODULAÇÃO OFDM

O termo OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) designa a Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência. De acordo com Anatory e Theethayi (2010), o esquema de modulação adotado deve garantir baixas taxas de erro por bit (BER – *Bit Error Rate*) mesmo para condições onde existem sinais com baixa relação de sinal ruído (SNR – *Signal-Noise Rate*), deve ocupar uma largura de banda mínima e possibilitar simplicidade e baixo custo na sua implementação. Em um sistema de transmissão de dados, informações como BER e SNR são figuras de mérito para qualificação de uma transmissão de dados. A taxa de erro por bit representa o número de bits com erro em relação ao número total de bits enviados. A relação sinal-ruído representa a relação entre a potência do sinal contendo informações e a potência do ruído de fundo.

Segundo Hrasnica, Haidine e Lehnert (2004), o canal PLC apresenta propriedades hostis para comunicação, tais como ruído, multi-caminhos e comportamentos não-lineares.

O esquema de modulação proposto deve ser capaz de operar com confiabilidade independentemente das condições adversas presentes no meio. A modulação OFDM oferece escalabilidade de largura de banda e vantagens como a flexibilidade e capacidade de selecionar subportadoras, onde interferências são mínimas (SHAVER; SU; POPA, 2013).

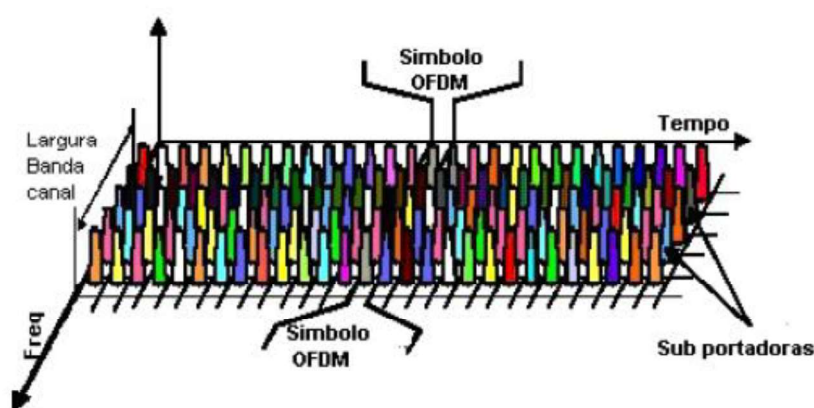
Esta técnica é altamente robusta no que diz respeito a comunicação em meios que apresentam condições adversas a comunicação (CARCELLE, 2009)

Técnicas de modulação multiportadora, em particular a OFDM, têm sido aplicadas com sucesso a uma grande variedade de aplicações digitais ao longo dos últimos anos (BAHAI; SALTZBERG; ERGEN, 2004).

3.2.1 Princípios da Modulação OFDM

O princípio da técnica OFDM é separar a banda de frequência em subportadoras (ver Figura 5) transportando parte da informação binária. As frequência destas sub-bandas são ortogonais e se sobrepõe para obter uma boa eficiência (CARCELLE, 2009). Os símbolos OFDM, representam a transformação dos símbolos seriais a serem transmitidos pelas subportadoras.

Figura 5 - Modulação OFDM.



Fonte: Adaptado de Batista (2008).

Em sistemas OFDM algumas subportadoras podem sofrer uma forte atenuação do canal, eventualmente ocasionando erros de transmissão.

De acordo com Chiueh, Tsai e Lai (2012), a utilização de técnicas de modulação, tais como a modulação adaptativa garante a diminuição de erros de transmissão.

3.2.2 Modulação Adaptativa OFDM

A modulação adaptativa OFDM é a técnica que adapta a ordem de modulação e transmissão de potência de cada uma das subportadoras, visando aumentar a robustez do sistema OFDM (CHIUEH; TSAI; LAI, 2012).

A escolha das subportadoras a serem utilizadas dependem intrinsecamente das características do canal onde se encontram, que atribuem ganhos ou atenuações resultantes da qualidade do canal.

Segundo Chiueh, Tsai e Lai (2012) o transmissor pode ajustar a frequência de cada subportadora dinamicamente para atingir uma melhor relação de taxa de erro (BER), potência de transmissão e taxa máxima de transmissão de acordo com as informações de estado do canal. Deste modo, cada subportadora pode ser modulada por diferentes técnicas de modulação, dependendo das condições que o canal oferece para cada região espectral de cada uma dessas subportadoras (TELECO, 2016b).

Por exemplo, uma subportadora situada em uma região espectral menos afetada pelas más condições do canal pode ser usado uma modulação mais robusta, como por exemplo a modulação BPSK. Enquanto, nas regiões menos afetada pelas más condições do canal pode ser utilizada uma modulação menos robusta, com maiores taxas de transmissão, como por exemplo a modulação QPSK.

Em um sistema OFDM, o fluxo de bits que chega à camada física, proveniente das camadas superiores para ser transmitido, é dividido em vários fluxos paralelos, onde cada subportadora carrega uma fração do total de bits que forma o fluxo principal. Deste modo, os bits são distribuídos pelas subportadoras, as quais podem fazer o mapeamento dos símbolos usando a modulação que for mais conveniente, o que permite a adaptação do espectro do sinal ao canal em que ele está sendo transmitido.

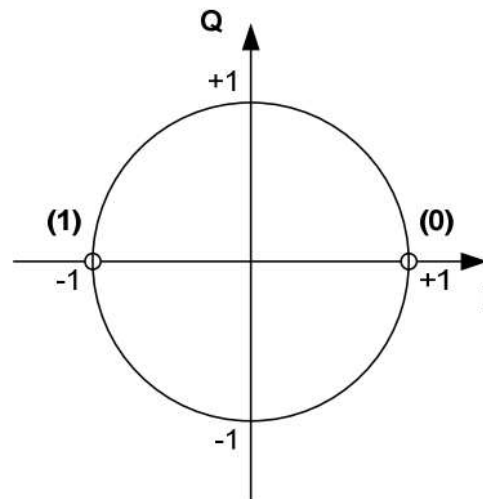
As subportadoras da OFDM são ortogonais entre si, e por isso não se interferem (em condições ideais), mesmo com seus espectros se sobrepondo. Em

sistemas que usam a tecnologia multiplexação por divisão de frequência (*Frequency Division Multiplexing* - FDM) pura, isto é, sem ortogonalidade, é necessária uma banda de guarda entre as portadoras vizinhas, para que não se interfiram.

3.3 MAPEAMENTO PARA AS MODULAÇÕES BPSK E ROBO

Na modulação BPSK e modo ROBO, um deslocamento de fase de 0° representa o binário 0 e um deslocamento de fase de 180° representa o binário 1, totalizando 2 símbolos possíveis conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama de constelação BPSK e ROBO.



Fonte: Erdf (2009).

A equação 1, ilustra matematicamente a destruição dos possíveis sinais em função da fase

$$s_i(t) = A \cdot \cos[2\pi \cdot f_c \cdot t + \varphi_i(t)] \quad (1)$$

em que A , é a amplitude do sinal, f_c a frequência da portadora e $\varphi_i(t)$ a variação da fase, de modo que

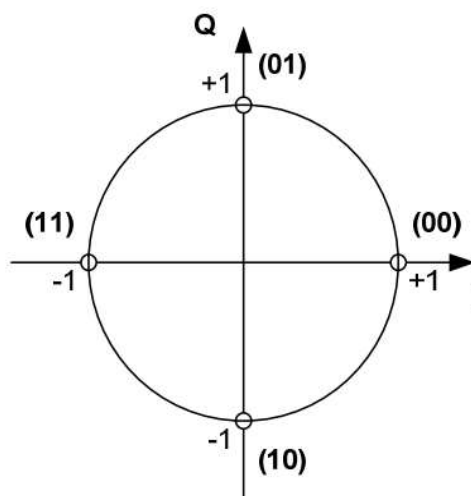
$$\varphi_i(t) = \pi(1-i) \quad (2)$$

para valores inteiros de $i = 1, 2$.

3.4 MAPEAMENTO PARA MODULAÇÃO QPSK

Na modulação QPSK um par de bits é mapeado em 4 diferentes deslocamentos de fase: 0° , 90° , 180° e 270° representando em binário 00, 01, 11 e 10, respectivamente. A Figura 7 apresenta o diagrama de constelação para esta técnica de modulação.

Figura 7 - Diagrama de constelação QPSK.



Fonte: Anatel (2015).

O comportamento do sinal na modulação 8PSK também baseia-se na equação 1, entretanto, para adequar as 8 opções de fase, o termo $\varphi_i(t)$ é descrito de acordo com a equação 3:

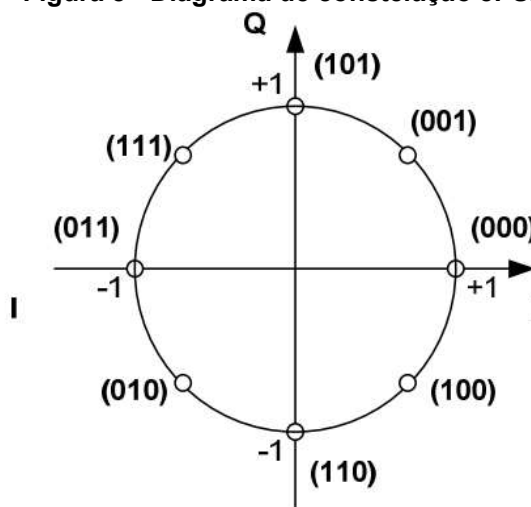
$$\varphi_i(t) = \frac{\pi}{4} (2.i - 1) \quad (3)$$

para valores inteiros de $i = 1, 2, 3$ e 4 .

3.5 MAPEAMENTO PARA MODULAÇÃO 8PSK

Na modulação 8PSK 3 bits são mapeados em 8 diferentes deslocamentos de fase: 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° e 315° representando 000, 001, 101, 111, 011, 010, 110 e 100, respectivamente. A Figura 8 mostra o diagrama de constelação para a modulação 8PSK.

Figura 8 - Diagrama de constelação 8PSK.



Fonte: Anatel (2015).

O comportamento do sinal na modulação 8PSK também baseia-se na equação 1, entretanto, para adequar as 8 opções de fase, o termo $\varphi_i(t)$ é descrito de acordo com a equação 4:

$$\varphi_i(t) = \frac{\pi}{8} (2.i - 1) \quad (4)$$

para valores inteiros de n de 1 até 8.

Ambas as modulações utilizadas nesse trabalho e apresentadas acima, utilizam a técnica de modulação por chaveamento de fase (PSK - *Phase Shift-Keying*). Modular uma onda portadora senoidal por chaveamento de fase consiste em alterar a fase instantânea da onda portadora em intervalos de tempo uniformemente espaçados. Tais intervalos podem ser denominados “intervalos de modulação”.

Em sua forma de implementação mais simples, o deslocamento de fase assume apenas dois valores. Como exemplo, podem ser utilizados deslocamento de 0° ou 180° , representando os bits 0 ou 1. Deslocamentos de ângulos menores que 180° também são possíveis, e muitas vezes desejáveis, por permitirem que uma quantidade maior de bits seja representada em um mesmo intervalo de tempo, aumentando a taxa de transmissão de dados.

Como exemplo, deslocamentos de 0°, 90°, 180° e 270° podem ser utilizados para representar os pares de bits 00, 01, 10, e 11, respectivamente. Se no primeiro e segundo exemplo o intervalo de tempo entre as sinalizações for o mesmo, a taxa de transmissão de dados do segundo caso em relação ao primeiro será duas vezes maior. A quantidade de deslocamentos adotada para uma dada modulação é comumente referenciada como “quantidade de símbolos” utilizada pela técnica de modulação (LOBATO, 2014).

Face ao exposto acima é possível perceber que a diferença conceitual básica entre BPSK, QPSK e 8PSK é a quantidade de símbolos utilizada, sendo estes valores 2, 4 e 8, respectivamente. As implicações técnicas da quantidade de símbolos utilizada por cada modulação geram um aumento da taxa máxima de transmissão de dados, proporcional à quantidade de símbolos utilizada, e uma imunidade a ruídos inversamente proporcional a essa mesma quantidade.

3.6 PADRÃO G3-PLC E SUA COMPATIBILIDADE COM AMBIENTES INDUSTRIAIS

O padrão G3-PLC é o principal concorrente do PRIME, utiliza a modulação OFDM para melhorar a confiabilidade dos dados e a taxa de transmissão. Segundo Erdf (2009), tem sido desenvolvido para atender os seguintes requisitos:

- Robustez: o perfil de comunicação do padrão G3-PLC deve ser adequado para ambientes severos;
- Desempenho: o padrão G3-PLC opera na banda CENELEC A;
- Simplicidade: o padrão G3-PLC deve possuir fácil implementação, fácil instalação (*Plug and Play*), operação e manutenção;
- Flexibilidade: o padrão G3-PLC deve ser compatível com diversas aplicações e topologias de rede;
- Segurança: o padrão G3-PLC deve ser um ambiente seguro para promoção de serviços de valor acrescentado;
- Não proprietário: o padrão G3-PLC deve ser baseado em padrões livres para possuir soluções de diversos fornecedores; e
- Escalabilidade: o padrão G3-PLC deve suportar todos os futuros desenvolvimentos de medição.

Com base nos requisitos especificados para o desenvolvimento do padrão, pode ser observado que o mesmo apresenta características adequadas para operação em ambientes industriais. A Seção 3.7 apresenta os órgãos regulamentadores da tecnologia PLC e suas respectivas bandas de frequências.

3.7 ENTIDADES DE PADRONIZAÇÃO DA TECNOLOGIA PLC

São 3 as principais entidades de padronização da tecnologia PLC: CENELEC, FCC e ARIB.

3.7.1 CENELEC

A CENELEC é uma organização sem fins lucrativos, fundada na Bélgica em 1973. Criado a partir da junção das organizações CENELCOM e CENEL, é responsável pela padronização no campo da engenharia eletrotécnica para União Europeia (CENELEC, 2016).

O Quadro 5 apresenta as bandas de frequência regulamentadas pelo CENELEC para redes de comunicação através da rede elétrica em média e baixa tensão, separadas de acordo com a aplicação (DZUNG; BERGANZA; SENDIN, 2011), listadas de CENELEC A a CENELEC D. Também são indicados o número máximo de subportadoras em cada banda.

Quadro 5 - Faixas de frequências da banda e número de subportadoras.

Banda	Faixa de frequência (kHz)	Número máximo de subportadoras
CENELEC A	3- 95	36
CENELEC B	95-125	15
CENELEC C	125-140	13
CENELEC D	140-148.5	13'

Fonte: Adaptado de Berger et al., (2014); Cenelec (2016).

Como pode ser observado no Quadro 5, a banda CENELEC A opera na faixa de frequência (3 kHz – 95 kHz). Diante das análises dos espectros de

frequências obtidos nos cenários de ensaios, foi observado que a maior variação de ruído está fora dessa faixa de frequência, justificando a escolha da banda CENELEC A para realizar os testes desse trabalho.

3.7.2 FCC (Federal Communications Commission)

A regulamentação dos sistemas de telecomunicação nos Estados Unidos da América é realizada pela FCC (Federal Communications Commission), que é uma agência independente do governo responsável por leis, regulamentação e inovação tecnológica na área de comunicação (FCC, 2016).

Segundo RAZAZIAN et al (2010), a FCC alocou para uso nos Estados Unidos o espectro de frequência compreendido entre 14 kHz e 480 kHz em uma única banda referenciada como banda FCC-PLC.

3.7.3 ARIB

A ARIB foi criada em 1995 para servir como uma organização para desenvolvimento de padrões visando a unificação de padrões internacionais e atividades relacionadas a área de telecomunicações no Japão (HOCH, 2011).

De acordo com Arib (2016) foi proposta apenas uma banda PLC entre 10 kHz e 450 kHz.

3.8 RUÍDOS PRESENTES NO ESPECTRO PLC

De acordo com Mlynek, Misurec e Koutny (2012), os ruídos presentes no espectro PLC podem ser classificados em 4 grupos gerais, sendo estes:

- Ruído de fundo: sempre presente na rede, causado por diferentes fontes de ruído com baixo consumo de energia. É caracterizado por sua baixa densidade espectral (PSD – *Power Spectral Density*) e aumenta em direção a frequências mais baixas;
- Ruído de banda-estreita: originado de estações de radiodifusão que transmitem ondas de curto, médio e longo alcance. A amplitude deste

pode ser modificada em função do tempo e lugar. Pode ser modelado como uma soma de senoides com diferentes amplitudes;

- Ruído assíncrono impulsivo: caracterizado por altos e baixos picos de tensão com duração entre 10 e 100 μs ;
- Ruído síncrono impulsivo: causado por aparelhos baseados em tiristores, tais como dimmers e copiadoras. Pode ocorrer em rajadas, dificultando sua identificação.

O ruído impulsivo é o mais importante quando se analisa meios físicos de comunicação, pois ele é responsável pela maioria dos erros nos dados transmitidos e é difícil de prever. Existem 3 parâmetros que definem as características do ruído impulsivo, tais como, a duração do impulso, a amplitude do impulso e o tempo de retorno entre dois pulsos seguidos (NIKOLETA; D FOTINI-NIOVI, 2010).

Em um sistema OFDM, alguns blocos são afetados pelo ruído impulsivo, enquanto outros não. Dependendo do momento que ocorre o impulso, podendo ser considerado de maneira aleatória.

A utilização do PLC em altas frequências como a utilizada no PLC de banda larga pode interferir no funcionamento de dispositivos próximos (dispositivos wireless, rádios, etc.) ou conectados à rede. Em sua dissertação de mestrado Sagar (2011) explica que ao se utilizar frequências entre 9 kHz e 30 MHz para comunicação PLC o sinal pode emanar sob a forma de radiação eletromagnética. Sendo assim, cabos utilizados para esta comunicação podem ser considerados antenas lineares com baixa eficiência.

Por esses motivos, a definição dos requisitos e regulamentações (descrito na Seção 3.7) torna-se necessário para garantir a operação e utilização dos sistemas de comunicação PLC.

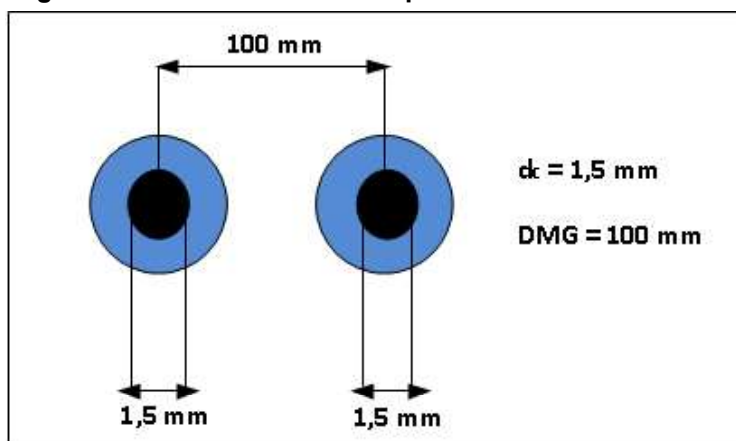
3.8.1 Indutância presente nos condutores da rede elétrica

Para calcular os valores de indutância dos experimentos realizados nesse trabalho, foram utilizadas duas fórmulas. Visto que para calcular os valores de indutância contida nos cabos esticados, foi utilizado a equação 5

$$L = K_L + 0,46 * \log\left(\frac{2 * DMG}{d_c}\right) \quad (5)$$

em que, L é o valor da indutância em mH/km, d_c é o diâmetro do condutor em mm, DMG representa a distância geométrica (em mm), entre os cabos e K_L é quantidade de fios elementares que formam o condutor (NAMBEI, 2016). A Figura 9 ilustra a distância entre um cabo e o outro, além da espessura do cabo utilizado.

Figura 9 - Posicionamento e espessura do cabo esticado.



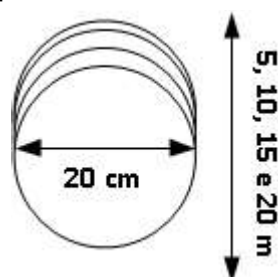
Fonte: Autoria Própria.

Adicionalmente à indutância dos cabos, para calcular o valor da indutância contido nas bobinas enroladas para simular a inserção de indutância na rede, utilizou-se a equação 6.

$$L = 1,256 * \frac{S * n^2}{C} * 10^{-8} \quad (6)$$

em que C é o comprimento da bobina, S é a área da espira e n é quantidade de voltas da bobina. A Figura 10 ilustra o diâmetro que foi enrolado as bobinas, além do tamanho de cabo enrolado de acordo com o cenário de ensaio proposto.

Figura 10 - Diâmetro e quantidade cabos enrolado em forma de bobina.

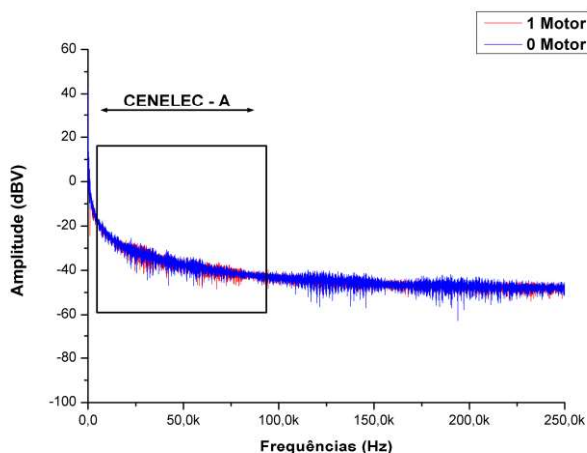


Fonte: Autoria Própria.

Face ao exposto acima, não foi possível realizar os experimentos em uma rede isolada com gerador limpo, mas sim em uma rede real, com ruídos presentes totalmente aleatório, além dos que foram inseridos através dos inversores/motores. Os ruídos aleatórios podem ser provenientes da própria geradora/fornecimento de energia, foi verificado uma alteração na característica dos ruídos presentes na rede com relação à última bateria de experimentos.

Utilizando o osciloscópio Tektronix MDO 4054-6, o qual possui um módulo de analisador de espectro, foi possível comparar os espectros obtidos nas duas fases de ensaios: um realizado em Janeiro de 2016 e outro realizado em Setembro de 2016. Na segunda fase foram criados cenários de ensaios afim de caracterizar e justificar alguns pontos levantados na primeira fase de testes. A Figura 11 ilustra o espectro de frequência do canal PLC de (Janeiro de 2016), que é estimado através da transformada rápida de Fourier, realizado através de uma operação matemática aplicada ao canal no qual a ponteira do analisador de frequências está conectada.

Figura 11 - Espectro de frequência do dia que foram realizados a primeira fase dos experimentos.

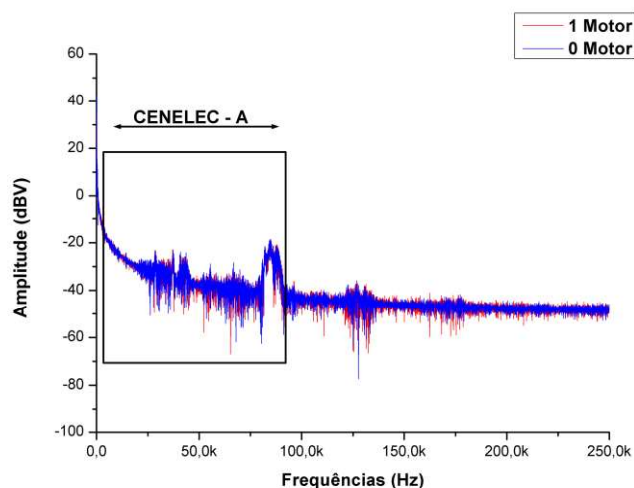


Fonte: Autoria Própria.

A região destacada entre (3 kHz – 95 kHz), ilustra a faixa de frequência CENELEC A que foi utilizada para transmitir as informações nesse trabalho. Como pode ser visto na Figura 11, o ruído presente nessa faixa é menor ou igual que os ruídos presentes nas outras faixas de frequência.

A Figura 12 ilustra o espectro de frequência do canal PLC obtido na segunda fase de testes, realizado sob as mesmas características físicas do cenário e considerando as mesmas condições de avaliação da rede e posição de equipamentos. Pode-se observar a presença de um ruído sobressaliente nessa faixa de frequência, o qual pode vir a interferir na qualidade da comunicação PLC.

Figura 12 - Espectro de frequência do dia que foram realizados a segunda fase dos experimentos.



Fonte: Autoria Própria.

Este ruído sobressaliente que apareceu no espectro de frequências na segunda fase de testes não teve sua origem identificada dentro do laboratório nem nas proximidades ao laboratório (equipamentos aleatoriamente ligados na rede elétrica interna), ou seja, pode ter sido transmitido pelo cabeamento externo, ou seja, provindo de outras fontes ruidosas e entregue pela própria fornecedora de energia elétrica. No decorrer dos experimentos realizados no laboratório, foram capturados diversos espectros de frequência da rede elétrica e são apresentados no Apêndice A, de modo a podermos comparar e avaliar o nível de ruído presente na rede elétrica local.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o modem PLC do kit comunicação G3-PLC TMDSPCKITV4-CEN e os softwares utilizados para obter os dados analisados no Capítulo 5. Os métodos estatísticos utilizados para analisar os dados obtidos, além dos cenários de ensaios criados para simular algumas situações presentes em um ambiente industrial.

4.1 HARDWARE DE COMUNICAÇÃO G3-PLC - TMDSPCKITV4-CEN

Foi escolhido o kit de desenvolvimento da Texas Instruments, TMDSPCKITV4-CEN. Os fatores que foram levados em consideração foram a possibilidade de utilizar mais de um padrão (G3-PLC, PRIME) para comunicação PLC e ferramentas que possibilitassem o desenvolvimento de aplicações e testes de desempenho.

Utilizando os programas computacionais fornecido pela Texas Instruments, foi possível configurar a modulação utilizada para transmissão dos dados e também realizar o monitoramento do tráfego de informações.

Segundo a Texas Instruments (2016), este novo módulo permite a integração com concentradores de dados baseados em PLC. A versão TMDSPCKITV4-CEN do kit de desenvolvimento inclui:

- Um par de MODEMs PLC projetados para operar nas faixas de frequência CENELEC;
- Um novo módulo que integra a interface analógica AFE031 e o modem em uma única placa de circuito impresso;
- Programa computacional para controle e testes dos MODEMs PLC com suporte aos padrões G3-PLC e PRIME.
- Design de hardware flexível apropriado para sistemas de produção; e
- Todos os cabos necessários para comunicação e alimentação.

O kit de desenvolvimento descrito acima é ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Kit de desenvolvimento para PLC TMDSPCKITV4-CEN da Texas Instruments.



Fonte: Texas Instruments (2016).

De acordo com a Texas Instruments (2016) , a taxa de transferência de dados alcançada por cada modulação é apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 - Taxas de transferência x modulação.

Modulação	Taxa de Transferência (bps)
8PSK	77697
BPSK	25899
QPSK	51799
ROBO	6475

Fonte: Autoria própria.

4.2 SOFTWARE DE CONFIGURAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO

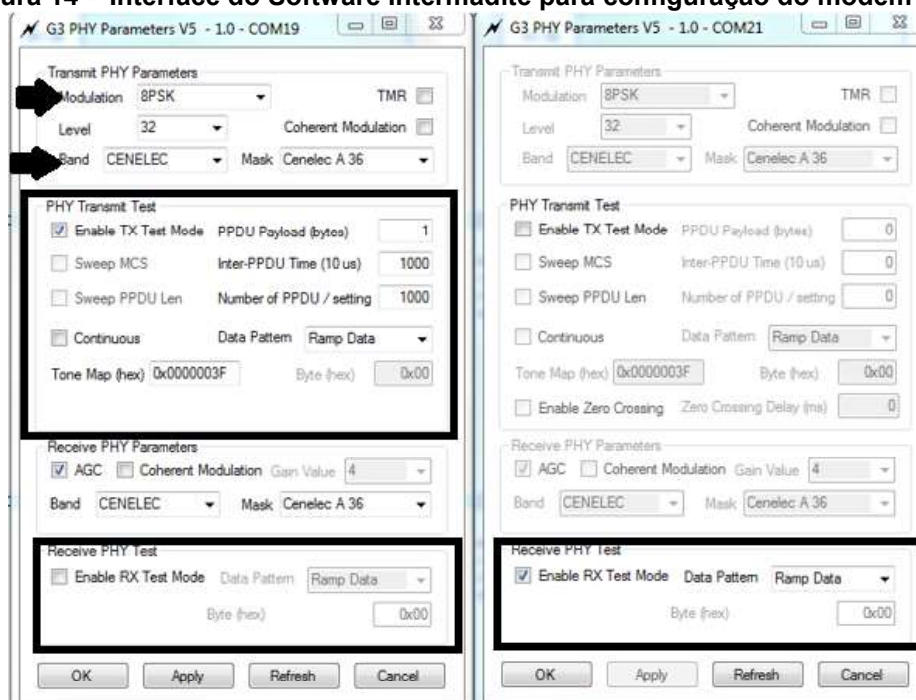
Para a configuração dos modems e padronização das variáveis enviadas, foram utilizados os softwares *Zero Configuration* e *Intermediate*, fornecido pela Texas Instruments.

