

Gideon Igor Carvalho Lobato

**Sistema de Comunicação e Comando Remoto  
de Inversores Utilizando o Barramento de  
Alimentação em Corrente Contínua**

**Belo Horizonte**

**Dezembro de 2014**



Gideon Igor Carvalho Lobato

**Sistema de Comunicação e Comando Remoto de  
Inversores Utilizando o Barramento de Alimentação em  
Corrente Contínua**

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Orientador: Prof. Dr. Sidelmo Magalhães Silva

Belo Horizonte  
Dezembro de 2014



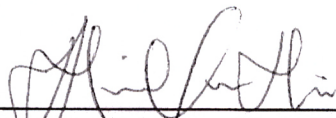
**"Sistema de Comunicação e Comando Remoto de Inversores  
Utilizando o Barramento de Alimentação em Corrente  
Contínua"**

**Gideon Igor Carvalho Lobato**

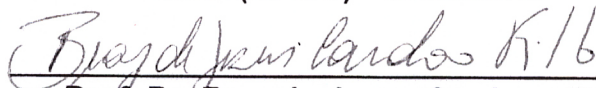
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 17 de dezembro de 2014.

Por:



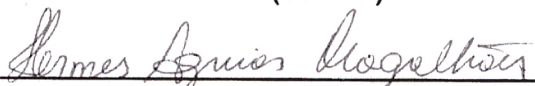
Prof. Dr. Sidelmo Magalhães Silva  
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Braz de Jesus Cardoso Filho  
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Helder de Paula  
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Hermes Aguiar Magalhães  
DELT (UFMG)



*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,  
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*



# Agradecimentos

Aos meus pais, por sempre terem me dado todo o suporte necessário.

Ao meu orientador Professor Dr. Sidelmo Magalhães Silva, por todos os anos de apoio e orientação, sem os quais este trabalho não teria sido realizado.

Aos colegas do laboratório TESLA/UFMG, por toda a troca de experiências e conhecimentos.

Muito Obrigado!



# Resumo

O presente trabalho busca avaliar a utilização de barramentos c.c. longos como meio de transmissão de informações para leitura de dados e comando de conversores de frequência. Esta aplicação é particularmente interessante em aplicações onde o inversor/motor encontra-se em locais inacessíveis, como é o caso da extração de petróleo em ambiente *subsea*, onde a geração de energia encontra-se nas plataformas enquanto o motor encontra-se instalado no leito oceânico. Com o aumento do comprimento do cabo, questões relativas ao nível de ruído e atenuação imposta pelo barramento tornam-se particularmente interessantes. Neste trabalho são apresentados resultados de simulação e experimentais, que comprovam a eficiência e aplicabilidade do sistema para barramentos com cabos de algumas centenas de metros de comprimento.

**Palavras-chaves:** *Power line communications. subsea. inversor PWM.*



# Abstract

This work aims to evaluate the use of long dc bus as the transmission medium for data exchange and command of frequency converters. This technology is particularly interesting in applications where the inverter / motor is in inaccessible places, as in the case of subsea oil extraction, where the power generation is located on the platforms while the motor is installed on the seabed. With increasing of cable length, issues relating to noise and attenuation imposed by the bus become particularly interesting. This work presents simulation and experimental results, which demonstrate the efficiency and applicability of this technology for dc bus with cable length a few hundred.

**Keywords:** *Power line communications. subsea. PWM inverter.*



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema elétrico simplificado do sistema proposto. . . . .	25
Figura 2 – Representação da instalação de equipamentos no leito oceânico. . . . .	25
Figura 3 – Representação gráfica das principais regulações sobre PLC. . . . .	32
Figura 4 – Pilha de protocolo do modelo OSI. . . . .	33
Figura 5 – Ilustração da Modulação BFSK. . . . .	36
Figura 6 – Símbolos da Modulação BPSK. . . . .	38
Figura 7 – Ilustração da Modulação BPSK. . . . .	39
Figura 8 – Símbolos da Modulação QPSK. . . . .	39
Figura 9 – Ilustração da Modulação QPSK. . . . .	40
Figura 10 – Símbolos da Modulação 8PSK. . . . .	40
Figura 11 – Ilustração da Modulação 8PSK. . . . .	41
Figura 12 – Comparativo do tempo de transmissão para as modulações BPSK, QPSK e 8PSK. . . . .	41
Figura 13 – Representação gráfica da modulação SPWM. . . . .	46
Figura 14 – Representação gráfica da modulação THIPWM1/4. . . . .	47
Figura 15 – Representação gráfica da modulação SVPWM. . . . .	48
Figura 16 – Modelo Pi para o cabo: (a)parâmetros concentrados e (b)aproximação a parâmetros distribuídos. . . . .	49
Figura 17 – Representação do condutor por um conjunto de "n" subcondutores tubulares concêntricos. . . . .	50
Figura 18 – Modelo Pi adaptado com o modelo Nramos. . . . .	51
Figura 19 – Modelo de simulação do sistema de acionamento implementado no <i>software</i> Matlab/Simulink. . . . .	52
Figura 20 – Formas de onda de tensão no lado retificador com barramento c.c de 15, 100 e 500 m. . . . .	53
Figura 21 – Formas de onda de tensão no lado inversor com barramento c.c de 15, 100 e 500 m. . . . .	54
Figura 22 – Transformada de Fourier da tensão do lado retificador com barramento c.c de 15, 100 e 500 m. . . . .	55
Figura 23 – Detalhe da transformada de Fourier da tensão do lado inversor com barramento c.c de 500 m e modulação SVPWM - cabos de 15, 100 e 500 metros. . . . .	55
Figura 24 – Transformada de Fourier da tensão nas extremidades do barramento - Cabo de 500 metros - 0 a 10 kHz. . . . .	56
Figura 25 – FFT da tensão do lado retificador com barramento c.c de 500 m - Modulações SPWM, THIPWM1/4 e SVPWM. . . . .	57

Figura 26 – FFT da tensão do lado inversor com barramento c.c de 500 m - Modulações SPWM, THIPWM1/4 e SVPWM. . . . .	58
Figura 27 – FFT da tensão do lado retificador - Motor a vazio - Modulação SVPWM.	59
Figura 28 – FFT da tensão do lado retificador - Torque mecânico de 10 Nm aplicado ao eixo - Modulação SVPWM. . . . .	59
Figura 29 – Representação em blocos do inversor CFW-09. . . . .	62
Figura 30 – Diagrama em blocos do modem PLC. . . . .	63
Figura 31 – Foto do modem TMDSPCKIT-V3. . . . .	65
Figura 32 – Foto da indutância inserida no barramento c.c. . . . .	67
Figura 33 – Foto do protótipo construído - Lado inversor. . . . .	69
Figura 34 – Tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 15 m.	70
Figura 35 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 15 m. . . . .	70
Figura 36 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 15 m - 0 a 10kHz. . . . .	71
Figura 37 – Tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 100 m.	72
Figura 38 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 100 m. . . . .	72
Figura 39 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 100 m - 0 a 10 kHz. . . . .	73
Figura 40 – Tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 500 m.	74
Figura 41 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 500 m. . . . .	75
Figura 42 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 500 m - 0 a 10 kHz. . . . .	75
Figura 43 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 0 RPM e cabo de 500 m. . . . .	76
Figura 44 – Tensão nas extremidades do barramento c.c com adição do sinal de comunicação PLC - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 15 m. . . . .	77
Figura 45 – Detalhe do sinal de comunicação adicionado a tensão do barramento c.c. - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 15 m. . . . .	77
Figura 46 – FFT da tensão no barramento c.c com sinal de comunicação - Cabo de 15 m. . . . .	78
Figura 47 – Tensão nas extremidades do barramento c.c com adição do sinal de comunicação PLC - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 100 m. . . . .	79
Figura 48 – Detalhe do sinal de comunicação adicionado a tensão do barramento c.c. - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 100 m. . . . .	79
Figura 49 – FFT da tensão no barramento c.c com sinal de comunicação - Cabo de 100 m. . . . .	80

Figura 50 – Tensão nas extremidades do barramento c.c com adição do sinal de comunicação PLC - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 500 m. . . . .	81
Figura 51 – Detalhe do sinal de comunicação adicionado a tensão do barramento c.c. - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 500 m. . . . .	81
Figura 52 – FFT da tensão no barramento c.c com sinal de comunicação - Cabo de 500 m. . . . .	82
Figura 53 – Medição do sinal captado em cada portadora de comunicação - Cabo de 500 m. . . . .	82
Figura 54 – Tela inicial do software <i>Superdrive</i> . . . . .	85
Figura 55 – Envio de comando de partida ao inversor CFW-09 através do barramento c.c. - Cabo de 100 m. . . . .	85
Figura 56 – Tensão no barramento c.c. após envio de comando de partida - Cabo de 100 m. . . . .	87
Figura 57 – Tensão no barramento c.c. após envio de comando de parada - Cabo de 100 m. . . . .	87



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Alocação de frequências - CENELEC EN-50065-1. . . . .	31
Tabela 2 – Máximos níveis de transmissão - CENELEC. . . . .	31
Tabela 3 – Portadoras utilizadas no protocolo G3. . . . .	43
Tabela 4 – Taxas teóricas máximas de transmissão de dados para protocolo G3 e bandas CENELEC. . . . .	44
Tabela 5 – Parâmetros R, L e C calculados para o cabo de $2.5 \text{ mm}^2$ . . . . .	52
Tabela 6 – Parâmetros R, L e C calculados para o cabo de $6.0 \text{ mm}^2$ . . . . .	52
Tabela 7 – Taxas de transmissão de dados alcançadas. . . . .	83
Tabela 8 – Taxas de erros de comunicação para modulação 8PSK e banda CENE- LEC B. . . . .	84



# Lista de abreviaturas e siglas

PLC	Power Line Communication
PWM	Pulse Width Modulation
SPWM	Sinusoidal PWM
THIPWM	Third-Harmonic Injection PWM
SVPWM	Space Vector PWM
DSP	Digital Signal Processor
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
GPIO	General Purpose Input/Output
ADC	Analog/Digital Converter
LED	Light Emiting Diode
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexer
API	Application Programming Interface
NBR-5410	Norma Brasileira - Instalações Elétricas de Baixa Tensão
PVC	Polyvinyl Chloride



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1	Motivação	23
1.2	Contextualização	24
1.3	Objetivos	25
1.4	Sistemas de Comunicação PLC	26
1.5	Organização do Texto	27
<b>2</b>	<b>SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO PLC</b>	<b>29</b>
2.1	Histórico	29
2.2	Padronização e Normalização	30
2.3	Sistemas de Comunicação PLC	32
2.3.1	Camadas de Rede	32
2.3.1.1	Camada de Aplicação	33
2.3.1.2	Camada de Apresentação	33
2.3.1.3	Camada de Sessão	33
2.3.1.4	Camada de Transporte	34
2.3.1.5	Camada de Rede	34
2.3.1.6	Camada de Enlace	35
2.3.1.7	Camada Física	35
2.3.2	Técnicas de Modulação	35
2.3.2.1	Modulação por chaveamento de Frequência - FSK	36
2.3.2.2	Modulação por chaveamento de Fase - PSK	37
2.3.2.3	OFDM	42
2.3.3	Protocolo G3	42
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO BARRAMENTO C.C. DE INVERSORES COMO MEIO DE COMUNICAÇÃO PLC</b>	<b>45</b>
3.1	Revisão sobre técnicas PWM e seu impacto no espectro de frequências no barramento c.c.	45
3.1.1	Modulações Analisadas	45
3.1.1.1	SPWM	45
3.1.1.2	THIPWM	46
3.1.1.3	SVPWM	47
3.2	Modelagem do barramento c.c. longo	48
3.2.1	Modelo Pi	49
3.2.2	Modelo Nramos	49

<b>3.3</b>	<b>Resultados de simulação/experimentos</b>	<b>51</b>
3.3.1	Variação do comprimento do cabo	53
3.3.2	Variação da Técnica de Modulação	57
3.3.3	Variação da Velocidade e Torque Mecânico	58
<b>4</b>	<b>RESULTADOS DE APLICAÇÃO</b>	<b>61</b>
<b>4.1</b>	<b>Descrição dos Componentes do Protótipo</b>	<b>61</b>
4.1.1	Sistema de Potência	61
4.1.2	Sistema de Comunicação	62
4.1.3	Melhoria da Relação Sinal/Ruído	66
4.1.4	Cabeamento do Barramento c.c.	68
<b>4.2</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>68</b>
4.2.1	Espectro de Frequências do Barramento c.c.	69
4.2.1.1	Cabo de 15 metros	69
4.2.1.2	Cabo de 100 metros	71
4.2.1.3	Cabo de 500 metros	74
4.2.2	Atenuação do Sinal de Comunicação	76
4.2.2.1	Cabo de 15 metros	76
4.2.2.2	Cabo de 100 metros	78
4.2.2.3	Cabo de 500 metros	80
4.2.3	Velocidade Máxima de Transmissão de Dados	83
4.2.4	Comunicação PLC Aplicada ao Comando Remoto do Inversor	84
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE</b>	<b>89</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões</b>	<b>89</b>
<b>5.2</b>	<b>Propostas de Continuidade</b>	<b>90</b>
	<b>Referências</b>	<b>93</b>

# 1 Introdução

**P**ower Line Communication - PLC (Comunicação através da Rede de Alimentação, em livre tradução) - é uma tecnologia de comunicação baseada na transmissão de informações utilizando a rede de alimentação de um determinado circuito. Isso é possível devido ao fato de informação e energia estarem contidos em diferentes faixas do espectro de frequências. Sua principal vantagem consiste no fato de aproveitar a infraestrutura prevista para alimentação, dispensando a utilização de cabos adicionais, específicos para comunicação.

## 1.1 Motivação

A grande maioria das aplicações, industriais ou não, que utilizem motores elétricos para realização de um determinado trabalho, envolvem normalmente a transmissão de energia elétrica desde um ponto denominado "fonte", para um outro ponto onde o trabalho é efetivamente realizado. A distância entre esses pontos pode ser desde poucos centímetros até vários quilômetros. Nesse contexto, a transmissão da energia pode ser realizada em corrente alternada (c.a.) ou em corrente contínua (c.c.). Os sistemas de transmissão c.a. comumente utilizados necessitam de pelo menos três condutores, denominados condutores de fase, enquanto os sistemas de transmissão c.c. necessitam de apenas dois condutores. Diversos estudos foram realizados [1], [2], visando avaliar e quantificar as vantagens relativas a economia de condutores (economia de cobre), proporcionada pela utilização de transmissão c.c. em substituição a transmissão c.a. Em uma análise preliminar, a economia proporcionada é evidente, pela simples mudança de três para dois condutores, e será cada vez mais significativa quanto maiores forem as distâncias envolvidas.

Em aplicações baseadas em acionamentos a velocidade variável, é comum a necessidade de transmissão de informações entre sistemas ditos de supervisão/controlado e o próprio sistema de acionamento, que pode estar instalado em locais remotos, e muitas vezes inacessíveis. Tais aplicações podem envolver linhas de transmissão de energia com grandes extensões, e exemplos típicos são sistemas para exploração de petróleo por plataformas marítimas e mineração subterrânea [2].

Boa parte da extração de petróleo nos dias atuais, no mundo, e especialmente no Brasil, se dá em regiões litorâneas, nos chamados "campos marítimos". Recentes descobertas indicam o Brasil como possuidor de grandes reservas de petróleo, localizadas na camada "Pré-sal", que localiza-se em profundidades acima dos 7 mil metros [3]. Para possibilitar a extração do recurso nestes ambientes, é necessária a utilização de maquinário pesado e construção de plataformas para abrigá-los.

Devido ao alto custo para a construção e manutenção dessas plataformas, é desejável que elas possuam a menor área possível. De forma a alcançar esse objetivo, uma alternativa existente são os chamados sistemas *Subsea*. Os sistemas *Subsea* (“dentro do mar”, em tradução direta) consistem em se instalar parte do maquinário necessário diretamente no solo oceânico. Dessa forma, o tamanho das plataformas pode ser minimizado. Isto pode ser feito em novas instalações ou mesmo ampliações de instalações existentes. Nessa topologia, os sistemas de supervisão e controle são localizados nas plataformas, sendo que sua interação com o maquinário submerso é feita via cabos de alimentação e comunicação, encapsulados em um arranjo chamado “cabo umbilical” [4].

Atualmente, a disponibilização de energia nesses sistemas baseia-se em geração e distribuição de energia nas plataformas em corrente alternada (c.a.). Entretanto, vários trabalhos têm sido desenvolvidos no intuito de se implementar sistemas de distribuição de energia em corrente contínua. Nesse contexto, a utilização do próprio barramento em corrente contínua (c.c.) dos inversores, nos quais o retificador estaria instalado na plataforma e o inversor submerso, como meio físico para a comunicação entre o inversor e os sistemas supervisórios é de grande interesse, como forma de se aumentar a confiabilidade (evitando a utilização de fibras óticas nos cabos umbilicais), além de reduzir os custos de instalação e manutenção destes sistemas.

Em resumo, qualquer aplicação baseada em acionamentos a velocidade variável, que envolva a transmissão de energia a grandes distâncias pode, potencialmente, ser beneficiada pela utilização de transmissão de energia em c.c. Nestes sistemas, a utilização do mesmo cabo utilizado para transmissão de energia, também como meio para a transmissão dos sinais de comunicação pode trazer ainda benefícios adicionais, facilitando a operação em ambientes remotos e/ou inacessíveis.

## 1.2 Contextualização

Atualmente, a comunicação entre os sistemas supervisórios da plataforma e os equipamentos submarinos é realizada normalmente através de redes de comunicação baseadas em fibra ótica ou pares trançados [5]. Esses cabos são encapsulados juntamente com os cabos de potência, hidráulicos e pneumáticos, em um único cabo denominado umbilical [4]. Essa alternativa faz com que esses cabos umbilicais sejam elementos complexos e de custo elevado.

A possibilidade de se utilizar o próprio condutor de potência para a comunicação de dados em ambiente submarino deve promover, além da simplificação do sistema, reduções de custos e aumento da confiabilidade.

A figura 1 ilustra, de modo simplificado, o diagrama esquemático do sistema proposto, no qual o sistema supervisório, através do dispositivo a ser estudado e desenvol-

vido/adaptado (Modem PLC) injeta e extrai informação com o inversor situado a longas distâncias, podendo chegar a até 200 km [6].

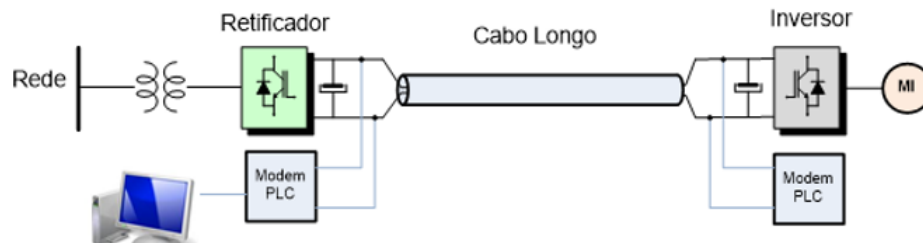


Figura 1 – Esquema elétrico simplificado do sistema proposto.

A figura 2 [7], exemplifica a distribuição do maquinário pesado no leito oceânico, sendo os mesmos alimentados e coordenados por sistemas embarcados, que podem estar localizados em plataformas acima do nível do mar ou mesmo em navios. A utilização da comunicação PLC, nesses casos, poderia eliminar a necessidade de cabos ou sistemas de comunicação adicionais, aproveitando-se o cabo de alimentação já existente.

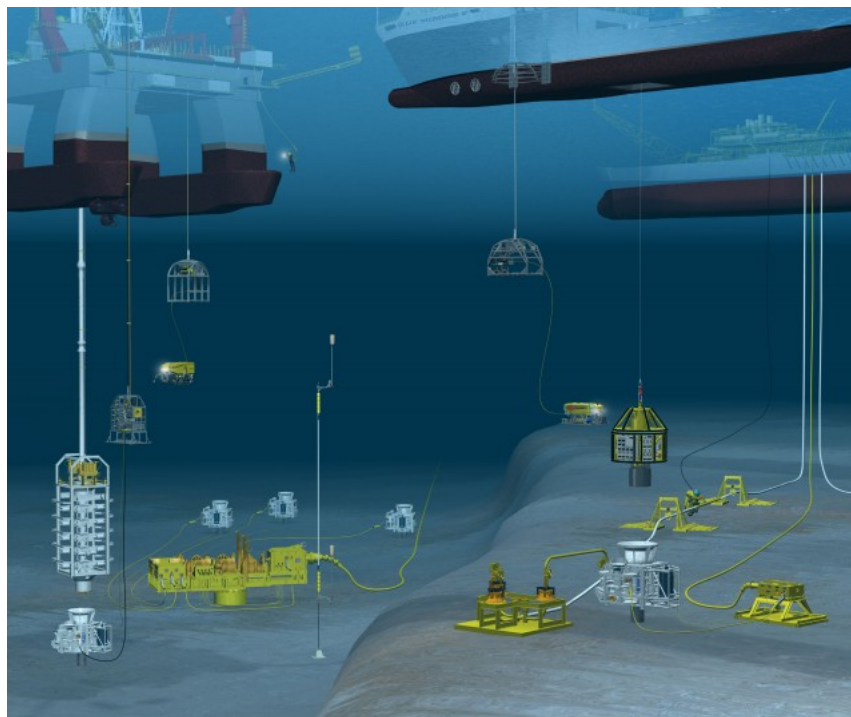


Figura 2 – Representação da instalação de equipamentos no leito oceânico.