Utilizando o software *Intermediate* é possível configurar a quantidade de pacotes a serem enviados, o tempo de intervalo entre esses pacotes, bem como o tamanho dos pacotes a serem enviados. Também é possível verificar quantos pacotes foram perdidos, quantos chegaram no destino sem estar corrompidos e quantos pacotes chegaram com erros.

Com essas informações é possível determinar a taxa de pacotes com erro. (*Packet Error Rate* – PER), que representam a porcentagem de pacotes recebido com erro, com relação aos pacotes que chegaram até o destino. A Figura 14 ilustra o painel de configuração do software *Intermediate*.

Através dos logs gerados pelo software *Intermediate* também foi possível obter a taxa de média de transferência dos dados em (bps) de cada janela de transmissão, essa taxa foi utilizada apenas na primeira análise, pois na segunda análise foi levado em consideração o próprio *baud rate* atingido por cada modulação.

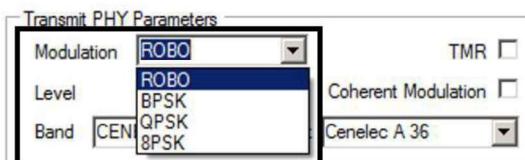
Figura 14 - Interface do Software Intermediate para configuração do modem PLC.



Fonte: Autoria própria.

O Software *Intermediate* permite a realizar a configuração dos MODEMS como transmissor (Tx) ou receptor (Rx) e também a escolha das técnicas de modulação das subportadoras, 8PSK, BPSK, QPSK e ROBO. A Figura 15 ilustra a janela de configuração das técnicas de modulação disponíveis para o modem TMDSPCKITV4-CEN, e a seleção da modulação ROBO.

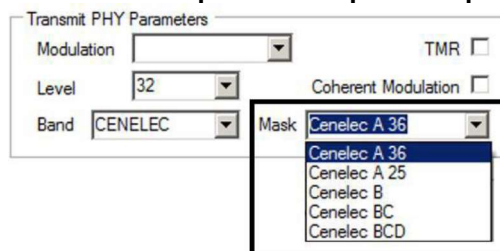
Figura 15 - Técnicas de modulação disponíveis para o modem TMDSPCKITV4-CEN.



Fonte: Autoria própria.

Para o modelo TMDSPCKITV4-CEN-CENELEC apenas a banda de frequência CENELEC está disponível, entretanto, é possível trabalhar com diversas faixas de operação de acordo com o Quadro 5 (pág. 49). As bandas de frequências disponíveis para escolha estão ilustradas na janela de configuração ilustrada na Figura 16.

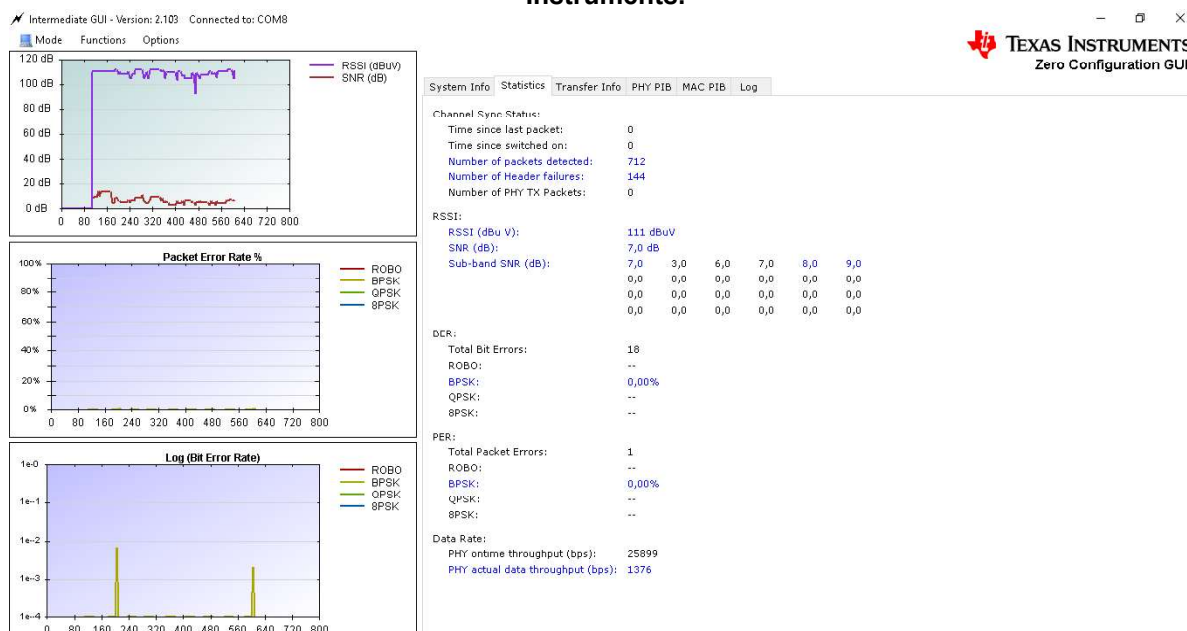
Figura 16 - Bandas de frequências disponíveis para o modem.



Fonte: Autoria própria.

A comunicação dos MODEMs com o computador é realizada pelas portas USB que realizam a conversão USB-RS232. Na Figura 17 é ilustrado a interface do Software *Intermediate*, logo após o início de uma transmissão de dados.

Figura 17 - - Informações de estatísticas disponibilizadas pelo Software Intermediate da Texas Instruments.



Fonte: Autoria própria.

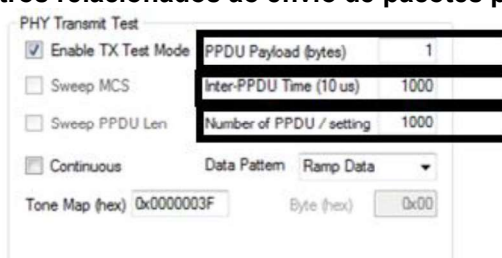
O software *Intermediate* oferece estatísticas relacionadas a transmissão de dados e também a possibilidade de visualização gráfica de informações como

relações de SNR – Relação Sinal Ruído (dB), RSSI – Intensidade do sinal recebido (dB μ V), PER (*Packet error rate*) e BER (*Bit error rate*).

Para realizar a análise configurou-se um dos MODEMS como transmissor (Tx) e outro como receptor (Rx), escolheu-se uma técnica de modulação e também parâmetros relacionados ao envio de pacotes.

A Figura 18 apresenta os parâmetros disponíveis para envio de dados, tais como: tamanho do pacote de dados em bytes, intervalo de tempo entre o envio de pacotes de dados, e também número de pacotes de dados a serem enviados.

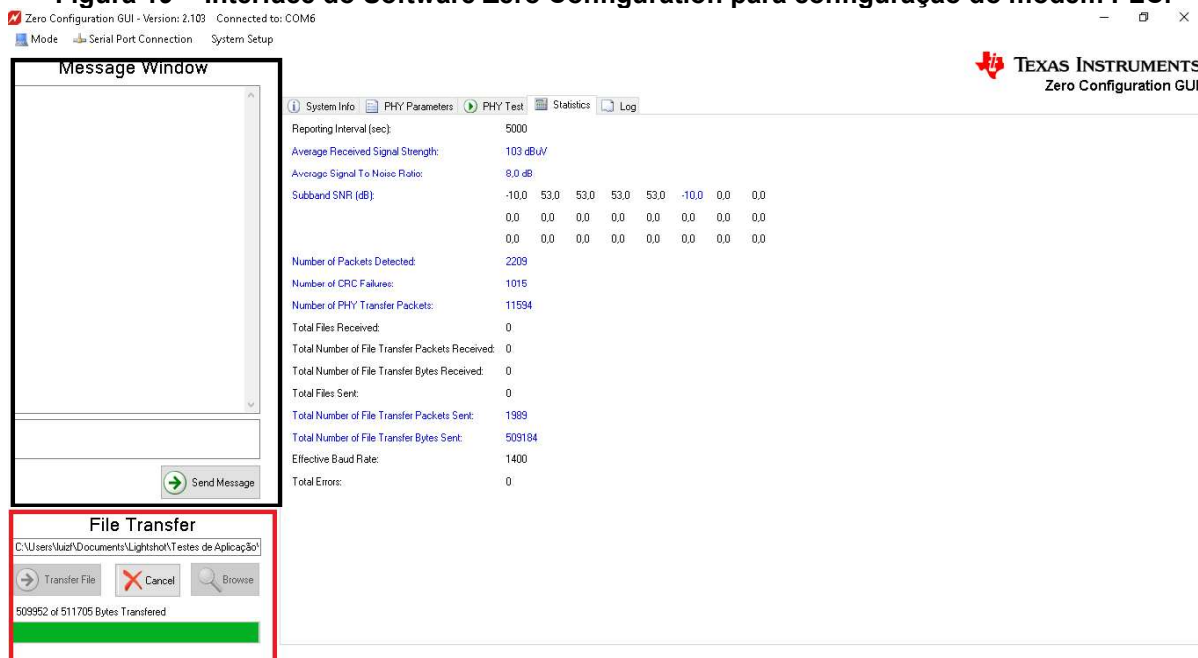
Figura 18 - Parâmetros relacionados ao envio de pacotes pelo software Intermediate.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 19 apresenta a interface do software *Zero Configuration*.

Figura 19 - Interface do Software Zero Configuration para configuração do modem PLC.



Fonte: Autoria própria.

Utilizando o software *zero configuration* foi possível enviar pacotes de dados físicos, além de mensagens entre o modem emissor/receptor (Tx/Rx) diferente do software *Intermediate* que apenas é possível enviar pacotes definidos através da configuração ilustrada na Figura 19.

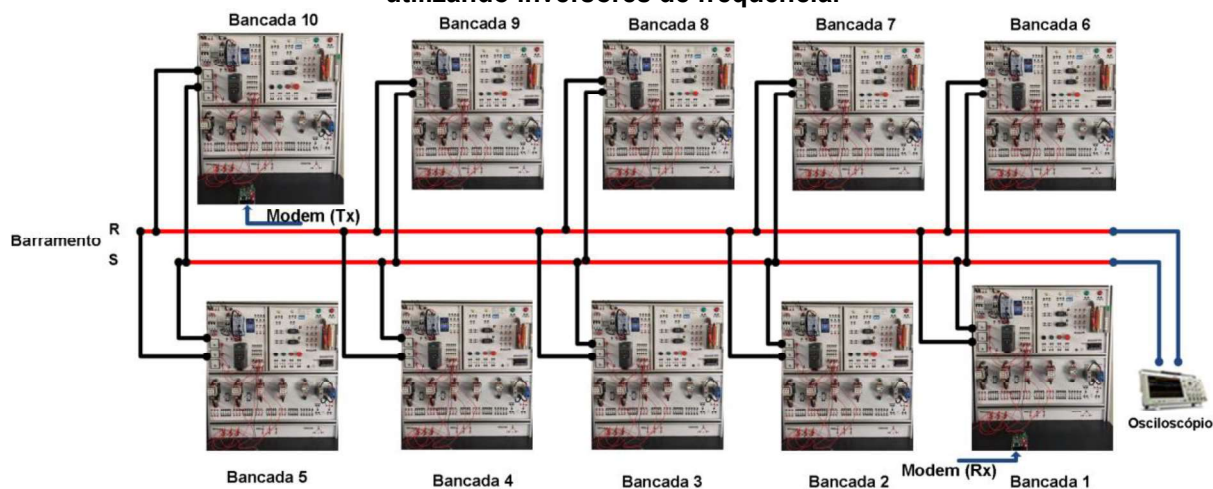
O quadro ilustrado em preto na Figura 19, representa a ferramenta utilizada para enviar mensagens entre o modem emissor/receptor (TX/Rx), já o quadro ilustrado em vermelho ilustra a parte do software utilizado para enviar arquivos de dados físicos. Neste trabalho foram enviados arquivos de textos (.txt) com tamanhos de 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 Bytes, dependendo da proposta do cenário de ensaios.

4.3 CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DO AMBIENTE INDUSTRIAL

Com o objetivo de realizar um estudo de avaliação da comunicação PLC em um ambiente industrial e sua utilização em sistemas de supervisão, em função da dificuldade de encontrar uma empresa aberta para realização de testes de campo, optou-se por simular um ambiente industrial utilizando o Laboratório de Acionamentos Eletroeletrônicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) do campus de Ponta Grossa. Neste laboratório, foram criados cenários de testes (descrito em detalhes nas próximas Seções) onde foram inseridos gradativamente ruídos característicos deste tipo de ambiente em uma rede elétrica, além de verificar a interferência da indutância presente no canal PLC.

Para a caracterização do ruído, foram utilizados inversores que acionavam motores no laboratório, caracterizando um ambiente industrial de pequeno porte, sob o qual ainda foram adicionados ruídos de iluminação (reatores) e fontes chaveadas de alimentação de diferentes equipamentos de bancada e de informática. A Figura 20 ilustra um diagrama elétrico simplificado da ligação dos dez conjuntos de inversores e motores utilizados nos cenários de ensaios. Para cada par de fonte de ruído motor e inversor, denominamos Bancada (inversor + motor) e atribuiu-se uma numeração de 1 a 10.

Figura 20 - Diagrama elétrico simplificado e ligações efetuadas do acionamento dos motores utilizando inversores de frequência.



Fonte: Autoria própria.

Os inversores de frequência são uma das principais fontes de ruídos em ambientes industriais devido ao chaveamento em alta frequência e geração de suas harmônicas. São dispositivos eletrônicos destinados ao controle da velocidade dos motores elétricos de indução trifásicos e independente da topologia utilizada, o princípio de funcionamento do inversor se baseia em uma tensão CC no circuito intermediário que é transformada em tensão CA para acionar o motor elétrico de indução trifásico (FRANCHI, 2008).

Suas chaves eletrônicas IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor* ou, em Português Transistor Bipolar de Porta Isolada) operando com chaveamentos em altas frequências são inevitavelmente fontes de ruído eletromagnético, causando interferências em diversos equipamentos conectados à mesma rede (WINNISCHOFER, 2014).

O inversor de frequência utilizado para realizar o acionamento dos motores foi o Micromaster 420 da Siemens. O Quadro 7 apresenta algumas características desse inversor.

Quadro 7 - Características nominais do inversor Micromaster 420.

Característica	Especificação
Tensão de alimentação e Faixas de potência	1 AC 200 V a 240 V \pm 10 % 0,12 kW - 3,0 kW (0,16 hp - 4,0 hp)
	2 AC 200 V a 240 V \pm 10 % 0,12 kW - 5,5 kW (0,16 hp - 7,5 hp)
	3 AC 380 V a 480 V \pm 10 % 0,37 kW - 11,0 kW (0,50 hp - 15,0 hp)
Frequência de entrada	47 Hz a 63 Hz
Frequência de saída	0 Hz a 650 Hz
Fator de potência	\geq 0,7
Eficiência do inversor	96 % a 97 %
Capacidade de sobrecarga	50 % de sobrecarga por 60 s dentro de um período de 5 min referido à corrente nominal de saída
Corrente de energização	Menor que a corrente nominal de entrada
Métodos de controle	Controle linear V/f; V/f Linear com Controle de Fluxo de Corrente (FCC), Controle Quadrático V/f; Controle Multi-ponto V/f
Frequência de pulsação	2 kHz a 16 kHz (passos de 2 kHz)

Fonte: Siemens (2017).

Conforme ilustrado na Figura 17, o laboratório possui 10 bancadas de treinamento. As bancadas de treinamento permitem o acionamento dos motores de indução trifásicos de 0,5 Hp cada, através de diversos métodos de acionamentos eletroeletrônicos. As características dos motores utilizados são apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 - Características dos motores elétricos de indução trifásicos utilizados para os ensaios.

Parâmetro	Valor
Potência (kW)	0,37
Frequência (Hz)	60
Tensão (V)	220/380
Corrente (A)	1,66/0,96
Velocidade (rpm)	3410
Rendimento (%)	73
Cos (ϕ)	0,80

Fonte: Autoria própria.

Com os equipamentos supracitados foi possível criar três cenários de ensaios para realizar os experimentos propostos nesse trabalho. Esses cenários são descritos em detalhes nas Seções seguintes.

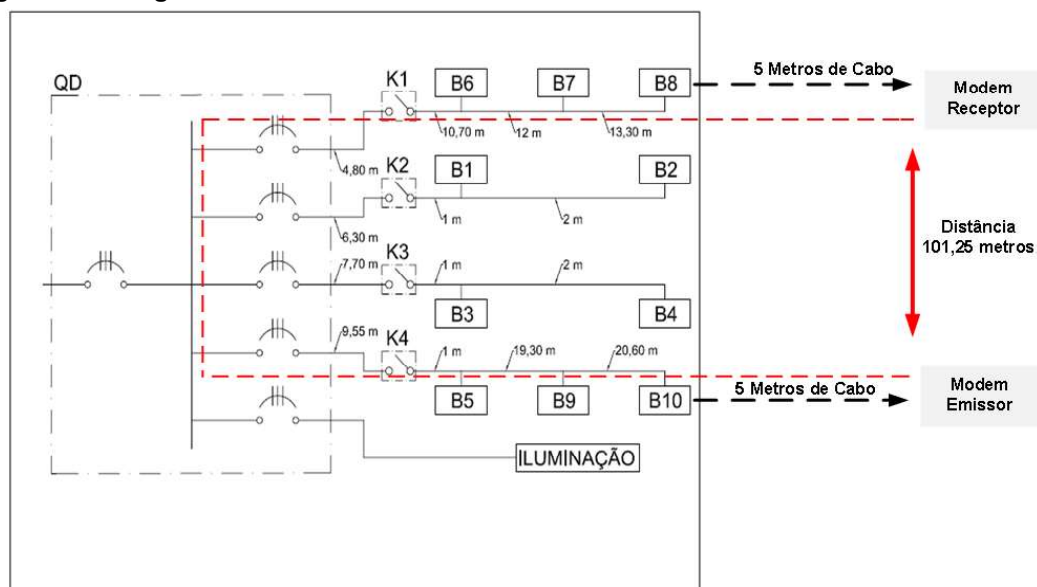
4.3.1 Cenários

Os cenários foram criados com intuito de simular o mais próximo as diversas situações presentes em um ambiente industrial. Esses cenários são descritos em detalhes nas próximas Seções.

Para que fosse possível avaliar esses cenários, foram enviados pacotes de dados de diversos tamanhos, que variam entre os valores de 1, 2, 4, 8, 16, 32 ou 64 Bytes, dependendo da avaliação a ser realizada.

Foram avaliados 3 cenários e suas variações de modulações e tamanho de pacotes, sendo eles: Para avaliação da Interferência dos inversores/motores na qualidade da comunicação PLC; para avaliação da distância entre o modem Emissor/Receptor e a fonte Ruidosa; e, por último, para avaliação da influência da Indutância do cabeamento entre o modem Emissor/Receptor (Tx/Rx) e a fonte Ruidosa. O diagrama unifilar do laboratório onde foram criados os cenários é ilustrado na Figura 21.

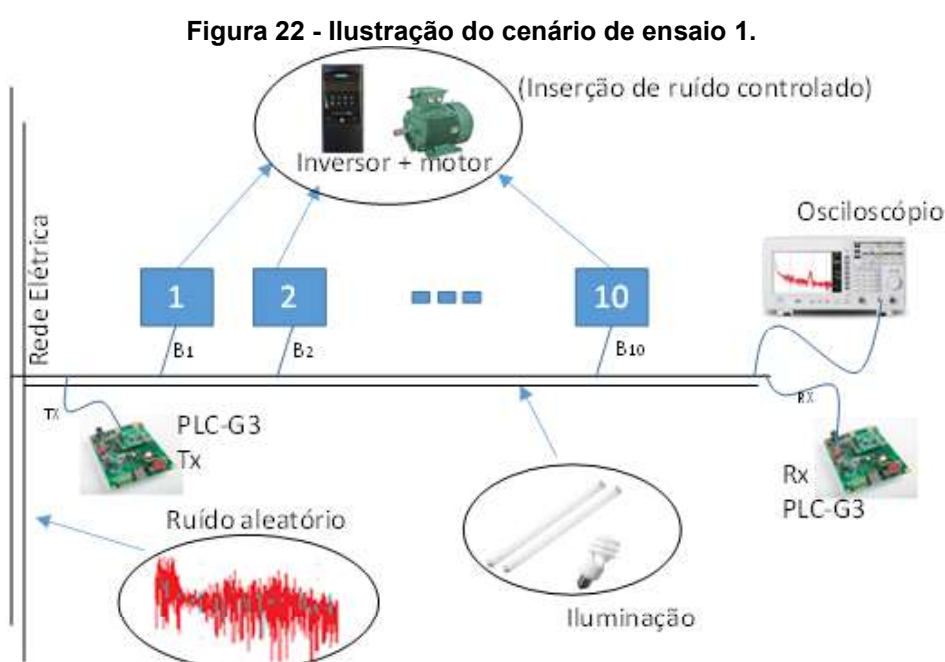
Figura 21 - Diagrama unifilar do laboratório onde foram criados os cenários de ensaios.



Fonte: Autoria própria.

4.3.1.1 Cenário 1: Avaliação da Interferência dos inversores/motores na qualidade da comunicação PLC

Este cenário foi caracterizado para verificar a interferência dos ruídos causados pelos inversores/motores na comunicação PLC, de forma a verificar se existe alguma diferença entre o ruído estar mais próximo ao modem emissor ou receptor, deste modo foi injetado o ruído de forma sequencial, crescente e decrescente. Na primeira análise, o acionamento das bancadas foi feito de maneira sequencial, não levando em consideração a distância de uma bancada para outra. A primeira bancada ser acionada foi a mais próxima do modem receptor, logo depois seguiu-se a ordem do posicionamento das bancadas localizadas no laboratório até chegar a bancadas mais próxima do modem emissor. O barramento e o posicionamento dos modems utilizados para realizar a comunicação PLC nesse cenário, é ilustrado na Figura 22.



Fonte: Autoria Própria.

Logo após os experimentos realizados nesse primeiro cenário de ensaios, foi verificado a necessidade de avaliar a interferência do posicionamento entre as bancadas e os modems emissor/receptor, portando foi levantado o diagrama unifilar

do laboratório, apresentado na Figura 21 (pág. 63). Afim de verificar e comprovar a existência da influência na qualidade da comunicação PLC, o posicionamento que os inversores/motores estão dos modems emissor/receptor, então foi criado o modo de acionamento crescente e decrescente.

O modo de acionamento crescente é caracterizado pelo acionamento do primeiro inversor/motor da bancada onde se encontra o modem emissor. Portanto, o acionamento decrescente foi caracterizado pelo acionamento da primeira bancada onde se encontra o modem receptor.

O tamanho do barramento utilizado nesse cenário de ensaios, tem como base a documentação técnica de um dos protocolos mais utilizados na indústria, o AS-Interface. Segundo Siemens (2009), o tamanho máximo do barramento sem que haja necessidade de um repetidor de sinal para esse protocolo é de 100 metros.

Afim de melhorar a compreensão, as distâncias dessas bancadas no modo de acionamento crescente/decrescentes são informadas na Tabela 9. Onde B8 é a bancada onde o modem receptor está conectado e B10 representa a bancada que se encontra conectado o modem emissor.

Tabela 1 - Ordem de acionamento crescente/decrescente e suas respectivas distâncias (em metros) entre as bancadas, a partir da bancada B10 (Emissor).

B8	B7	B6	B4	B3	B2	B1	B5	B9	B10
91,25	77,95	65,95	61,15	59,15	58,25	56,25	39,9	20,60	0

Fonte: Autoria própria.

Ressalta-se que no acionamento sequencial, o modem receptor se localiza-se na bancada 1 e o receptor na bancada 10, e não foi levado em consideração as distâncias entre as bancadas, sendo assim a ordem de acionamento foi bancada (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10).

4.3.1.2 Cenário 2: Avaliação da distância entre o modem Emissor/Receptor e a fonte Ruidosa

Após os resultados obtidos no primeiro cenário de ensaios, verificou-se a necessidade de avaliar a influência dos ruídos mais próximos ao modem emissor separadamente do modem receptor. Desse modo, nesse cenário em um primeiro momento foi mantido uma distância de 5 metros separando o modem receptor da

fonte ruidosa e a distância que separava o modem emissor da fonte ruidosa foi aumentada gradativamente de 20 em 20 metros esticados. Iniciou-se com uma distância de 20 metros até chegar em 80 metros de distância do modem emissor até a fonte ruidosa.

A mesma avaliação foi feita para o modem receptor, alongando gradativamente a distância do cabo que separa o modem receptor da fonte ruidosa e mantendo a distância de 5 metros do modem emissor até a fonte ruidosa.

Neste cenário, foi possível constatar a interferência dessas distâncias na comunicação PLC, tornando necessário avaliar essa tecnologia em mais um cenário de ensaios, onde o objetivo é avaliar a interferência da indutância na qualidade da comunicação PLC, este cenário é descrito em detalhes na Seção 4.3.1.3. O aumento gradativo da indutância se deu através do aumento da quantidade de cabo entre o emissor ou receptor e a fonte ruidosa. Foi utilizado a equação 5 (pág. 52) para encontrar o valor aproximado da indutância em metros e assim multiplicar pelo tamanho do cabo utilizado em cada experimento. A aplicação da equação 5 (pág. 52) e o desenvolvimento é ilustrado abaixo.

$$L = 0,0528 + 0,46 * \log\left(\frac{2 * 100}{1,5}\right)$$

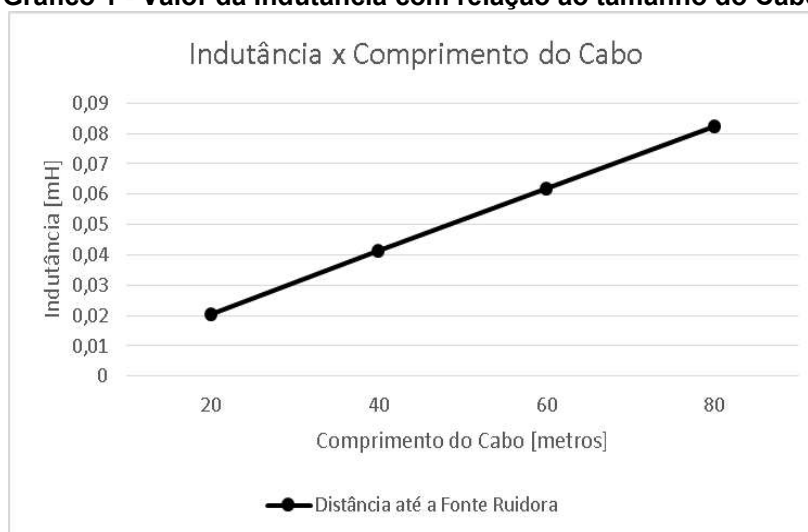
$$L = 1,0303 \text{ mH/Km}$$

$$L = \frac{1,0303}{1000}$$

$$L = 0,0010303 \text{ mH/m}$$

O Gráfico 1 apresenta os valores de indutância em cada experimento realizado, com os diferentes tamanhos de cabos utilizados.