### 1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar a aplicabilidade da utilização da técnica de comunicação PLC como forma de transmissão das informações necessárias ao comando e leitura de parâmetros de acionamentos de motores elétricos baseados em conversores

de frequência, utilizando como meio de comunicação o próprio barramento de corrente contínua do conversor.

Os objetivos principais são:

- Estudo sobre as principais técnicas de comunicação através de PLC (Power line communication).
- Estudo dos barramentos de corrente contínua dos inversores como meio para comunicação de dados.
- Projeto e implementação de um sistema para comando e comunicação entre o retificador e o inversor conectados a longa distância, tendo como meio os próprios cabos do barramento c.c.

## 1.4 Sistemas de Comunicação PLC

A comunicação PLC atualmente já é utilizada como método de transferência de dados, tanto em sistemas das concessionárias de distribuição de energia elétrica, como em redes de distribuição internas. Contudo, o perfil dessas aplicações é diferente. Os dispositivos desenvolvidos para uso doméstico têm geralmente o propósito de controle de cargas elétricas dentro do âmbito da residência [8]. Exemplos mais comuns são: controle de iluminação, tráfego de informações relativas a sistemas de alarme residencial, controle de equipamentos de refrigeração e aquecimento e disponibilização de pontos de conexão a internet com fio. Já no campo das companhias de energia, os dispositivos e sistemas que utilizam alguma técnica de comunicação PLC são relativos, normalmente, à leitura remota de medidores, conexão e desconexão de usuários, alteração tarifária, monitoração de consumo e controle de cargas.

Durante as últimas décadas, a possibilidade de provimento de acesso à internet pela rede de distribuição de energia vem causando discussão entre os setores envolvidos [9]. As características físicas da rede de distribuição, pertinentes ao tráfego de dados modulados (atenuação, ruído, compatibilidade eletromagnética, etc), bem como novas técnicas de modulação de dados e correção de erros vêm sendo largamente estudadas. Devido aos problemas técnicos e regulatórios concernentes, a ideia de provimento de acesso “banda larga” à internet via rede elétrica está, ao menos em parte, abandonada.

Apesar do comentado acima, o meio físico para transmissão de energia ainda continua sendo um canal apropriado para o controle de dispositivos e transferência de informações que não requeiram uma grande largura de banda. Um exemplo possível de aplicação é, então, o monitoramento e parametrização de acionamentos industriais baseados em conversor de frequência e motores elétricos.

## 1.5 Organização do Texto

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos, incluindo-se este capítulo introdutório. A sequência dos capítulos segue ordem coerente com as etapas que foram necessárias para realização deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão do estado da arte dos sistemas de comunicação PLC. É apresentado um histórico do sistema, indicando sua evolução desde meados do século XIX até os dias atuais. O capítulo contém uma breve descrição acerca das normas e padrões existentes em diversos países. São também apresentadas informações importantes para a compreensão dos sistemas de comunicação PLC, englobando teoria de redes de transmissão, técnicas de modulação e protocolo de comunicação comumente utilizados.

O capítulo 3 busca caracterizar o barramento c.c. de sistemas de acionamento de motores baseados em conversores de frequência quanto à sua potencial utilização como meio de comunicação PLC. É apresentada uma breve revisão acerca de técnicas de modulação PWM comumente utilizadas para inversão de tensão. Ao final do capítulo uma metodologia para a modelagem do barramento c.c., supondo um cabo longo, é proposta e são apresentados resultados a partir de simulações computacionais em ambiente Matlab/Simulink.

O capítulo 4 começa com uma descrição dos parâmetros utilizados durante a construção do protótipo. Na sequência, são apresentados os resultados experimentais alcançados. É analisado o espectro de frequências presente no barramento c.c., a atenuação imposta pelo barramento aos sinais de comunicação e as velocidades máximas de comunicação alcançadas. Ao final do capítulo são apresentados resultados referentes à utilização do protótipo para comandar remotamente o conversor de frequência.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como propostas de continuidade para trabalhos futuros.



## 2 Sistemas de Comunicação PLC

### 2.1 Histórico

O princípio por trás da técnica de comunicação utilizando como meio a linha de transmissão de energia elétrica não surgiu recentemente. Os primeiros estudos vislumbrando essa possibilidade remontam a meados do século XIX. Em 1838, Edward Davy propôs uma solução permitindo a medição remota de níveis de tensão de baterias utilizadas no sistema de telégrafo existente entre Londres e Liverpool [10]. Em 1897 foi registrada, no Reino Unido, por Joseph Routin e C.E.L. Brown, a primeira patente envolvendo sinalização pela rede elétrica, visando a obtenção remota de dados provenientes de medidores de energia comunicando através da rede de distribuição [11]. Em 1905 foi patenteado nos EUA, por Chester Thoradson, seu sistema para leitura remota de medidores de eletricidade, concebido em 1902, utilizando um cabo adicional de sinalização [12]. Devido à baixa relação custo/benefício, este sistema foi descontinuado.

Em 1950, o primeiro sistema PLC, então conhecido como “*Ripple Control*”, foi implementado em redes de média e baixa tensão. Sua portadora possuía frequência entre 100 Hz e 1 kHz. A comunicação era unidirecional, via sinais de controle para comutação remota da iluminação pública ou alterações tarifárias [13]. O primeiro sistema industrial com tecnologia PLC surgiu na França, em 1960, sob o codinome “Pulsadis” e visava o controle de equipamentos elétricos.

O termo “*Power Line Carrier*”, comumente abreviado como PLC, surgiu ao final da segunda guerra mundial, em 1945. Em função da guerra, muitas linhas de telefonia foram destruídas, restando mais linhas de transmissão de energia do que de comunicação. Com o intuito de resolver este problema, foram projetados sistemas de comunicação por meio das linhas de média e alta tensão, imitando as leituras remotas já realizadas àquela época [13].

Devido às grandes dificuldades inerentes à comunicação pela rede elétrica (ruído, variações de impedância, etc), o sistema de transmissão PLC continuou restrito aos já tradicionais serviços de telemetria, controle remoto de cargas e comunicação de voz entre subestações de energia. Após o surgimento do transistor, em 1960, do circuito integrado, em 1967 e do microprocessador, em 1980, o mundo da eletrônica começou seu crescimento vertiginoso, proporcionando o surgimento de dispositivos com poder de processamento cada vez maior, com menor tamanho e custo. Entre 1980 e o início da década de 90, surgem técnicas de controle de erro com relativa sofisticação, de forma que sua subsequente implementação em microcontroladores de baixo custo foram propostas, propiciando o

surgimento dos primeiros modems PLC [14], [15].

Em 1991, com o crescimento vertiginoso das telecomunicações no mundo inteiro, houve uma retomada do interesse pela antiga tecnologia PLC. A Norweb Communications, empresa de energia elétrica da cidade de Manchester, Inglaterra, iniciou testes com comunicação digital de alta velocidade utilizando suas linhas de energia elétrica. Entre 1995 e 1997, ficou demonstrado que era possível resolver os problemas de ruído e atenuar (mas não eliminar totalmente) as interferências e que a transmissão de dados de alta velocidade poderia ser viável. Em 1997 a Norweb, em conjunto com a Nortel (empresa especializada em tecnologia de redes de telecomunicações, sediada no Canadá), realizaram o primeiro teste de acesso à internet, em uma escola de Manchester. Dessa forma, foi lançada uma nova idéia para a utilização da tecnologia PLC para acesso à internet, chamada pelas empresas de “*Digital Powerline*” [16].

No Brasil, em setembro de 1999, ocorreu o primeiro seminário sobre o assunto, com o tema Tecnologia *Power Line Communications*, criado pelo sub-comitê de comunicações do GCOI (Grupo de Controle, Otimização e Inteligência Computacional Aplicados a Sistemas de Energia Elétrica) e a APTEL (Associação de Empresas Proprietárias de Infraestrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações). E, em agosto de 2009, a Anatel publicou a Resolução Normativa N° 375, que regulamenta a utilização das instalações de distribuição de energia elétrica como meio de transporte para a comunicação digital ou analógica de sinais [17].

## 2.2 Padronização e Normalização

Para a Europa Ocidental (i.e. países membros da união européia, com adição da Irlanda, Noruega, Suíça e o Reino Unido), a regulação relativa à transmissão de informação em linhas de baixa tensão, tanto no sistema de distribuição pública quanto nas instalações dos consumidores, é descrita pela norma CENELEC EN 50065-1, intitulada “Signaling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz”. Na parte 1 deste documento, intitulado “General requirement, frequency bands and electromagnetic disturbances” [18], as bandas de frequências e níveis de tensão de saída permitidos para comunicação são indicados.

A faixa de frequências permitidas para comunicação está contida entre 3 a 148,5 kHz e é subdividida em cinco sub-bandas. A Tabela 1 apresenta essas subdivisões, bem como os tipos de usuários a que se destinam [18].

Tabela 1 – Alocação de frequências - CENELEC EN-50065-1.

<b>Banda</b>	<b>Range (kHz)</b>	<b>Reservado para:</b>
	3 - 9	Concessionárias de energia
<b>A</b>	9 - 95	Concessionárias de energia e suas permissionárias
<b>B</b>	95 - 125	Consumidores sem restrição
<b>C</b>	125 - 140	Consumidores com protocolo de acesso
<b>D</b>	140 - 148,5	Consumidores sem restrição

A Tabela 2 apresenta os níveis máximos de tensão de saída para dispositivos monofásicos. As medidas devem ser feitas de acordo com a publicação CISPR 16 (detector quase-pico, medições com duração de 1 minuto em pontos específicos) [19].

Tabela 2 – Máximos níveis de transmissão - CENELEC.

<b>Range (kHz)</b>	<b>Máximo nível de transmissão</b>	<b>Tipo de dispositivo</b>
3 - 95	134 dB ( $\mu$ V)	
95 - 148,5	116 dB ( $\mu$ V)	Propósito geral
95 - 148,5	134 dB ( $\mu$ V)	Dispositivos especiais (e.g. industriais)

Já na América do Norte, a regulação é feita pelo padrão US FCC Part15 [20]. Neste caso, as frequências permitidas estão contidas no intervalo entre 9 e 500 kHz, o que é consideravelmente maior que no padrão europeu. De forma a proteger o sistema de navegação por rádio em aviões, que ocorre entre 190 e 525 kHz, restrições em sistemas PLC que operem acima de 185 kHz devem ser consideradas.

No Japão, a regulamentação é responsabilidade do ministério das telecomunicações. Atualmente, os sistemas são limitados a operarem em frequências entre 10 e 450 kHz [21]. Sistemas que utilizem frequências abaixo de 10 kHz necessitam de permissão. Sistemas operando entre 10 a 450 kHz necessitam notificar sua existência ao ministério. A Associação de Indústrias de Rádio e Negócios (ARIB) tem conduzido esforços nos últimos anos visando a liberação de acesso para frequências entre 2 e 30 MHz, para sistemas de banda larga sobre a rede de energia.

A Figura 3 apresenta, de forma gráfica, uma relação entre as faixas de frequências reguladas nos Estados Unidos, Japão e Europa.

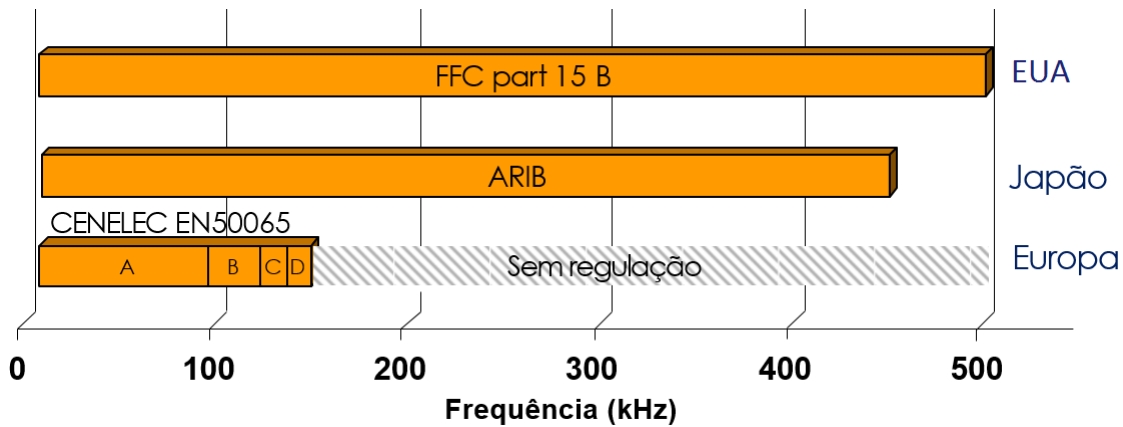


Figura 3 – Representação gráfica das principais regulações sobre PLC.

## 2.3 Sistemas de Comunicação PLC

### 2.3.1 Camadas de Rede

A tecnologia PLC é utilizada para a transmissão de dados entre um ou mais dispositivos, que podem ou não alternar as funções de “emissor” ou “receptor”. Isso a coloca em um cenário de rede de dados. Sendo parte de uma rede, é antes interessante estudar os outros elementos envolvidos nessa rede e suas arquiteturas. Para facilitar este complexo estudo, alvo de inúmeras publicações [22] [23] [24], é comum dividir uma rede em “camadas”. Esta arquitetura de camadas permite discutir uma parcela específica e bem definida de um sistema grande e complexo, em especial, os sistemas que visam a transmissão de dados, independentemente da tecnologia, seja ela com fio (PLC, ethernet, etc.) ou sem fio (Wi-Fi, Zigbee, etc.). Com a modularidade fica mais fácil modificar a implementação do serviço prestado pela camada, contanto que forneça os mesmos serviços para a camada superior e use os mesmos da camada inferior.

Para prover uma estrutura para o projeto de protocolos de rede, projetistas de rede organizam-nos então nestas camadas. Isto quer dizer que cada camada geralmente tem um protocolo específico, cuja função é prover algum tipo de serviço para o protocolo da camada superior. Uma camada de protocolo pode ser implementada em *software*, em *hardware*, ou em uma combinação de ambos. Quando tomados em conjunto, os protocolos das várias camadas são denominados pilha de protocolo, que no modelo *Open Systems Interconnection* (OSI) é formada por sete camadas: física, de enlace (ou ligação de dados), de rede, de transporte, sessão, apresentação e aplicação. A Figura 4 ilustra a interação entre estas camadas e como cada uma agrega informações aos pacotes de dados transmitidos. No caso da tecnologia PLC, elas fazem parte das duas camadas inferiores do modelo OSI: a física e de enlace. Mesmo assim, todas as outras camadas serão brevemente descritas para possibilitar o entendimento da interação entre elas.

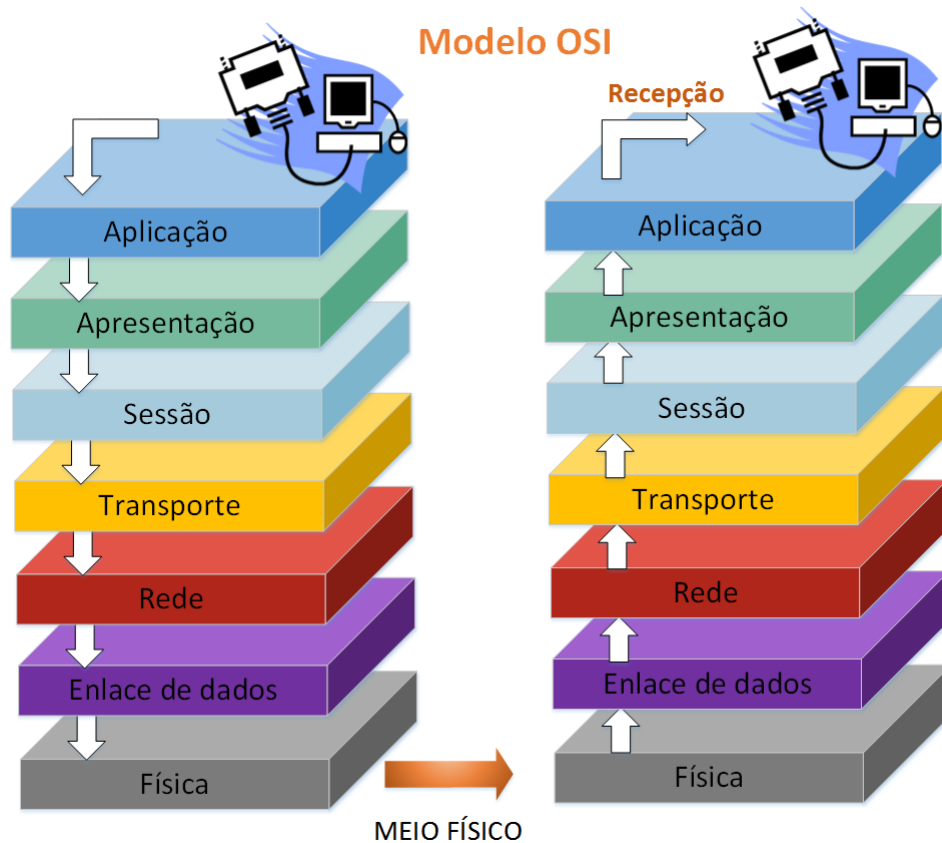


Figura 4 – Pilha de protocolo do modelo OSI.

#### 2.3.1.1 Camada de Aplicação

Corresponde às aplicações do topo da camada OSI, utilizada para promover uma interação entre máquina e usuário, disponibilizando os recursos para que tal comunicação aconteça. A camada de aplicação é relacionada ao software, e é onde residem aplicações de rede e seus protocolos. Inclui protocolos como o (i) HTTP (para navegação na internet e transferência de documentos e sites); (ii) SMTP e POP (provê transferência de mensagens de correio eletrônico ou email); e (iii) FTP (transferência de arquivos entre dois computadores).

#### 2.3.1.2 Camada de Apresentação

Converte o formato do dado recebido pela camada de aplicação em um formato que seja entendido pelo protocolo usado. Como os dados recebidos estão descomprimidos, esta camada é responsável por comprimi-los para uma transmissão mais rápida, já que haverá menos dados a serem transmitidos.

#### 2.3.1.3 Camada de Sessão

Responsável pelos processos que controlam a transferência de dados, permitindo a comunicação de aplicações em dispositivos diferentes. Esta camada administra os registros

da transmissão de dados e cuida dos erros de transmissão, sendo responsável pela coordenação do fluxo de dados entre nós (remetente e destinatário), sincronização das trocas de mensagens e por averiguar os procedimentos a serem tomados em caso de falha.

#### 2.3.1.4 Camada de Transporte

Esta camada transporta mensagens da camada de aplicação entre os lados do cliente e servidor de uma aplicação. O objetivo desta camada é proporcionar um serviço eficiente, confiável e de baixo custo. A ISO define dois modos de operação dos protocolos de transporte: orientado à conexão e não-orientado à conexão.

Como exemplo dos tipos de protocolo tem-se, respectivamente, o TCP (*Transmission Control Protocol* – Protocolo de Controle de Transmissão) e o UDP (*User Datagram Protocol* – Protocolo de Datagrama de Usuário), ambos podem transportar mensagens da camada de aplicação. O protocolo TCP fornece, em suas aplicações, serviços orientados para conexão. Alguns desses serviços são a entrega garantida de mensagens da camada de aplicação ao destino e controle de fluxo, ou seja, compatibilização das velocidades remetente/receptor. O TCP também fragmenta mensagens longas em segmentos mais curtos e provê mecanismos de controle de congestionamento, de modo que uma origem regula sua velocidade de transmissão quando a rede está congestionada.