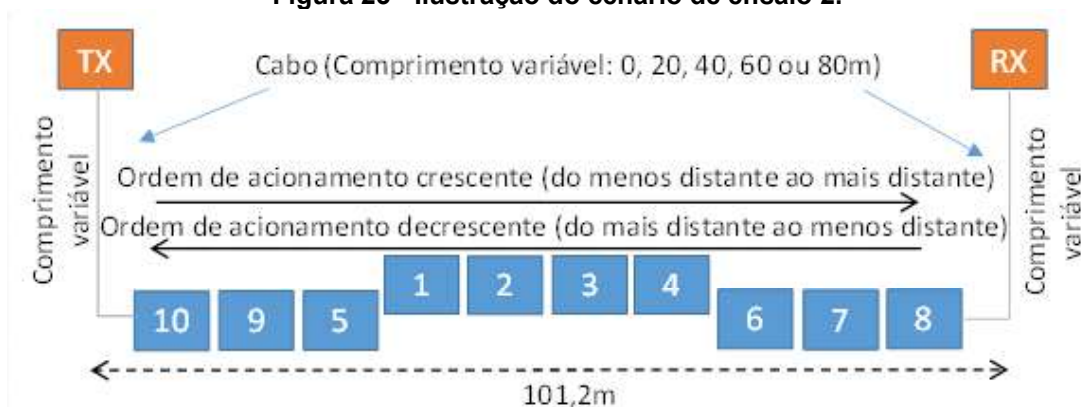
Gráfico 1 - Valor da Indutância com relação ao tamanho do Cabo.



Fonte: Autoria própria.

Desse modo, torna-se razoável verificar o que mais interfere na qualidade da comunicação PLC, no qual pode ser o ruído presente na rede, a distância entre os modems emissor/receptor (Tx/Rx) ou a indutância presente no canal PLC. O cenário de ensaios descrito nesta Seção, é ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Ilustração do cenário de ensaio 2.



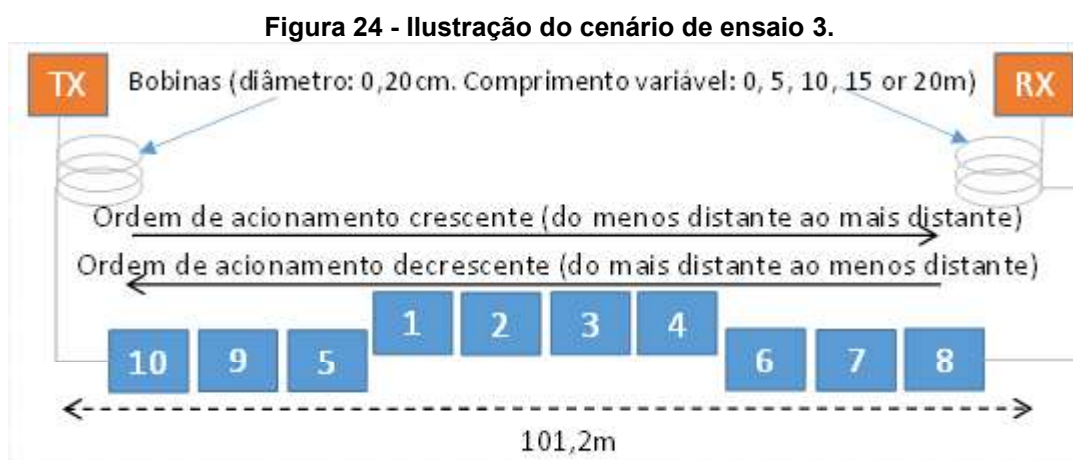
Fonte: Autoria própria.

4.3.1.3 Cenário 3: Avaliação da influência da Indutância do cabeamento entre o modem Emissor/Receptor e a fonte Ruidosa

Após verificar que a indutância presente no canal influencia na qualidade da comunicação PLC, foram criados 5 diferentes cenários de ensaios para a

comprovação da primeira análise. Do qual, foi criado bobinas com os próprios cabos utilizados nos experimentos do cenário 2, simulando uma situação bem comum em ambiente industrial, onde sobra cabo ao realizar um serviço e afim de evitar emendas futuras o técnico responsável apenas enrola o cabo e os deixa em um canto da indústria, além de ser possível fazer a avaliação da interferência da indutância na qualidade da comunicação PLC, visto que quanto maior a bobina, maior é a indutância característica presente nela.

As bobinas foram enroladas de 5 em 5 metros, com uma circunferência de diâmetro de aproximadamente 20 cm. Em um primeiro momento foi utilizado a menor distância entre os modems emissor/receptor (Tx/Rx) até a fonte ruidosa, nesse caso 20 metros. Após verificar quanto de indutância foi necessário para não ser mais possível a comunicação PLC, foi realizado o mesmo procedimento para a maior distância (80 metros), entre o modem emissor/receptor (Tx/Rx) até a fonte de ruidosa. Este cenário é ilustrado na Figura 24.



Fonte: Autoria própria.

Para encontrar o valor da indutância da bobina enrolada de 5 em 5, com 20 cm de diâmetro foi utilizada a equação 12.

Aplicando a equação 6 (pág. 52) para obter o valor da indutância presente na bobina de 5 metros, temos:

$$L = 1,256 * \frac{0,0311 * 8^2}{5} * 10^{-8}$$

$$L = 1,256 * 0,3981 * 10^{-8}$$

$$L = 5,00001e^{-09} \text{ H}$$

$$L = 0,05 \text{ mH}$$

Aplicando a equação 6 (pág. 52) para obter o valor da indutância presente na bobina de 10 metros, temos:

$$L = 1,256 * \frac{0,0311 * 16^2}{10} * 10^{-8}$$

$$L = 1,256 * 0,7962 * 10^{-8}$$

$$L = 1,0000e^{-8} \text{ H}$$

$$L = 0,1 \text{ mH}$$

Aplicando a equação 6 (pág. 52) para obter o valor da indutância presente na bobina de 15 metros, temos:

$$L = 1,256 * \frac{0,0311 * 24^2}{15} * 10^{-8}$$

$$L = 1,256 * 1,1942 * 10^{-8}$$

$$L = 1,5e^{-8} \text{ H}$$

$$L = 0,15 \text{ mH}$$

Aplicando a equação 6 (pág. 52) para obter o valor da indutância presente na bobina de 20 metros, temos:

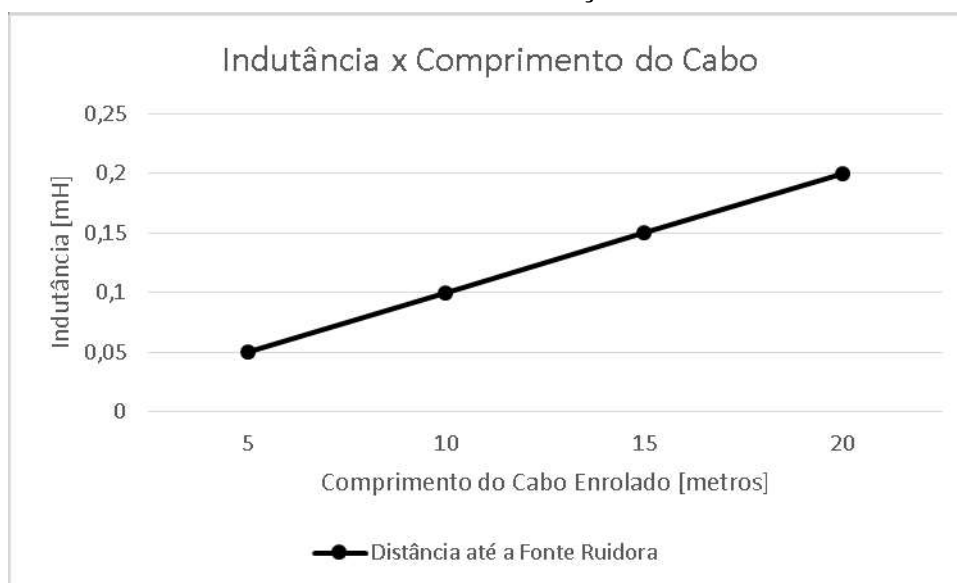
$$L = 1,256 * \frac{0,0311 * 32^2}{20} * 10^{-8}$$

$$L = 1,256 * 1,5923 * 10^{-8}$$

$$L = 2e^{-8} \text{ H}$$

$$L = 0,2 \text{ mH}$$

O Gráfico 2 ilustra os valores obtidos com relação ao tamanho do cabo enrolado em forma de bobina.

Gráfico 2 - Valor da Indutância com relação ao tamanho do Cabo

Fonte: Autoria própria.

As bobinas criadas nesse cenário foram importantes para simular os cabos enrolados que são bastante presentes em ambientes industriais, além de necessitar de menos cabos para simular a mesma quantidade de indutância presentes em cabos esticados.

4.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para realizar a coleta e caracterizar os cenários supracitados, foi utilizado o osciloscópio Tektronix modelo MDO 4054-6. Este modelo de osciloscópio digital oferece a performance necessária para visualização de detalhes nas rápidas mudanças de sinais. O mesmo foi configurado para estimar o espectro de frequência nas faixas entre 0 Hz – 250 kHz (TEKTRONIX, 2016).

O espectro de frequência é estimado através da transformada rápida de Fourier, realizada através de uma operação matemática aplicada ao canal no qual a ponteira encontra-se conectada. As medições realizadas foram exportadas no formato de imagem e também no formato de texto através de uma das interfaces USB presentes no osciloscópio, possibilitando maior flexibilidade no tratamento de dados e análise de desempenho.

No primeiro cenário de ensaios, foram testados quatro tipos de modulação de sinais para transmitir os dados via rede elétrica: 8PSK, QPSK, BPSK e ROBO. Afim de verificar a eficiência e confiabilidade das modulações em um ambiente

industrial, em diferentes níveis de ruído. Foi escolhido a técnica de modulação CENELEC A 36, onde são utilizadas 36 portadoras localizadas entre 36 kHz e 91 kHz (XIAOLIN; OLIVER, 2012). Foi escolhido essa faixa de frequência porque nos primeiros ensaios realizados foi detectado menos ruído presente nessa faixa de espectro, além de ser a maior faixa de espectro disponível.

Para a avaliação do primeiro cenário de ensaios, acionamento sequencial. Foi padronizado o envio de 1000 pacotes de diferentes tamanhos (1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 Bytes), 5 (cinco) vezes. Em cada janela de transmissão foi analisado a quantidade de pacotes recebidos com erros, bem como a taxa de transmissão de dados.

Através das análises realizadas no primeiro cenário de ensaios, foi possível verificar que algumas variáveis além dos inversores/motores estão interferindo na qualidade da comunicação PLC, tais como: posicionamento dos modems emissor/receptor (Tx/Rx) e a quantidade de indutância presente na rede elétrica. Foi assim que surgiu a necessidade de acionar incrementalmente primeiro as bancadas mais próximas do modem receptor e depois repetir o processo para o modem emissor, denominados de acionamento crescente e decrescente. Afim de verificar se o aumento de pacotes recebidos com erro quando acionado a última bancada, na qual está conectado o modem emissor é pelo aumento do nível de ruído ou se porque quando mais próximo a fonte ruidosa está do modem emissor, mais pacotes são perdidos e corrompidos.

Desse modo, os cenários de ensaios seguintes, onde o objetivo foi verificar a interferência do posicionamento do ruído inserido, através dos acionamentos (crescente e decrescente), bem como o comportamento da qualidade da comunicação PLC com relação a indutância presente no canal PLC. Nesses cenários de ensaios foi enviado 1000 pacotes de 4 Bytes, 5 (cinco) vezes. Foi escolhido esse tamanho de pacotes, por ser o tamanho intermediário dos pacotes testados nos cenários anteriores, além de ser o tamanho máximo de pacote de dados que um dos protocolos mais utilizados na indústria suporta, conhecido como protocolo AS-Interface.

Neste trabalho foi utilizado média, desvio padrão, e análise de variância (ANOVA) para verificar a interferência dos inversores/motores na qualidade da comunicação, através da análise dos pacotes recebidos com erros (PER). E assim, diante dos dados obtidos nos testes, verificar a viabilidade de utilizar a comunicação

via rede elétrica para trocas de dados na indústria, aplicado a prevenção e manutenção das máquinas, além da supervisão de processos onde o tempo não é crítico.

Após a caracterização e avaliação do meio físico, foi utilizado o programa computacional *Intermediate* fornecido pela Texas Instruments para enviar os pacotes com seus tamanhos pré-definidos. Foi analisado a qualidade com que esses pacotes estavam chegando ao modem receptor.

Também foram realizados testes utilizando o software *Zero Configuration*, também fornecido pela Texas Instruments. Onde, foi possível analisar a troca de mensagens já em forma de aplicação, e assim, verificar realmente qual tipo de modulação conseguiu mesmo tendo perdas de pacotes, realizar o reenvio dos pacotes que chegaram corrompidos.

Os dados capturados nos experimentos foram analisados e os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 5.

4.5 MÉTODOS ESTÁTISTICOS UTILIZADOS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os métodos estatísticos utilizados para analisar os dados obtidos nos cenários de ensaios desse trabalho.

4.5.1 Média

Média é um exemplo de estatística. Uma estatística é um número utilizado para resumir as propriedades de um conjunto numérico (DOWNING; CLARK, 2011). A média aritmética de um conjunto de valores é a medida de centro encontrada pela soma dos valores amostrais, dividido pela quantidade de amostras (TRIOLA, 2006). Esta definição pode ser representada pela equação 7.

$$Média = \frac{\sum x}{n} \quad \begin{array}{l} (\leftarrow \text{soma de todos os valores amostrais}) \\ (\leftarrow \text{quantidade de números amostrais}) \end{array} \quad (7)$$

4.5.2 Desvio Padrão e Variância

O desvio padrão de um conjunto de valores amostrais, mede a variação das amostras em torno da média. Este método é representado pela equação 8.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - x_{\text{média do conjunto}})^2}{n-1}} \quad (8)$$

Em que x , são os valores das amostras, n é a quantidade de amostras e $x_{\text{média do conjunto}}$ representa a média do conjunto analisado.

A variância é comumente simbolizada por σ^2 é uma maneira de verificar a distância média das amostras com relação à média do conjunto (DOWNING; CLARK, 2011). A equação geral da variância é apresentada abaixo.

$$Var(x) = \sigma^2 = \frac{(x_1 - x_{\text{média do conjunto}})^2 + (x_2 - x_{\text{média do conjunto}})^2 + \dots + (x_n - x_{\text{média do conjunto}})^2}{n} \quad (9)$$

4.5.3 Análise de Variância (ANOVA - *ANALYSIS Of VARIANCE*)

A análise de variância, também conhecido como ANOVA, refere-se de maneira ampla a um conjunto de situações experimentais e procedimentos estatísticos para a análise de respostas quantitativas de unidades experimentais (MURRAY, 1993).

Este método envolve análise de dados obtidos de amostras de mais de duas populações numéricas (distribuições) ou dados de experimentos em que foram empregados mais de dois tratamentos. A característica que diferencia os tratamentos ou populações entre si é chamada de fator em estudo, e os tratamentos ou populações diferentes são chamados de níveis do fator (DEVORE; DA SILVA, 2006). Exemplos de situações desse tipo incluem:

- I. Um experimento para estudar os efeitos de cinco diferentes marcas de gasolina na eficiência operacional (milhas/galão) de motores de automóvel.

- II. Um experimento para estudar os efeitos da presença de quatro diferentes soluções de açúcar (glicose, sacarose, frutose e uma combinação das três) no crescimento de bactérias.

Observa-se em (1) que o fator de interesse é a marca da gasolina e há cinco níveis diferentes. No item (2) pode ser observado que o fator é o açúcar, com quatro níveis.

4.5.3.1 Anova de fator único

Muitas aplicações envolvem experimentos nos quais são considerados grupos ou níveis pertencentes a somente um fator de interesse. Um fator, como é o caso da interferência que os motores podem causar nos pacotes recebidos com erros nos experimentos realizados nesse trabalho.

Segundo Levine et al. (2005), quando as medidas numéricas entre os grupos são contínuas, e determinadas premissas são atendidas, uma metodologia conhecida como análise de variância (ANOVA) pode ser utilizada para comparar as médias aritméticas dos grupos.

Ao comparar-se dois grupos, surge o conceito de avaliação de hipóteses que baseiam-se nas alternativas que serão testadas a respeito de uma população de dados. São fundamentais os seguintes conceitos para um teste de hipótese:

- Hipótese nula (H_0): é a hipótese que assume-se como verdade para a construção do teste. É o efeito, teoria ou alternativa a ser verificado.
- Hipótese alternativa (H_1): é o que considera-se, caso a hipótese nula não tenha evidência estatística que a defenda.
- Erro do tipo I: a probabilidade de rejeitar-se a hipótese nula quando ela é efetivamente verdadeira; e
- Erro do tipo II: a probabilidade de rejeitar-se a hipótese alternativa quando ela é efetivamente verdadeira.

4.5.3.1.1 Processo geral para um teste de análise de variância

Suponha m grupos, cada um com n elementos. Baseado nesta hipótese, são 8 os passos para se calcular a análise de variância.

I. Calcular a média amostral para cada grupo:

$$m_1 = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

$$m_2 = \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_n}{n}$$

$$m_3 = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_n}{n}$$
(10)

etc.

II. Calcular a média de todas as médias:

$$\text{media}_{\text{geral}} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n}$$
(11)

III. Calcular a variância amostral das médias:

$$S^2 = \frac{(m_1 - \text{media}_{\text{geral}})^2 + (m_2 - \text{media}_{\text{geral}})^2 + (m_3 - \text{media}_{\text{geral}})^2 + \dots}{m - 1}$$
(12)

IV. Calcular a variância amostral para cada grupo:

$$S_a^2 = (a_1 - m_1)^2 + (a_2 - m_1)^2 + \dots + (a_n - m_1)^2$$

$$S_b^2 = (b_1 - m_2)^2 + (b_2 - m_2)^2 + \dots + (b_n - m_2)^2$$
(13)

$$S_c^2 = (c_1 - m_3)^2 + (c_2 - m_3)^2 + \dots + (c_n - m_3)^2$$

etc.

V. Calcular a média de todas as variâncias amostrais:

$$S^2 = \frac{S_a^2 + S_b^2 + S_c^2 + \dots}{m}$$
(14)

VI. Calcular o valor F:

$$F = \frac{nS^2}{S^2} \quad (15)$$

VII. Achar o valor crítico de uma distribuição F, com m-1 e m.(n-1) graus de liberdade.

VIII. Se o valor observado da estatística F for maior que o valor crítico, rejeita-se a hipótese nula. Segundo LEVINE et al. (2005), também pode ser observado o *valor-p*, obtido a partir do Microsoft Excel. Uma vez que este *valor-p* é menor que α (significância estatística), rejeita-se a hipótese nula. Caso nenhuma dessas considerações sejam verdadeiras, aceita-se a hipótese nula.

Uma hipótese nula geralmente garante que não existe correlação entre dois fenômenos físicos, os quais foram submetidos a análise de variância (ANOVA).

Neste trabalho foi utilizado a ANOVA de um fator para analisar a interferência dos inversores/motores na comunicação PLC. Com essa técnica foi possível verificar se através de um novo acionamento de inversor/motor, a qualidade da comunicação PLC foi afetada, através da análise da quantidade de pacotes que chegaram com erro. Esses resultados são apresentados na Seção 5.1.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos três cenários de ensaios apresentados na Seção 4.3.1.

5.1 ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA DA QUANTIDADE DE INVERSORES/MOTORES ACIONADOS NA QUALIDADE DA COMUNICAÇÃO

Nessa primeira análise, foi utilizado o Cenário 1, acionamento aleatório. Para analisar a interferência da quantidade de ruído (inversores + motores), foi aplicado a metodologia estatística ANOVA. Utilizando essa técnica foi possível avaliar o quão está sendo afetado a qualidade da comunicação PLC, através da utilização de uma população de dados.

Esta população representa os resultados obtidos enviando 1 Byte de dados, utilizando a modulação 8PSK. Foi escolhido a modulação 8PSK por se tratar da modulação mais vulnerável a erros (descrito na Seção 3.5) e 1 Byte de dados, por se tratar do menor pacote enviado, e assim a análise possa valer para todas as outras modulações e todos os outros tamanhos, levando em conta que quanto maior o pacote mais chance de corromper algum bit do pacote e quanto mais robusta a modulação, menos chance de corromper os pacotes enviados. Os resultados adicionais obtidos são apresentados no APÊNDICE B.

Os resultados obtidos após aplicar a ANOVA, são ilustrados na Tabela 10 A coluna Grupo representa a inserção de ruído, caracterizados pela quantidade inversores/motores ligados à rede elétrica. A quantidade de amostras analisadas é apresentada na coluna amostras. Na coluna soma é apresentado a soma dos pacotes recebidos com erros nos 5 ensaios, a coluna média apresenta a média desses resultados e a variância das amostras é apresentado na coluna Variância.

Tabela 2 – Dados obtidos com as médias dos pacotes recebidos com erros, variando a quantidade de inversores/motores acionados.

<i>Grupo</i>	<i>Amostras</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Sem Ruído	5	1139	227,8	30,7
Acionado 1 Inversor/Motor	5	1834	366,8	156,2
Acionados 2 Inversores/Motores	5	1623	324,6	6,8
Acionados 3 Inversores/Motores	5	2425	485	42,5
Acionados 4 Inversores/Motores	5	2273	454,6	14,3
Acionados 5 Inversores/Motores	5	2249	449,8	148,2
Acionados 6 Inversores/Motores	5	2266	453,2	29,2
Acionados 7 Inversores/Motores	5	2418	483,6	3,3
Acionados 8 Inversores/Motores	5	2403	480,6	41,3
Acionados 9 Inversores/Motores	5	2530	506	21,5
Acionados 10 Inversores/Motores	5	2568	513,6	25,3

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 11 é apresentado o resultado do teste ANOVA dos valores apresentados na Tabela 10. A coluna SQ é a soma dos quadrados de todos os desvios em relação à média de todas as observações (entre e dentro das amostras), MQ é a média quadrática (entre e dentro das amostras). O valor-P representa a probabilidade da hipótese nula ser verdadeira, o valor F representa a razão entre o modelo e o seu erro.

Tabela 3 - Análise de Variância (ANOVA)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	393624,2	10	39362,42	833,7889	1,02E-46	2,053901
Dentro dos grupos	2077,2	44	47,20909			
Total	395701,4	54				

Fonte: Autoria própria.

Nesta análise as hipóteses consideradas são:

- H_0 : Não há interferência dos motores nos pacotes recebidos com erros;
- H_1 : Existe alguma interferência dos motores com relação aos pacotes recebidos com erro.

Como explicado na Seção 4.5, quando o *valor-P* é menor que o α , e neste caso $\alpha=0,05$. Desconsidera a H_0 , portanto existe alguma interferência dos motores com relação aos pacotes recebidos com erro.

Então, surge a dúvida. Será que todos os inversores/motores estão interferindo nos pacotes recebidos com erros ou em algum momento eles deixam de interferir? Para tentar responder esta questão, aplicou-se o método de análise de variância (ANOVA) a cada inserção de ruído verificando quando está interferindo e quando não está. Abaixo é apresentado os resultados obtidos nessas comparações.

5.1.1 Aplicando ANOVA entre os cenários: Sem ruído e com 1 inversor/motor ligado

Como pode ser observado na Tabela 12, o *valor-P* é menor que $\alpha=0,05$. Portanto, desconsidera a H_0 e considera a H_1 : Existe alguma interferência dos motores com relação os pacotes recebidos com erro.

Tabela 4 - ANOVA entre 0 e 1 inversor/motor ligado.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	48302,5	1	48302,5	516,8806849	1,48471E-08	5,317655072
Dentro dos grupos	747,6	8	93,45			
Total	49050,1	9				

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, o acionamento de 1 inversor/motor influência na qualidade da comunicação comparando quando não existe ruído injetado pelo mesmo na rede.

5.1.2 Aplicando ANOVA entre os cenários: 1 inversor/motor e 2 inversores/motores ligados

Na tabela abaixo, é possível observar que o *valor-P* é menor que $\alpha=0,05$. Portanto, desconsidera a H_0 e considera a H_1 : Existe alguma interferência dos motores com relação aos pacotes recebidos com erro.

Tabela 5 - ANOVA entre 1 e 2 inversores/motores ligados.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4452,1	1	4452,1	54,62699387	7,6854E-05	5,317655072
Dentro dos grupos	652	8	81,5			
Total	5104,1	9				

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, o acionamento de 2 inversores/motores influencia na qualidade da comunicação comparando quando existe somente 1 inversor/motor ligados na rede.

5.1.3 Aplicando ANOVA entre os cenários: 2 inversores/motores e 3 inversores/motores ligados

Observa-se na Tabela 14 que o *valor-P* é menor que $\alpha=0,05$. Portanto, desconsidera a H_0 e considera a H_1 : Existe alguma interferência dos motores com relação aos pacotes recebidos com erro.

Tabela 6 - ANOVA entre 2 e 3 inversores/motores ligados.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	64320,4	1	64320,4	2609,346856	2,38949E-11	5,317655072
Dentro dos grupos	197,2	8	24,65			
Total	64517,6	9				

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, o acionamento de 3 inversores/motores influencia na qualidade da comunicação comparando quando existe somente 2 inversores/motores ligados na rede.

5.1.4 Aplicando ANOVA entre os cenários: 3 inversores/motores e 4 inversores/motores ligados

Na Tabela 7 é possível observar que o *valor-P* é menor que $\alpha=0,05$. Portanto, desconsidera H_0 e considera a H_1 : Existe alguma interferência dos motores com relação aos pacotes recebidos com erro.

Tabela 7 - ANOVA entre 3 e 4 inversores/motores ligados

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2310,4	1	2310,4	81,35211268	1,8238E-05	5,317655072
Dentro dos grupos	227,2	8	28,4			
Total	2537,6	9				

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, o acionamento de 4 inversores/motores influencia na qualidade da comunicação comparando quando existe somente 3 inversores/motores ligados na rede.

5.1.5 Aplicando ANOVA entre os cenários: 4 inversores/motores e 5 inversores/motores ligados

Nesta comparação obteve-se um *valor-P* maior que $\alpha=0,05$, portanto considera H_0 . Nesse caso, constata-se que não influencia na qualidade da comunicação tendo 4 ou 5 inversores/motores ligados na rede.

Tabela 8 - ANOVA entre 4 e 5 inversores/motores ligados

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	57,6	1	57,6	0,708923077	0,424254897	5,317655072
Dentro dos grupos	650	8	81,25			
Total	707,6	9				

Fonte: Autoria própria.

Nesse caso, o acionamento de 5 inversores/motores não influencia na qualidade da comunicação comparando quando existe 4 inversores/motores ligados na rede.

5.1.6 Aplicando ANOVA entre os cenários: 5 inversores/motores e 6 inversores/motores ligados

O mesmo acontece comparando 5 e 6 inversores/ligados à rede, como pode ser observado na Tabela 17.

Tabela 9 - ANOVA entre 5 e 6 inversores/motores ligados

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	28,9	1	28,9	0,325817362	0,583805745	5,317655072
Dentro dos grupos	709,6	8	88,7			
Total	738,5	9				

Fonte: Autoria própria.

Afim de testar uma tendência linear entre 4 e 6 motores, foi realizado a comparação entre 4 e 6 inversores/motores ligados à rede. Como pode ser observado na Tabela 18, o *valor-P* é maior que $\alpha=0,05$, não sendo possível rejeitar a H_0 : Não há interferência dos motores nos pacotes recebidos com erros.

Tabela 10 - ANOVA entre 4 e 6 inversores/motores ligados

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,9	1	4,9	0,225287356	0,647726909	5,317655072
Dentro dos grupos	174	8	21,75			
Total	178,9	9				

Fonte: Autoria própria.

Então, podemos concluir que entre 4 e 6 inversores/motores ligados à rede não houve interferência significativa nos pacotes recebidos com erros. Levando a crer, que nesse ponto há uma tendência linear da influência dos inversores/motores ligados à rede.

5.1.7 Aplicando ANOVA entre os cenários: 6 inversores/motores e 7 inversores/motores ligados

Neste ponto da análise, os inversores/motores voltam influenciar na qualidade dos pacotes recebidos com erros, como pode ser visto na Tabela 19.

Tabela 11 - ANOVA entre 6 e 7 inversores/motores ligados

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2310,4	1	2310,4	142,1784615	2,25039E-06	5,317655072
Dentro dos grupos	130	8	16,25			
Total	2440,4	9				

Fonte: Autoria própria.

Portanto, o acionamento de 7 inversores/motores influencia na qualidade da comunicação comparando quando existe 6 inversores/motores ligados na rede.

5.1.8 Aplicando ANOVA entre os cenários: 7 inversores/motores e 8 inversores/motores ligados

Neste cenário de comparação volta existir um certo ponto de linearidade, onde não podemos rejeitar a H_0 : Não há interferência dos motores nos pacotes recebidos com erros.

Tabela 12 - ANOVA entre 7 e 8 inversores/motores ligados

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	22,5	1	22,5	1,00896861	0,344561295	5,317655072
Dentro dos grupos	178,4	8	22,3			
Total	200,9	9				

Fonte: Autoria própria.

Nesse caso, o acionamento de 8 inversores/motores não influencia na qualidade da comunicação comparando quando existem 7 inversores/motores ligados na rede.

5.1.9 Aplicando ANOVA entre os cenários: 8 inversores/motores e 9 inversores/motores ligados

Neste cenário de comparação os inversores/motores voltam a interferir na qualidade dos pacotes recebidos, como pode ser observado na Tabela 21.

Tabela 13 - ANOVA entre 8 e 9 inversores/motores ligados

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1612,9	1	1612,9	51,36624204	9,54832E-05	5,317655072
Dentro dos grupos	251,2	8	31,4			
Total	1864,1	9				

Fonte: Autoria própria.

5.1.10 Aplicando ANOVA entre os cenários: 9 inversores/motores e 10 inversores/motores ligados

Por fim, no último cenário de comparação, os motores seguem interferindo na comunicação dos pacotes recebidos com erros. Esta análise pode ser observada na Tabela 22, onde o *valor-P* é menor que $\alpha=0,05$, rejeitando a H_0 : Não há interferência dos motores nos pacotes recebidos com erros.

Tabela 14 - ANOVA entre 9 e 10 inversores/motores ligados

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	144,4	1	144,4	6,170940171	0,037866641	5,317655072
Dentro dos grupos	187,2	8	23,4			
Total	331,6	9				

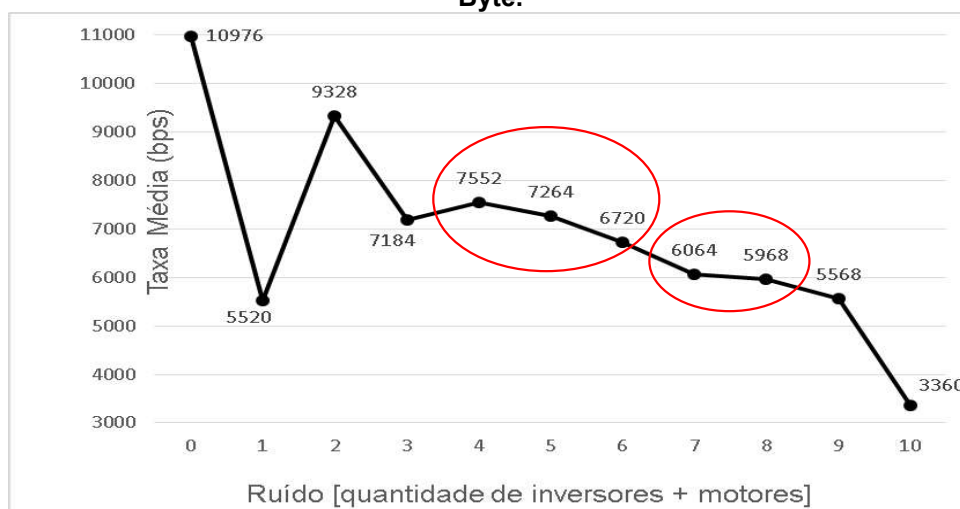
Fonte: Autoria própria.

Baseado nos resultados apresentados nas Tabelas 10-22, pode-se concluir com base nos pontos de linearidade apresentados entre (4 e 6) e (7 e 8) inversores/motores acionados e que algum outro fator pode estar interferindo para que essa linearidade ocorra.

Como esses primeiros resultados foram feitos com o acionamento dos inversores/motores sequencialmente, os próximos resultados analisados foram obtidos através dos acionamentos crescente/decrescente. Onde é possível verificar a interferência das distâncias e verificar se essa tendência tem relação com o posicionamento das bancadas que estão sendo acionadas.

As taxas de transmissão média de dados obtidas em cada janela de transmissão (levando em consideração apenas os bits que não foram corrompidos - *goodput*), em função do número de inversores/motores acionados é ilustrado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Modulação 8PSK: Taxa de Média de transmissão de dados, enviando pacotes de 1 Byte.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se, que aonde foi detectado uma certa tendência de linearidade aplicando ANOVA. Também obteve-se uma taxa de transmissão média estável, que é o caso de 4 a 6 inversores/motores ligados, e 7 a 8 inversores/motores ligados.

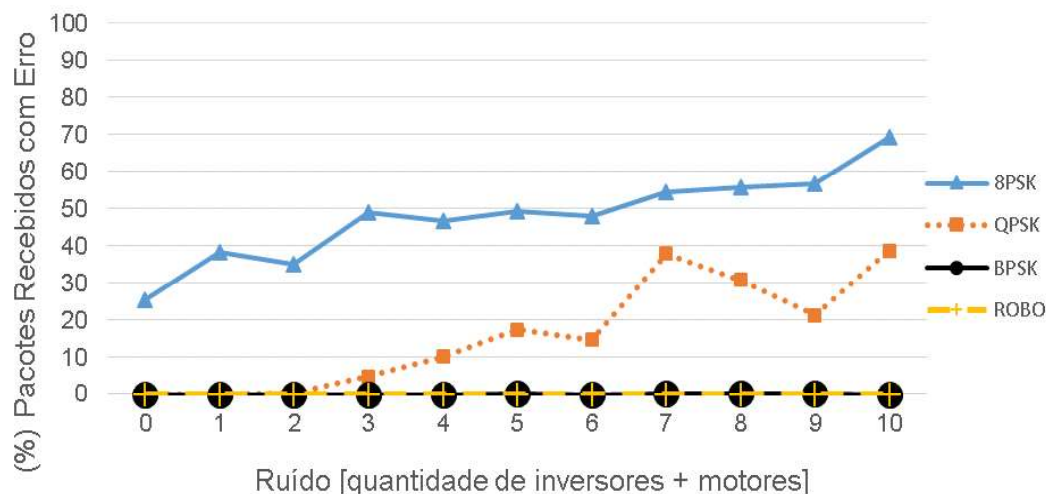
Portanto, ao fim da análise de variância para este cenário de ensaios utilizando a modulação 8PSK e pacotes de dados de 1 Byte, conclui-se que existe uma tendência de decaimento da taxa média de transmissão com relação ao aumento de fontes de ruído (com exceção de um dos ensaios, com duas fontes de ruído). Através dessa análise também é possível verificar que a quantidade de inversores/motores ligados à rede afeta a qualidade da transmissão.

5.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DAS QUATRO MODULAÇÕES UTILIZADAS NO TRABALHO

Com o objetivo de verificar a eficiência das quatro modulações utilizadas nesse trabalho, foram analisados os dados obtidos com o envio de pacotes de 4 Bytes, utilizando as quatro modulações disponíveis. Como pode ser verificado no Gráfico 4 as modulações 8PSK e QPSK obtiveram um desempenho muito inferior quando comparadas com as modulações mais robustas, BPSK e ROBO. Enquanto as modulações 8PSK e QPSK obtiveram no cenário mais ruidoso uma taxa de pacotes recebidos com erros de aproximadamente 70% e 40% respectivamente, as

modulações BPSK e ROBO obtiveram 0% de pacotes recebidos com erro, evitando a necessidade de reenvio de pacotes para corrigir os pacotes recebidos com erro.

Gráfico 4 - Porcentagem dos pacotes recebidos com erros de acordo com a quantidade de ruído inserido na rede.



Fonte: Autoria própria.

Também foi analisado a quantidade de pacotes perdidos. Como pode ser verificado no Gráfico 5, os resultados obtidos com todas as modulações foram bem semelhantes no ponto de vista comportamental. Levando em consideração o cenário mais ruidoso, ambas as modulações tiveram aproximadamente 30% dos pacotes perdidos durante a transmissão dos 1000 pacotes de dados.

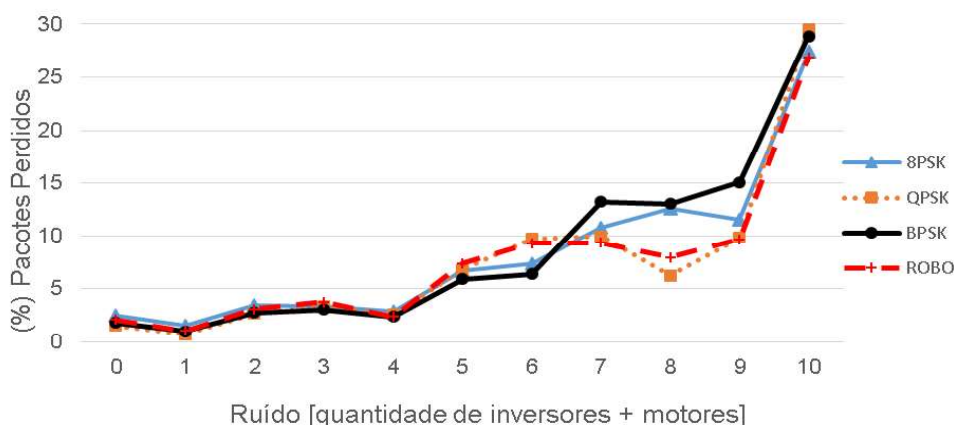
Entretanto, pode ser ressaltado a eficiência das modulações BPSK e ROBO (ver Gráfico 4) quanto aos pacotes que chegaram até o destino. Os pacotes que não foram perdidos durante a transmissão chegaram até o destino sem ter nenhum bit corrompido, dispensando a necessidade de retransmissão do pacote corrompido.

Além das análises de qualidade da transmissão supracitadas, onde destaca-se a eficiência das modulações BPSK e ROBO, este trabalho visou analisar se existe alguma relação entre a quantidade de ruído inserido na rede e sua tendência a estabilizar a qualidade da comunicação, independentemente da quantidade de ruído na rede.

Entretanto, como pode ser visto no Gráfico 5 não é possível tirar nenhuma conclusão exata, apenas supor alguns pontos que foram analisados posteriormente com novos testes realizados após qualificação da dissertação. Tais como: distância entre os equipamentos que estão sendo acionados, visto que existem pontos de linearidade e os resultados obtidos com as quatro modulações apresentaram

resultados muito parecidos, embora com valores diferentes. Outro ponto de dúvida que surgiu foi referente ao posicionamento do ruído com relação ao modem emissor/receptor (Tx/Rx), pois como pode ser observado a quantidade de pacotes perdidos duplicou quando acionada a bancada mais próxima ao modem receptor.

Gráfico 5 - Porcentagem de pacotes perdidos durante a transmissão dos dados.



Fonte: Autoria própria.

Para responder esses dois pontos levantados durante a pesquisa, foi realizado uma nova bateria de testes, 6 meses após esses primeiros testes, utilizando o mesmo cenário de ensaios, com as mesmas características físicas, entretanto, com novos ruídos aleatórios (conforme apresentado na Seção 3.8.1) que podem levar a novos resultados. Por esse motivo, os resultados apresentados abaixo serão baseados apenas nesses novos dados obtidos.

Para as análises sequentes será utilizada as modulações consideradas mais robustas e eficiente, quando comparadas entre si. Neste caso, as modulações BPSK e ROBO. Os resultados adicionais obtidos nessa fase de ensaios experimentais são apresentados no APÊNDICE C.

5.3 VERIFICANDO SE A QUALIDADE DA COMUNICAÇÃO PLC ESTÁ RELACIONADA COM O POSICIONAMENTO DO RUÍDO ENTRE O MODEM EMISSOR-RECEPTOR

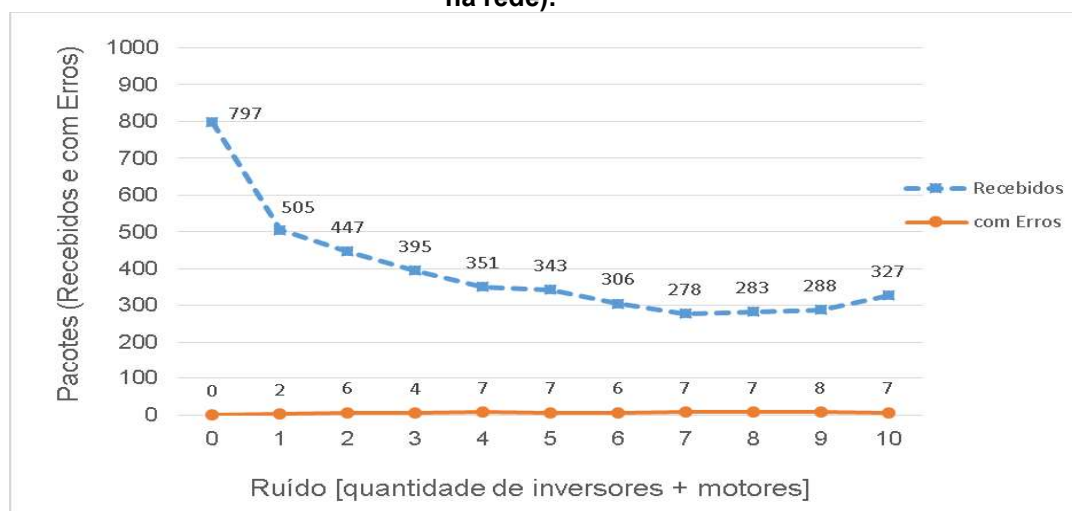
Conforme apresentado detalhadamente na Seção 4.3.1. Através da ordem de acionamento das bancadas, foi possível analisar se existe diferença na qualidade da comunicação PLC com relação ao posicionamento do ruído inserido. Desse

modo, foi realizado duas sequências de testes, além do modo de acionamento sequência que deu origem a essa percepção. Um denominado acionamento crescente (as bancadas mais próximas ao modem emissor foram acionadas primeiro) e outra denominada acionamento decrescente (as bancadas mais próximas ao modem receptor foram acionadas primeiro).

5.3.1 Acionamento Crescente: Resultados obtidos com a modulação BPSK e ROBO

Como pode ser observado no Gráfico 6 a bancada 1 que mais causou interferência, onde estava conectado o modem emissor. A partir do acionamento da primeira bancada, nota-se que todas as demais interferem muito menos quando vão se afastando do modem emissor, chegando a estabilizar entre 30% e 40% dos pacotes recebidos a partir do acionamento da terceira bancada, que está localizada a aproximadamente 37,10 metros de distância do modem receptor e 59,15 metros do modem emissor.

Gráfico 6 - Modulação ROBO (Relação dos pacotes recebidos de acordo com o Ruído inserido na rede).



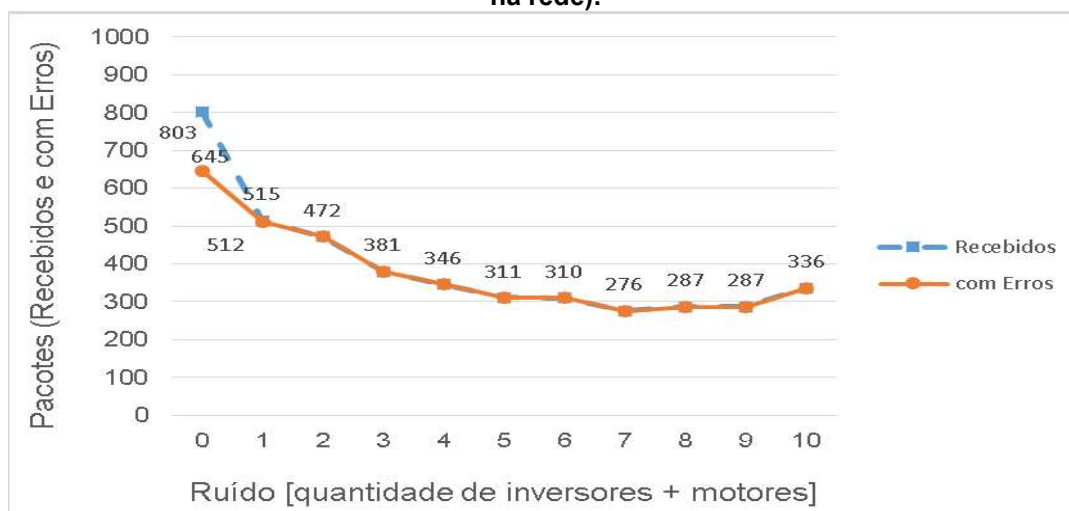
Fonte: Autoria própria.

Afim de verificar se o que mais está interferindo na comunicação PLC, é proximidade da fonte ruidosa do modem emissor ou a distância da fonte ruidosa do modem receptor, os resultados obtidos com a sequência de acionamento decrescente é apresentado na Seção 5.3.2.

Os valores que representam os pacotes recebidos, nada mais é do que representam a quantidade de pacotes que chegaram até o destino, desconsiderando os pacotes que se perderam no caminho de alguma maneira. Já os valores que representam dos pacotes recebidos com erros, fazem relação aos pacotes que chegaram até destino, entretanto chegaram com algum bit corrompido.

Como pode ser observado no Gráfico 7 a relação dos pacotes recebidos foi muito semelhante para as duas modulações. Entretanto, utilizando a modulação BPSK a quantidade de pacotes corrompidos (com erros) a partir da inserção do segundo nível de ruído já foi de 100% dos pacotes recebidos, tornando a modulação inviável para aplicações industriais, ou com elevado níveis de ruído.

Gráfico 7 - Modulação BPSK (Relação dos pacotes recebidos de acordo com o ruído inserido na rede).



Fonte: Autoria própria.

Essa inviabilidade ocorre pelo fato de toda comunicação entre dois dispositivos (emissor/receptor) estabelecer um tempo de espera, também conhecido como *timeout*. Quando ultrapassado esse tempo de espera, a conexão é interrompida e torna impossível o recebimento dos pacotes enviados.

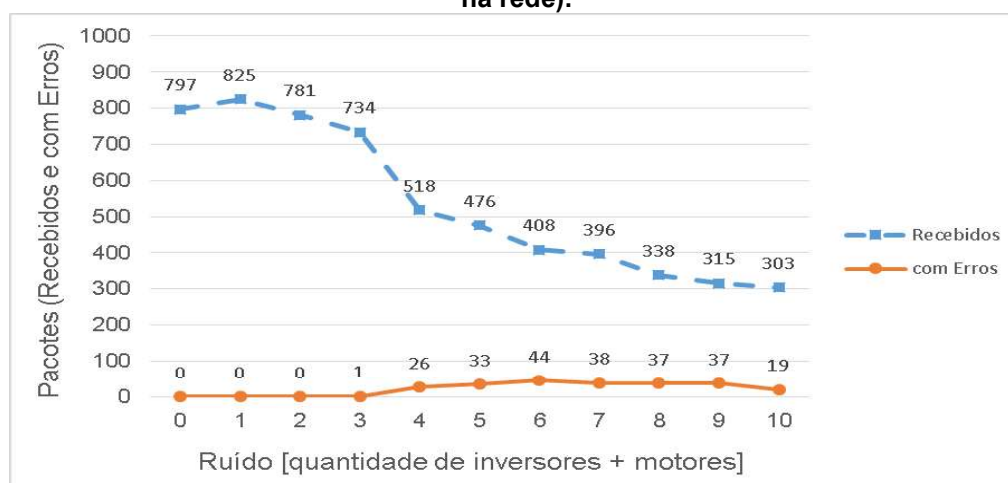
Visto que enquanto não ultrapassar o tempo de espera, os pacotes podem ser retransmitidos, mas como a taxa de pacotes recebidos com erro está em 100%, provavelmente todos os pacotes chegarão com erros novamente.

5.3.2 Acionamento Decrescente: Resultados obtidos com a modulação ROBO e BPSK

O Gráfico 8 ilustra os resultados obtidos nesse cenário de ensaios, é possível observar a mesma estabilização que houve no cenário anterior. Entretanto, verifica-se que o ruído é menos significativo quando está próximo ao modem emissor, isso pode ser verificado comparando a variação de pacotes recebidos.

Quando acionada as bancadas de maneira crescente, nota-se uma perda de aproximadamente 30% de pacotes detectados já na primeira bancada acionada. Analisando o acionamento decrescente, onde a primeira bancada acionada é a que está mais perto do modem emissor, nota-se que não houve interferência significativa, tendo até aumentado um pouco a quantidade de pacotes recebidos pelo modem receptor.

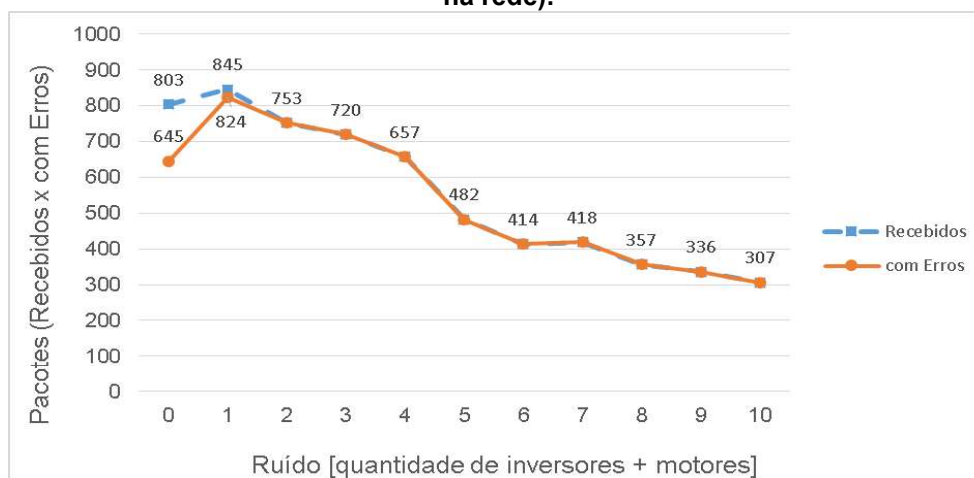
Gráfico 8 - Modulação ROBO (Relação dos pacotes recebidos de acordo com o Ruído inserido na rede).



Fonte: Autoria própria.

Utilizando a modulação BPSK, conforme pode ser observado no Gráfico 9 a quantidade de pacotes recebidos é muito semelhante com a resposta que a modulação ROBO obteve nesse cenário (ver no Gráfico 8). Entretanto, ocorreu o mesmo que no cenário anterior, onde a partir do terceiro nível de ruído a modulação BPSK não conseguiu transmitir e receber nenhum pacote sem erro, obtendo a taxa de pacotes recebidos com erro (PER) de 100%.

Gráfico 9 - Modulação BPSK (Relação dos pacotes recebidos de acordo com o Ruído inserido na rede).



Fonte: Autoria própria.

Portanto, com os resultados obtidos nesses primeiros cenários foi possível verificar que quanto mais próximo a fonte ruidosa estiver do modem receptor, mais pacotes são corrompidos. Tornando verdade o ponto levantado anteriormente, de que as distâncias entre as bancadas e a ordem de acionamento estaria interferindo na leve tendência linear entre alguns pontos, apresentados na Seção 5.1.6.

5.3.3 Alongando a distância entre o modem Emissor/Receptor e a fonte Ruidosa

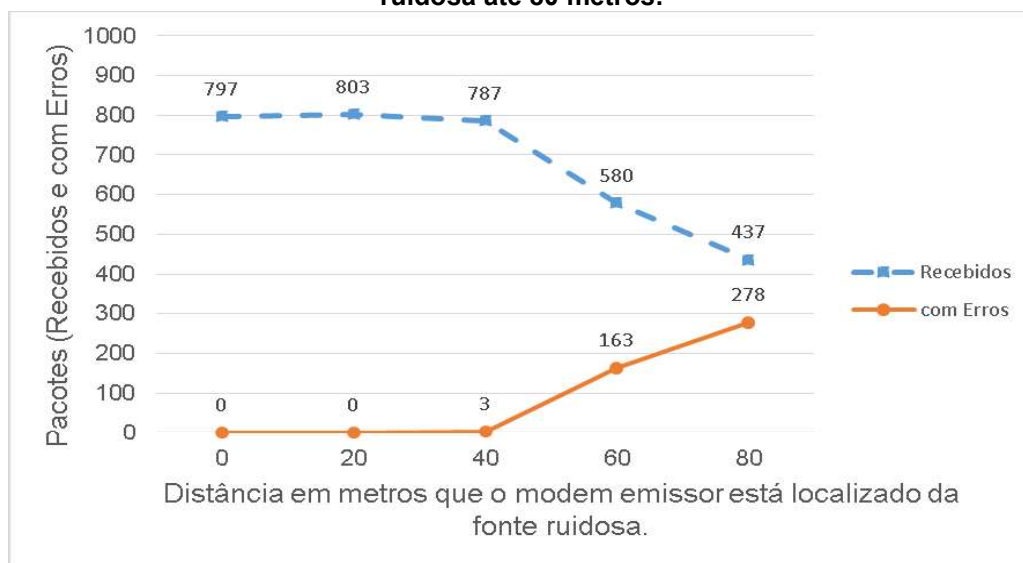
Afim de comprovar o ponto levantado na Seção anterior, de que a distância entre a fonte ruidosa e os modems emissor/receptor interferem na qualidade da comunicação PLC de modo diferente, bem como a quantidade de pacotes recebidos com erros é maior quando a fonte ruidosa está mais próxima ao modem receptor.

Foi utilizado cabo de 20, 40, 60 e 80 metros para aumentar a distância desses modems, os resultados são apresentados nas Seções abaixo.

5.3.3.1 Alongando a distância entre o modem emissor e a fonte ruidosa

Como pode ser verificado no Gráfico 10, onde é apresentado os resultados obtidos utilizando a modulação ROBO. Quanto mais distante o modem emissor está da fonte ruidosa, pior é qualidade da comunicação PLC. Ou seja, percebe-se que a indutância característica atenuando o sinal antes de chegar e ultrapassar a fonte ruidosa inserida nos ensaios, atuando como um filtro.

Gráfico 10 - Modulação ROBO: Alongando a distância do entre o modem emissor e a fonte ruidosa até 80 metros.

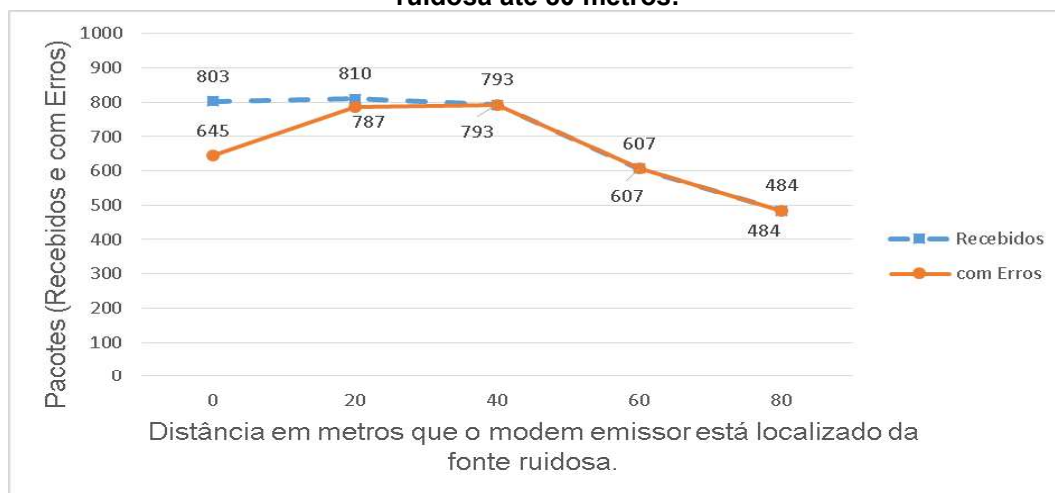


Fonte: Autoria própria.