O protocolo UDP provê serviço não orientado para conexão a suas aplicações. O protocolo de transporte não orientado à conexão é menos confiável, não garantindo a entrega das mensagens da camada de aplicação. Contudo, se o serviço das camadas inferiores é bastante confiável, como em redes locais, esse protocolo pode ser utilizado. Ele é geralmente empregado em aplicações de transferência de vídeo e voz onde a perda de alguns pacotes não prejudica o resultado final. Sua vantagem reside no fato que é um protocolo mais enxuto e como não se preocupa com a garantia da entrega de dados, é mais rápido.

#### 2.3.1.5 Camada de Rede

A camada de rede é a responsável pela entrega dos pacotes advindos da camada de transporte de uma máquina para outra. O protocolo da camada de transporte da máquina de origem envia para sua camada de rede o pacote contendo os dados a serem transmitidos, bem como o endereço da máquina de destino. A camada de rede então cuida para que os dados sejam efetivamente entregues ao sua máquina de destino.

Para realizar sua função alvo, a camada de rede é normalmente constituída de dois componentes principais: o protocolo de endereçamento e o protocolo de roteamento. Enquanto o protocolo de endereçamento cuida para que cada máquina no sistema de comunicação possua um endereço único, o protocolo de roteamento cuida das rotinas

necessárias para se encontrar o melhor caminho para envio da informação entre as máquinas de origem e destino.

#### 2.3.1.6 Camada de Enlace

Pacotes de dados relativos à camada de enlace são normalmente denominados “quadros”. A camada de enlace é responsável por controlar o fluxo de quadros, estabelecendo a comunicação entre sistemas diretamente conectados e por detectar e em alguns casos corrigir os erros que possam acontecer devido ao tráfego da informação através da camada física.

Dependendo do protocolo utilizado na camada de enlace, este pode prover diversos serviços à camada de enlace, como, por exemplo, garantir que os quadros sejam entregues sem erros ao destino. Uma das formas de se garantir a entrega, no caso da detecção de erros é realizar o reenvio do pacote até que a máquina de destino informe o recebimento sem erros do pacote.

#### 2.3.1.7 Camada Física

A camada física refere-se aos meios de conexão pelos quais a informação irá efetivamente trafegar. As definições de parâmetros elétricos, mecânicos e funcionais são entendidos como parâmetros da camada física. Tais definições normalmente tratam, dentre outras, da escolha do tipo de meio físico a ser utilizado (se cabo, fibra óptica, comunicação sem fio, etc), níveis de tensão e corrente aplicados, tipos de sinalizações, comprimentos máximos de cabo, taxas máximas de transmissão de dados, definição do tipo de modulação. Os parâmetros funcionais estão ligados aos significados dados aos sinais modulados enviados através do meio físico. De todas as camadas, esta é a efetivamente responsável por acessar o *hardware* componente do meio de transmissão.

### 2.3.2 Técnicas de Modulação

Por modulação entende-se como o processo pelo qual uma onda, dita “portadora”, tem uma ou mais de suas características (frequência, amplitude ou fase) modificadas, visando a transmissão de informação. Os sistemas modernos de comunicação utilizam, como metodologia para transmissão de dados, a modulação dita digital. Por “digital” entende-se que a informação transmitida/recebida pode ser interpretada apenas em valores discretos e bem determinados, mesmo embora normalmente a onda portadora trafegue pelo meio de transmissão como uma onda analógica.

A transmissão de dados, seja em canais exclusivos para comunicação ou linhas de transmissão de energia, pode ser dividida em duas camadas principais: a camada física e a camada de enlace. A camada física está relacionada às técnicas de modulação, enquanto a

camada de enlace especifica as técnicas para o acesso de múltiplos usuários ao meio de comunicação e detecção e correção de erros.

A comunicação na camada física, em redes PLC, requer a utilização de técnicas de modulação robustas. As mais utilizadas são aquelas baseadas em chaveamento da frequência (FSK), e aquelas baseadas no chaveamento da fase (PSK) da onda portadora. Ambas as técnicas podem ainda transmitir a informação utilizando apenas uma onda portadora, ou várias portadoras independentes, utilizando neste caso a técnica conhecida como OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* - multiplexação por divisão de frequência ortogonal). A utilização da técnica OFDM possui uma série de vantagens relativas ao sistema baseado em portadora única, sobretudo em meios de transmissão com alto nível de interferência.

### 2.3.2.1 Modulação por chaveamento de Frequência - FSK

Na técnica de modulação digital baseada em frequência, a informação a ser transmitida varia a frequência da portadora analógica de acordo com valores pré-determinados. A técnica possui diversas variantes. Uma delas e talvez a mais conhecida é a BFSK (*Binary Frequency Shift Keying*). Esta técnica emprega duas frequências, cada qual representando um nível binário, um ou zero, respectivamente chamados de marca e espaço. Esta técnica está ilustrada na Figura 5.

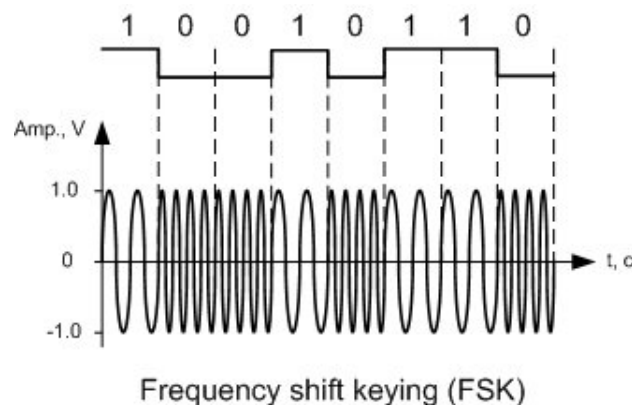


Figura 5 – Ilustração da Modulação BFSK.

Outra derivação é a MSK (*Minimum Shift Keying*). É uma forma espectralmente eficiente de FSK, onde a diferença entre o par de frequências é igual à metade da taxa de bits. Conseqüentemente, as formas de onda usadas se diferem por exatamente metade do período da portadora. Já a AFSK (*Audio Frequency Shift Keying*) é um terceiro tipo de derivação onde os dados digitais são representados pela mudança na frequência de um tom de áudio, produzindo um sinal codificado para transmissão via rádio ou telefone. Realiza a modulação em frequências de base e é menos eficiente, em energia e largura de banda, do que os modos de modulação citados acima.

Outra categoria, a CPFSK (*Continuous Phase Frequency Shift Keying*) é uma variação comumente usada de FSK. Em geral, um sinal FSK padrão não tem fase contínua. No caso do CPFSK, a fase é contínua. Esta característica é desejável para sinais que são transmitidos por meio de um canal de limite de banda estreito, já que descontinuidades no sinal introduzem componentes de frequência de banda larga.

A MFSK (*Multiple Frequency Shift Keying*) é outra variação da FSK que utiliza mais que um par de frequências. Esta técnica consiste da utilização de frequências de transmissão distintas, ocupando uma banda de frequência alta. Entretanto, a utilização de múltiplas frequências aumenta a taxa de transmissão do sistema.

Outro tipo muito usual de modulação FSK, especialmente para sistemas PLC, é a S-FSK (*Spread Frequency Shift Keying* – Modulação por Chaveamento de Frequência Espalhada). Nela, a camada física responsável por produzir o sinal a ser transmitido sincroniza um pequeno pacote de tons para o cruzamento com o zero da tensão da linha de força. Um tom é escolhido para a marca e outro para o espaço. O pacote trocado não é especificado por norma (sendo escolhido pelos fabricantes). Estão geralmente entre 20 kHz e 100 kHz e devem ser separados por, pelo menos, 10 kHz para evitar cruzamento de informação. A diferença entre S-FSK e FSK está no fato de que as frequências escolhidas para a marca e para o espaço são colocados distantes, tornando a qualidade de cada uma independente da outra. O padrão permite transmitir mais *bits* a cada semiciclo, com menor sensibilidade para número de *bits* maiores. Em sistemas trifásicos, é possível enviar um sinal em cada fase, acelerando a transmissão.

A baixa velocidade é causada pelo número limitado de *bits* por ciclo da tensão de alimentação. A alta confiabilidade é devido (i) ao cruzamento com o zero, que garante uma cronometragem confiável; (ii) à alta relação sinal-ruído, já que as *frequências* escolhidas evitam os ruídos da linha; (iii) à falta de distorção de modulação e (iv) à detecção de um sinal que melhor se adapta à transmissão.

### 2.3.2.2 Modulação por chaveamento de Fase - PSK

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 exemplos 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.

Neste trabalho serão avaliadas as técnicas de modulação por chaveamento de fase denominadas BPSK, QPSK e 8PSK, aplicadas em sistemas de comunicação PLC.

### • Modulação BPSK

A modulação BPSK, *Binary Phase-shift Keying* - chaveamento binário de fase, é a mais simples de todas as técnicas de modulação por chaveamento de fase, tanto para modulação quanto para demodulação. Utiliza apenas dois símbolos, um localizado em  $0^\circ$  e o outro em  $180^\circ$ ; desta forma é possível transmitir 01 bit a cada intervalo de modulação. Devido ao grande espaçamento de fase entre os símbolos, esta técnica é a mais robusta quanto à imunidade a ruídos, uma vez que é necessário o maior nível de ruído ou distorção para que o demodulador tome uma decisão incorreta quanto à fase do sinal.

A figura 6 apresenta os símbolos utilizados pela modulação BPSK, bem como os bits correspondentes.

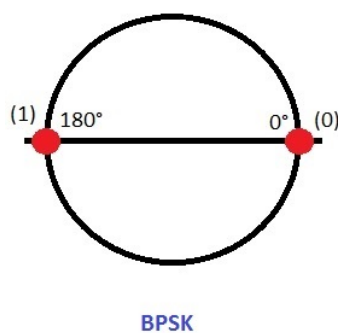


Figura 6 – Símbolos da Modulação BPSK.

Na figura 7 é apresentado um exemplo de transmissão de dados utilizando-se esta técnica. Na parte superior da figura é possível visualizar a representação no tempo dos 12 bits a serem transmitidos. Na parte inferior é apresentada a forma de onda modulada.

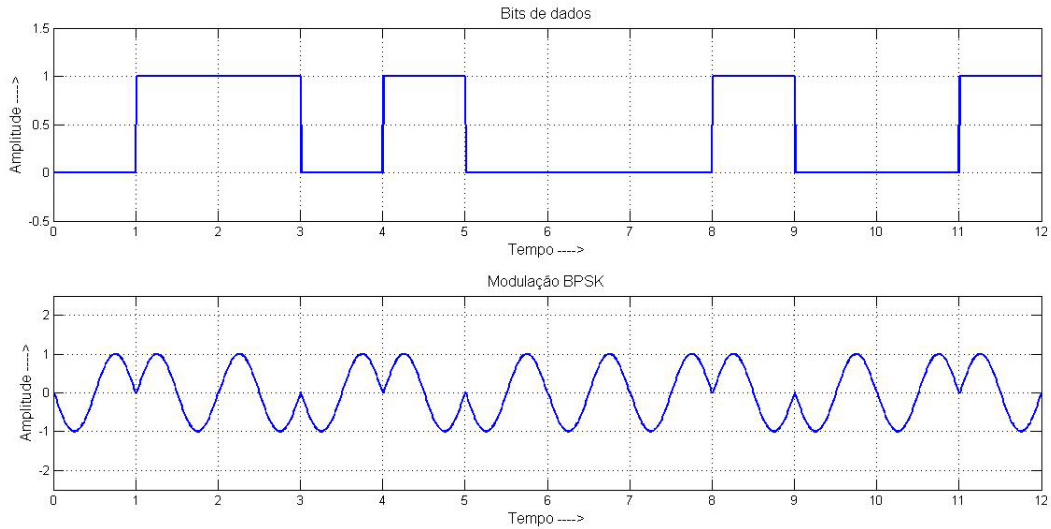


Figura 7 – Ilustração da Modulação BPSK.

### • Modulação QPSK

O termo QPSK significa *Quadrature Phase-shift Keying* - Chaveamento de fase em quadratura. Também é conhecida como 4-PSK ou 4-QAM. Esta técnica utiliza 4 símbolos para a modulação do sinal; desta forma, é possível transmitir dois bits a cada intervalo de modulação. Para uma dada portadora, QPSK pode transmitir dados ao dobro da taxa de transmissão que seria possível utilizando BPSK. Devido ao espaçamento entre os símbolos ser agora de  $90^\circ$ , esta técnica possui uma menor imunidade a ruídos, quando comparada a BPSK.

A figura 8 apresenta os símbolos utilizados pela modulação QPSK, bem como os bits correspondentes.

A figura 9 apresenta um exemplo de modulação utilizando a técnica QPSK. A sequência de bits utilizada no exemplo é a mesma que foi utilizada no exemplo apresentando a técnica anterior.

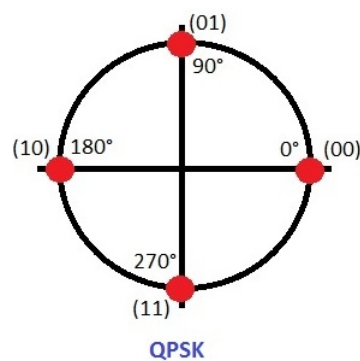


Figura 8 – Símbolos da Modulação QPSK.

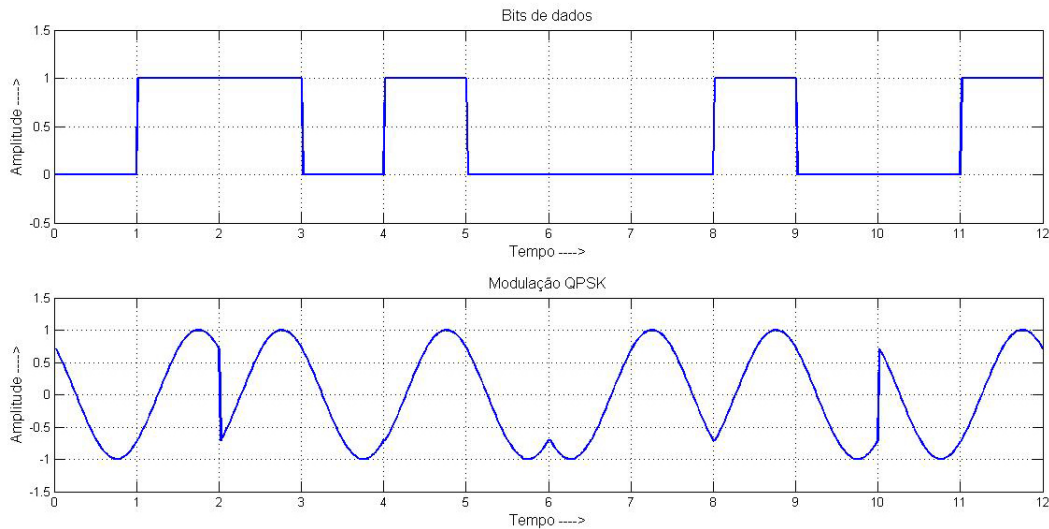


Figura 9 – Ilustração da Modulação QPSK.

### • Modulação 8PSK

*Eight Phase-shift Keying* ou Chaveamento por deslocamento em 8 fases é o nome desta técnica de modulação, que, como pode ser inferido, pode deslocar a fase da onda portadora em 8 diferentes valores de fase, desta forma transmitindo 3 bits de dados a cada intervalo de modulação. Das três técnicas apresentadas aqui, esta é a que possui a menor imunidade a ruídos, devido ao menor espaçamento,  $45^\circ$ , entre os símbolos.

A figura 10 apresenta os símbolos utilizados pela modulação 8PSK, bem como os bits correspondentes. Na figura 11 é apresentado um sinal modulado utilizando 8PSK. A sequência de bits modulante, novamente, é a mesma utilizada nos exemplos referentes as duas técnicas apresentadas anteriormente.

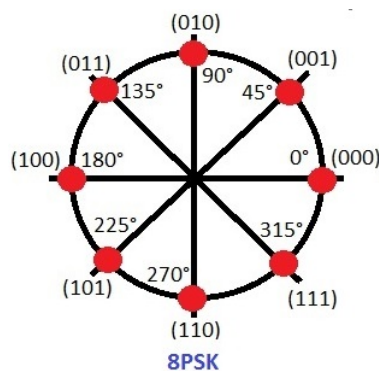


Figura 10 – Símbolos da Modulação 8PSK.

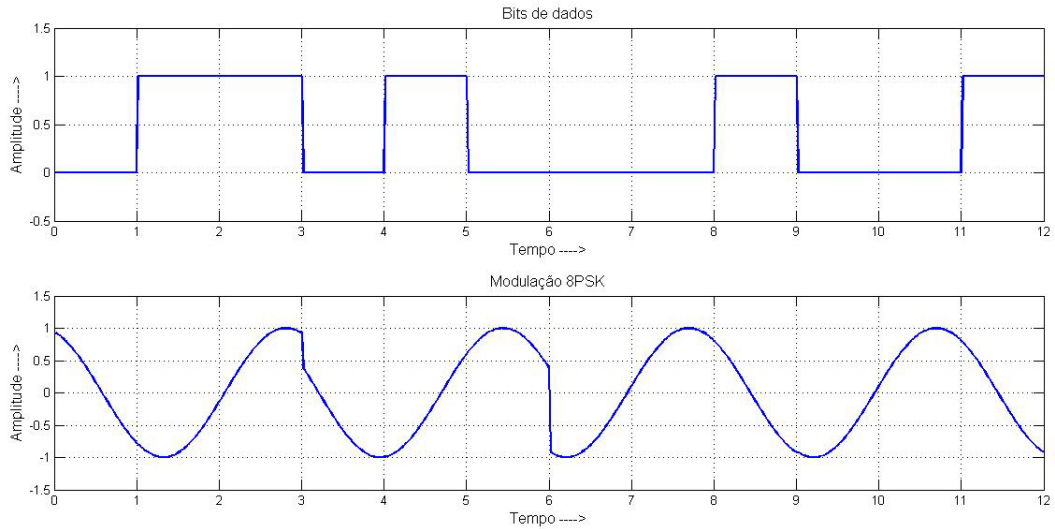


Figura 11 – Ilustração da Modulação 8PSK.

Como visto, 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 são 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.

De forma a ilustrar a diferença na taxa de transmissão entre as três técnicas apresentadas, a figura 12 ilustra uma dada sequência de bits sendo transmitida pelas três técnicas utilizando o mesmo intervalo de modulação.

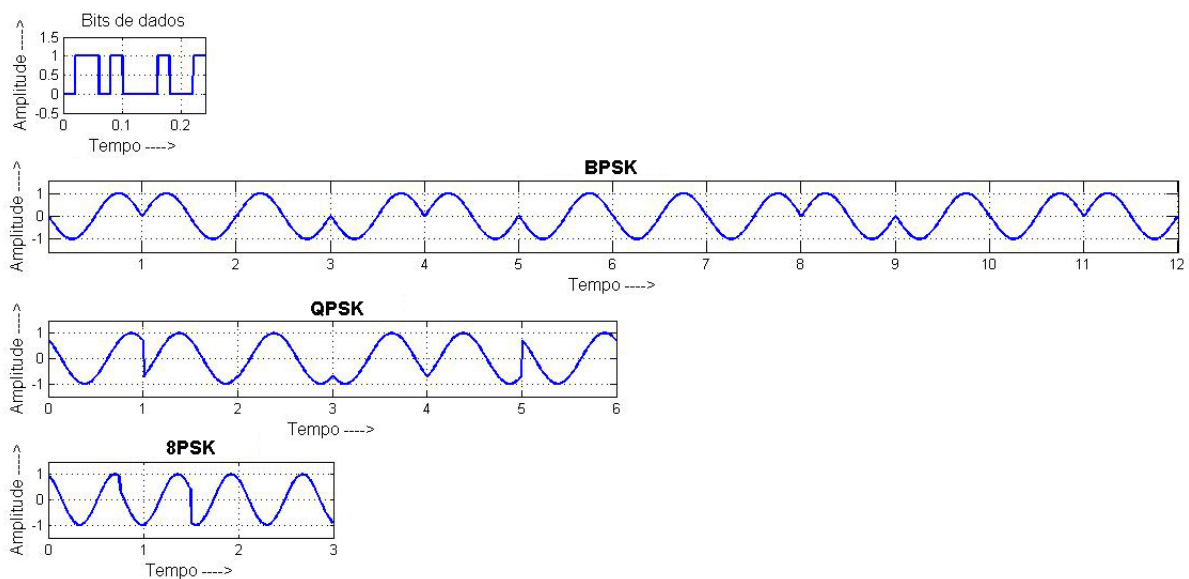


Figura 12 – Comparativo do tempo de transmissão para as modulações BPSK, QPSK e 8PSK.