Deste modo, a tendência é que nos próximos testes, onde o objetivo foi verificar a interferência da indutância através de bobinas criadas utilizando os próprios cabos que foram utilizados nesse experimento. Leva a crer que dependendo da quantidade de indutância presente no canal PLC, o modem emissor não conseguirá enviar os dados devido a atenuação que o sinal está sofrendo.

A mesma tendência (ver Gráfico 11) ocorre quando utilizado a modulação BPSK para modular as subportadoras. Entretanto, a partir de 40 metros de distância a modulação BPSK recebe todos os pacotes corrompidos, demonstrando sua inferioridade quando comparada com a modulação ROBO.

Gráfico 11 - Modulação BPSK: Alongando a distância do entre o modem emissor e a fonte ruidosa até 80 metros.



Fonte: Autoria própria.

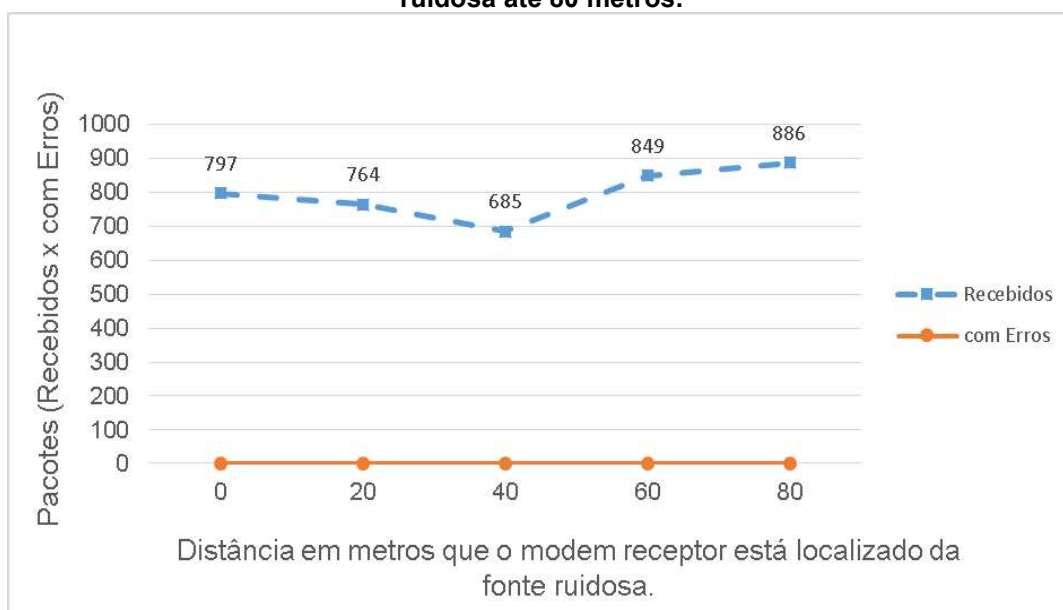
Vale ressaltar que a palavra tendência foi utilizada para relacionar os resultados obtidos utilizando as distâncias de 20 até 80 metros de cabo desenrolado, a partir desse ponto os valores de inserção de indutância está relacionado com o tamanho da bobina criada, visto que não foi feito uma relação de quanto representa esse valor em metros de cabos desenrolados.

5.3.3.2 Alongando a distância entre o modem receptor e a fonte ruidosa

Neste cenário de ensaio, foi possível perceber nitidamente que o posicionamento dos modems emissor/receptor interfere na qualidade da comunicação PLC. O Gráfico 12, ilustra os resultados obtidos utilizando a modulação ROBO, distanciando o modem receptor da fonte ruidosa.

Como pode ser observado, entre os primeiros 40 metros ocorreu uma tendência de diminuir a quantidade de pacotes recebidos, entretanto a partir dos 60 metros essa tendência reverteu e a qualidade da comunicação PLC foi superior até mesmo aos cenários apresentados nas Seções (5.3.1 e 5.3.2), onde a única distância era a do barramento que está sendo realizado os testes, mais 5 metros para distanciar os modems das bancadas utilizadas para simular os ruídos industriais.

Gráfico 12 - Modulação ROBO: Alongando a distância entre o modem receptor e a fonte ruidosa até 80 metros.



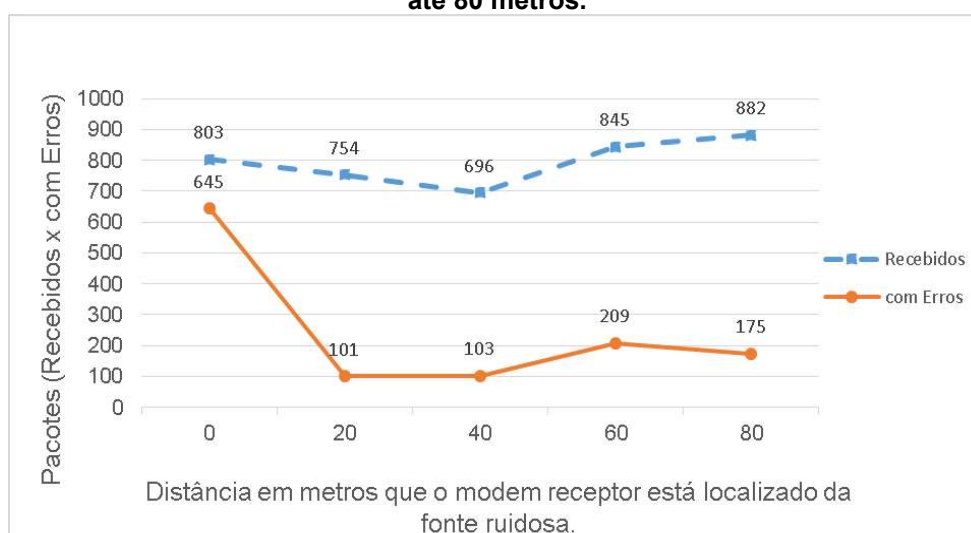
Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar, que nesse cenário de ensaios a modulação ROBO não recebeu nenhum pacote corrompido. Reforçando a ideia de que quando utilizado na medida certa e na posição correta dentro do canal PLC, a indutância atua como um filtro e melhora a qualidade da comunicação PLC.

A mesma tendência apresentada pela modulação ROBO, é apresentada pela modulação BPSK, conforme ilustra o Gráfico 13. É possível observar a partir da inserção de 20 metros de cabo separando o modem receptor e a fonte ruidosa que manteve-se muito próximo a quantidade de pacotes recebidos, entretanto ocorreu de 80% de pacotes recebidos com erro para aproximadamente 13% quando inserido a distância de 20 metros para separar o modem receptor da fonte ruidosa.

Também é possível verificar que entre 20 e 40 metros ocorre uma queda na qualidade da comunicação PLC (neste exemplo, houve uma redução em torno de 5% de pacotes recebidos). Entretanto, com a inserção de 80 metros entre o modem receptor a fonte ruidosa, aumenta para 88% a quantidade de pacotes recebidos e diminui 5% (de 209 para 175) a taxa de pacotes recebidos com erro (PER), quando comparado com os resultados obtidos com o distanciamento de 60 metros.

Gráfico 13 - Modulação BPSK: Alongando a distância entre o modem receptor e a fonte ruidosa até 80 metros.



Fonte: Autoria própria.

A partir desses resultados, torna-se necessário provar alguns resultados e conclusões discutidas nessa Seção, como a atuação da indutância como um filtro passa-baixa que melhora a qualidade da comunicação PLC quando posicionada no local correto do barramento, no qual estão sendo transmitidas as informações.

Para simular cenários com maior valor de indutância, foram desenvolvidas algumas bobinas com os próprios cabos utilizados nos cenários acima. Os resultados obtidos, são apresentados abaixo.

5.3.3.3 Avaliando a Indutância do cabeamento entre o Emissor/Receptor e a fonte Ruidosa

Afim de comprovar e verificar a interferência da indutância na qualidade da comunicação PLC, foi utilizado o cenário sem ruído, acrescido de bobinas enroladas de 5 em 5 metros, com um diâmetro de 0,2 metros. A distância utilizada entre os modems emissor/receptor foi a maior distância utilizada nos cenários anteriores, 80 metros.

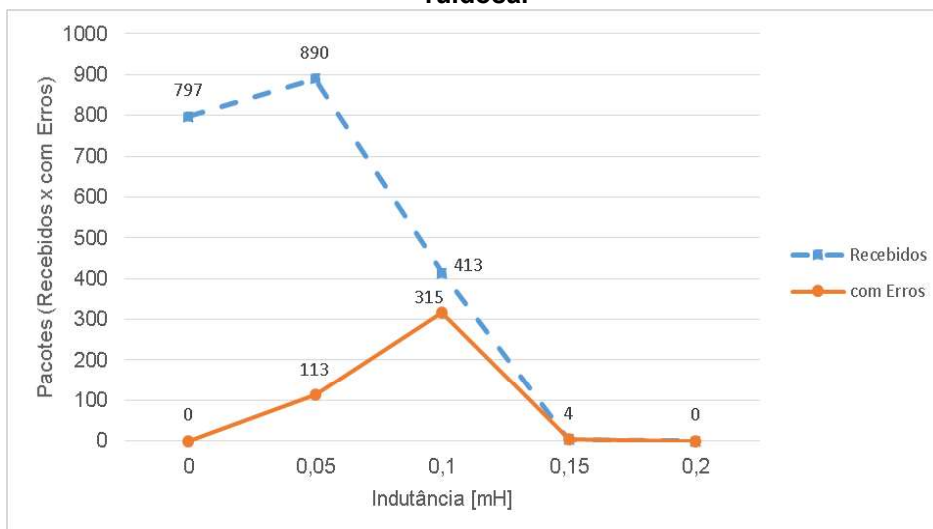
Foi escolhido o cenário sem inserção de ruído, afim de verificar somente a interferência que a indutância pode causar na qualidade da comunicação PLC. Os resultados obtidos são apresentados abaixo.

5.3.3.3.1 *Inserção de bobinas entre o modem emissor e a fonte ruidosa*

O Gráfico 14 ilustra os resultados obtidos com a modulação ROBO, a partir desse gráfico é possível observar a tendência observado anteriormente é verdadeira, de que quanto mais indutância entre o modem emissor e a fonte ruidosa, pior é a qualidade da comunicação PLC.

Quando inserido uma bobina de aproximadamente 20 metros de cabo enrolado, com 20 centímetros de diâmetro e um valor de indutância de 0,2 mH (conforme calculado na Seção 4.3.1.3), o modem não conseguiu enviar os dados, inviabilizando a utilização da comunicação PLC em um cenário com essas características.

Gráfico 14 - Modulação ROBO: Pacotes recebidos e pacotes com erros de acordo com a indutância presente nas bobinas enroladas de 5 em 5 metros entre o modem emissor e a fonte ruidosa.

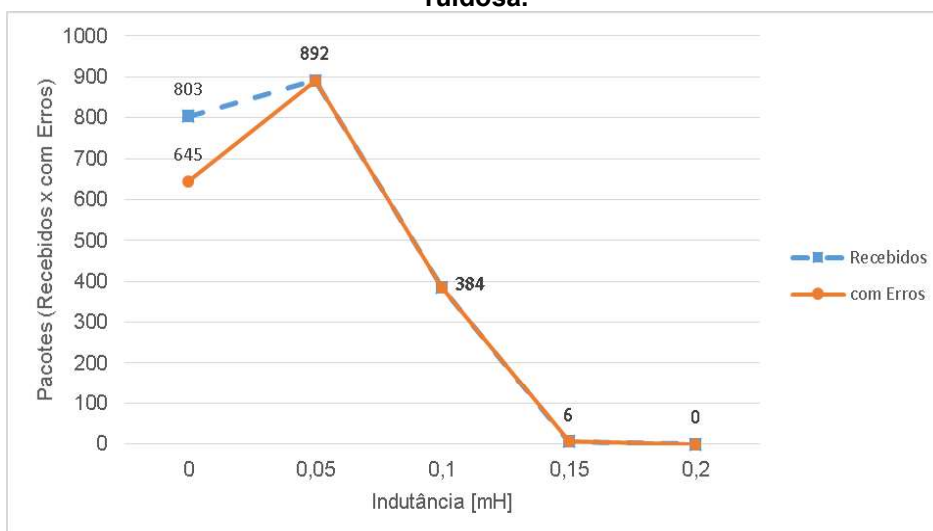


Fonte: Autoria própria.

O mesmo acontece quando utilizado a modulação BPSK para modular as subportadoras, conforme apresenta o Gráfico 15. Entretanto, a modulação BPSK recebeu todos os pacotes corrompidos nos quatro níveis de inserção de indutância.

Diferente da modulação ROBO, que mesmo com uma indutância de aproximadamente 0,1 mH conseguiu receber 34% dos pacotes sem erros dos 41% recebidos, demonstrando robustez mesmo no cenário mais ruidoso.

Gráfico 15 - Modulação BPSK: Pacotes recebidos e pacotes com erros de acordo com a indutância presente nas bobinas enroladas de 5 em 5 metros entre o modem emissor e a fonte ruidosa.

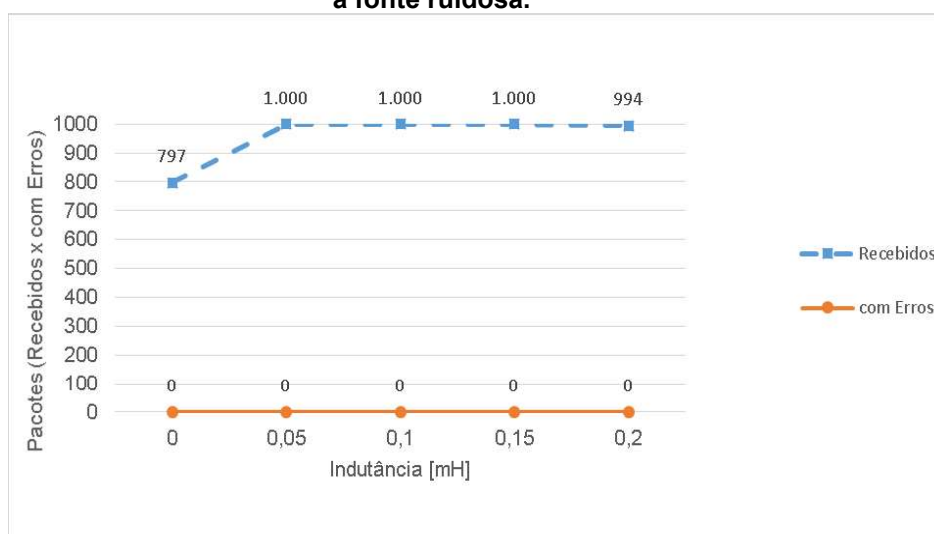


Fonte: Autoria própria.

5.3.3.3.2 Inserção de bobinas entre o modem receptor e a fonte ruidosa

O Gráfico 16 apresenta os resultados obtidos utilizando a modulação ROBO, nesse cenário é possível afirmar que dependendo do posicionamento que é inserido a bobina pode melhorar a comunicação PLC.

Gráfico 16 - Modulação ROBO: Bobinas enroladas de 5 em 5 metros entre o modem receptor e a fonte ruidosa.

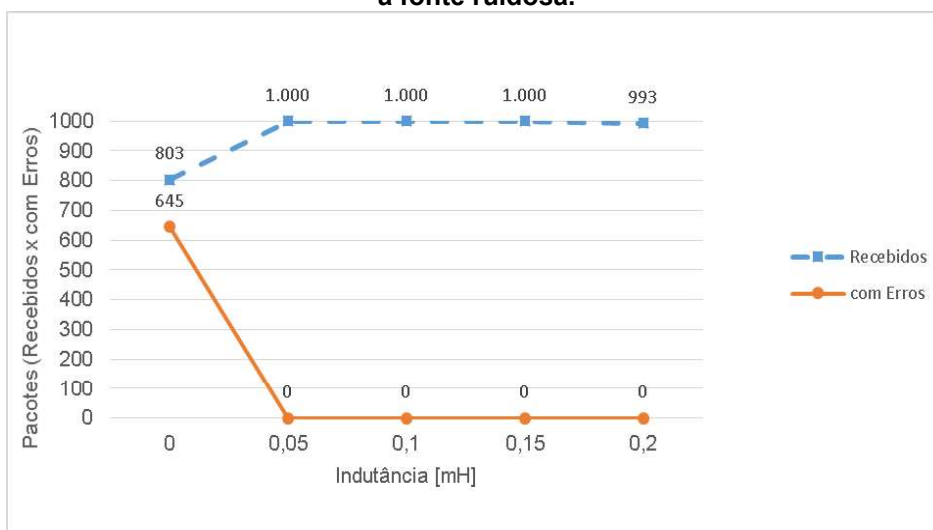


Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado, o aproveitamento dos pacotes recebidos aumentou para 100% sem alterar nenhum item do cenário, além da inversão do posicionamento do modem emissor/receptor.

O mesmo comportamento é observado quando utilizando a modulação BPSK, conforme ilustrado no Gráfico 17, no qual é possível verificar o aumento para 100% de pacotes recebidos já a partir de uma indutância de 0,05mH. Entretanto, a partir da inserção de 0,2 mH de indutância a quantidade de pacotes recebidos começa a diminuir, como ocorreu com a modulação ROBO.

Gráfico 17 - Modulação BPSK: Bobinas enroladas de 5 em 5 metros entre o modem receptor e a fonte ruidosa.



Fonte: Autoria própria.

Diante de todos esses testes é possível afirmar que quando existe uma indutância característica próximo ao modem emissor, essa bobina pode atuar como um filtro e atenuar os dados antes dele passar a fonte ruidosa, interferindo negativamente na comunicação PLC.

Diferentemente de quando essa bobina está após a fonte ruidosa e antes do modem receptor, onde ela atua como um filtro passa-baixa e interfere positivamente na qualidade da comunicação PLC, elevando a taxa de eficiência de pacotes enviados/recebidos para até 100%.

5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através dos 3 cenários de ensaios propostos nesse trabalho, foi possível verificar que para a comunicação PLC ser uma realidade em ambientes industriais, as instalações elétricas devem estar organizadas e devidamente esticadas pelas canaletas. Porque conforme apresentado na Seção 5.2, os inversores/motores influenciam na qualidade da comunicação PLC, entretanto, mesmo no ambiente mais ruidoso simulado no laboratório, a modulação ROBO conseguiu enviar/receber informações pelo canal PLC.

Os testes realizados no laboratório, mostrou a eficiência da modulação ROBO mesmo no ambiente mais ruidoso simulado com inserção de ruído, (10 inversores/motores acionados, além dos ruídos aleatórios da rede). Entretanto,

conforme os resultados apresentados na Seção 5.3.3, foi possível constatar que mesmo a modulação mais robusta, sofre interferência com a indutância característica do canal PLC, isso foi constatado alongando a distância de cabo entre o modem emissor/receptor em um primeiro momento, logo depois foi adicionado bobinas criadas com os próprios cabos que foram alongados, para simular valores maiores de indutância e uma situação muito comum em ambientes industriais, onde muitas vezes não são desenrolados totalmente o fio da bobina.

Com esses testes foi possível constatar que a presença da indutância piora a qualidade da comunicação quando está próxima ao modem emissor, pois atenua o sinal até reduzir a zero a taxa de pacotes recebidos no receptor. Entretanto, quando a indutância está localizada mais próxima do modem receptor ela atua como um filtro e eleva a taxa de pacotes recebidos para até 100% e diminuiu a taxa de pacotes recebidos com erro para 0%.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso da tecnologia PLC em ambiente industrial pode se tornar uma alternativa viável às redes de comunicação industriais existentes, reduzindo problemas relacionados a infraestrutura, diminuindo custos e tempo de instalação de sistemas para comunicação de dados. Embora outrora o uso desta tecnologia tenha permanecido estagnado por muito tempo, o desenvolvimento de novas técnicas de modulação possibilitou o aumento da confiabilidade e novas perspectivas para uso de sistemas PLC em diversos ambientes, principalmente com a ideia de monitoramento de parâmetros de energia (*smart grid*) e em aplicações locais de banda larga (como acesso à internet).

Ruídos e atenuações inerentes das linhas de energia afetam diretamente o desempenho da comunicação utilizando este meio físico. Assim, faz-se necessário analisar as características de amplitude e frequência, analisando o espectro dos ruídos presentes neste canal, para desta forma promover a constante evolução das técnicas de modulação de sinal utilizadas.

Devido a característica não determinística do ruído, este trabalho buscou simular em laboratório a característica de ruído em um ambiente industrial de pequeno a médio porte, e desta forma, avaliar a utilização da técnica de comunicação PLC sob diferentes cenários de técnicos. Para tal, foram utilizados modems no padrão banda estreita G3-PLC, o qual operam na faixa CENELEC A.

Assim, foram criados 3 cenários de ensaios com diferentes características que podem existir em um ambiente industrial, tais como: diferente quantidade de inversores/motores ligados na rede, distância entre o modem emissor/receptor, entre essas distâncias em um ambiente industrial também pode haver cabos que não foram desenrolados, formando bobinas e aumentando a quantidade de indutância presente próximo ao receptor ou transmissor.

Para termos uma simulação de ambiente mais próxima do real, preferimos não isolar o ambiente através de uma fonte controlada, para termos a variação estocástica do ruído provindo dos elementos desconhecidos e conectados na rede.

Através da inserção de ruído controlado (simulado pelo acionamento de controlado de inversores/motores) e inserção de cabos, foram analisadas figuras de

mérito como taxa de pacotes recebidos, de pacotes perdidos e taxa de pacotes recebidos com erros.

Em uma primeira análise, foi possível verificar a existência de uma tendência de estabilização da taxa de pacotes recebidos em aproximadamente 30%, pois a diferença entre os resultados apresentados pela a inserção dos 10 elementos de ruído, foi muito próximo dos resultados obtidos com a presença de 9 elementos de ruído. Também foi possível verificar que em cenários com alta inserção de ruído a modulação ROBO mostrou sua superioridade perante as outras modulações estudadas nesse trabalho, e os resultados abaixo discutidos foram obtidos utilizando essa modulação.

Através desses cenários também foi possível constatar que a indutância presente na rede elétrica pode interferir negativamente, como positivamente. Em um primeiro momento foram utilizados apenas cabos esticados, simulando distâncias maiores entre o modem emissor/receptor, e depois, quando estes foram enrolados, simulamos a inserção de uma indutância próximo ao transmissor ou receptor. Logo depois foram criadas bobinas, simulando um cenário industrial que pode ter cabos enrolados no meio de comunicação PLC.

Com esses cenários de simulações das características reais existente em um ambiente industrial, foi possível constatar que quanto mais próximo o cabo enrolado (bobina) está do modem emissor, pior será a comunicação PLC. A bobina (cujo os valores de indutância foram calculados) próxima do modem emissor, atua como um atenuador do sinal, levando o modem emissor até a incapacidade de transmissão de dados no canal PLC, isso ocorreu com uma indutância de 0,2 mH.

Entretanto, a mesma bobina localizada próximo ao modem receptor (ou seja, depois da fonte de ruídos) atuou como um filtro de ruído, melhorando o desempenho da comunicação PLC utilizando as modulações BPSK e ROBO. Houve a melhora da taxa de pacotes recebidos para 100% e taxas de pacotes recebidos com erro para 0% utilizando as bobinas de 0,5 mH, 0,1 mH e 0,15 mH. Já os resultados obtidos com a bobina de 0,2 mH apresentam uma tendência de diminuir a quantidade de pacotes recebidos, pois tanto a modulação ROBO quanto a modulação BPSK receberam 99,4% dos pacotes recebidos, mas mesmo assim mantiveram a taxa de pacotes recebidos com erro em 0%.

O objetivo principal desse trabalho foi a análise da viabilidade técnica da utilização do padrão G3-PLC em ambiente industrial e em nenhum momento

parâmetros como distâncias máximas foram levados em consideração, entretanto os comprimentos testados sempre comparam-se aos comprimentos máximos em norma para as técnicas industrialmente aplicadas atualmente.

Baseado nos cenários estudados, e nos experimentos realizados, pode concluir que o uso de inversores de frequência e motores afetam o desempenho da comunicação PLC, provocando perdas de pacotes de dados. Entretanto, o padrão G3-PLC mesmo apresentando alguma perda de pacote (e conseqüente atraso por retransmissão dos mesmos), mostrou que seu modo robusto (ROBO) é capaz de enviar e receber dados em ambientes ruidosos, a uma taxa de transferência efetiva de aproximadamente 6 kbps, o que nos permite concluir a sua viabilidade técnica para aplicações de baixa complexidade como por exemplo: coleta de informações para manutenção preventiva, leitura de sensores, acionamento de dispositivos à distância, as quais não necessitam de atuação em tempo real.

As dificuldades encontradas durante a elaboração deste trabalho e análises dos resultados apontam para uma nova necessidade: ajustes na rede elétrica, através do planejamento de diagramas elétricos que facilitem e permitam a implementação de sistemas PLC diminuindo ruídos e atenuações presentes na rede.

A análise do uso do padrão G3-PLC em ambiente industrial realizada neste trabalho mostrou que é possível utilizar a banda de faixa estreita para desenvolvimento de aplicações em meio industrial com características similares as simuladas, principalmente com o foco de monitoramento de variáveis industriais, dando apoio principal às áreas de manutenção e supervisão industrial.

Apesar das limitações das análises aqui apresentadas é evidente que a comunicação via rede elétrica em ambiente industrial é uma alternativa viável para monitoramento de variáveis, devido aos fatores como a simplicidade de instalação, economia de tempo e custo, taxas de transferência compatíveis com a necessidade das aplicações industriais, além de alcançar facilmente a distância máxima alcançada pelos padrões industriais mais comuns, que é de 100 metros sem que haja necessidade de repetidores de sinal.

Sugere-se, como trabalho futuro, a modelagem da comunicação em um canal ruidoso, sob o qual as características de inserção de indutâncias (ou capacitâncias) possam ser modeladas e os efeitos descritos nessa dissertação possam ser analiticamente descritos.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. U. B. DE; ALEXANDRIA, A. R. DE. **Redes Industriais: aplicações em sistemas digitais de controle distribuído. Editora Ensino Profissional. 2a edição**, 2009.
- ANATEL. **Institucional**, 2015. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/institucional/index.php?option=com_content&view=article&id=99&Itemid=296>. Acesso em: 30 mar. 2016
- ANATORY, J.; THEETHAYI, N. **Broadband Power-line Communications Systems: Theory & Applications**. [s.l.] wit press, 2010.
- ARIB. **Establishment of ARIB**. Disponível em: <<http://www.arib.or.jp/english/html/arib/establishment.html>>. Acesso em: 30 mar. 2016.
- BAHAI, A. R.; SALTZBERG, B. R.; ERGEN, M. **Multi-carrier digital communications: theory and applications of OFDM**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2004.
- BATISTA, M. C. P. **Identificação e Caracterização da Modulação dos Sinais Digitais em RF**. [s.l.] Universidade de Aveiro, 2008.
- BERGER, L. T. et al. **MIMO Power Line Communications: Narrow and Broadband Standards, EMC, and Advanced Processing**. [s.l.] CRC Press, 2014.
- BORGES, F. **Redes de Comunicação Industrial. Documento técnico nº2. Edição de Setembro de**, 2007.
- CARCELLE, X. **Power line communications in practice**. [s.l.] Artech House, 2009.
- CENELEC. **About CENELEC - Who we are**. Disponível em: <<https://www.cenelec.eu/aboutcenelec/whoweare/index.html>>. Acesso em: 30 mar. 2016.
- CHANDNA, V. K.; ZAHIDA, M. Effect of Varying Topologies on the Performance of Broadband Over Power Line. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 4, p. 2371–2375, Outubro 2010.
- CHIUEH, T.-D.; TSAI, P.-Y.; LAI, I.-W. **Baseband receiver design for wireless MIMO-OFDM communications**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2012.
- DEVORE, J. L.; DA SILVA, J. P. N. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências**. [s.l.] Pioneira Thomson Learning, 2006.
- DOWNING, D.; CLARK. **Estatística aplicada**. [s.l.] Saraiva, 2011. v. 3ª Edição
- DZUNG, D.; BERGANZA, I.; SENDIN, A. **Evolution of powerline communications for smart distribution: From ripple control to OFDM**. 2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC). **Anais...**

In: 2011 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS (ISPLC). abr. 2011

ERDF. **G3-PLC physical layer specification**. In: ELECTRICITE RESEAU DISTRIBUTION FRANCE. , ago. 2009. Disponível em: <http://www.erdf.fr/sites/default/files/documentation/G3_Specifications_%20low_%20layers.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2016

FCC. **What We Do | Federal Communications Commission**. Disponível em: <<https://www.fcc.gov/about-fcc/what-we-do>>. Acesso em: 30 mar. 2016.