### 2.3.2.3 OFDM

Esta técnica é baseada na divisão ortogonal de frequências ou, simplesmente, OFDM. Ao contrário da transmissão por portadora única, o sistema de transmissão OFDM, por utilizar várias portadoras, diminui a complexidade da equalização do sistema de comunicação, em termos do nível de ruído presente no mesmo, para transmitir o sinal entre o emissor e o receptor, garantindo uma implementação simples e de baixo custo dos receptores PLC.

Esta técnica utiliza eficientemente a banda de frequência, onde o espectro dos vários canais não se sobrepõem, permanecendo completamente ortogonais e produzindo pouca interferência entre estes. Por ser uma técnica multiportadora, possui robustez contra ruído, uma vez que cada portadora é afetada por um ruído de forma independente das outras. Na técnica de portadora única, o ruído pode afetar alguns bits de dados, comprometendo todo o quadro transmitido. Na OFDM, a perda de informação em uma portadora não afeta as demais. Isso permite uma alta flexibilidade de alocação de velocidade para cada usuário ou portadora. Cada portadora pode ser codificada de forma independente a partir das outras de acordo com a qualidade da conexão física e da melhor técnica de modulação.

Quadros de “treinamento” são usados pelas técnicas de OFDM para identificar as capacidades de transmissão de canal no domínio da frequência. Assim, há uma melhoria da estimativa preliminar do canal de transmissão. Esta é uma técnica robusta em meios de comunicação com interferência. Seu princípio se baseia em separar a faixa de frequências em sub-bandas estreitas, que transportam parte da informação binária. A resposta de frequência de cada subbanda é ortogonal e se sobrepõe para obter uma boa eficiência espectral com menor ocupação da banda de frequência.

Evoluções técnicas na área de processamento de sinal em meios com alta interferência levaram a soluções que aproveitam ao máximo a banda de frequência autorizada para comunicações locais (1-30 MHz), a fim de alcançar a velocidade de transmissão de cerca de 200 Mbit/s podendo chegar até a 500 Mbit/s.

### 2.3.3 Protocolo G3

Desde os primeiros vislumbres de possibilidade, até os dias atuais, a utilização da rede de energia para fins de comunicação já soma mais de um século de existência. Durante praticamente todo este tempo não existiu uma padronização que permitisse, dentre outras coisas, uma compatibilização entre produtos e soluções PLC desenvolvidos por diferentes fabricantes.

No ano de 2011, algumas companhias ligadas ao setor de energia, como a concessionária de energia francesa ERDF (*Électricité Réseau Distribution France*), a fabricante de medidores de energia *Landis & Gyr* e a fabricante de circuitos integrados *Maxim* se uniram

e fundaram a G3-PLC Alliance, com o objetivo de promover a tecnologia de comunicação PLC e desenvolver um padrão de comunicação, denominado Protocolo G3 [25].

G3-PLC é um protocolo de baixo nível desenvolvido para possibilitar a comunicação entre aplicações conectadas à rede elétrica de distribuição. Possui especificações tais que permitem que seja utilizado nas bandas de frequência CENELEC, FCC e ARIB, de forma que pode ser utilizado em praticamente qualquer país do mundo. Utiliza tecnologia de transmissão de dados OFDM, podendo utilizar como simbologia as modulações BPSK, QPSK e 8PSK. O dispositivo responsável pela comunicação deve possuir taxa de amostragem para conversão analógico digital de 400 kHz. Implementa técnicas de detecção e correção de erros baseadas em checagem de redundância cíclica CRC e correção de erros Reed-Solomon. Como técnica para enlace de dados é utilizada a padronização IEEE 802.15.4 [26].

G3-PLC foi concebido de forma a possibilitar conexões extremamente robustas quanto à rejeição a ruídos e segurança da informação. Seu projeto prevê que os sinais de comunicação sejam capazes de cruzar transformadores de distribuição e trafegar em meios de comunicação agressivos quanto a nível de ruído e interferências.

Por utilizar OFDM, o protocolo G3 transmite a informação utilizando várias portadoras ortogonais. O espaçamento, em frequência, entre as portadoras é padronizado em 1.5625 kHz [26].

Tabela 3 – Portadoras utilizadas no protocolo G3.

<b>Banda CENELEC</b>	<b>Quantidade de Portadoras</b>	<b>Faixa de frequência (kHz)</b>
<b>A</b>	36	35.9375 - 90.625
<b>B</b>	16	98.4375 - 121.875
<b>BC</b>	26	98.4375 - 137.5
<b>BCD</b>	32	98.4375 - 146.875

A tabela 3 apresenta a quantidade de portadoras utilizada pelo protocolo G3 para as bandas CENELEC [26] [27]. Também são apresentadas as frequências referentes à primeira e à última portadora de cada faixa. Para se encontrar as frequências das portadoras intermediárias é necessário apenas conhecer a ordem da portadora sob interesse e acrescentar a quantidade de espaçamentos padronizados.

Tabela 4 – Taxas teóricas máximas de transmissão de dados para protocolo G3 e bandas CENELEC.

Máxima taxa de comunicação (bps)			
Banda	BPSK	QPSK	8PSK
A	20009	34160	42618
B	9240	16302	21616
BC	14207	26766	34496
BCD	18129	31351	40266

A tabela 4 apresenta as máximas taxas teóricas de comunicação de dados alcançáveis para as diversas técnicas de modulação e faixas de frequência CENELEC. As taxas de comunicação efetivamente alcançáveis tendem a ser um pouco menores que as descritas, em função do nível de ruído, atenuação e interferência impostos pelo meio.

Neste capítulo foram apresentados os conceitos introdutórios necessários à compreensão do restante do trabalho. Foi apresentada uma revisão do estado da arte acerca da comunicação PLC, as normas existentes e as técnicas para transmissão de dados usualmente utilizadas. O próximo capítulo irá apresentar uma caracterização acerca do barramento c.c. como meio de transmissão de dados, por meio de resultados de simulação.

## 3 Caracterização do Barramento C.C. de Inversores como Meio de Comunicação PLC

### 3.1 Revisão sobre técnicas PWM e seu impacto no espectro de frequências no barramento c.c.

O Barramento c.c de sistemas de acionamento de motores de indução por meio de inversores que utilizam modulação *Pulse Width Modulation* (PWM), embora projetado para operar em tensão contínua, apresenta também tensões e correntes de alta frequência, que surgem naturalmente durante o processo de modulação e acionamento da carga. Visando caracterizar as influências e particularidades que podem ser impostas pelo barramento ao sistema de comunicação, torna-se necessário o estudo do espectro de frequências presente no barramento devido à técnica de modulação, comprimento do cabo e carga mecânica aplicada ao eixo do motor.

Neste capítulo serão avaliadas três técnicas de modulação: *Sinusoidal PWM* (SPWM), *Third-Harmonic Injection PWM* (THIPWM) e *Space Vector PWM* (SVPWM). Serão ainda avaliados, em ambiente de simulação, os impactos referentes ao acionamento do motor a vazio e com carga mecânica no eixo, para barramentos c.c curtos e longos.

#### 3.1.1 Modulações Analisadas

Serão apresentadas aqui, a título de referência, breves descrições acerca das técnicas de modulação analisadas neste trabalho.

##### 3.1.1.1 SPWM

Esta é uma das técnicas de modulação mais simples existente. Uma das formas para a implementação desta técnica de modulação consiste na comparação de uma referência senoidal com um sinal portador triangular. Os pulsos provenientes da comparação serão utilizados para o controle dos instantes de comutação das chaves semicondutoras do inversor, de forma que a amplitude e frequência da tensão de saída desejada serão iguais ou proporcionais às da referência senoidal, enquanto a frequência de chaveamento do inversor será igual à frequência da onda triangular.

A figura 13 apresenta um representação gráfica da técnica de modulação SPWM. Nesta figura, uma onda modulante de 50 Hz e amplitude igual a 150 V é comparada com uma triangular de frequência 1 kHz. Na parte inferior da figura são apresentados os pulsos

de comando que devem ser aplicados à chave semicondutora superior do inversor, para uma das fases de saída.

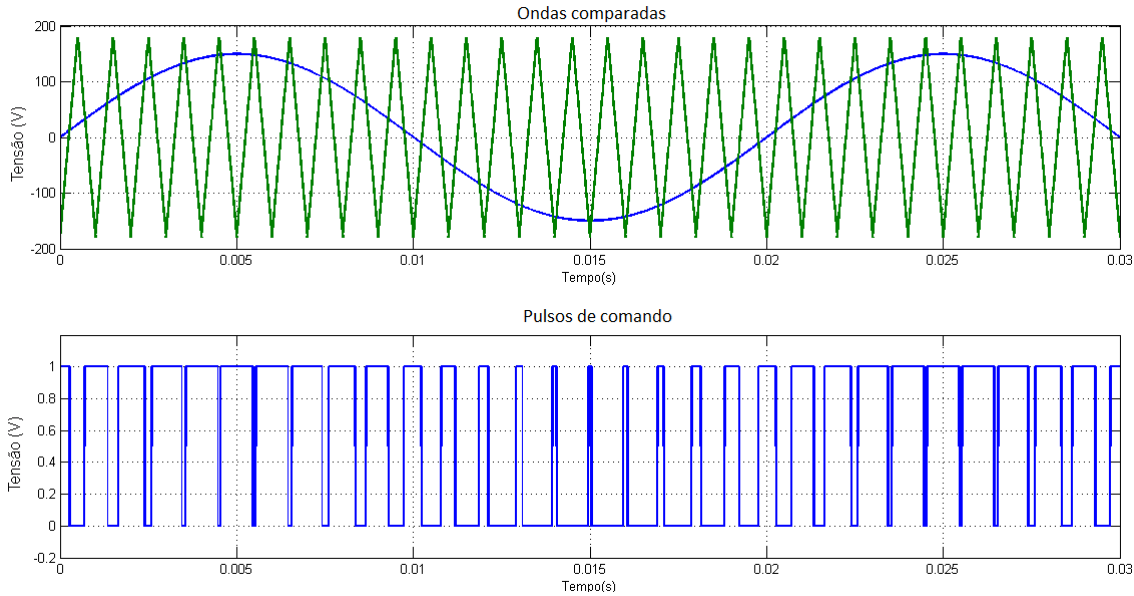


Figura 13 – Representação gráfica da modulação SPWM.

### 3.1.1.2 THIPWM

Esta técnica é muito semelhante à SPWM; porém, aqui o sinal modulante é modificado através da adição de uma componente de terceiro harmônico. O princípio envolvido deriva do fato de componentes de sequência zero não afetarem o valor eficaz das tensões de linha de saída do inversor, embora alterem de forma significativa as características de chaveamento.

Várias são as possibilidades referentes à forma de onda da componente de sequência zero a ser injetada ao sinal modulante. Especificamente para esta técnica de modulação, a componente de sequência zero possui formato senoidal, dada pela equação 3.1 [28].

$$V_o = -\frac{V_m}{n} \cos 3\omega t \quad (3.1)$$

Onde  $V_m$  é a amplitude da tensão de saída do inversor e  $n$  é um número maior que 1. Neste trabalho foi adotado  $n=4$ , de forma que a técnica de modulação passa a ser denominada THIPWM1/4.

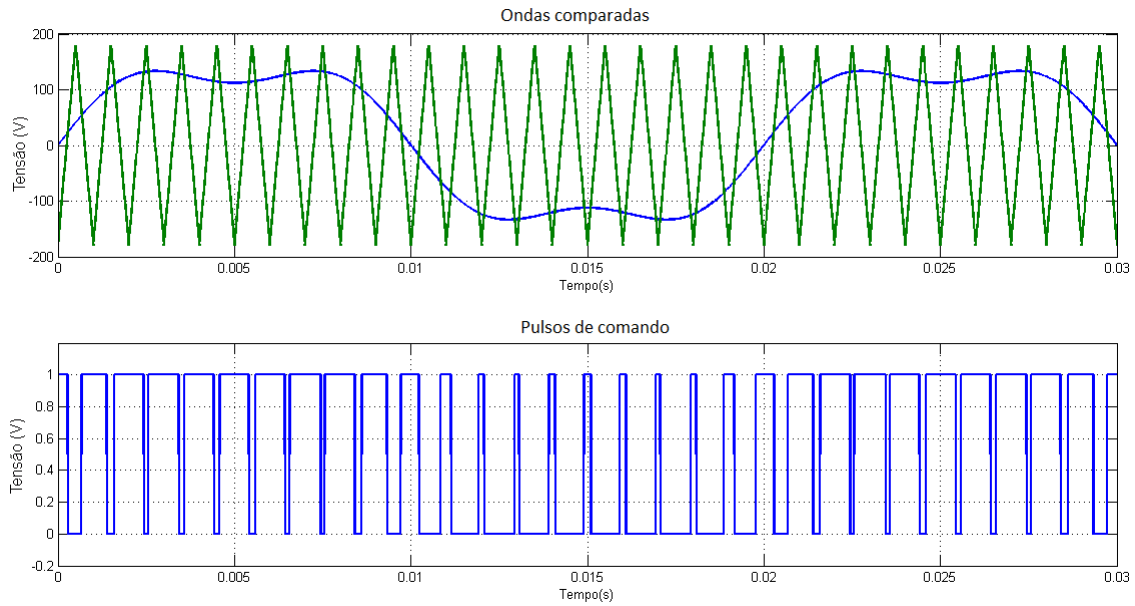


Figura 14 – Representação gráfica da modulação THIPWM1/4.

A figura 14 apresenta a representação da modulação THIPWM1/4, com a componente de sequência zero já adicionada ao sinal modulante senoidal. Na parte inferior da figura são apresentados os pulsos de comando que devem ser aplicados à chave semicondutora superior do inversor, para uma das fases de saída.

### 3.1.1.3 SVPWM

De todas as técnicas apresentadas aqui, esta talvez seja a mais utilizada comercialmente. Para a implementação desta técnica através da comparação triangular, o sinal de sequência zero a ser adicionado é construído através de um teste de menor magnitude, que verifica, entre os três sinais senoidais de referência, aquele que instantaneamente possui a menor magnitude. Este sinal é então multiplicado por 0,5 [28]. Dessa forma, a expressão para o sinal de sequência zero é então:

$$V_o = \begin{cases} 0.5 \times V_a & \text{se } |V_a| = \min(|V_a|, |V_b|, |V_c|) \\ 0.5 \times V_b & \text{se } |V_b| = \min(|V_a|, |V_b|, |V_c|) \\ 0.5 \times V_c & \text{se } |V_c| = \min(|V_a|, |V_b|, |V_c|) \end{cases} \quad (3.2)$$

Na figura 15 é possível visualizar o sinal modulante SVPWM após a adição da componente de sequência zero, bem como os pulsos de comando para a chave superior do braço do inversor, na parte inferior da figura.

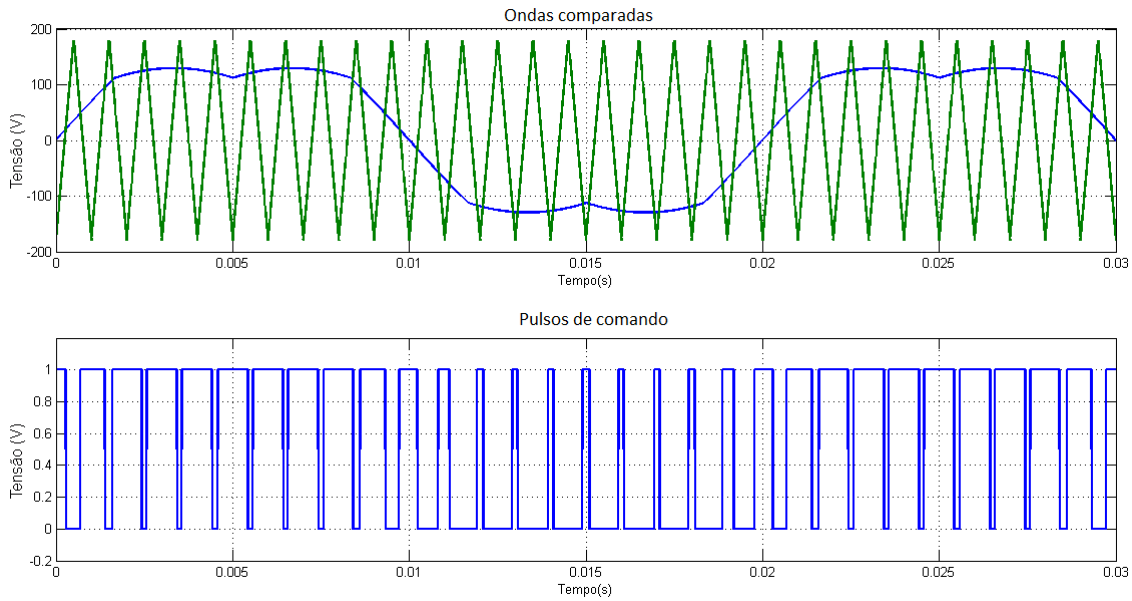


Figura 15 – Representação gráfica da modulação SVPWM.

## 3.2 Modelagem do barramento c.c. longo

O barramento c.c. de conversores não é um item originalmente projetado para transmissão de dados, possuindo, naturalmente, características desfavoráveis a esta finalidade. Dentre os vários inconvenientes deste meio, relativos à comunicação, pode-se citar (i) a grande quantidade de ruído, proveniente do chaveamento do inversor e do acionamento da carga, (ii) nível de atenuação dependente da frequência, (iii) grande capacitância do barramento, que se torna um problema especialmente para altas frequências de modulação do sinal de comunicação.

Acionamentos baseados em conversores de frequência típicos possuem um comprimento do barramento c.c. (distância entre retificador e inversor) que vão desde poucos centímetros a poucos metros. O mais comum atualmente é a existência de um único equipamento que contenha internamente todas as partes necessárias; desta forma, o comprimento dos cabos do barramento c.c. é algo normalmente desprezado.

A proposta deste trabalho parte do pressuposto que o barramento c.c. é composto por cabos bipolares de elevado comprimento, desde algumas centenas de metros, podendo ultrapassar a marca dos quilômetros. Desta forma, torna-se necessário avaliar o impacto, principalmente quanto ao espectro de frequências no barramento e atenuação imposta ao sinal de comunicação, relativo a este aumento do comprimento dos cabos.

Para tal, modelou-se o barramento como uma linha de transmissão. Linhas de transmissão são entendidas como tendo parâmetros de resistência, indutância e capacitância, entre os cabos e destes para a terra, distribuídos ao longo de todo o seu comprimento [29].

Modelos simples e normalmente eficientes podem ser construídos considerando a linha como um conjunto de pequenas seções com parâmetros definidos e concentrados. O modelo total da linha será então obtido com o agrupamento, em série, dos modelos para as várias seções. Como exemplo desta metodologia, uma linha de comprimento igual a 100 metros pode ser entendida como o conjunto de 100 partes de 1 metro de cabo, conectados em série.

### 3.2.1 Modelo Pi

Neste trabalho adotou-se, para o cabo do barramento c.c., o modelo Pi, no qual a linha é representada como tendo, por seção, uma impedância em série com a corrente, além de uma admitância transversal.

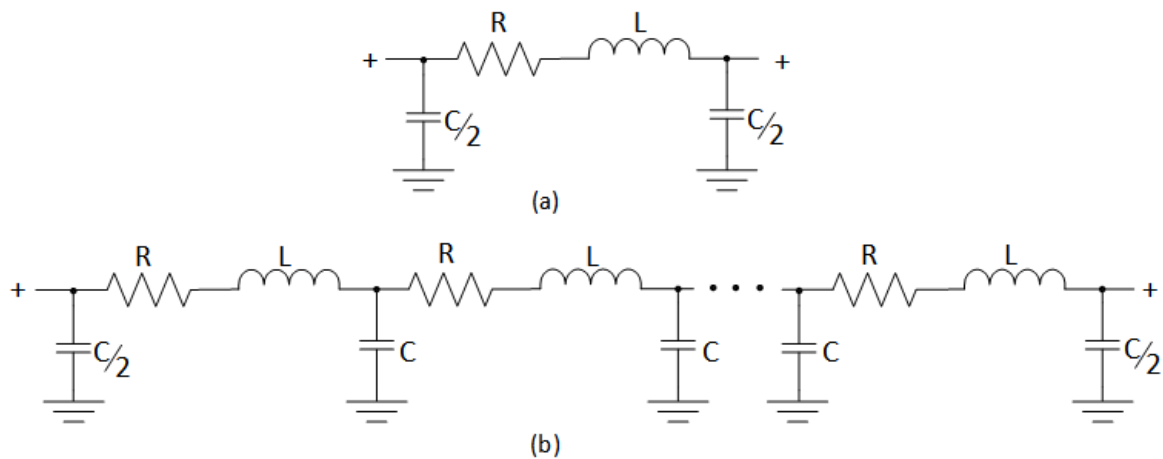


Figura 16 – Modelo Pi para o cabo: (a) parâmetros concentrados e (b) aproximação a parâmetros distribuídos.