FERREIRA, H. C. et al. **Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines**. 2. ed. [s.l.] Wiley, 2010.

FIELDCOMM, G. **Sobre o Protocolo HART**. Disponível em: <http://pt.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol_how.html>. Acesso em: 17 set. 2016.

FOROUZAN, B. A. **Comunicação de dados e redes de computadores**. 2. ed. [s.l.] AMGH Editora, 2009.

FRANCHI, C. . **Acionamentos Elétricos**. [s.l.] Érica Ltda, 2008. v. 4

GALLI, S.; SCAGLIONE, A.; WANG, Z. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. **Proceedings of the IEEE**, v. 99, n. 6, p. 998–1027, jun. 2011.

GALLOWAY, B.; HANCKE, G. P. Introduction to Industrial Control Networks. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 15, n. 2, p. 860–880, Second 2013.

HOCH, M. **Comparison of PLC G3 and PRIME**. 2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC). **Anais...** In: 2011 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS (ISPLC). abr. 2011

HRASNICA, H.; HAIDINE, A.; LEHNERT, R. **Broadband Powerline Communications: Network Design**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2004.

IEEE. **IEEE SA - 1901.2-2013 - IEEE Standard for Low-Frequency (less than 500 kHz) Narrowband Power Line Communications for Smart Grid Applications**. Disponível em: <<https://standards.ieee.org/findstds/standard/1901.2-2013.html>>. Acesso em: 17 set. 2016.

LEME, M.; TROJAN, F.; XAVIER, A. **Variables in the maintenance of electric motors, by power line communication and multi-criteria analysis**. In: POMS 26TH ANNUAL CONFERENCE. Washington, 11 Maio 2015.

LEVINE, D. M. et al. **Estatística: teoria e aplicações-usando Microsoft Excel português**. [s.l.] Ltc, 2005.

LOBATO, G. I. C. **Sistema de Comunicação e Comando Remoto de Inversores Utilizando o Barramento de Alimentação em Corrente Contínua**. Mestrado—[s.l.] UFMG, 2014.

LUGLI, A. B.; SANTOS, M. M. D. **Redes industriais para automação industrial: AS-I, PROFIBUS e PROFINET**. São Paulo: Érica, 2010.

MLYNEK, P. et al. **Measurements and evaluation of PLC modem with G3 and PRIME standards for Street Lighting Control**. 2014 18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC). **Anais...** In: 2014 18TH IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS (ISPLC). mar. 2014

MLYNEK, P.; MISUREC, J.; KOUTNY, M. **Noise Modeling for Power Line Communication Model**. In: TELECOMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING (TSP), 35TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON. IEEE. , 2012.

MLYNEK, P.; MISUREC, J.; KOUTNY, M. **Random Channel Generator for Indoor Power Line Communication**. v. 13, n. 4, p. 206–213, 2013.

MOYNE, J. R.; TILBURY, D. M. **The emergence of industrial control networks for manufacturing control, diagnostics, and safety data**. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 1, p. 29–47, 2007.

MURRAY, R. S. **Estatística Coleção Schaum**. 3ª Edição ed. [s.l.] MAKRON Books, 1993.

NAMBEI. **Informações e Tabelas Técnicas** Nambei Fios e Cabos, , 2016.

NIKOLETA, A.; D FOTINI-NIOVI, P. **Modeling the Noise on the OFDM Power-Line Communications System**. v. 25, n. 1, 2010.

OKSA, P. et al. **Considerations of Using Power Line Communication in the AMR System**. 2006 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. **Anais...** In: 2006 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS. 2006

PEREIRA, S. C. **Estudo Sobre a Transmissão de Dados Via Rede de Energia Elétrica em Ambiente Industrial Através do padrão G3-PLC**. Mestrado—São Paulo: INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO, 2014.

RAZAZIAN, K. et al. **G3-PLC specification for powerline communication: Overview, system simulation and field trial results**. 2010 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC). **Anais...** In: 2010 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS (ISPLC). mar. 2010

SEIXAS FILHO, C. **Industrial Ethernet**. [s.l.: s.n.].

SENDIN, A.; PEÑA, I.; ANGUEIRA, P. Strategies for Power Line Communications Smart Metering Network Deployment. **Energies**, v. 7, n. 4, p. 2377–2420, 15 abr. 2014.

SHAVER, D.; SU, D. H.; POPA, D. **Narrowband OFDM power line communication challenges, standardization, and semiconductor's role**. 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). **Anais...IEEE**, 2013Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6831530>. Acesso em: 11 set. 2016

SIEMENS. **AS-Interface - Answers for industry**SIEMENS AG, , 2009. Disponível em: <<https://www.automation.siemens.com/cd-static/material/info/e20001-a550-p305-v4-7600.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2016

SIEMENS. **MICROMASTER 420**, 2017. Disponível em: <http://www.tecaut.com.br/Download/MM420_Man%20Oper_port_set02.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2017

SMAR. **SMAR | Tutorial sobre a tecnologia AS-i**. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/asi>>. Acesso em: 16 set. 2016a.

SMAR. **Tutorial DEVICENET**. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/devicenet>>. Acesso em: 16 set. 2016b.

STOUFFER, K.; FALCO, J.; SCARFONE, K. Guide to industrial control systems (ICS) security. **NIST special publication**, v. 800, n. 82, 2008.

TEKTRONIX. **MSO/DPO4000B Mixed Signal Oscilloscope | Tektronix**. Disponível em: <<http://www.tek.com/oscilloscope/mso4000-dpo4000>>. Acesso em: 30 mar. 2016.

TELECO. **Classificação das Redes Sem Fio**. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredesemfio1/pagina_2.asp>. Acesso em: 17 set. 2016a.

TELECO. **Redes Ópticas I: Motivação do Uso da Modulação OFDM**. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialofdm/pagina_2.asp>. Acesso em: 17 jan. 2017b.

TEXAS INSTRUMENTS. **C2000 Power Line Modem Developer's Kit - TMDSPCKIT-V3 - TI Tool Folder**. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/tmdsplckit-v3>>. Acesso em: 8 set. 2016a.

TEXAS INSTRUMENTS. **Power Line Communications Kit for CENELEC Frequency Band - TMDSPCKITV4-CEN - TI Tool Folder**. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/TMDSPCKITV4-CEN?keyMatch=tmdsplckit-v4&tisearch=Search-EN-Everything#0>>. Acesso em: 8 set. 2016b.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. [s.l.] LTC, 2006. v. 10

WINNISCHOFER, G. **Contribuição das configurações de sistemas de acionamento e de seus componentes naturais no controle de interferências eletromagnéticas**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2014.

XIAOLIN, L.; OLIVER, M. **Developing robust power line communications (PLC) with G3**. In: TEXAS INSTRUMENTS. , 2012. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/wp/slay021/slay021.pdf>>. Acesso em: 2 jun. 2016

ZIGBEE ALLIANCE. **Utility Industry | The ZigBee Alliance**. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/what-is-zigbee/utility-industry/>>. Acesso em: 17 set. 2016.

APÊNDICE A - Espectros de frequência obtidos durante a realização dos experimentos

Luiz da Rocha Farias
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Campus Ponta Grossa)
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

Resultados obtidos durante o desenvolvimento da dissertação

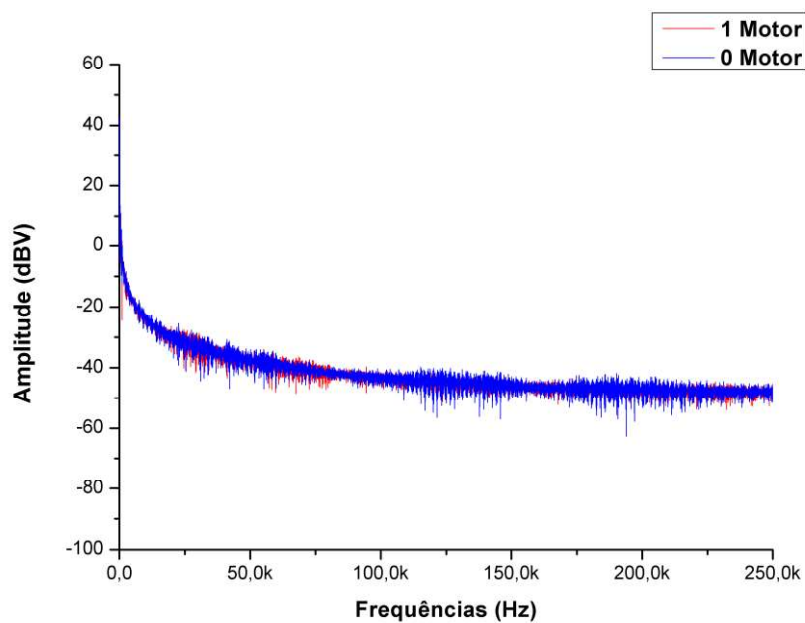
Neste apêndice é apresentado os resultados obtidos durante os ensaios realizados no laboratório. Todos esses resultados foram tabelados para que pudesse gerar os gráficos analisados e discutidos na Seção 5.

As Figuras 27-36, ilustram a caracterização da inserção do ruído da primeira bateria de testes, onde foi identificado que o posicionamento do ruído poderia estar interferindo na qualidade da comunicação PLC, mediante a quantidade de inversores/motores ligados na rede.

A partir das Figuras 37-46, são ilustrados os espectros de frequência obtido na segunda bateria de testes, onde é possível verificar a presença de um ruído característico na faixa de frequência utilizada (3 kHz – 95 kHz) para enviar os dados, diferente do que havia na primeira bateria de testes.

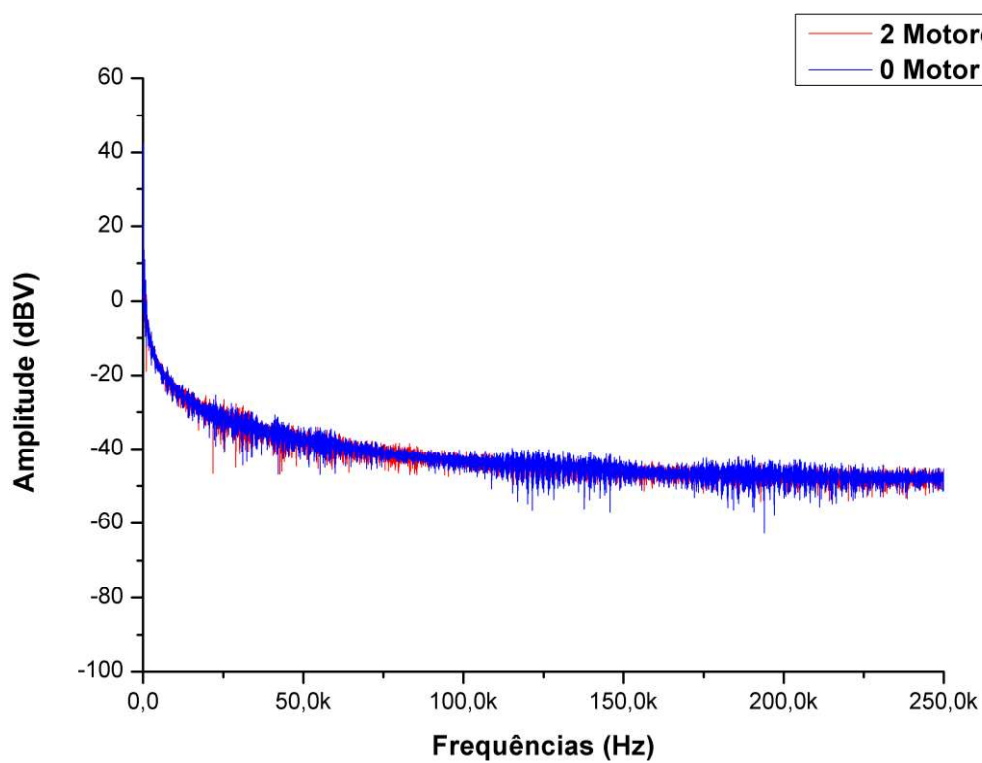
Por fim, são apresentados em formato de tabelas todos os resultados obtidos, tanto na primeira como na segunda bateria de testes. Esses dados foram analisados e apresentados em forma de Gráfico na Seção 5.

Figura 25 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 1 motor acionado sobre 0 motor.



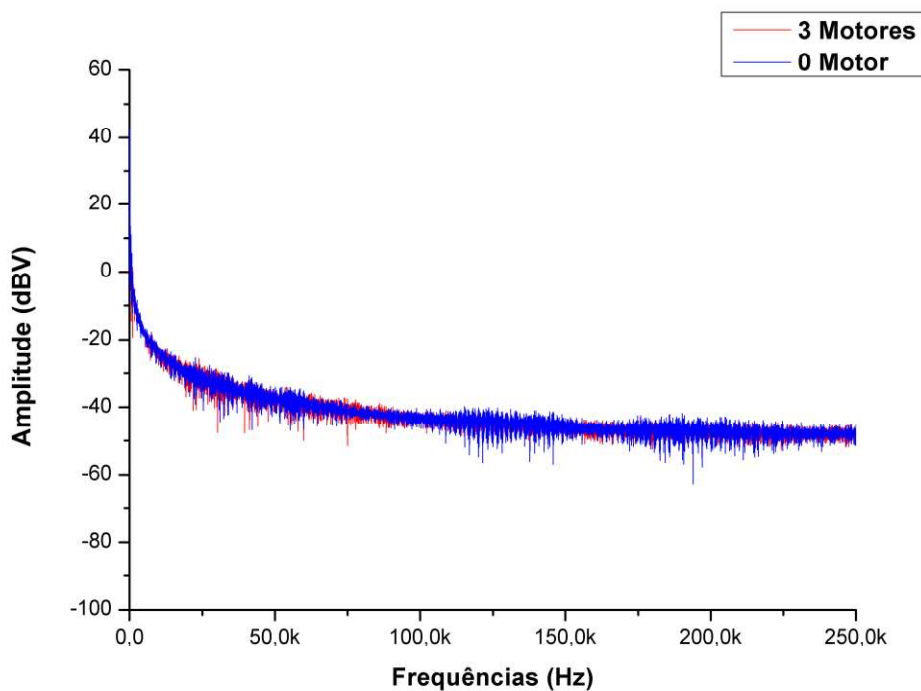
Fonte: Autoria própria.

Figura 26 - - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 2 motores acionados sobre 0 motor.



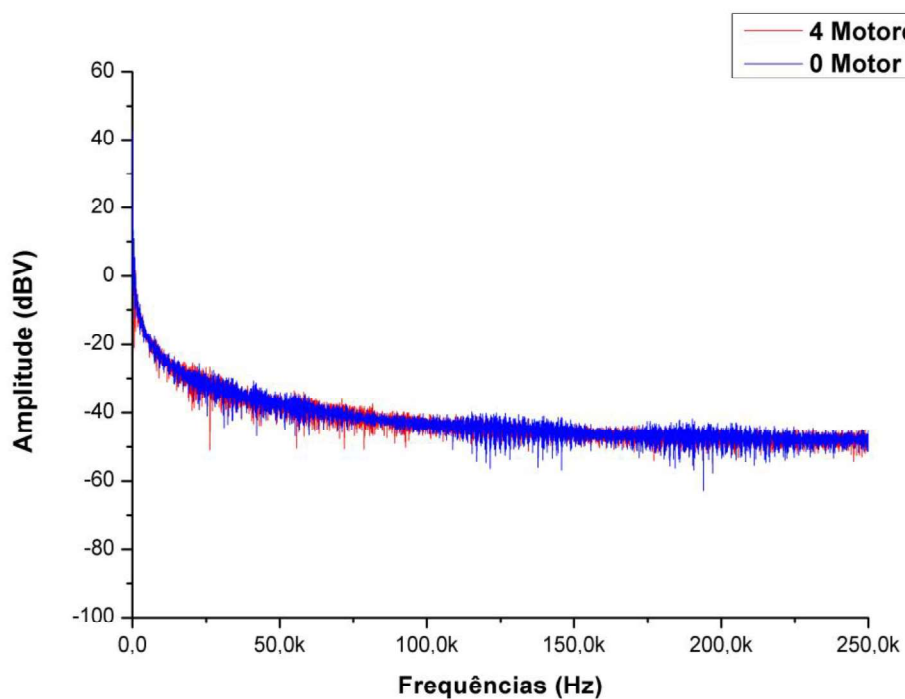
Fonte: Autoria própria.

Figura 27 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 3 motores acionados sobre 0 motor.



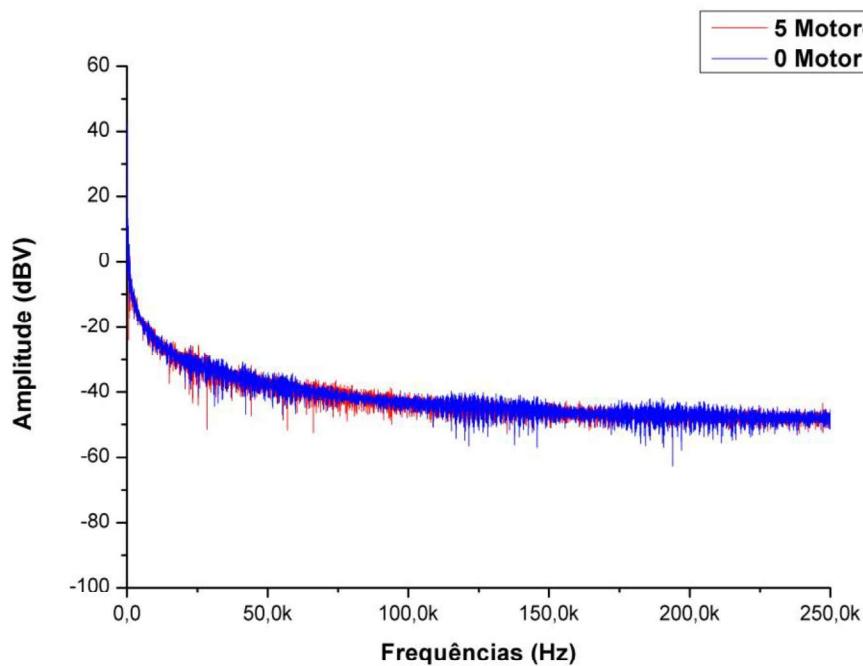
Fonte: Autoria própria.

Figura 28 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 4 motores acionados sobre 0 motor.



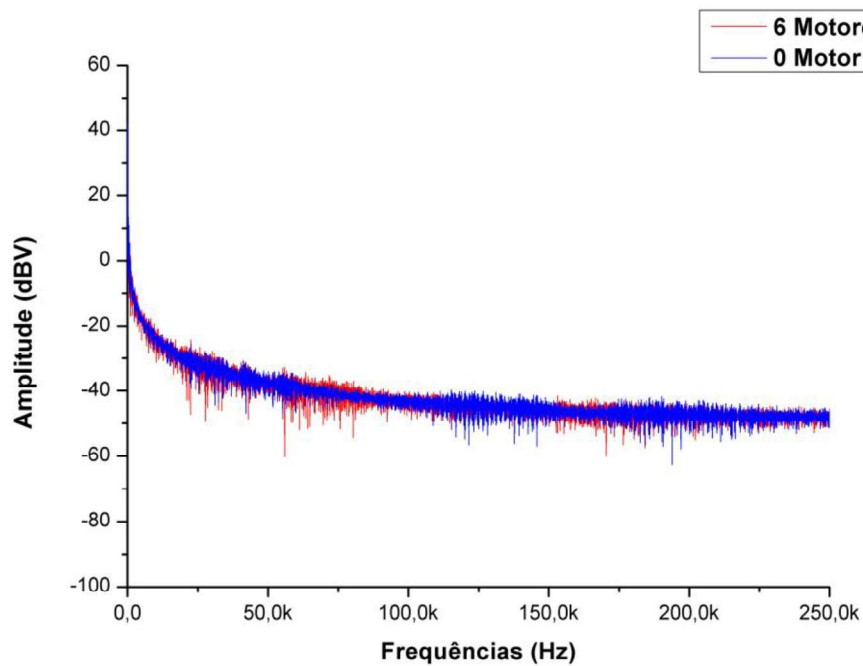
Fonte: Autoria própria.

Figura 29 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 5 motores acionados sobre 0 motor.



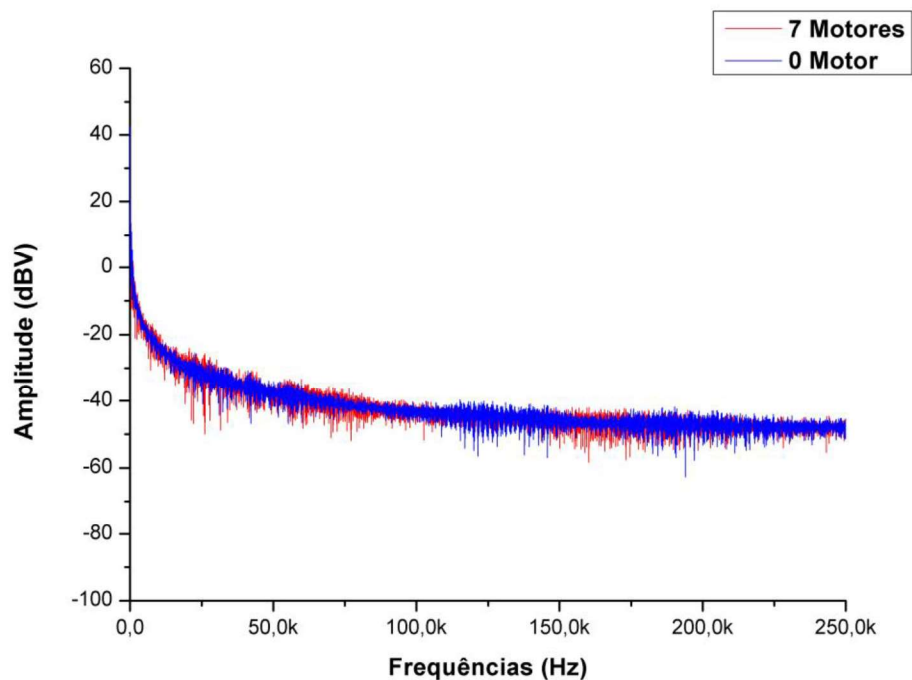
Fonte: Autoria própria.

Figura 30 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 6 motores acionados sobre 0 motor.



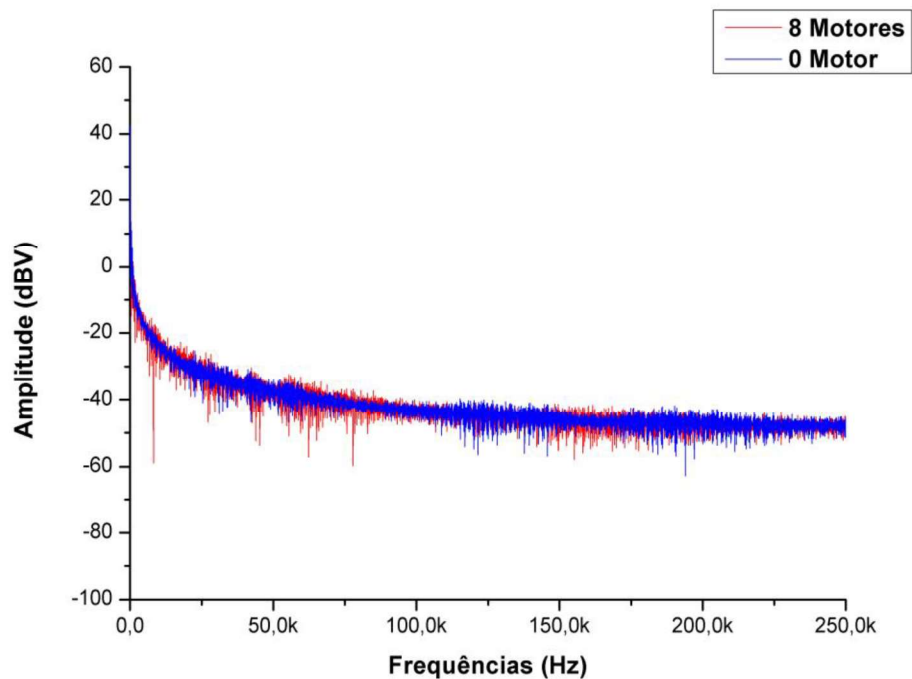
Fonte: Autoria própria.

Figura 31 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 7 motores acionados sobre 0 motor.



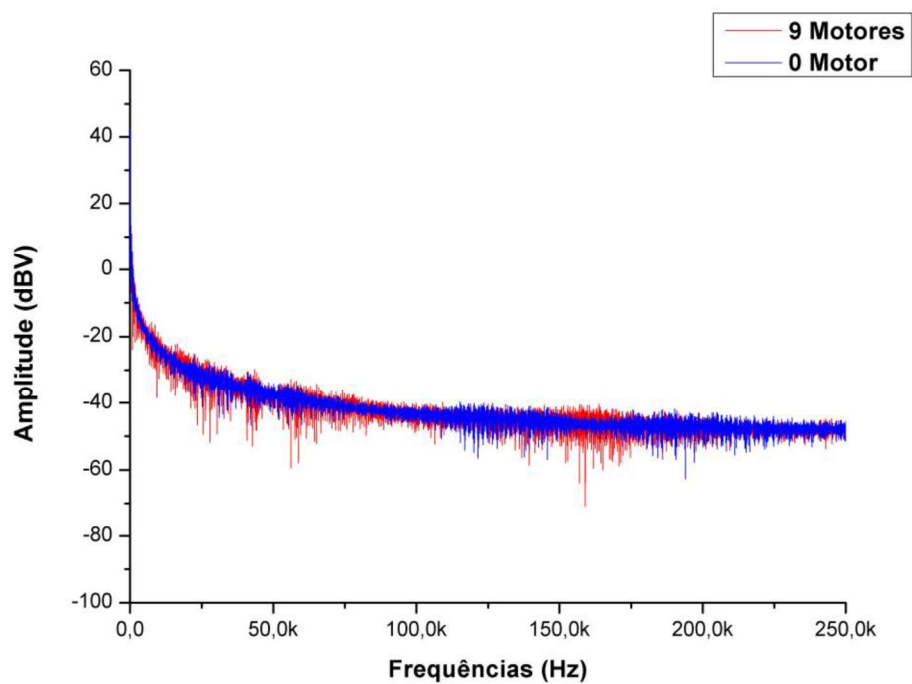
Fonte: Autoria própria.

Figura 32 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 8 motores acionados sobre 0 motor.



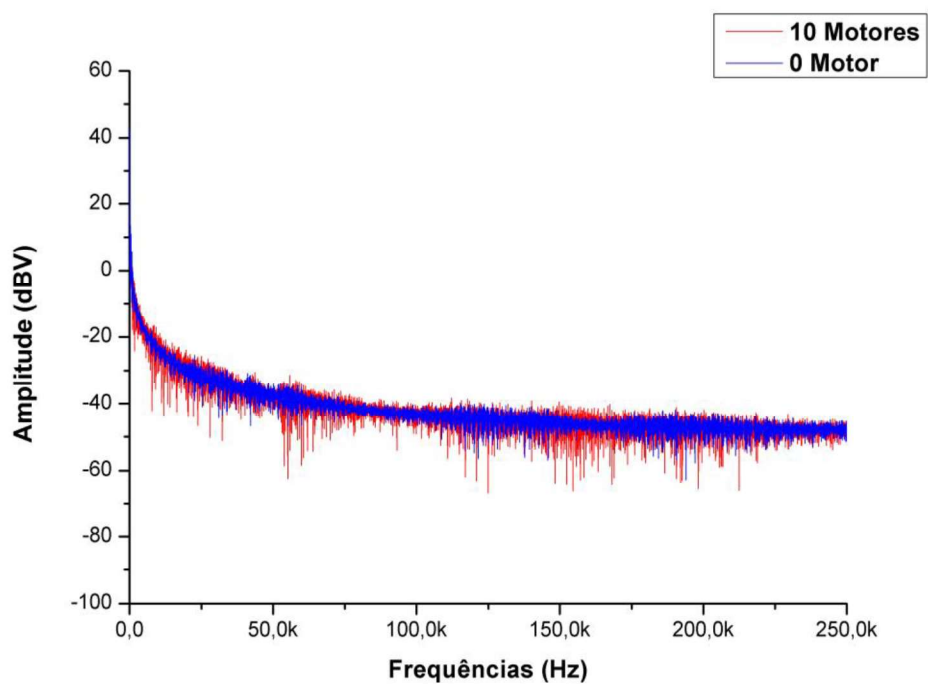
Fonte: Autoria própria.

Figura 33 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 9 motores acionados sobre 0 motor.



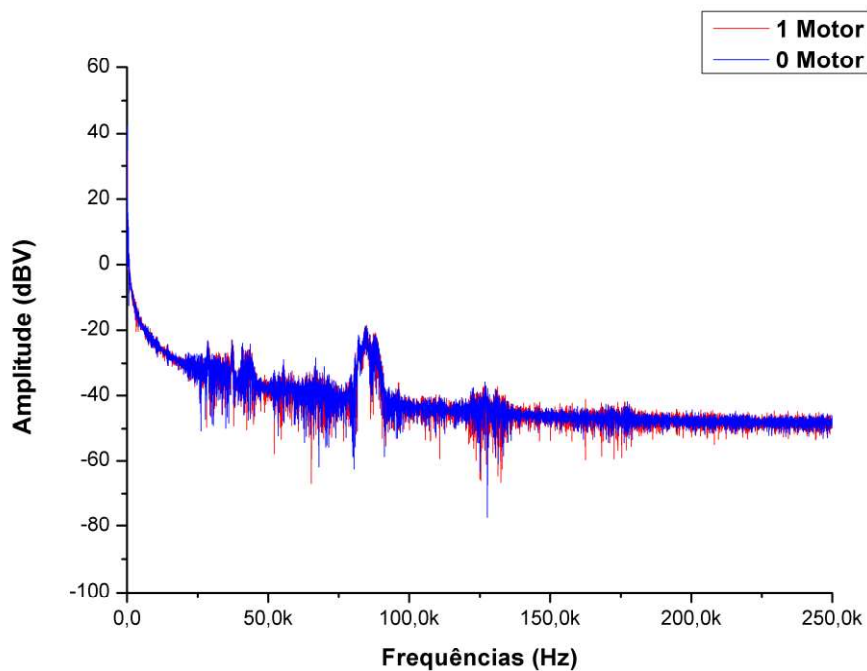
Fonte: Autoria própria.

Figura 34 - Espectro de frequência do canal PLC da primeira bateria de testes, com 10 motores acionados sobre 0 motor.



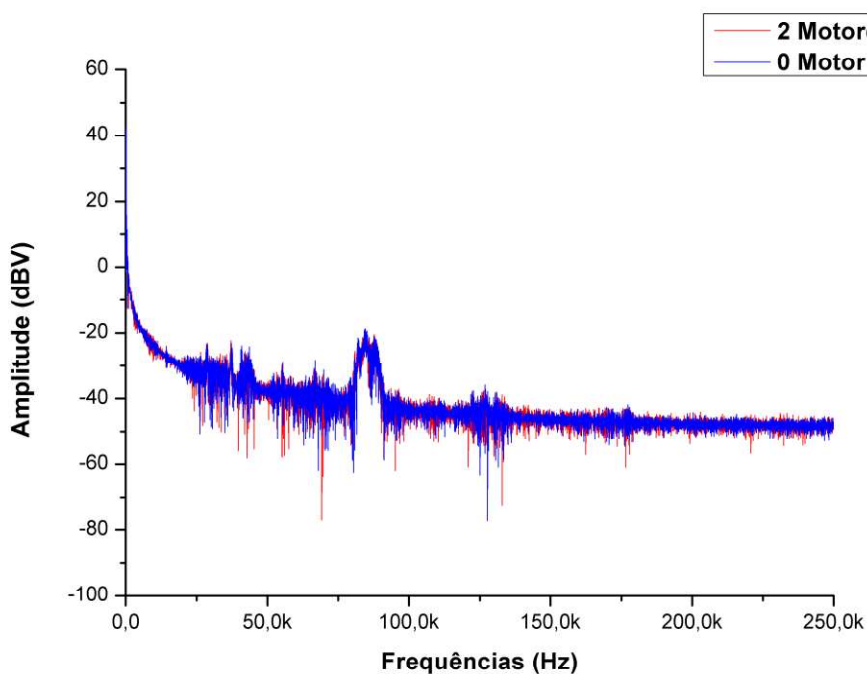
Fonte: Autoria própria.

Figura 35 - Espectro de frequência do canal PLC da segunda bateria de testes, com 1 motor acionado sobre 0 motor.



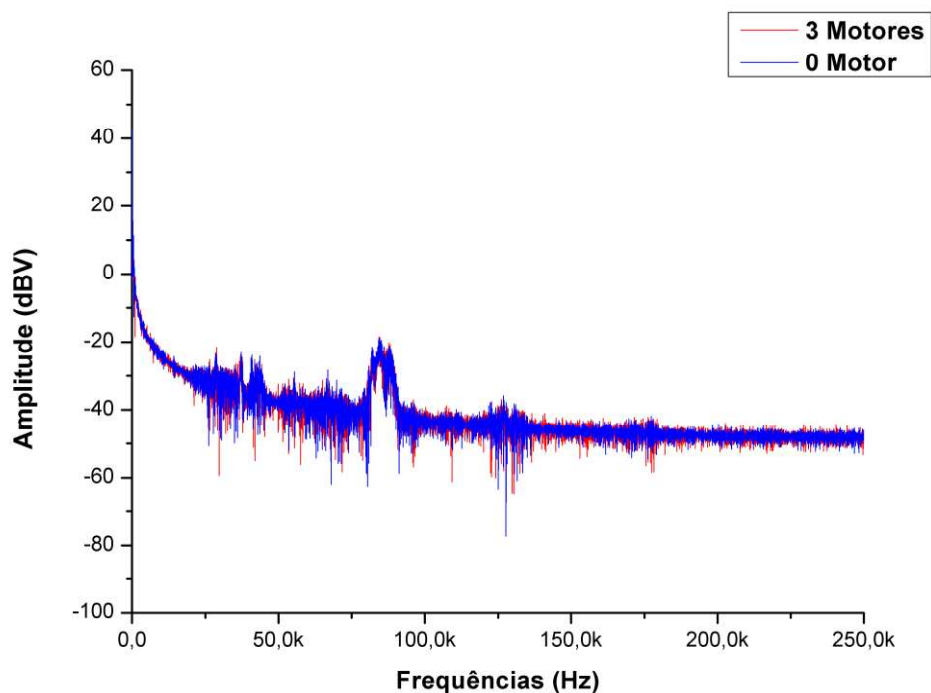
Fonte: Autoria própria.

Figura 36 - Espectro de frequência do canal PLC da segunda bateria de testes, com 2 motores acionado sobre 0 motor.



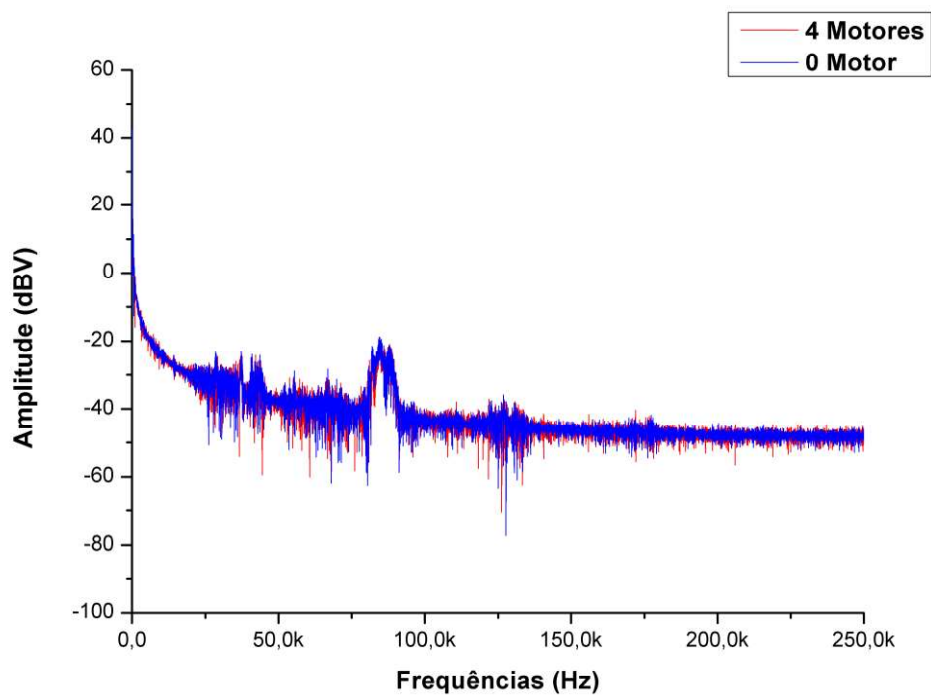
Fonte: Autoria própria.

Figura 37 - Espectro de frequência do canal PLC da segunda bateria de testes, com 3 motores acionado sobre 0 motor.



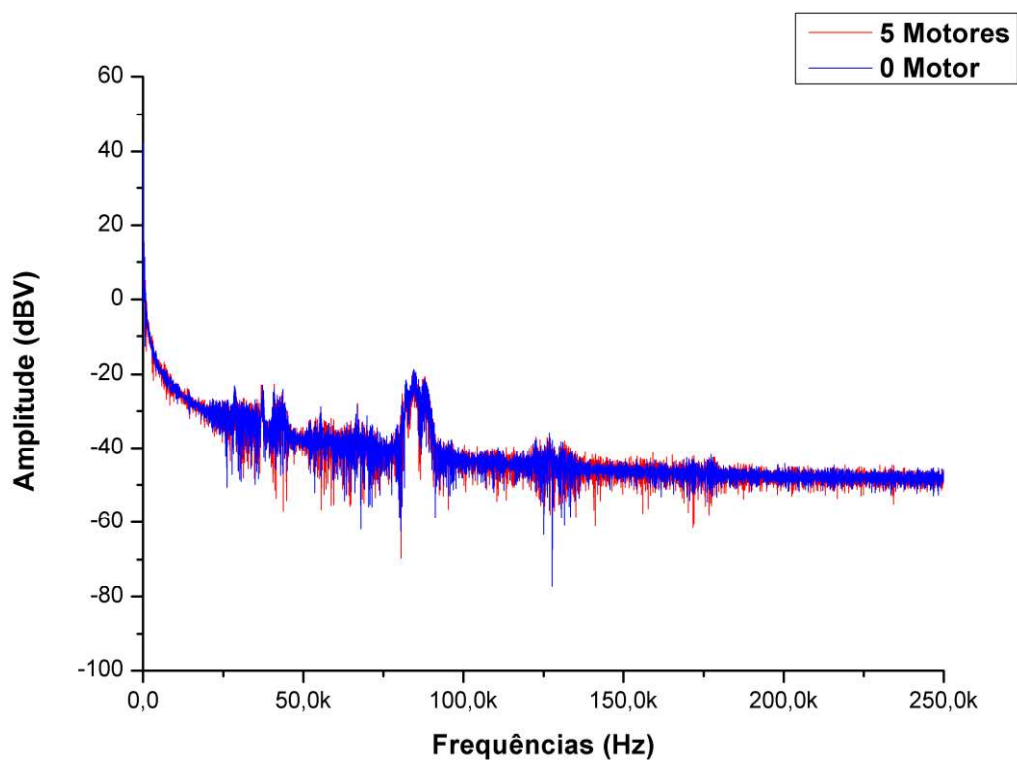
Fonte: Autoria própria.

Figura 38 - Espectro de frequência do canal PLC da segunda bateria de testes, com 4 motores acionado sobre 0 motor.



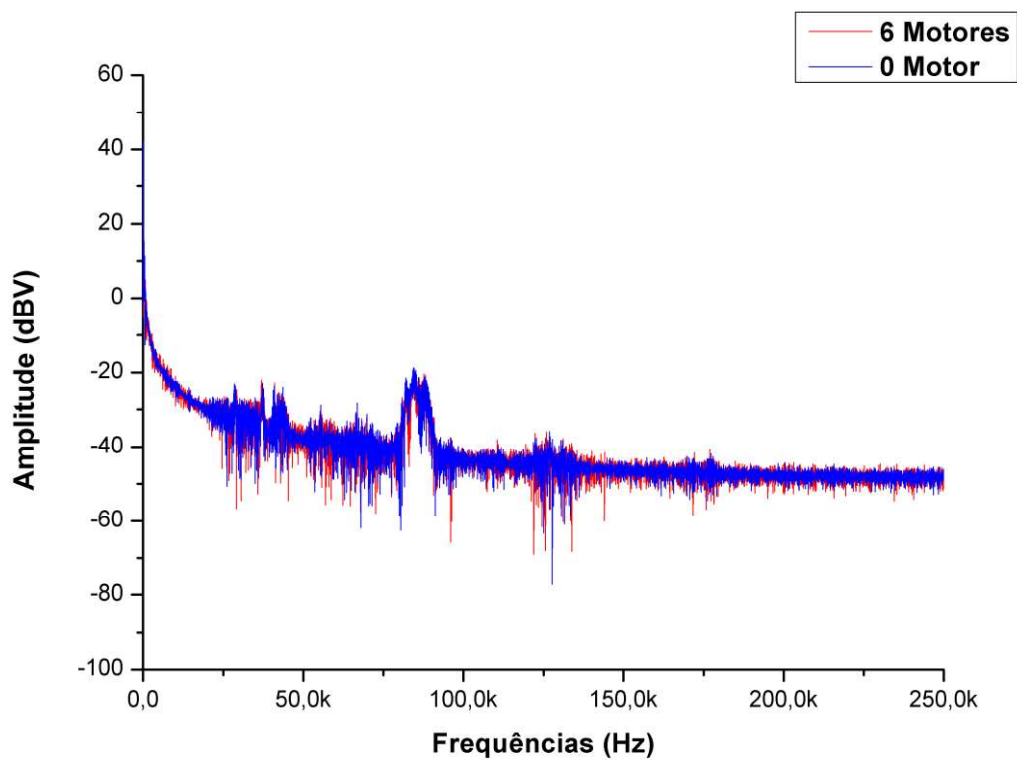
Fonte: Autoria própria.

Figura 39 - Espectro de frequência do canal PLC com 5 motores acionado sobre 0 motor.



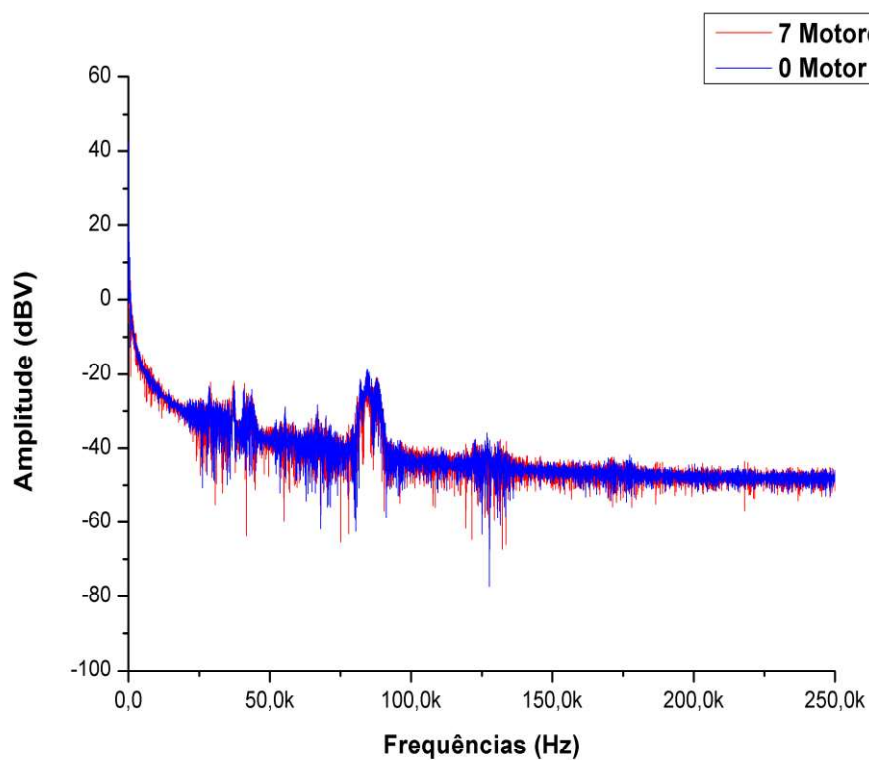
Fonte: Autoria própria.

Figura 40 - Espectro de frequência do canal PLC com 6 motores acionado sobre 0 motor.



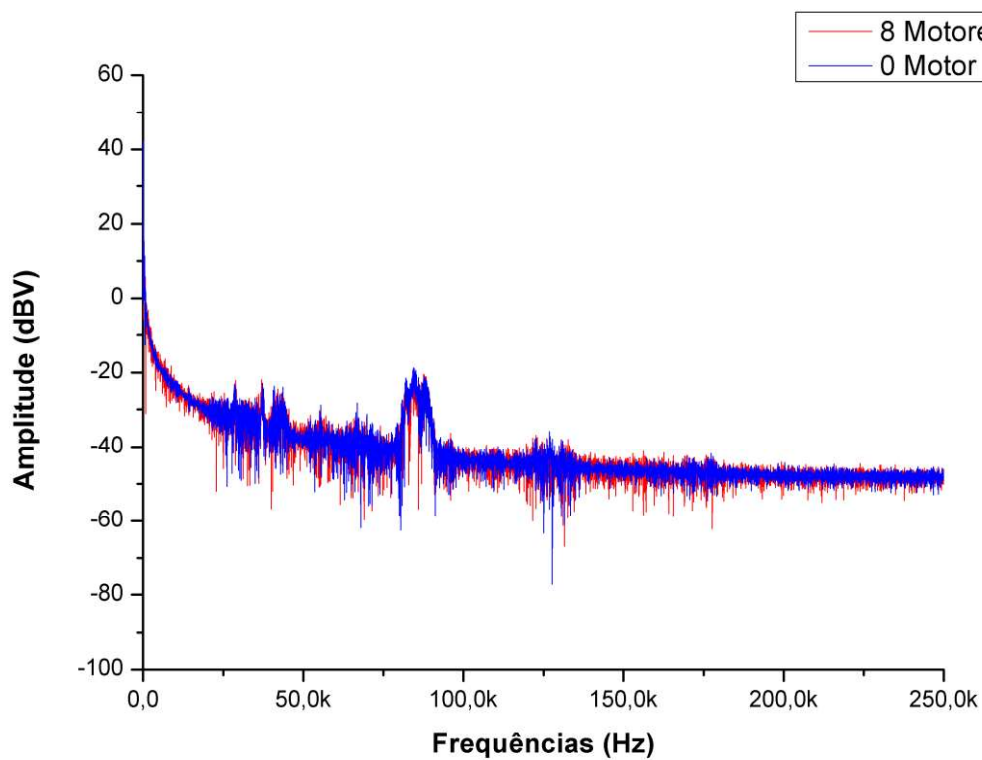
Fonte: Autoria própria.

Figura 41 - Espectro de frequência do canal PLC com 7 motores acionado sobre 0 motor.



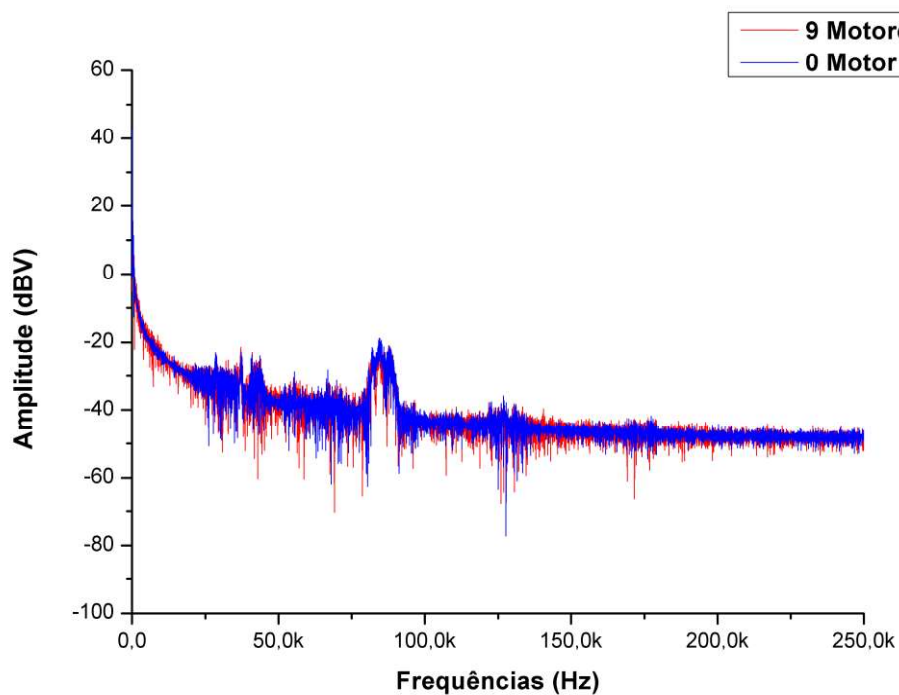
Fonte: Autoria própria.

Figura 42 - Espectro de frequência do canal PLC com 8 motores acionado sobre 0 motor.



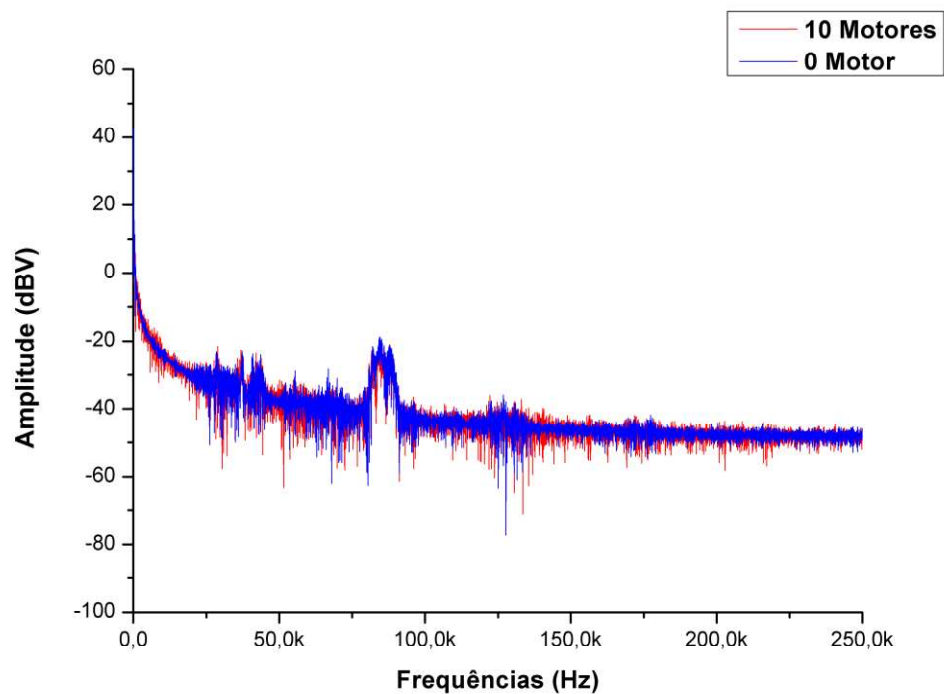
Fonte: Autoria própria.

Figura 43 - Espectro de frequência do canal PLC com 9 motores acionado sobre 0 motor.



Fonte: Autoria própria.

Figura 44 - Espectro de frequência do canal PLC com 10 motores acionado sobre 0 motor.



Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B - Primeira fase de ensaios experimentais

Luiz da Rocha Farias

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Campus Ponta Grossa)

Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

Resultados obtidos na primeira fase de ensaios experimentais

Neste apêndice é apresentado os resultados obtidos durante a primeira fase dos ensaios realizados no laboratório. As tabelas ilustradas nesse apêndice representam os resultados obtidos durante a primeira fase dos ensaios experimentais, onde foram enviados pacotes de tamanho variáveis de 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 Bytes para as 4 modulações utilizadas (8PSK, BPSK, QPSK e ROBO). Através dessas tabelas foram gerados os gráficos para analisar os dados obtidos na primeira fase de ensaios experimentais, onde foi observado a necessidade de realizar a segunda fase de ensaios experimentais, cujos os resultados foram apresentados na Seção 5.

Modulação 8PSK: Resultados obtidos com cenário 1, onde os acionamentos das bancadas foram feitos desconsiderando as distâncias entre as bancadas.

Tabela 15 - Média de 5 envios de pacotes de 1 Byte, utilizando a modulação 8PSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
1 Byte	0	18	982	228	7490	10976
	1	17	983	367	12381	5520
	2	34	966	325	10991	9328
	3	30	970	485	17144	7184
	4	29	971	455	15496	7552
	5	64	936	450	15448	7264
	6	85	915	453	15764	6720
	7	118	882	484	16957	6064
	8	122	878	481	16975	5968
	9	132	868	506	17781	5568
	10	275	725	514	18505	3360

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 16 - Média de 5 envios de pacotes de 2 Bytes, utilizando a modulação 8PSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
2 Bytes	0	21	979	231	7673	10784
	1	16	984	379	12781	5328
	2	31	969	337	11392	9296
	3	32	968	481	16888	7216
	4	31	969	447	15335	7696
	5	58	942	448	15401	7408
	6	80	920	457	15798	7024
	7	120	880	482	16897	5984
	8	123	877	492	17402	5872
	9	126	874	508	18268	5440
	10	272	728	498	18167	1712

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 17 - Média de 5 envios de pacotes de 4 Bytes, utilizando a modulação 8PSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
4 Bytes	0	25	975	249	8236	10560
	1	16	984	376	12715	5376
	2	34	966	339	11461	9040
	3	34	966	474	16741	7232
	4	29	971	452	15383	7616
	5	67	933	460	15785	7168
	6	74	926	446	15412	7200
	7	107	893	485	16869	6128
	8	126	874	487	17286	5872
	9	116	884	502	17589	3568
	10	274	726	502	18501	2288

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 18 - Média de 5 envios de pacotes de 8 Bytes, utilizando a modulação 8PSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
8 Bytes	0	30	970	262	8797	10256
	1	15	985	426	14297	5472
	2	30	970	341	11444	9200
	3	33	967	477	16915	7184
	4	30	970	455	15597	7552
	5	68	932	457	15729	7136
	6	67	933	448	15584	7312
	7	98	902	484	16873	6304
	8	128	872	495	17392	5792
	9	125	875	505	17895	3488
	10	275	725	491	18352	2320

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 19 - Média de 5 envios de pacotes de 16 Bytes, utilizando a modulação 8PSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
16 Bytes	0	17	983	46	1849	45880
	1	14	986	455	29597	16458
	2	35	965	332	18421	32323
	3	32	968	657	60526	16221
	4	32	968	664	58463	15984
	5	58	942	633	55529	16162
	6	70	930	641	58542	14918
	7	107	893	746	68243	11426
	8	129	871	695	72847	9886
	9	130	870	720	76673	4854
	10	278	722	674	78059	2131

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 20 - Média de 5 envios de pacotes de 32 Bytes, utilizando a modulação 8PSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
32 Bytes	0	22	978	48	1951	45051
	1	17	983	489	32345	15806
	2	35	965	381	21616	29008
	3	32	968	689	62525	14445
	4	30	970	455	15597	7552
	5	67	933	631	55524	15629
	6	69	931	648	59686	14682
	7	91	909	690	67225	11958
	8	119	881	697	72277	10123
	9	137	863	716	76586	5269
	10	268	732	685	79457	1954

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 21 - Média de 5 envios de pacotes de 64 Bytes, utilizando a modulação 8PSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
64 Bytes	0	21	979	13	689	74342
	1	19	981	445	28153	27443
	2	41	959	211	17793	58778
	3	35	965	838	75898	12493
	4	29	971	819	69208	13414
	5	73	927	675	56678	22630
	6	73	927	759	63876	15667
	7	96	904	862	82958	4915
	8	114	886	863	89940	2765
	9	121	879	866	98110	1536
	10	297	703	703	103481	102

Fonte: Autoria Própria.