Na figura 16 é possível ver a representação de uma linha segundo o modelo Pi. Este modelo, como representado na figura, é referente a apenas um condutor. Como o barramento c.c necessita de dois condutores para a sua construção (*e.g.*, cabos V+ e V-), em ambiente de simulação este modelo deve ser repetido para ambos os condutores do barramento. Na figura 16(a) a linha é modelada supondo parâmetros concentrados; desta forma, o modelo é construído com uma única rede Pi. Já em 16(b) a distribuição dos parâmetros ao longo da linha é aproximada por meio da divisão do comprimento total da linha em várias pequenas seções da mesma, cada qual representada por uma rede Pi.

### 3.2.2 Modelo Nramos

Todo cabo apresenta uma indutância série que varia em função da frequência da corrente circulante. Tal fenômeno é devido à não uniformidade da indutância própria do

condutor ao longo de sua seção transversal, assim os parâmetros de resistência e indutância do cabo são variantes em função da frequência das correntes que circulem pelo cabo, sendo a resistência e indutância proporcionais à frequência.

Desta forma, o modelo Pi não se configura como a melhor opção para representação de um determinado cabo quando este é percorrido por uma corrente de elevada componente espectral, pois, por utilizar parâmetros (R, L e C) determinados para uma dada frequência fixa, o mesmo não é capaz de levar em conta o efeito pelicular do cabo.

Visando a obtenção de resultados de simulação mais condizentes com o sistema real, implementou-se uma modificação no modelo Pi, utilizando como base um outro modelo, denominado “Nramos”. O modelo Nramos parte do pressuposto que o condutor pode ser considerado como uma associação em paralelo de infinitos subcondutores tubulares concêntricos, cada qual com seus respectivos valores de resistência e indutância [30], de tal forma que o modelo formado por todos os subcondutores é capaz de aproximar satisfatoriamente o efeito pelicular do cabo.

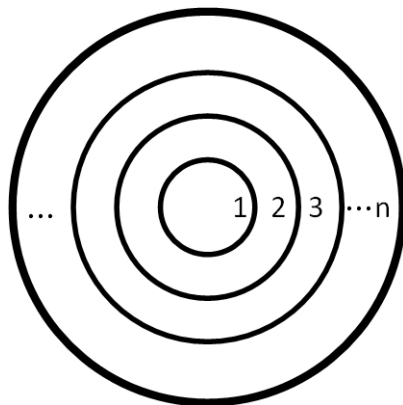


Figura 17 – Representação do condutor por um conjunto de “n” subcondutores tubulares concêntricos.

A figura 17 ilustra a representação física do cabo, sendo este entendido por um arranjo de subcondutores tubulares, utilizada como base para o modelo Nramos. Para cada tubo concêntrico corresponde uma indutância e resistência características, que são determinadas para uma dada frequência. Dessa forma, cada tubo pode ser entendido como um “ramo”, onde circula a corrente de uma dada faixa de frequências, de onde advém o nome do modelo. Uma metodologia para cálculo dos parâmetros de cada ramo pode ser encontrada em [31] [32].

A figura 18 apresenta o modelo Pi modificado para a representação do efeito pelicular, empregando-se o modelo Nramos. Como visto, o conceito de subcondutores concêntricos tubulares agrupados, do modelo Nramos, para fins de simulação, pode então ser representado por um arranjo especial de resistores e indutores.

O modelo utilizado neste trabalho para o cabo do barramento c.c. é então uma

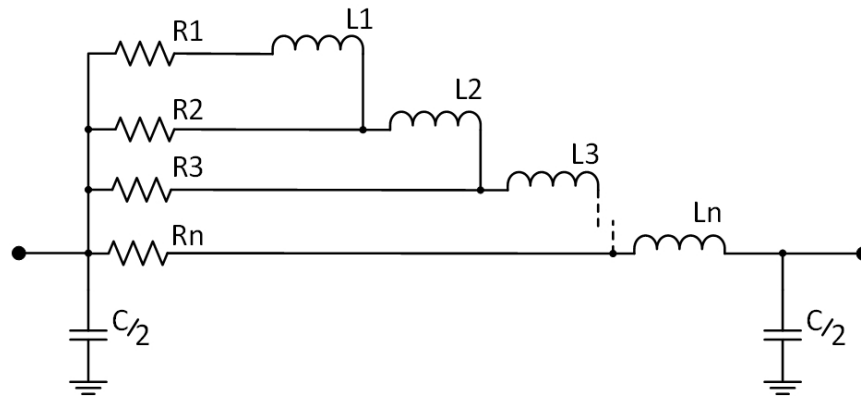


Figura 18 – Modelo Pi adaptado com o modelo Nramos.

junção dos modelos Pi e Nramos. O cabo continua sendo representado de acordo com o modelo Pi, formado por uma impedância RL longitudinal e uma admitância C transversal, porém o bloco longitudinal é representado segundo o seu equivalente Nramos.

Os parâmetros R,L e C do modelo podem ser obtidos de forma teórica ou experimental. Existem atualmente vários *softwares* capazes de realizar uma boa aproximação dos mesmos com base em informações relativas ao cabo, tais como diâmetro do condutor, espaçamento entre condutores e entre estes e a terra e frequência do sinal aplicado. Neste trabalho, utilizou-se a rotina *Compute RLC Line Parameters*, pertencente ao *software* gráfico *Powergui*, do pacote *Matlab/Simulink* [33].

### 3.3 Resultados de simulação/experimentos

Nesta seção serão apresentados os resultados de simulação para o modelo proposto. Utilizou-se como ferramenta computacional o *software* Matlab/Simulink. A figura 19 apresenta o modelo de simulação implementado. Cada bloco “Pi-Nramos” desta figura, internamente, corresponde ao modelo apresentado na figura 18, contendo 5 ramos para representar a impedância série.

Buscando uma boa aproximação do modelo implementado em relação ao cabo real, é recomendável que os ramos sejam determinados em frequências de entrada espaçadas geometricamente entre si [32]. Desta forma, e utilizando como limite inferior a frequência dos pulsos do retificador trifásico de entrada, 360 Hz, e como limite superior a máxima frequência utilizada para comunicação, 120 kHz, os ramos do modelo foram calculados para as frequências de 360 Hz, 1.5 kHz, 6.5 kHz, 28 kHz e 120 kHz. Os resultados apresentados são referentes às formas de onda de tensão no início e final do barramento c.c. (*i.e.*, tensão nos capacitores C1 e C2.).

Considerou-se, para obtenção dos parâmetros de indutância, resistência e capacitâncias, a utilização de dois tipos distintos de cabo, em função do comprimento do

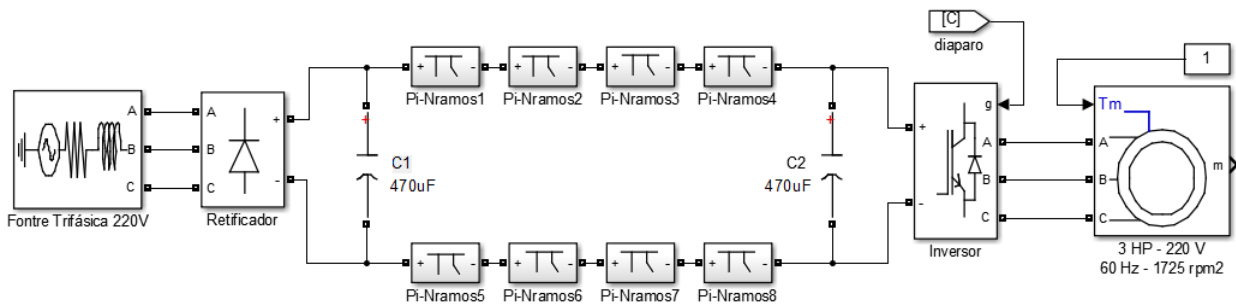


Figura 19 – Modelo de simulação do sistema de acionamento implementado no *software* Matlab/Simulink.

barramento considerado. Para barramentos com comprimento de 15 e 100 metros o modelo foi parametrizado supondo a utilização de condutor de cobre, de seção  $2.5 \text{ mm}^2$  de seção transversal, e para barramento com comprimento de 500 metros considerou-se condutor, também de cobre, com seção transversal de  $6.0 \text{ mm}^2$ .

As tabelas 5 e 6, apresentam, respectivamente, os parâmetros calculados para os cabos de  $2.5 \text{ mm}^2$  e  $6.0 \text{ mm}^2$  de seção transversal, considerados nas frequências citadas anteriormente. Adotou-se a construção do barramento utilizando unicamente cabos unipolares, e que ambos os condutores do barramento encontram-se instalados lado a lado, distanciados apenas pela espessura da camada de isolamento dos cabos, posicionados diretamente sobre o solo. Considerou-se uma resistividade média do solo de  $1 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$ ; a resistência c.c. do cabo  $2.5 \text{ mm}^2$  como sendo  $7.4 \text{ }\Omega/\text{km}$  e para o cabo  $6.0 \text{ mm}^2$  como sendo  $3.8 \text{ }\Omega/\text{km}$ .

Tabela 5 – Parâmetros R, L e C calculados para o cabo de  $2.5 \text{ mm}^2$

	360 Hz	1.5 kHz	6.5 kHz	28 kHz	120 kHz
<b>R (<math>\Omega/\text{km}</math>)</b>	7,7553	8,8804	13,815	35,035	125,84
<b>L (mH/km)</b>	3,7631	3,6204	3,4738	3,3277	3,1822
<b>C (<math>\mu\text{F}/\text{km}</math>)</b>	0,1398	0,1398	0,1398	0,1398	0,1398

Tabela 6 – Parâmetros R, L e C calculados para o cabo de  $6.0 \text{ mm}^2$

	360 Hz	1.5 kHz	6.5 kHz	28 kHz	120 kHz
<b>R (<math>\Omega/\text{km}</math>)</b>	4,1553	5,2804	10,215	31,435	122,24
<b>L (mH/km)</b>	3,6142	3,4715	3,3249	3,1788	3,0333
<b>C (<math>\mu\text{F}/\text{km}</math>)</b>	0,1605	0,1605	0,1605	0,1605	0,1605

### 3.3.1 Variação do comprimento do cabo

Buscando analisar os possíveis impactos, devidos ao conteúdo espectral das tensões no início e final do barramento c.c., o sistema foi simulado com o barramento c.c. composto por cabo de três comprimentos distintos: 15, 100 e 500 metros. Para o inversor, foi utilizada a técnica de modulação SVPWM, e frequência de chaveamento em 5 kHz. A figura 20 apresenta as tensões na extremidade do cabo referente ao lado do retificador, enquanto a figura 21 apresenta as tensões referentes ao lado inversor.

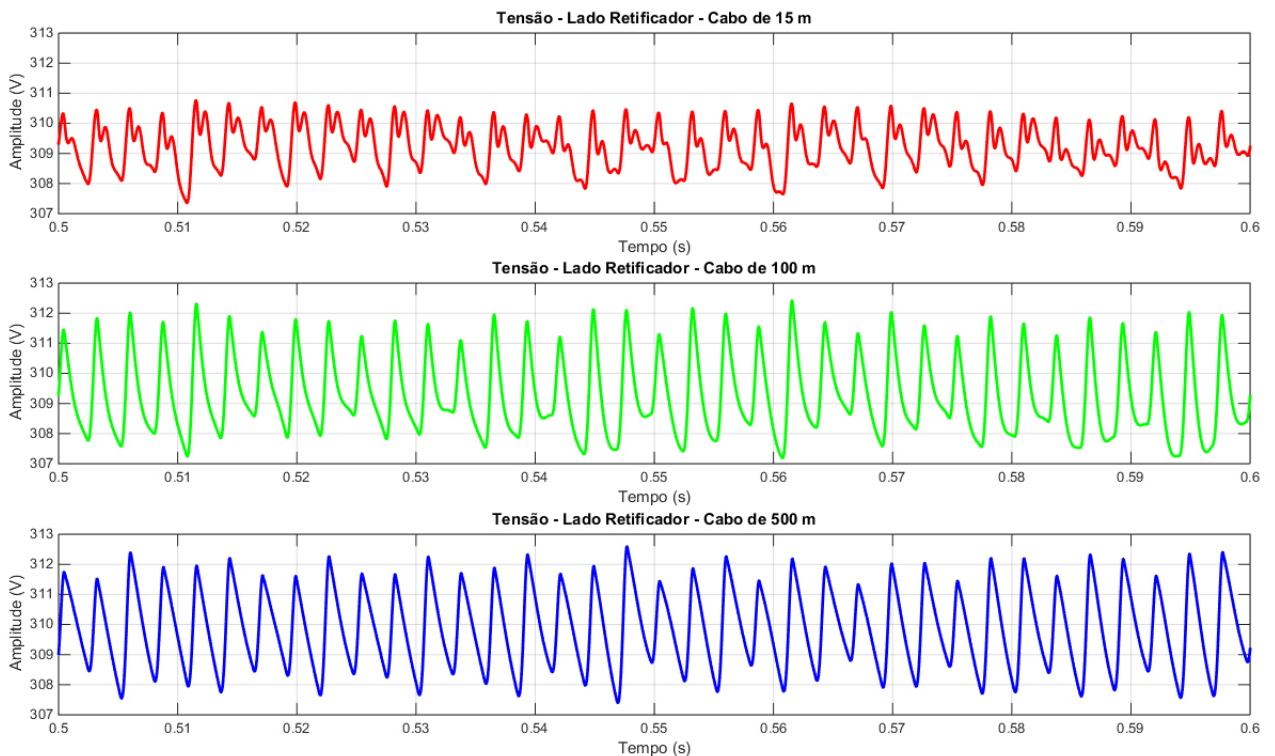


Figura 20 – Formas de onda de tensão no lado retificador com barramento c.c de 15, 100 e 500 m.

Uma análise visual preliminar das figuras 20 e 21 indica que, do lado retificador, o aumento do comprimento do cabo tende à acarretar um aumento do *ripple* da tensão nesta extremidade, com pequenas modificações no formato da forma de onda. Do lado inversor, o aumento do comprimento do cabo resulta, principalmente, em uma diminuição da tensão c.c média disponível ao inversor.

De forma a verificar os possíveis impactos, quanto ao nível de ruído de alta frequência presente no barramento, em função do aumento do comprimento do cabo, as figuras 22 e 23 apresentam o conteúdo espectral das tensões nas extremidades do cabo, avaliado de 0 a 100 kHz, pelo algoritmo da transformada rápida de Fourier, ou *Fast Fourier Transform* (FFT).

Como pode ser visto, o aumento do comprimento do cabo não altera de forma

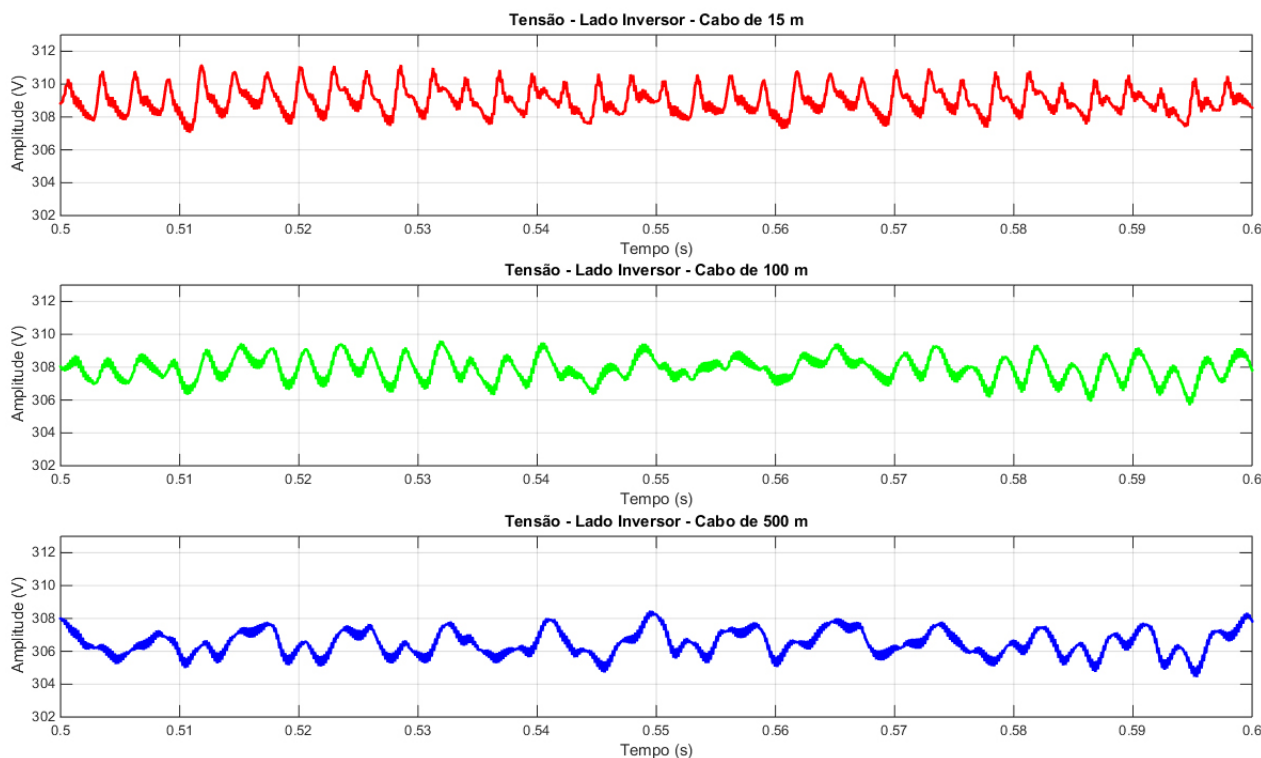


Figura 21 – Formas de onda de tensão no lado inversor com barramento c.c de 15, 100 e 500 m.

significativa o conteúdo espectral das tensões em ambas as extremidades do barramento. É possível verificar ainda que, em ambas as extremidades, após 10 kHz a amplitude da tensão em ambas extremidades já se encontra abaixo dos 50 dB. De forma a facilitar o entendimento do perfil espectral das tensões em ambas as extremidades, a figura 24 apresenta, para o cabo de 500 metros, a distribuição espectral no intervalo entre 0 e 10 kHz.

Pela figura 24 percebe-se que em ambas as extremidades a tensão possui suas maiores componentes compreendidas na faixa entre 0 e 2 kHz, sendo estas de amplitude mais elevada do lado retificador que do lado inversor. Do lado inversor, as componentes situadas próximas a frequência de chaveamento do inversor e suas harmônicas, são mais proeminentes, destacando-se quanto à amplitude. Desta forma pode-se entender o barramento longo como um “filtro”, que separa as componentes provenientes do processo de retificação da tensão localizadas principalmente na extremidade do lado retificador, e as componentes provenientes do processo de chaveamento e inversão da tensão c.c. para acionamento do motor, principalmente do lado inversor.