Modulação QPSK: Resultados obtidos no cenário 1, onde os acionamentos das bancadas eram feitos desconsiderando as distâncias entre as bancadas.

Tabela 22 - Média de 5 envios de pacotes de 1 Byte, utilizando a modulação QPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
1 Byte	0	17	983	51	166	1347
	1	15	985	68	192	1318
	2	30	970	107	320	1248
	3	30	970	132	404	1211
	4	25	975	146	433	1213
	5	64	936	204	579	640
	6	90	910	176	518	1083
	7	101	899	226	730	1002
	8	107	893	230	873	976
	9	98	902	201	598	1029
	10	290	710	223	680	757

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 23 - Média de 5 envios de pacotes de 2 Bytes, utilizando a modulação QPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
2 Bytes	0	20	980	1	53	24307
	1	6	994	1	25	15382
	2	33	967	4	168	14470
	3	24	976	38	1387	23469
	4	27	973	95	3390	22028
	5	58	942	157	6195	12078
	6	88	912	100	3718	20642
	7	104	896	360	15594	14075
	8	93	907	350	15080	14501
	9	93	907	171	6586	18726
	10	297	703	264	11340	11795

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 24 - Média de 5 envios de pacotes de 4 Bytes, utilizando a modulação QPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
4 Bytes	0	15	985	1	30	24320
	1	7	993	1	20	14744
	2	27	973	4	172	14622
	3	33	967	47	1609	23074
	4	26	974	98	3723	21858
	5	68	932	162	6214	12130
	6	97	903	132	5333	19304
	7	100	900	342	14468	14501
	8	62	938	289	11839	16690
	9	98	902	192	7425	18544
	10	295	705	272	11942	11522

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 25 - Média de 5 envios de pacotes de 8 Bytes, utilizando a modulação QPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
8 Bytes	0	13	987	0	6	24472
	1	4	996	0	16	14744
	2	34	966	1	62	14592
	3	31	969	47	1730	23043
	4	24	976	94	3425	22283
	5	58	942	154	6175	12312
	6	91	909	134	5574	19699
	7	108	892	338	14321	14574
	8	60	940	254	10410	17845
	9	106	894	188	7628	18240
	10	287	713	277	12014	11643

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 26 - Média de 5 envios de pacotes de 16 Bytes, utilizando a modulação QPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
16 Bytes	0	15	985	0	12	24320
	1	3	997	0	0	14744
	2	43	957	3	115	14440
	3	27	973	54	1962	23074
	4	25	975	85	3088	22344
	5	56	944	126	4829	12675
	6	59	941	152	5890	19790
	7	89	911	342	14820	14774
	8	65	935	211	8103	18787
	9	104	896	195	7824	18453
	10	291	709	272	11800	11734

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 27 - Média de 5 envios de pacotes de 32 Bytes, utilizando a modulação QPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
32 Bytes	0	23	977	0	6	43216
	1	3	997	15	677	26285
	2	38	962	22	1051	25397
	3	30	970	45	3558	41203
	4	55	945	68	5389	39368
	5	68	932	73	5780	23443
	6	71	929	66	5040	38362
	7	78	922	133	14197	35994
	8	86	914	97	8633	36822
	9	97	903	89	7119	36882
	10	295	705	50	4689	30133

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 28 - Média de 5 envios de pacotes de 64 Bytes, utilizando a modulação QPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
64 Bytes	0	19	981	0	0	73818
	1	6	994	15	644	44384
	2	27	973	18	901	44034
	3	36	964	62	5381	67912
	4	52	948	105	10492	64474
	5	71	929	122	10300	38136
	6	68	932	163	12547	60035
	7	89	911	248	31137	51859
	8	90	910	191	17047	56064
	9	104	896	156	14266	56765
	10	300	700	122	11131	46136

Fonte: Autoria Própria.

Modulação BPSK: Resultados obtidos no cenário 1, onde os acionamentos das bancadas eram feitos desconsiderando as distâncias entre as bancadas.

Tabela 29 - Média de 5 envios de pacotes de 1 Byte, utilizando a modulação BPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
1 Byte	0	15	985	0	0	1285
	1	15	985	0	0	1285
	2	31	969	0	0	1269
	3	35	965	0	0	1272
	4	27	973	0	0	1272
	5	58	942	0	32	1237
	6	64	936	0	0	1234
	7	129	871	0	1	712
	8	134	866	1	2	696
	9	150	850	0	70	690
	10	273	727	0	0	982

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 30 - Média de 5 envios de pacotes de 2 Bytes, utilizando a modulação BPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
2 Bytes	0	23	977	0	0	11712
	1	14	986	0	0	11760
	2	36	964	0	0	11584
	3	30	970	1	13	11664
	4	26	974	1	11	11680
	5	62	938	2	39	11168
	6	69	931	0	12	11168
	7	127	873	1	13	6528
	8	117	883	1	18	6608
	9	147	853	1	23	6304
	10	289	711	1	12	8864

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 31 - Média de 5 envios de pacotes de 4 Bytes, utilizando a modulação BPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
4 Bytes	0	18	982	0	0	11712
	1	10	990	0	0	11840
	2	28	972	0	0	11664
	3	30	970	0	0	11616
	4	24	976	0	7	11664
	5	59	941	1	34	11296
	6	64	936	0	4	11312
	7	132	868	1	22	6416
	8	130	870	1	8	6560
	9	151	849	1	7	6320
	10	289	711	0	11	8784

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 32 - Média de 5 envios de pacotes de 8 Bytes, utilizando a modulação BPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
8 Bytes	0	18	982	0	0	11760
	1	12	988	0	0	11808
	2	28	972	0	0	11696
	3	34	966	0	0	11616
	4	23	977	1	23	11760
	5	60	940	2	176	11344
	6	88	912	0	12	11088
	7	134	866	0	7	6496
	8	129	871	1	9	6496
	9	159	841	1	14	6320
	10	298	702	1	11	8544

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 33 - Média de 5 envios de pacotes de 16 Bytes, utilizando a modulação BPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
16 Bytes	0	18	982	0	0	20611
	1	8	992	0	0	20763
	2	28	972	0	0	20550
	3	30	970	0	0	20490
	4	24	976	0	10	20642
	5	46	954	1	47	20246
	6	87	913	0	0	19608
	7	130	870	1	40	11522
	8	137	863	1	11	11278
	9	163	837	0	0	11066
	10	281	719	0	9	15626

Fonte: Aatoria Própria.

Tabela 34 - Média de 5 envios de pacotes de 32 Bytes, utilizando a modulação BPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
32 Bytes	0	18	982	0	0	34928
	1	8	992	0	0	35165
	2	25	975	0	0	34689
	3	33	967	0	5	35750
	4	32	968	1	24	34714
	5	59	941	3	88	28298
	6	88	912	1	28	33611
	7	127	873	3	101	19418
	8	134	866	2	69	18826
	9	154	846	4	80	18589
	10	291	709	2	53	26107

Fonte: Aatoria Própria.

Tabela 35 - Média de 5 envios de pacotes de 64 Bytes, utilizando a modulação BPSK.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
64 Bytes	0	18	982	0	0	50278
	1	8	992	0	6	50586
	2	27	973	1	25	50278
	3	33	967	3	150	49766
	4	29	971	19	1174	49152
	5	62	938	28	1538	28877
	6	80	920	12	636	47923
	7	126	874	23	1161	27648
	8	133	867	25	1218	27136
	9	163	837	21	0	11066
	10	287	713	18	1057	37683

Fonte: Aatoria Própria.

Modulação ROBO: Resultados obtidos no cenário 1, onde os acionamentos das bancadas eram feitos desconsiderando as distâncias entre as bancadas.

Tabela 36 - Média de 5 envios de pacotes de 1 Byte, utilizando a modulação ROBO.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
1 Byte	0	22	978	0	0	2013
	1	11	989	0	0	1712
	2	28	972	0	0	2006
	3	31	969	0	0	2000
	4	19	981	0	0	2013
	5	75	925	0	0	1168
	6	81	919	0	0	1917
	7	105	895	0	0	1872
	8	88	912	0	0	1920
	9	91	909	0	0	1904
	10	279	721	0	0	1514

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 37 - Média de 5 envios de pacotes de 2 Bytes, utilizando a modulação ROBO.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
2 Bytes	0	22	978	0	0	2006
	1	11	989	0	0	2029
	2	28	972	0	85	2013
	3	30	970	0	0	2006
	4	24	976	0	0	2019
	5	73	927	0	0	1178
	6	89	911	0	0	1927
	7	86	914	0	0	1898
	8	70	930	0	0	1939
	9	98	902	0	0	1888
	10	267	733	0	0	1555

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 38 - Média de 5 envios de pacotes de 4 Bytes, utilizando a modulação ROBO.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
4 Bytes	0	21	979	0	0	3770
	1	10	990	0	0	3789
	2	31	969	0	0	3750
	3	38	962	0	0	3712
	4	24	976	0	0	3789
	5	74	926	0	0	2208
	6	93	907	0	0	3597
	7	93	907	0	0	3552
	8	79	921	0	0	3635
	9	97	903	0	0	3578
	10	269	731	0	0	2931

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 39 - Média de 5 envios de pacotes de 8 Bytes, utilizando a modulação ROBO.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
8 Bytes	0	23	977	0	136	7474
	1	11	989	0	0	7560
	2	31	969	0	138	7502
	3	36	964	0	0	7445
	4	22	978	0	0	7502
	5	77	923	0	0	4363
	6	91	909	0	0	7099
	7	122	878	0	89	6912
	8	82	918	0	41	7142
	9	103	897	0	0	7056
	10	283	717	0	0	5818

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 40 - Média de 5 envios de pacotes de 16 Bytes, utilizando a modulação ROBO.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
16 Bytes	0	25	975	0	0	11315
	1	16	984	0	0	11418
	2	32	968	0	0	11418
	3	39	961	0	0	11290
	4	27	973	0	0	11341
	5	75	925	0	0	6682
	6	96	904	0	0	10726
	7	120	880	0	0	10547
	8	80	920	0	0	10906
	9	108	892	0	0	10675
	10	277	723	0	0	8858

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 41 - Média de 5 envios de pacotes de 32 Bytes, utilizando a modulação ROBO.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
32 Bytes	0	18	982	0	0	17408
	1	19	981	0	0	17408
	2	29	971	0	0	17354
	3	47	953	0	0	17027
	4	25	975	0	0	17408
	5	74	926	0	0	10336
	6	85	915	0	0	17082
	7	108	892	0	0	16538
	8	67	933	0	0	17027
	9	107	893	0	0	16429
	10	279	721	0	0	13926

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 42 - Média de 5 envios de pacotes de 64 Bytes, utilizando a modulação ROBO.

	Ruído	Pacotes Perdidos	Pacotes Recebidos	PER	BER	Tx Médio
64 Bytes	0	19	981	0	0	22360
	1	19	981	0	0	22360
	2	27	973	0	0	22256
	3	60	940	0	0	22048
	4	24	976	0	0	22256
	5	82	918	0	161	13312
	6	89	911	0	0	21736
	7	99	901	0	157	21216
	8	75	925	0	0	21736
	9	107	893	0	0	21216
	10	290	710	0	33	17992

Fonte: Autoria Própria.

APÊNDICE C - Segunda fase de ensaios experimentais

Luiz da Rocha Farias
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Campus Ponta Grossa)
 Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

Resultados obtidos na segunda fase de ensaios experimentais

Neste apêndice são apresentados os resultados obtidos durante a segunda fase dos ensaios realizados no laboratório, onde foi realizado duas sequências de acionamentos das bancadas, denominados: acionamento decrescente/crescente. Nessa fase foi enviado pacotes de dados com 4 Bytes e foi utilizado apenas as 2 modulações mais eficientes (BPSK e ROBO), os resultados obtidos são ilustrados nas tabelas abaixo.

Os resultados apresentados nas tabelas abaixo, foram obtidos através da ordem de acionamento decrescente, caracterizado pelo acionamento da primeira bancada onde se encontra o modem receptor.

Tabela 43 – Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com nenhum motor acionado, utilizando a modulação BPSK

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	205	795	632	79	25899
	2	207	793	613	77	25899
	3	201	799	652	82	25899
	4	181	819	670	82	25899
	5	189	811	659	81	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 44 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 1 motor acionado, utilizando a modulação BPSK

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	125	875	861	98	25899
	2	143	857	836	98	25899
	3	154	846	830	98	25899
	4	158	842	808	96	25899
	5	193	807	784	97	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 45 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 2 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	254	746	745	100	25899
	2	225	775	775	100	25899
	3	227	773	773	100	25899
	4	256	744	744	100	25899
	5	273	727	727	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 46 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 3 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	261	739	739	100	25899
	2	274	726	726	100	25899
	3	315	685	685	100	25899
	4	266	734	734	100	25899
	5	283	717	717	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 47 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 4 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	335	665	665	100	25899
	2	325	675	675	100	25899
	3	352	648	648	100	25899
	4	355	645	645	100	25899
	5	347	653	653	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 48 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 5 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	520	480	480	100	25899
	2	516	484	484	100	25899
	3	523	477	477	100	25899
	4	509	491	491	100	25899
	5	521	479	479	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 49 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 6 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	583	417	417	100	25899
	2	581	419	419	100	25899
	3	595	405	405	100	25899
	4	589	411	411	100	25899
	5	582	418	418	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 50 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 7 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	586	414	414	100	25899
	2	592	408	408	100	25899
	3	570	430	430	100	25899
	4	571	429	429	100	25899
	5	590	410	410	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 51 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 8 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	647	353	353	100	25899
	2	646	354	354	100	25899
	3	622	378	378	100	25899
	4	636	364	364	100	25899
	5	665	335	335	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 52 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 9 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	656	344	344	100	25899
	2	659	341	341	100	25899
	3	674	326	326	100	25899
	4	663	337	337	100	25899
	5	667	333	333	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 53 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	699	301	301	100	25899
	2	694	306	306	100	25899
	3	687	313	313	100	25899
	4	697	303	303	100	25899
	5	690	310	310	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 54 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	201	799	0	0	6475
	2	209	791	0	0	6475
	3	208	792	0	0	6475
	4	211	789	0	0	6475
	5	185	815	0	0	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 55 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 1 motor acionado, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	199	801	0	0	6475
	2	171	829	0	0	6475
	3	189	811	0	0	6475
	4	172	828	0	0	6475
	5	144	856	0	0	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 56 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 2 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

2 Motores

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	242	758	2	0	6475
	2	223	777	0	0	6475
	3	193	807	0	0	6475
	4	214	786	0	0	6475
	5	222	778	0	0	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 57 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 3 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	288	712	0	0	6475
	2	249	751	0	0	6475
	3	273	727	1	0	6475
	4	258	742	3	0	6475
	5	263	737	1	0	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 58 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 4 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	470	530	20	4	6475
	2	487	513	30	6	6475
	3	479	521	24	5	6475
	4	482	518	27	5	6475
	5	492	508	27	5	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 59 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 5 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	519	481	34	7	6475
	2	551	449	25	6	6475
	3	511	489	36	7	6475
	4	517	483	35	7	6475
	5	521	479	37	8	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 60 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 6 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	588	412	49	12	6475
	2	576	424	40	9	6475
	3	586	414	42	10	6475
	4	603	397	43	11	6475
	5	607	393	47	12	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 61 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 7 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	602	398	33	8	6475
	2	581	419	38	9	6475
	3	608	392	42	11	6475
	4	624	376	39	10	6475
	5	607	393	39	10	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 62 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 8 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	651	349	35	10	6475
	2	649	351	42	12	6475
	3	676	324	27	8	6475
	4	661	339	34	10	6475
	5	672	328	46	14	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 63 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 9 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	683	317	34	11	6475
	2	673	327	45	14	6475
	3	698	302	30	10	6475
	4	690	310	31	10	6475
	5	680	320	46	14	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 64 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	693	307	21	7	6475
	2	699	301	12	4	6475
	3	698	302	19	6	6475
	4	697	303	25	8	6475
	5	696	304	20	7	6475

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados apresentados nas tabelas abaixo, foram obtidos através da ordem de acionamento crescente, caracterizado pelo acionamento da primeira bancada onde se encontra o modem emissor.

Tabela 65 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	205	795	632	79	25899
	2	207	793	612	77	25899
	3	201	799	652	82	25899
	4	181	819	670	82	25899
	5	189	811	659	81	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 66 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 1 motor acionado, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	504	496	494	100	25899
	2	488	512	508	99	25899
	3	487	513	509	99	25899
	4	477	523	519	99	25899
	5	470	530	529	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 67 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 2 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	561	439	439	100	25899
	2	537	463	463	100	25899
	3	521	479	479	100	25899
	4	501	499	499	100	25899
	5	519	481	481	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 68 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 3 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	647	353	353	100	25899
	2	604	396	396	100	25899
	3	585	415	415	100	25899
	4	613	387	387	100	25899
	5	648	352	352	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 69 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 4 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	658	342	342	100	25899
	2	656	344	344	100	25899
	3	669	331	331	100	25899
	4	645	355	355	100	25899
	5	643	357	357	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 70 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 5 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	709	291	291	100	25899
	2	697	303	303	100	25899
	3	696	304	304	100	25899
	4	676	324	324	100	25899
	5	667	333	333	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 71 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 6 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	671	329	329	100	25899
	2	705	295	295	100	25899
	3	704	296	296	100	25899
	4	707	293	293	100	25899
	5	662	338	338	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 72 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 7 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	691	309	309	100	25899
	2	703	297	297	100	25899
	3	740	260	260	100	25899
	4	744	256	256	100	25899
	5	742	258	258	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 73 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 8 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	729	271	271	100	25899
	2	721	279	279	100	25899
	3	718	282	282	100	25899
	4	686	314	314	100	25899
	5	712	288	288	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 74 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 9 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	731	269	269	100	25899
	2	729	271	271	100	25899
	3	695	305	305	100	25899
	4	700	300	300	100	25899
	5	711	289	289	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 75 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	659	341	341	100	25899
	2	658	342	342	100	25899
	3	662	338	338	100	25899
	4	683	317	317	100	25899
	5	659	341	341	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 76 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	201	799	0	0	6475
	2	209	791	0	0	6475
	3	208	792	0	0	6475
	4	211	789	0	0	6475
	5	185	815	0	0	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 77 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 1 motor acionado, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	499	501	2	0	6475
	2	501	499	2	0	6475
	3	494	506	4	1	6475
	4	487	513	1	0	6475
	5	492	508	2	0	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 78 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 2 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	566	434	4	1	6475
	2	546	454	7	2	6475
	3	530	470	2	0	6475
	4	547	453	8	2	6475
	5	577	423	8	2	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 79 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 3 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	572	428	1	0	6475
	2	579	421	6	1	6475
	3	599	401	1	0	6475
	4	629	371	5	1	6475
	5	646	354	9	3	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 80 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 4 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	643	357	5	1	6475
	2	632	368	4	1	6475
	3	654	346	9	3	6475
	4	642	358	11	3	6475
	5	674	326	6	2	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 81 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 5 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	685	315	7	2	6475
	2	666	334	4	1	6475
	3	620	380	6	2	6475
	4	650	350	10	3	6475
	5	662	338	6	2	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 82 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 6 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	692	308	6	2	6475
	2	694	306	3	1	6475
	3	688	312	6	2	6475
	4	690	310	11	4	6475
	5	708	292	5	2	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 83 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 7 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	713	287	10	3	6475
	2	714	286	6	2	6475
	3	718	282	9	3	6475
	4	728	272	5	2	6475
	5	738	262	5	2	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 84 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 8 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	698	302	9	3	6475
	2	697	303	7	2	6475
	3	706	294	11	4	6475
	4	744	256	2	1	6475
	5	740	260	7	3	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 85 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 9 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	704	296	10	3	6475
	2	706	294	9	3	6475
	3	739	261	6	2	6475
	4	719	281	9	3	6475
	5	692	308	6	2	6475

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 86 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	675	325	4	1	6475
	2	676	324	9	3	6475
	3	697	303	5	2	6475
	4	663	337	5	1	6475
	5	654	346	10	3	6475

Fonte: Autoria Própria.

As tabelas abaixo ilustram os resultados obtidos no cenário de ensaios 2. Onde foi verificado a influência das distâncias entre o modem receptor/emissor e a fonte ruidosa.

Tabela 87 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 20 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	237	763	88	12	25899
	2	238	762	125	16	25899
	3	265	735	94	13	25899
	4	247	753	102	14	25899
	5	241	759	94	12	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 88 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 40 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	(PER %)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	303	697	123	18	25899
	2	303	697	111	16	25899
	3	323	677	108	16	25899
	4	309	691	87	13	25899
	5	281	719	85	12	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 89 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 60 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	(PER %)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	154	846	216	26	25899
	2	157	843	183	22	25899
	3	158	842	214	25	25899
	4	149	851	205	24	25899
	5	159	841	225	27	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 90 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	(PER %)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	121	879	166	19	25899
	2	127	873	157	18	25899
	3	113	887	161	18	25899
	4	114	886	188	21	25899
	5	114	886	201	23	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 91 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 20 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	(PER %)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	198	802	783	98	25899
	2	191	809	782	97	25899
	3	180	820	794	97	25899
	4	204	796	777	98	25899
	5	175	825	800	97	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 92 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 40 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	(PER %)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	208	792	791	100	25899
	2	209	791	791	100	25899
	3	216	784	782	100	25899
	4	204	796	796	100	25899
	5	196	804	804	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 93 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 60 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	(PER %)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	401	599	599	100	25899
	2	398	602	602	100	25899
	3	361	639	639	100	25899
	4	410	590	590	100	25899
	5	394	606	606	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 94 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	(PER %)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	505	495	495	100	25899
	2	484	516	516	100	25899
	3	510	490	490	100	25899
	4	543	457	457	100	25899
	5	539	461	461	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 95 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 20 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	262	738	0	0	6410
	2	251	749	0	0	6410
	3	232	768	0	0	6410
	4	226	774	0	0	6410
	5	208	792	0	0	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 96 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 40 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	311	689	0	0	6410
	2	320	680	0	0	6410
	3	307	693	0	0	6410
	4	324	676	0	0	6410
	5	313	687	0	0	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 97 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 60 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	153	847	0	0	6410
	2	157	843	0	0	6410
	3	153	847	0	0	6410
	4	144	856	0	0	6410
	5	148	852		0	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 98 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	104	896	0	0	6410
	2	122	878	0	0	6410
	3	111	889	0	0	6410
	4	120	880	0	0	6410
	5	112	888	0	0	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 99 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 20 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	190	810	0	0	6410
	2	190	810	0	0	6410
	3	205	795	0	0	6410
	4	193	807	0	0	6410
	5	205	795	0	0	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 100 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 40 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	205	795	3	0	6410
	2	215	785	4	1	6410
	3	208	792	1	0	6410
	4	208	792	5	1	6410
	5	230	770	2	0	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 101 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 60 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	422	578	158	27	6410
	2	419	581	153	26	6410
	3	421	579	175	30	6410
	4	413	587	164	28	6410
	5	426	574	167	29	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 102 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes com 10 motores acionados e 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	585	415	265	64	6410
	2	561	439	279	64	6410
	3	546	454	281	62	6410
	4	564	436	293	67	6410
	5	561	439	272	62	6410

Fonte: Autoria Própria.

As tabelas abaixo ilustram os dados obtidos no cenário de ensaios 3, onde a finalidade foi verificar a interferência da indutância na qualidade da comunicação PLC.

Tabela 103 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 5 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

1ª (8 voltas de 20cm no Receptor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	0	1000	0	0	25899
	2	0	1000	0	0	25899
	3	0	1000	0	0	25899
	4	0	1000	0	0	25899
	5	0	1000	0	0	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 104 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 10 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

2ª (8 voltas de 20cm no Receptor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	0	1000	0	0	25899
	2	0	1000	0	0	25899
	3	0	1000	0	0	25899
	4	0	1000	0	0	25899
	5	0	1000	0	0	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 105 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 15 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

3ª (8 voltas de 20cm no Receptor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	0	1000	0	0	25899
	2	0	1000	0	0	25899
	3	0	1000	0	0	25899
	4	0	1000	0	0	25899
	5	0	1000	0	0	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 106 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 20 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

4ª (8 voltas de 20cm no Receptor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	2	998	0	0	25899
	2	11	989	0	0	25899
	3	12	988	0	0	25899
	4	2	998	0	0	25899
	5	8	992	0	0	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 107 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 5 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

1ª (8 voltas de 20cm no Emissor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	85	915	915	100	25899
	2	97	903	903	100	25899
	3	101	899	899	100	25899
	4	110	890	890	100	25899
	5	149	851	851	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 108 - - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 10 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

2ª (8 voltas de 20cm no Emissor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	452	548	548	100	25899
	2	578	422	422	100	25899
	3	568	432	432	100	25899
	4	731	269	269	100	25899
	5	752	248	248	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 109 - - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 15 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

3ª (8 voltas de 20cm no Emissor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	999	1	1	100	25899
	2	999	1	1	100	25899
	3	993	7	7	100	25899
	4	994	6	6	100	25899
	5	987	13	13	100	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 110 - - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 20 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação BPSK.

4ª (8 voltas de 20cm no Emissor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	1000	0	0	0	25899
	2	1000	0	0	0	25899
	3	1000	0	0	0	25899
	4	1000	0	0	0	25899
	5	1000	0	0	0	25899

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 111 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 5 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

1ª (8 voltas de 20cm no Receptor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	0	1000	0	0	6410
	2	0	1000	0	0	6410
	3	0	1000	0	0	6410
	4	0	1000	0	0	6410
	5	0	1000	0	0	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 112 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 10 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

2ª (8 voltas de 20cm no Receptor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	0	1000	0	0	6410
	2	0	1000	0	0	6410
	3	0	1000	0	0	6410
	4	0	1000	0	0	6410
	5	0	1000	0	0	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 113 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 15 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

3ª (8 voltas de 20cm no Receptor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	0	1000	0	0	6410
	2	0	1000	0	0	6410
	3	0	1000	0	0	6410
	4	0	1000	0	0	6410
	5	0	1000	0	0	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 114 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 20 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem receptor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

4ª (8 voltas de 20cm no Receptor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	13	987	0	0	6410
	2	7	993	0	0	6410
	3	4	996	0	0	6410
	4	4	996	0	0	6410
	5	0	1000	0	0	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 115 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 5 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	126	874	144	16	6410
	2	107	893	103	12	6410
	3	97	903	84	9	6410
	4	110	890	117	13	6410
	5	111	889	118	13	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 116 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 10 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

2ª (8 voltas de 20cm no Emissor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	547	453	332	73	6410
	2	551	449	332	74	6410
	3	611	389	298	77	6410
	4	637	363	298	82	6410
	5	589	411	317	77	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 117 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 15 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

3ª (8 voltas de 20cm no Emissor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	999	1	1	100	6410
	2	998	2	2	100	6410
	3	993	7	7	100	6410
	4	993	7	7	100	6410
	5	998	2	2	100	6410

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 118 - Dados obtidos nos 5 envios de pacotes sem nenhum motor acionado, com uma bobina de 20 metros enrolada dos 80 metros de cabo entre o modem emissor e a fonte ruidosa, utilizando a modulação ROBO.

4ª (8 voltas de 20cm no Emissor)						
Tamanho do Pacote (Bytes)	Ensaio	Pacotes Perdidos	Pacotes Detectados	Pacotes com Erros	PER (%)	Taxa de Transmissão
4 Bytes	1	1000	0	0	0	6410
	2	1000	0	0	0	6410
	3	1000	0	0	0	6410
	4	1000	0	0	0	6410
	5	1000	0	0	0	6410

Fonte: Autoria Própria.