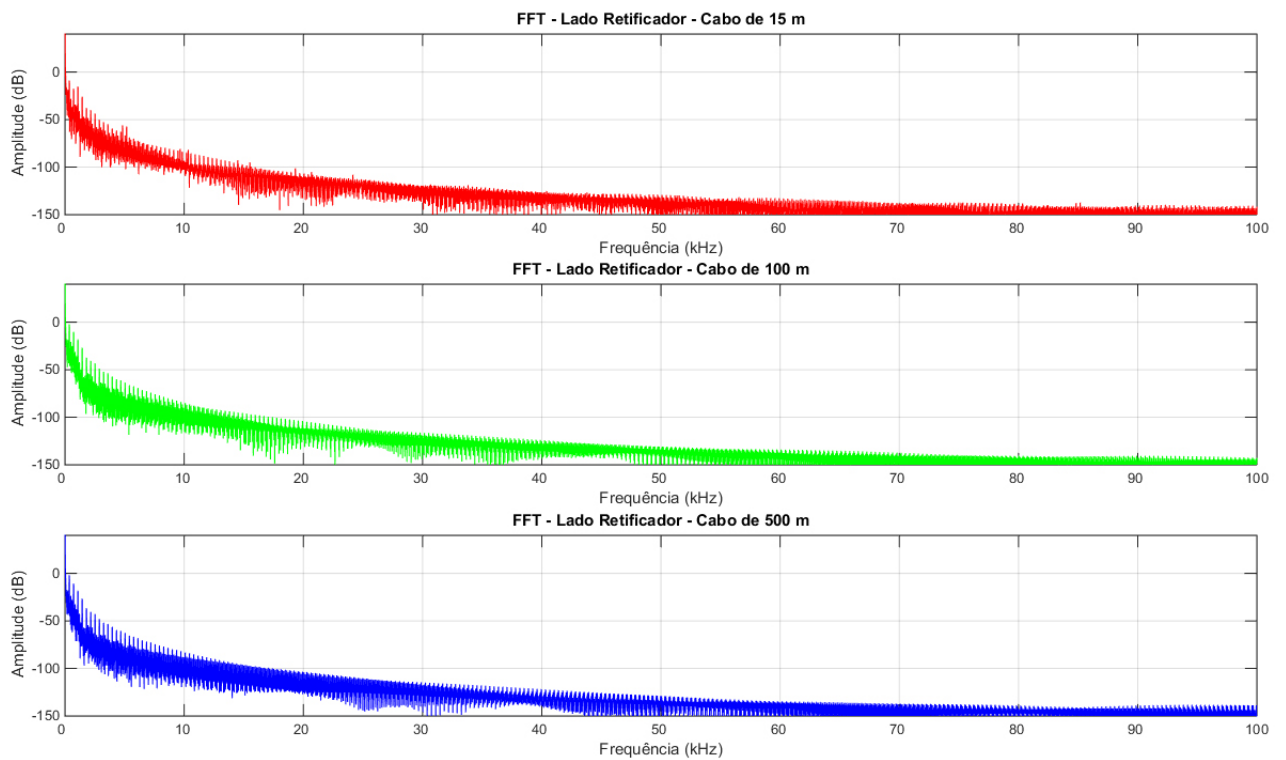


Figura 22 – Transformada de Fourier da tensão do lado retificador com barramento c.c de 15, 100 e 500 m.

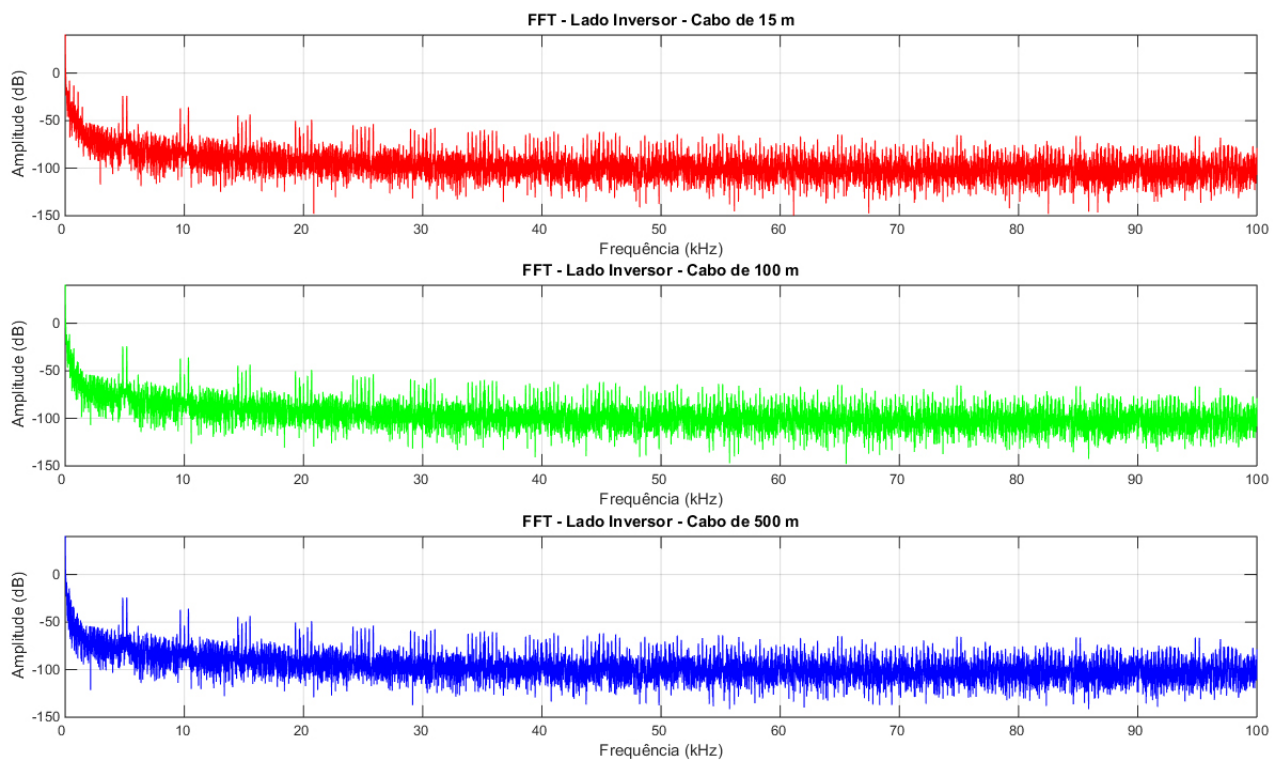


Figura 23 – Detalhe da transformada de Fourier da tensão do lado inversor com barramento c.c de 500 m e modulação SVPWM - cabos de 15, 100 e 500 metros.

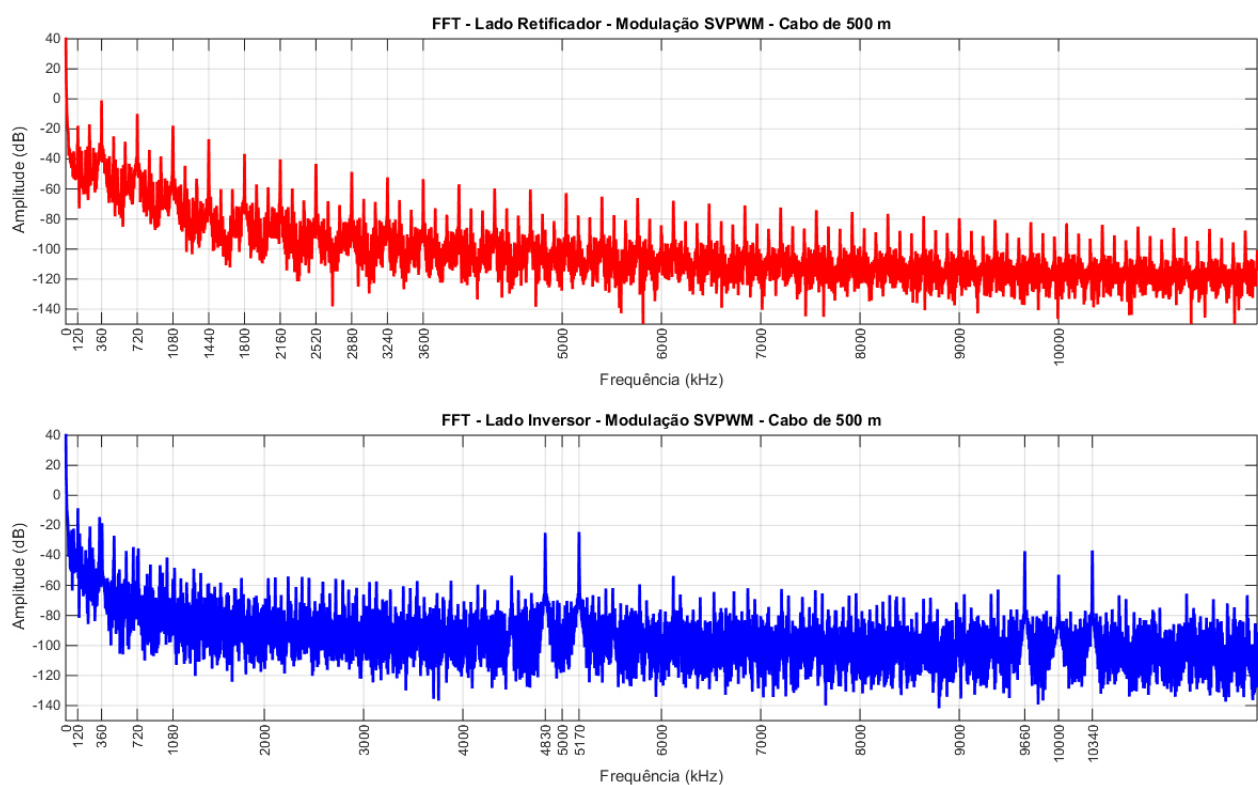


Figura 24 – Transformada de Fourier da tensão nas extremidades do barramento - Cabo de 500 metros - 0 a 10 kHz.

### 3.3.2 Variação da Técnica de Modulação

Visando avaliar o impacto proveniente da técnica de modulação aplicada ao processo de inversão da tensão c.c., as figuras 25 e 26 apresentam as componentes espectrais das tensões, utilizando-se as técnicas de modulação SPWM, THIPWM1/4 e SVPWM, nas extremidades do lado retificador e inversor, respectivamente. O sistema foi modelado utilizando barramento c.c. com 500 metros de comprimento.

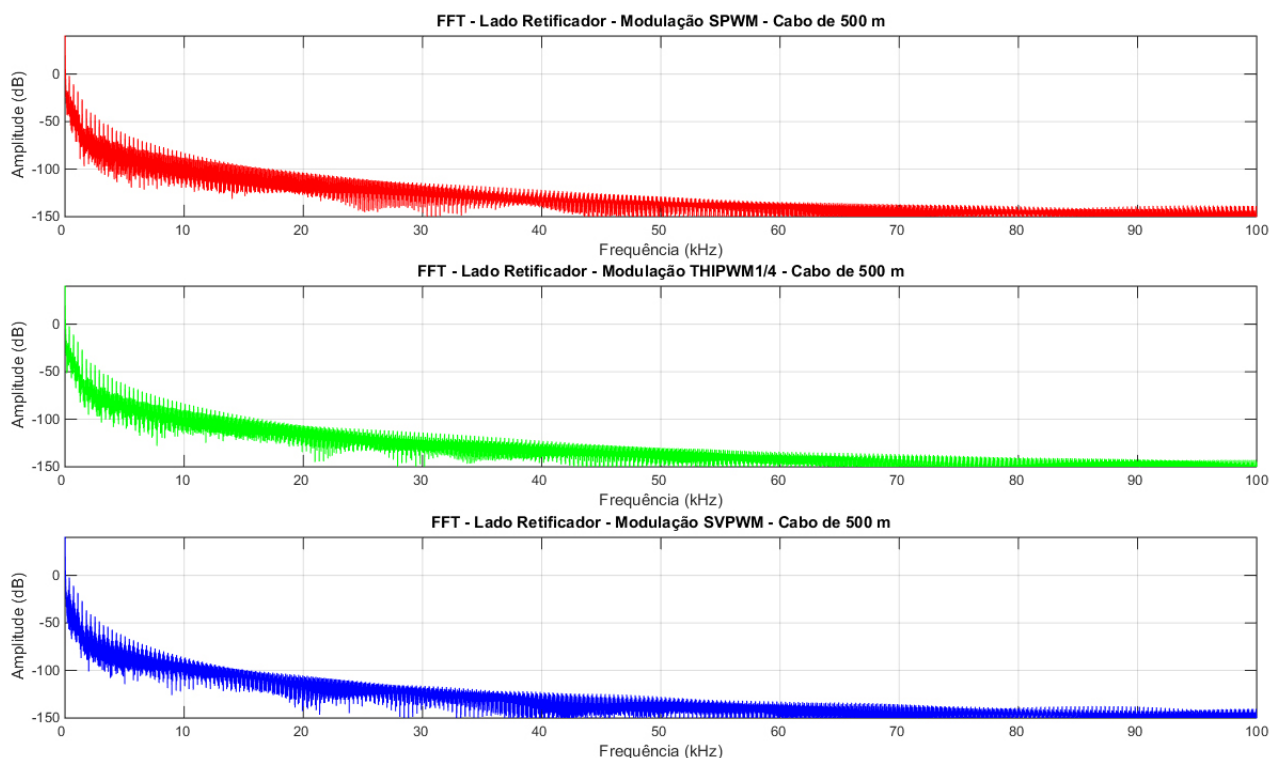


Figura 25 – FFT da tensão do lado retificador com barramento c.c de 500 m - Modulações SPWM, THIPWM1/4 e SVPWM.

Como visto nas figuras 25 e 26, na faixa acima de 90 kHz, que será utilizada para a comunicação PLC, o conteúdo espectral para ambas as técnicas de modulação possui amplitude abaixo dos 70 dB, o que, em primeira análise, indica que a escolha da técnica de modulação não possui influência significativa quanto à utilização do barramento como meio de comunicação PLC. Pequenas variações no espectro são verificadas, em função da técnica de modulação, principalmente na faixa abaixo dos 10 kHz, que não serão detalhadas aqui por não serem relevantes ao sistema de comunicação proposto neste trabalho.

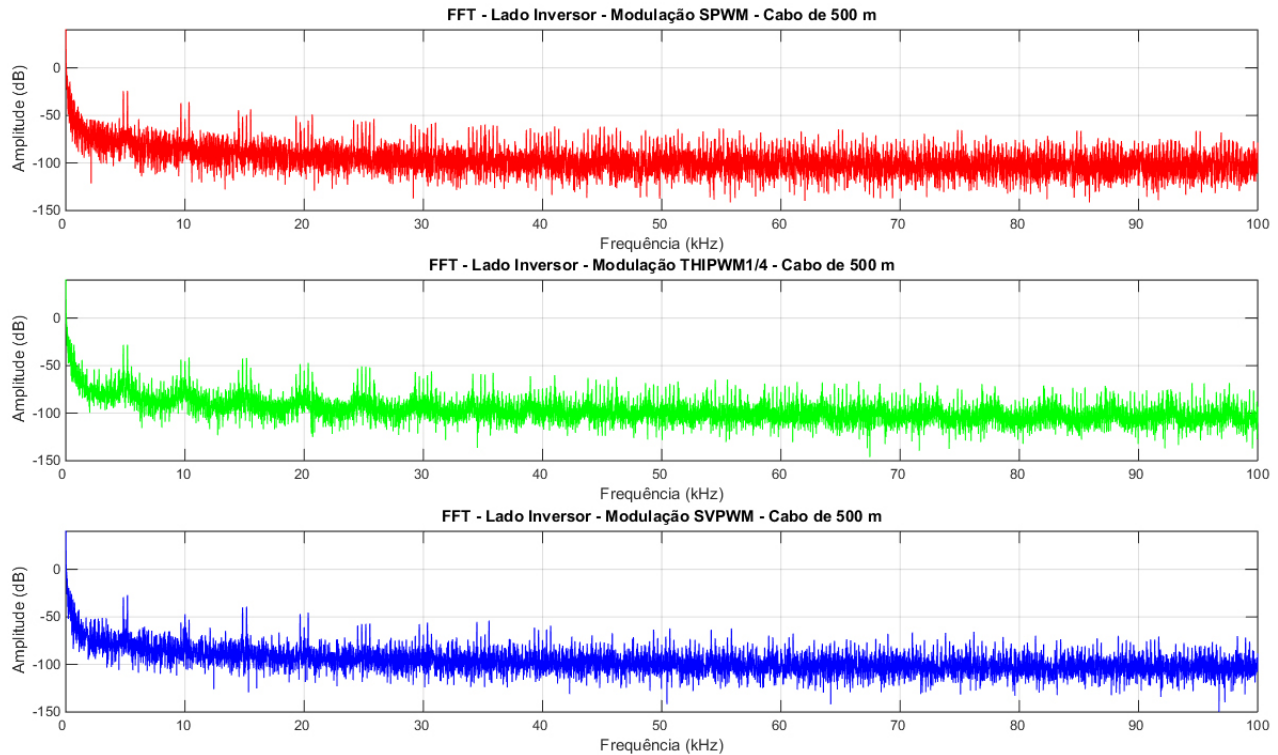


Figura 26 – FFT da tensão do lado inversor com barramento c.c de 500 m - Modulações SPWM, THIPWM1/4 e SVPWM.

### 3.3.3 Variação da Velocidade e Torque Mecânico

De forma a verificar os efeitos no espectro de frequências do barramento c.c. relativos à operação do sistema de acionamento para diferentes referências de velocidade de rotação da máquina, o sistema foi simulado utilizando modulação SVPWM e motor a vazio. A figura 27 apresenta os resultados para o espectro de frequência da forma de onda de tensão presente no barramento c.c. do lado retificador, obtidos com o motor girando a 1500, 1200 e 900 RPM, conforme indicado. Como pode ser facilmente percebido, para frequências superiores a 6 kHz, a magnitude da transformada de Fourier é inferior aos -70 dB.

A figura 28 apresenta resultados para o sistema operando novamente com modulação SVPWM, porém agora com um torque de 10 Nm aplicado ao eixo do motor, nas mesmas velocidades de rotação avaliadas para o sistema a vazio. Como pode ser percebido, a operação do motor com carga mecânica aplicada modifica o espectro de frequências no barramento c.c. em relação à operação a vazio, para uma dada velocidade de rotação; porém, mesmo para esse caso, tal espectro não apresenta componentes com amplitudes superiores aos -70 dB para frequências superiores a 8 kHz.

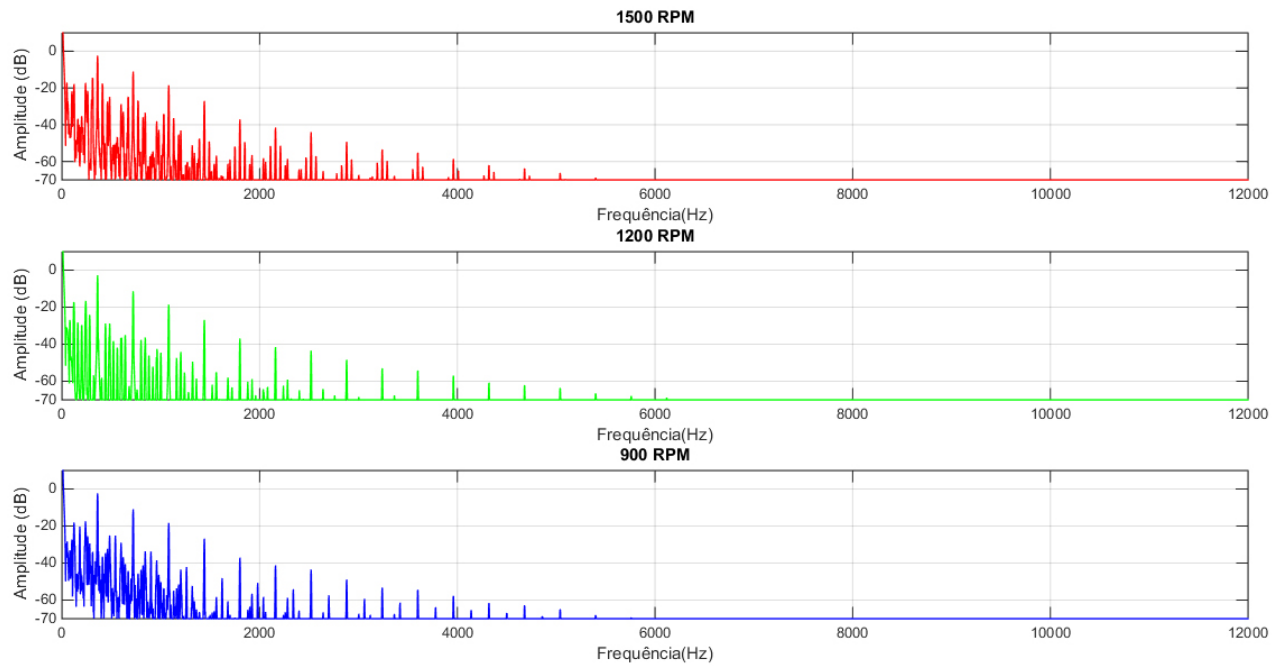


Figura 27 – FFT da tensão do lado retificador - Motor a vazio - Modulação SVPWM.

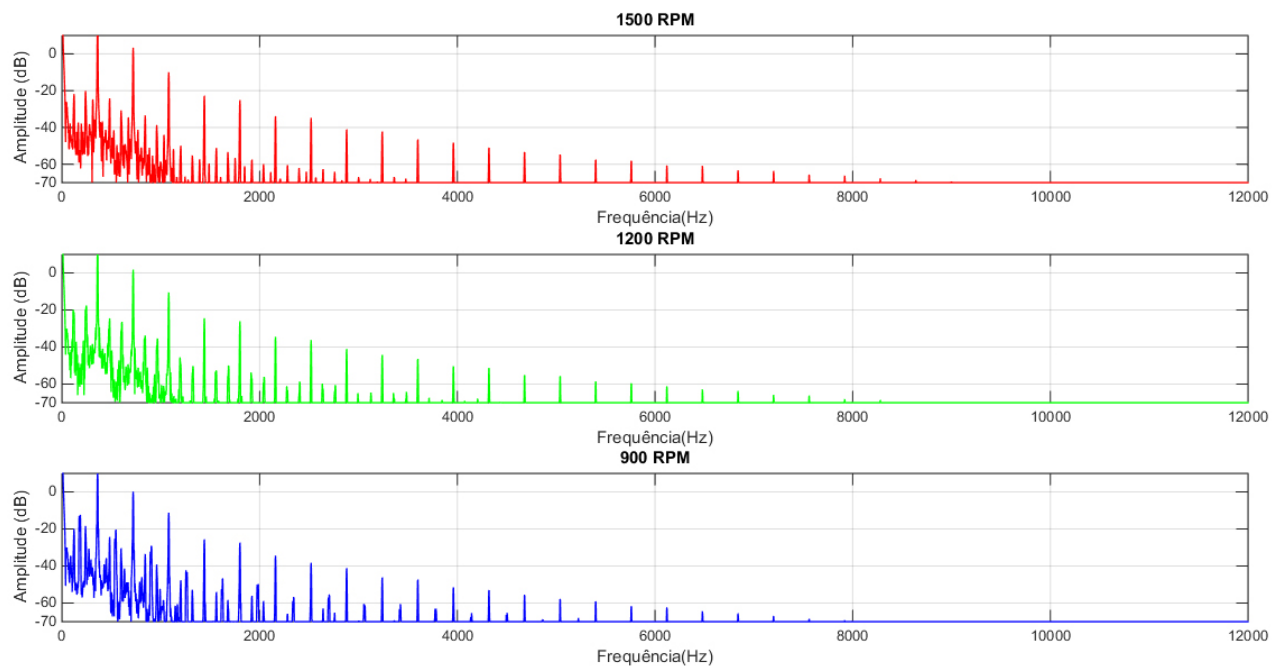


Figura 28 – FFT da tensão do lado retificador - Torque mecânico de 10 Nm aplicado ao eixo - Modulação SVPWM.

Este capítulo abordou a caracterização do barramento c.c. de inversores como meio para a transmissão de dados entre suas extremidades, quanto ao espectro de frequências

presente no mesmo em diversos pontos de operação. O próximo capítulo apresentará os resultados experimentais alcançados com o protótipo construído para avaliar a comunicação PLC como ferramenta para controle/leitura de inversores remotamente.

## 4 Resultados de Aplicação

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais alcançados com o sistema proposto. Inicialmente é feita uma descrição geral do protótipo, subdividindo seus componentes em sistema de potência, sistema de comunicação, sistema para melhoria da relação sinal/ruído e cabeamento do barramento.

Posteriormente, são apresentados os resultados experimentais, analisando-se o espectro de frequências do barramento c.c., a atenuação imposta ao sinal de comunicação pelo barramento e as velocidades máximas de comunicação que podem ser atingidas. Ao final do capítulo, o sistema de comunicação proposto é utilizado para efetivamente operar o sistema de acionamento do motor, em uma aplicação completa.

Todas as figuras referentes a formas de onda de tensão apresentadas neste capítulo foram registradas com um osciloscópio. Algumas foram incluídas aqui diretamente como apresentadas na tela do aparelho. Outras, para facilitar entendimento e possibilitar cálculos, como por exemplo de FFT, tiveram seus dados importados para o Matlab, através de arquivo binário disponibilizado pelo osciloscópio e posteriormente plotadas pelo próprio Matlab.

### 4.1 Descrição dos Componentes do Protótipo

Nesta seção são apresentados detalhes construtivos dos blocos que compõem o protótipo do sistema sob análise.

#### 4.1.1 Sistema de Potência

Um protótipo experimental com características semelhantes ao sistema modelado foi construído. Para os testes, foi utilizado um motor de 3.0 cv/220 V 60Hz, rotação nominal de 1735 RPM, fator de potência  $FP = 0.83$ , rendimento  $\eta = 0.85$  e corrente nominal  $I_n = 8.2$  A. O conversor de frequências utilizado é de fabricação WEG, modelo CFW-09, com corrente nominal igual a 28 A e tensão de alimentação 220/230 V entre fases. O mesmo foi configurado para receber comandos via porta serial RS-232, disponível no mesmo. Como fonte de alimentação utilizou-se a rede trifásica de energia 220/127 V - 60 Hz.

A figura 29 apresenta uma representação do conversor utilizado. A figura 29a) apresenta uma foto do equipamento, enquanto na figura 29b) é apresentado o diagrama em blocos do circuito de potência do mesmo.

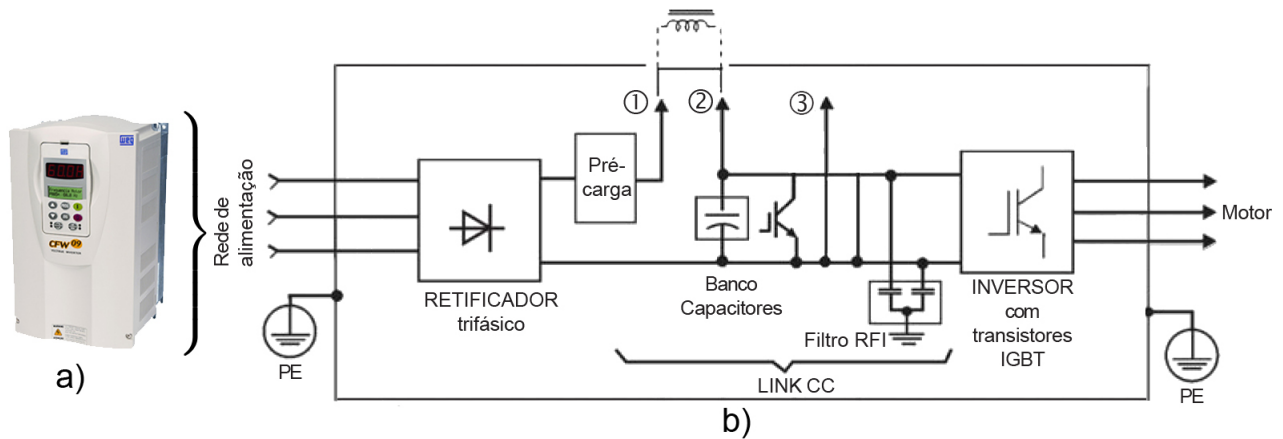


Figura 29 – Representação em blocos do inversor CFW-09.

Como visto na figura 29a) e b), o modelo CFW-09 é uma solução completa, contendo, no mesmo produto, os subsistemas retificador, barramento c.c e inversor. O banco de capacitores deste é composto por uma associação de capacitores em série e paralelo, totalizando uma capacitância de  $470\mu\text{F}/800\text{V}$ .

O sistema proposto neste trabalho necessita que o bloco retificador esteja separado do bloco inversor, possibilitando a transmissão de energia através do barramento c.c. longo. Desta forma, para utilizar o CFW-09, não se pode utilizar seu bloco retificador de entrada. Ao invés disso, a energia deve ser entregue ao mesmo já retificada, através de conexão direta ao seu barramento c.c interno. O mesmo já é construído com pontos de conexão próprios para esta finalidade, representados na figura 29-b) pelos pontos 2 e 3.

Para construção do retificador de entrada, é conveniente utilizar componentes semelhantes aos utilizados no CFW-09 ou mais robustos. Desta forma, foi utilizada a ponte retificadora comercial modelo “160MT80KB”, do fabricante *International Rectifier*, que possui corrente máxima de 160 A e tensão de bloqueio máxima de 1600 V, devido ao fato de ser o componente que tínhamos disponível e este ser inclusive mais robusto que aquela empregada no CFW-09. Como banco de capacitores do estágio retificador utilizou-se um banco igual ao já existente no CFW-09, retirado de outro inversor de mesmo modelo.

#### 4.1.2 Sistema de Comunicação

Nesse trabalho, utiliza-se comunicação ponto a ponto, necessitando portanto de dois modems, um localizado no lado retificador e outro no lado inversor. Os dois modems são aparelhos de igual constituição, tanto quanto a *hardware* como para *software*. Os modems utilizados devem ser equipamentos capazes de se comunicar com o inversor CFW-09 através de protocolo de comunicação já existente no inversor, denominado protocolo *WEG-Bus*. Também devem ser capazes de comunicarem entre si, utilizando o barramento

c.c. como meio físico. Para esta comunicação entre modems foi escolhido o protocolo G3. Outra característica importante para o modem é a capacidade de detecção de erros no recebimento de informações, e no caso destes, solicitar, para o modem que as transmitiu, o reenvio da informação.

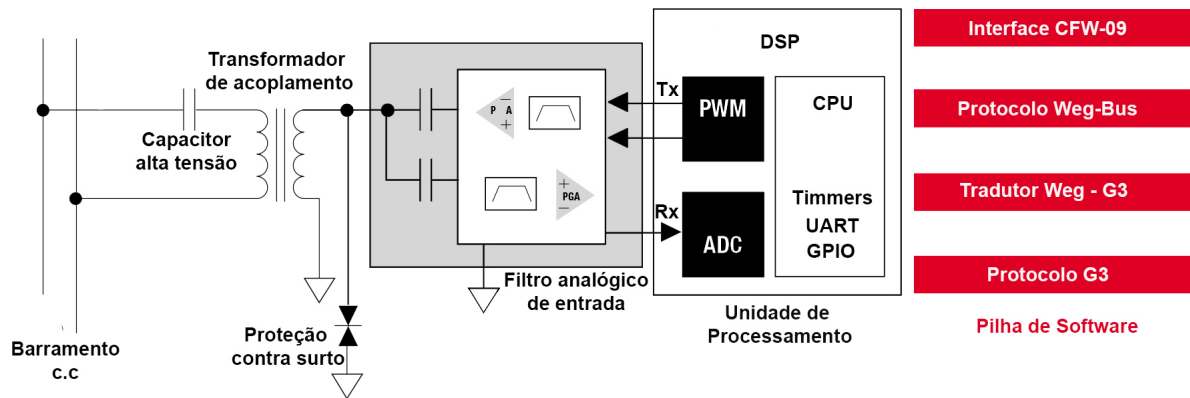


Figura 30 – Diagrama em blocos do modem PLC.

A figura 30 apresenta o diagrama em blocos do modem PLC. Em cor preta, tem-se os blocos referentes ao *hardware* e, em vermelho, aqueles associados ao *software*. Em termos de *hardware*, o modem é composto basicamente por três estágios, denominados estágios de acoplamento, filtro analógico de entrada e unidade de processamento.

O estágio de acoplamento é composto pelo capacitor de alta tensão, transformador de acoplamento e proteção contra surtos. A função deste bloco é bloquear a alta tensão c.c. presente no barramento, permitindo a interação entre os sistemas de potência e de comunicação. Também fornece proteção primária ao sistema de comunicação contra eventuais danos que possam ser ocasionados por surtos indesejados no barramento.

O segundo estágio, constituído pelo filtro analógico de entrada, é composto basicamente por filtros RLC sintonizados na frequência de comunicação do modem, permitindo, dessa forma, a passagem apenas de sinais de frequências contidas dentro das bandas CENELEC A e B. Possui também estágios amplificadores, de forma a compatibilizar os baixos níveis de corrente possíveis de serem fornecidos/recebidos pelo DSP do estágio de processamento aos níveis mais elevados necessários para transmitir/receber os sinais de comunicação pelo barramento. Este estágio pode ser subdividido em dois ramos, um para a transmissão (TX) e outro para o recebimento (RX).

Outra característica importante do estágio de filtro analógico de entrada advém do fato de que, para que a informação possa ser transmitida pelo barramento, esta deve ser modulada em portadoras senoidais. Porém, o DSP da unidade de processamento somente é capaz de produzir ondas quadradas, com amplitude variando de forma binária entre 0 V e a tensão de alimentação do DSP, tipicamente em até 5 V. Dessa forma, o estágio de

filtro é responsável, no ramo de transmissão, por filtrar as ondas binárias geradas pelo DSP, transmitindo apenas ondas com formato senoidal e frequência relativa à fundamental do trem de pulsos enviado. No ramo de recepção, o estágio de filtro é responsável por adequar a amplitude do sinal recebido a níveis aceitáveis pelo DSP. Em ambos os ramos, de transmissão e recepção, devem existir amplificadores de ganho ajustável, para possibilitar ao modem funcionar em meios de comunicação com variados níveis de atenuação.

O terceiro estágio, representado pela unidade de processamento, é o que possui a “inteligência” do sistema. É composto basicamente por um processador digital de sinais “DSP”. Os DSPs comercializados atualmente possuem, internamente, uma ampla gama de periféricos, dependendo do modelo e fabricante. Para esta aplicação são necessários periféricos do tipo *Timer*, para temporização, UART para comunicação serial, geradores de PWM para a geração dos sinais de transmissão e conversor analógico digital ADC para a demodulação dos sinais recebidos. A existência de pinos de entrada e saída de uso geral GPIO é desejável para possibilitar, por exemplo, a sinalização por LED de eventos registrados pelo modem, como entrada em funcionamento, comunicação bem sucedida ou eventuais erros.

Outros blocos fundamentais para o funcionamento do sistema, como interfaces de programação e fontes de alimentação, não foram representados na figura 30, pois seu uso é difundido e de amplo conhecimento no meio técnico. É importante salientar, quanto à fonte de alimentação, que esta deve ser tal que possa ser alimentada diretamente pelo barramento c.c, sobretudo para o modem que se encontra junto ao lado inversor.

Quanto ao *software* do modem, este deve ser capaz de trocar informações com o *software* de aplicação (lado do usuário) ou com o conversor de frequência (lado remoto). Na figura 30, este bloco de *software* está representado como “Interface CFW-09”. O protocolo para esta troca de informações já foi definido pelo fabricante do conversor, sendo denominado protocolo Weg-Bus. Definiu-se, neste trabalho, esta comunicação como “Comunicação de alto nível”. Este nome é devido a esta ser a comunicação alvo. O sistema tem como finalidade, em última instância, permitir a comunicação entre o *software* de aplicação e o conversor de frequências. Foi definida como “Comunicação em baixo nível” a comunicação entre os dois modems, por meio do barramento c.c. Para esta etapa escolheu-se o protocolo G3. Desta forma, torna-se necessário um bloco de *software* que faça a tradução entre os protocolos Weg-Bus e G3. Este bloco pode ser entendido como um intérprete, que permite que a comunicação em alto nível ocorra através do envio de mensagens por meio da comunicação em baixo nível, que é a que efetivamente possui acesso ao meio físico (neste caso, o barramento c.c.).

Atualmente, vários fabricantes de componentes eletrônicos (*e.g.* Texas Instruments, Maxim, Ariane), visando alavancar a tecnologia PLC e promover seus produtos, disponibilizam *kits* de desenvolvimento compostos por *hardware* e/ou *software* pré desenvolvidos.

Tais *kits* são comercializados normalmente sob licença aberta, o que significa que seus diagramas esquemáticos e códigos fonte são disponibilizados a quem os adquira. Uma das principais vantagens de criar um sistema com base em *kits* existentes é a redução do tempo de desenvolvimento, possibilitando que o esforço seja concentrado na evolução da tecnologia, não necessitando o emprego de tempo com o desenvolvimento de componentes de *hardware/software* que já são de amplo conhecimento no meio técnico/acadêmico e que já possuem seu funcionamento validado/consolidado.

Com base nas especificações descritas acima e de forma a acelerar o processo de desenvolvimento, foram considerados vários *kits* de desenvolvimento PLC existentes, e, dentre as soluções encontradas, optou-se pela versão desenvolvida pela Texas Instruments, por apresentar boa relação custo/benefício e baixos prazos para aquisição/entrega. Tal solução é composta por dois modems PLC completos, possuindo todos os estágios de *hardware* apresentados na figura 30. Tal *kit* denomina-se TMSDSPLCKIT-V3, e sua foto pode ser vista na figura 31.



Figura 31 – Foto do modem TMSDSPLCKIT-V3.

Junto com o kit, o fabricante disponibiliza uma *Application Programming Interface* (API) do protocolo G3. Uma API pode ser entendida como um conjunto de especificações que descrevem a forma de se interagir com um *software*, a nível de programação, sem que seja necessário conhecer detalhes da implementação deste. Através da API é possível fazer com que dois *softwares* interajam, de forma que informações/comandos possam ser trocados entre si. O intercâmbio de informações/comandos entre dois *softwares*, a partir deste ponto, será denominado “chamada”. A etapa seguinte, em nível de *software*, é desenvolver uma aplicação de mais alto nível, que se utilize da API existente e torne o modem aplicável às particularidades do sistema sob estudo.

Por se tratar de um estudo acadêmico, e de forma a se manter a modularidade do sistema, optou-se por realizar a interface do modem com os sistemas solicitantes

da comunicação (*i.e.*, *software* do usuário e inversor CFW-09) por um outro *hardware* microprocessado, ficando este responsável por interagir com os sistemas solicitantes e fazer chamadas à API presente no modem, para que este, então, transmita as informações pelo barramento, conforme necessário. Este *hardware* será aqui denominado de “circuito de interface”, justamente pelo fato do mesmo ser responsável por fazer a interface entre os protocolos Weg-Bus e G3. Este circuito é então responsável pelas três camadas superiores da pilha de *software* apresentada na figura 30. Outras responsabilidades do circuito de interface incluem a configuração inicial do modem, após energização, e solicitação de retransmissão, no caso de eventuais erros de transmissão. Por configuração inicial entende-se a configuração do tipo de modulação, banda de frequência para comunicação, número e posição das portadoras a serem utilizadas.

O protocolo de comunicação configurado para comunicação serial pelo conversor CFW-09, Weg-Bus, utiliza controle de fluxo do tipo “Mestre-escravo”, o que significa que o conversor (escravo) só responde caso o mestre (*software* do usuário) solicite alguma informação. Para a comunicação com o inversor foi utilizada porta RS-232, sendo que a mesma foi configurada para comunicação em 9600 bps, 7 bits de dados e paridade ímpar. Da forma como foi implementado o sistema, as chamadas à API do modem serão feitas via porta serial RS-232 presente no mesmo. Esta porta foi configurada para comunicar em 57600 bps, 8 bits de dados e sem bit de paridade.

O circuito de interface foi desenvolvido baseado na plataforma Arduíno, mais especificamente no *kit* “Arduíno Mega”, novamente procurando utilizar as soluções já existentes no mercado em busca de agilidade de desenvolvimento, possibilitando assim maior concentração de esforços nas especificidades do sistema sob estudo. Tal *kit* se apresenta como uma boa opção por possuir um microcontrolador com quatro portas seriais, ao contrário da maioria dos microcontroladores de baixo custo existentes, que normalmente possuem no máximo uma porta serial. Como descrito acima, o circuito de interface necessita de pelo menos 2 portas seriais, cada qual com diferentes configurações de transmissão/recepção.

### 4.1.3 Melhoria da Relação Sinal/Ruído

Devido às características do barramento c.c. (*e.g.*, comprimento do cabo, capacitâncias parasitas, impedância série), o sinal de comunicação aplicado em uma das extremidades é captado com alguma atenuação na outra extremidade do barramento. Uma das formas de quantificar esta atenuação é através de uma grandeza que correlacione a amplitude do sinal aplicado em relação a amplitude do ruído presente no meio. Esta relação é comumente denominada de “relação sinal-ruído”, SNR - *Signal to Noise Ratio*.

De forma a melhorar a SNR do sinal captado pelos modems de comunicação PLC, foi introduzida uma pequena indutância no início e final do cabo do barramento c.c., de

forma que a tensão captada pelos modems é em sua maior parte a tensão sobre essas indutâncias. Na figura 32 é possível visualizar uma foto da referida indutância.



Figura 32 – Foto da indutância inserida no barramento c.c.

É importante salientar que, devido à comunicação poder ser bidirecional (*i.e.*, o usuário pode enviar comandos para o conversor, bem como solicitar informações), é necessária a inserção desta indutância tanto do lado retificador, quanto no lado inversor.

O valor de indutância adequado foi determinado empiricamente. Após vários testes, verificou-se que, para um cabo com comprimento de 100 m, uma indutância de 0.25 mH em ambas as extremidades do barramento possibilita que praticamente todo o sinal enviado seja captado na extremidade oposta. Na prática, esta indutância foi construída utilizando um cabo de mesma seção do utilizado para o barramento, através de 15 espiras deste em torno de um núcleo toroidal de ferrite, como visto na figura 32.

De posse do valor de indutância, é possível calcular o seu impacto tanto para o sistema de potência, quanto para o sistema de comunicação. Para o acionamento do motor (*i.e.*, sistema de potência), as frequências de interesse são baixas, da ordem de 360 Hz. Calculando a impedância nesta faixa de frequência chega-se a:

$$\begin{aligned} Z &= \omega \times L \\ Z &= 2\pi \times 360 \times 0.25mH \\ Z &= 0.0564\Omega \end{aligned} \tag{4.1}$$

Para o sistema de comunicação, as frequências de interesse são de ordem mais elevada. Adotando a banda CENELEC B, destinada a aplicações do usuário, e protocolo de comunicação G3, a faixa de frequências sob interesse vai de 98.4375 kHz até 121.875 kHz. Calculando a impedância representada pela indutância inserida, nesta faixa de frequências, chega-se a:

$$Z_{min} = 154.6 \Omega \quad , \quad Z_{max} = 191.4 \Omega \quad (4.2)$$

Como pode ser percebido facilmente através de (4.1) e (4.2), a inserção destas indutâncias no barramento c.c. não representa impacto significativo ao sistema de potência. Já para o sistema de comunicação, os valores de impedância apresentados possibilitam que praticamente todo o sinal emitido por um modem seja captado pelo modem na extremidade oposta do cabo, com um mínimo de corrente injetada pelo modem no barramento.

#### 4.1.4 Cabeamento do Barramento c.c.

O cabo utilizado para construir o barramento c.c. deve ser tal que permita o correto e seguro acionamento do motor. Levando em conta as características nominais do conversor utilizado, o cabo para o barramento c.c. deveria ter seção mínima igual a  $6.0 \text{ mm}^2$ , segundo o critério de condução de corrente, estipulado pela norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão NBR-5410. Para o motor utilizado, descrito na seção 4.1.1, verifica-se, a partir da norma NBR-5410, que o cabo de  $2.5 \text{ mm}^2$  de seção transversal e isolamento em PVC é suficiente. Segundo esta norma, o referido cabo possui, dependendo do ambiente onde instalado, corrente máxima de operação igual a 29 A. Com estes valores é possível calcular que o cabo de  $2.5 \text{ mm}^2$  pode ser utilizado, nessa aplicação, com motores típicos ( $FP=0.8$ ,  $\eta = 0.85$ ) de potência até 9 cv, aproximadamente.

O sistema proposto foi testado em barramentos c.c. medindo 15, 100 e 500 metros. Para os dois primeiros comprimentos foi utilizado cabo flexível paralelo, seção nominal  $2.5 \text{ mm}^2$  e isolamento em PVC. Para o último, utilizou-se cabo flexível unipolar, seção nominal  $6.0 \text{ mm}^2$  e isolamento em PVC.

## 4.2 Resultados Experimentais

A figura 33 apresenta uma foto do protótipo construído, na qual podem ser visualizados o conversor, com o circuito de interface posicionado em sua lateral, o modem PLC ao meio da figura e, na parte mais inferior, o motor acionado. Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais obtidos com este protótipo. Será analisado o espectro de frequência da tensão no barramento c.c. para os três comprimentos de cabo descritos na seção 4.1.4, com e sem a presença do sinal de comunicação. Será também avaliada a comunicação PLC, quanto à velocidade de comunicação e rejeição a erros de comunicação. Ao final, o desempenho do sistema proposto será verificado em uma aplicação real de comando e leitura de dados do inversor.

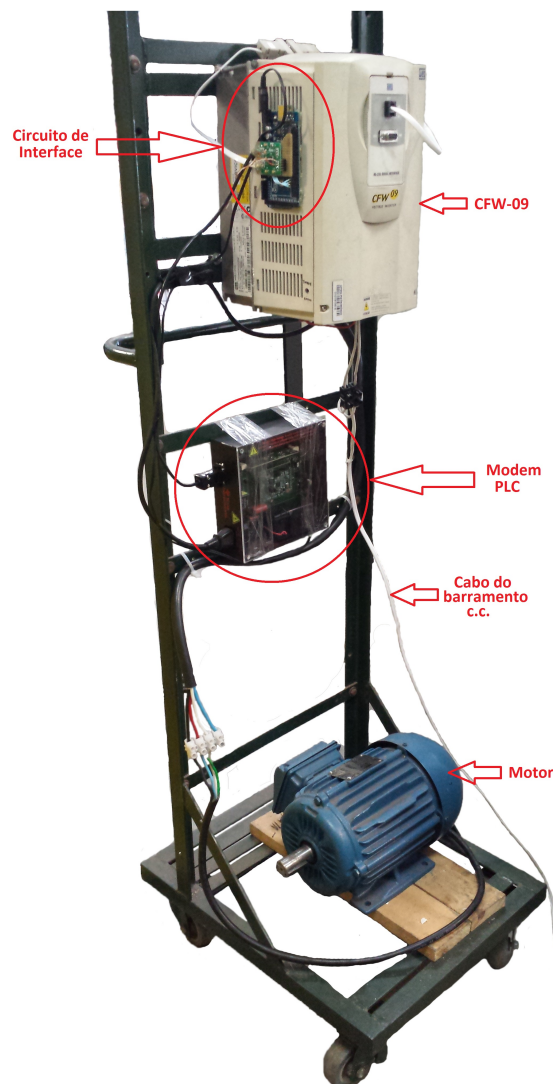


Figura 33 – Foto do protótipo construído - Lado inversor.

#### 4.2.1 Espectro de Frequências do Barramento c.c.

Com o protótipo construído, torna-se possível avaliar de forma experimental o sistema como um todo. Inicialmente, verificou-se o espectro de frequências presente no barramento c.c. apenas devido ao acionamento do motor, sem a presença do sinal de comunicação. Para tal, comandou-se o inversor para acionar o motor, em vazio, a uma rotação de 1700 RPM. São apresentados os resultados para o barramento com cabo de 15, 100 e 500 metros.

##### 4.2.1.1 Cabo de 15 metros

A figura 34 apresenta a forma de onda da tensão no barramento c.c. com o motor em regime permanente. Nesta figura é possível ver, na parte superior, a forma de onda da tensão presente no lado retificador, e na parte inferior, a forma da tensão no lado inversor. Como pode ser visto nesta figura, do lado retificador a tensão possui ruído de

maior amplitude que do lado inversor.

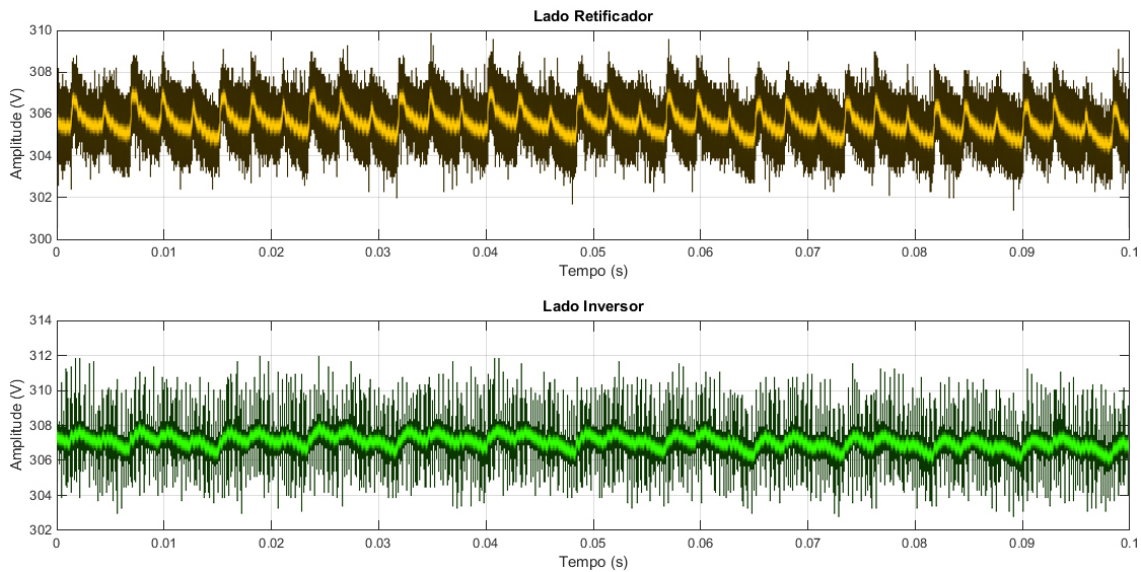


Figura 34 – Tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 15 m.

Na figura 35 é apresentado o espectro de frequências no barramento c.c., calculado através dos dados apresentados na figura 34. Nesta figura é possível verificar que, a partir de 10 kHz, a amplitude do espectro cai para abaixo de -60 dB. A exceção encontra-se na frequência de 59.62 Hz, na qual é observada uma componente com amplitude acima de -40 dB. Esta componente explica-se como sendo a frequência de chaveamento da fonte interna de alimentação para os circuitos eletrônicos do inversor.

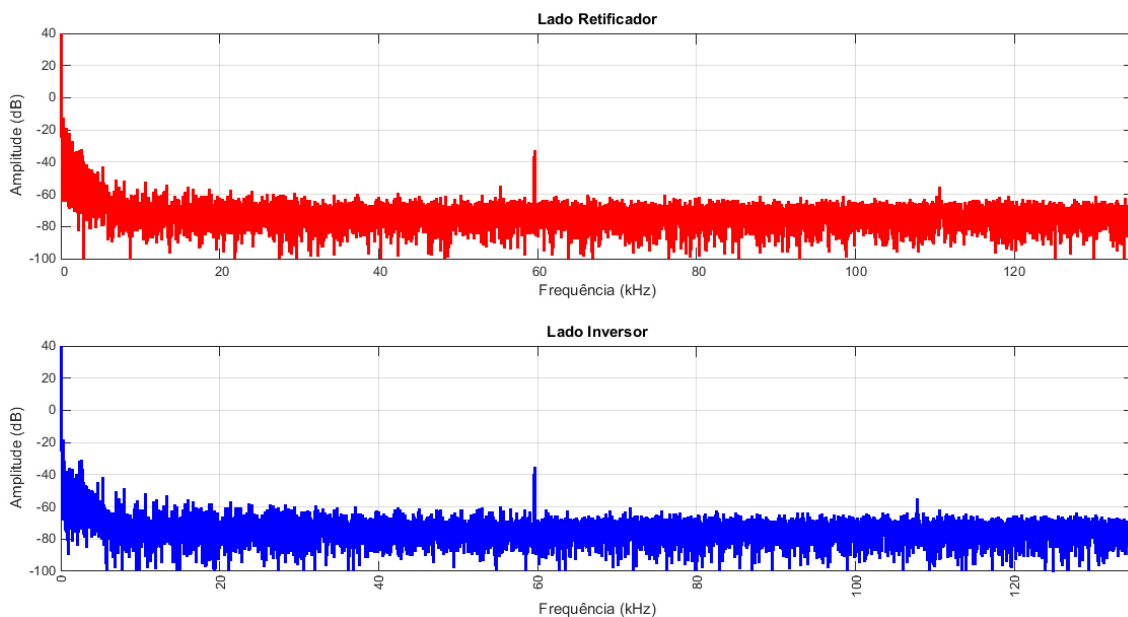


Figura 35 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 15 m.

Para facilitar a compreensão do espectro, a figura 36 possibilita uma melhor visualização da faixa compreendida entre 0 e 10 kHz. Nesta figura fica fácil perceber que

praticamente toda a energia está concentrada na tensão contínua, como era o esperado. Para componentes alternadas, a maior parte do espectro está concentrada na frequência de 360 Hz e suas harmônicas. Existe ainda uma componente localizada na frequência de 120 Hz, devido à existência de componentes de sequência negativa. Todas essas componentes são referentes ao processo de retificação da tensão alternada. Existem ainda componentes em torno de 5 kHz ( $\pm 360$  Hz), que são relativas ao processo de chaveamento do inversor, em 5 kHz.

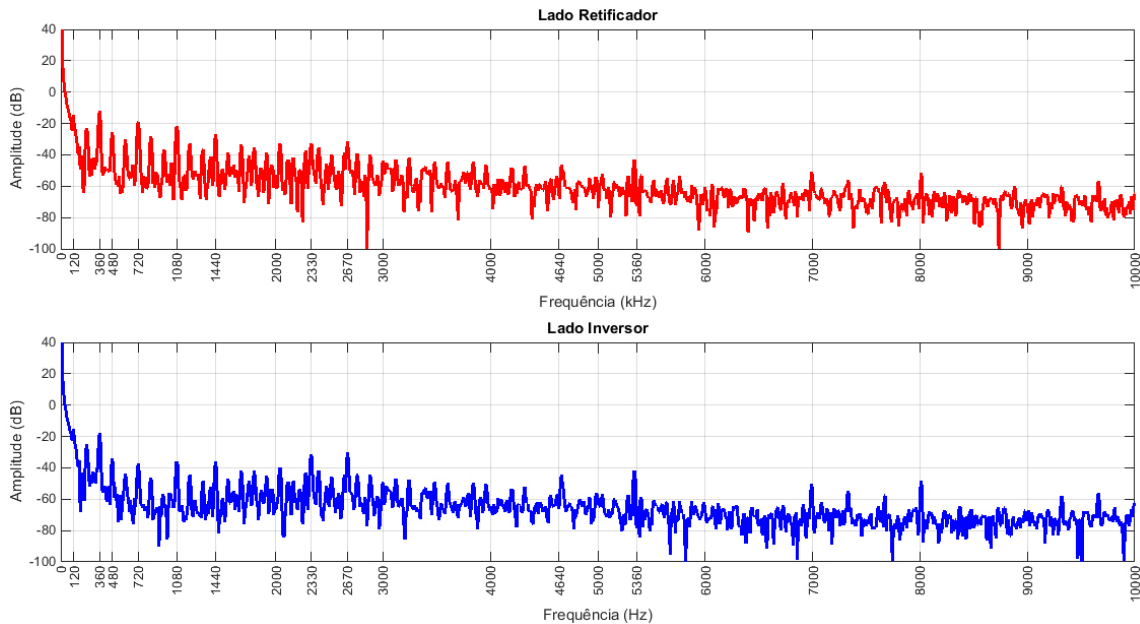


Figura 36 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 15 m - 0 a 10kHz.

#### 4.2.1.2 Cabo de 100 metros

A figura 37 apresenta a tensão no barramento para o cabo com comprimento igual a 100 m. Através da comparação com a figura 34, percebeu-se que o aumento do comprimento do barramento c.c. leva a um aumento do *ripple*. Analisando para o lado retificador, por exemplo, percebemos que o ripple de tensão aumentou de 2 volts para cerca de 5 volts, aproximadamente.

As figuras 38 e 39 apresentam o espectro de frequências no barramento para o cabo de 100 metros, sendo a figura 39 correspondente à faixa entre 0 e 10 kHz. Como pode ser facilmente percebido pela análise destas figuras, e em comparação com as figuras 35 e 36, o aumento do comprimento do cabo de 15 para 100 metros não alterou significativamente o espectro de frequências no barramento, tanto para o lado retificador quanto para o lado inversor. É importante notar também que, para ambos os cabos, na faixa de frequências escolhida para a comunicação PLC, CENELEC B, o ruído presente no barramento c.c. está abaixo de -60 dB.

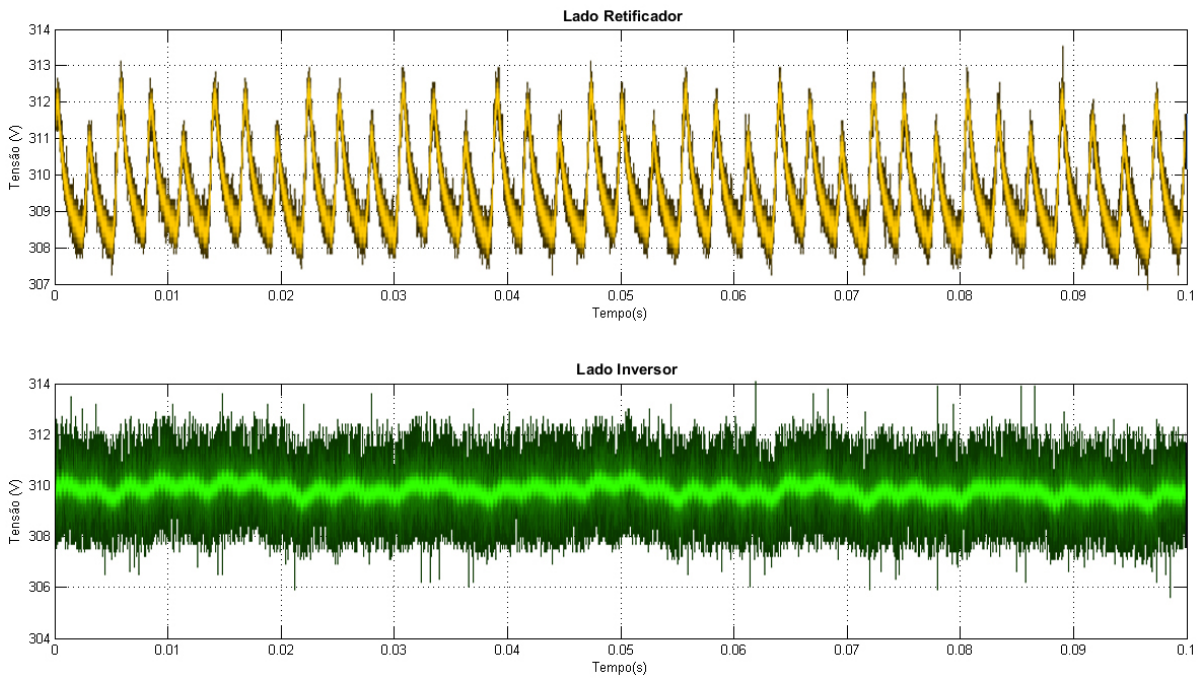


Figura 37 – Tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 100 m.

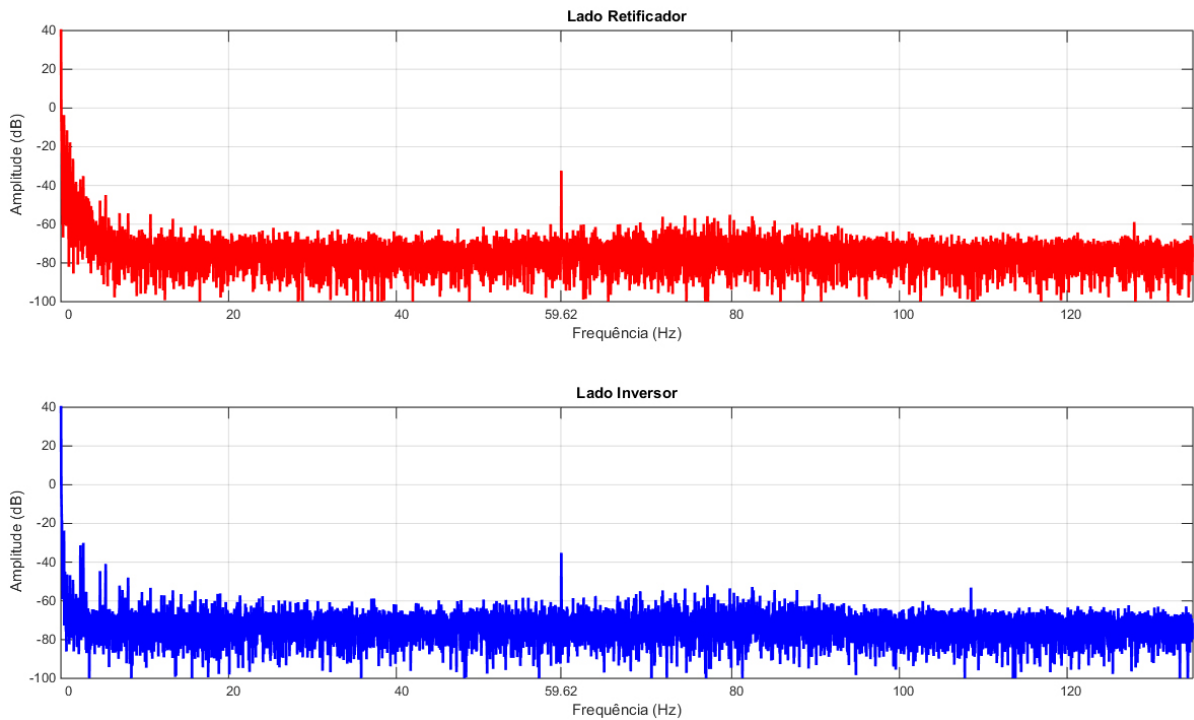


Figura 38 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 100 m.

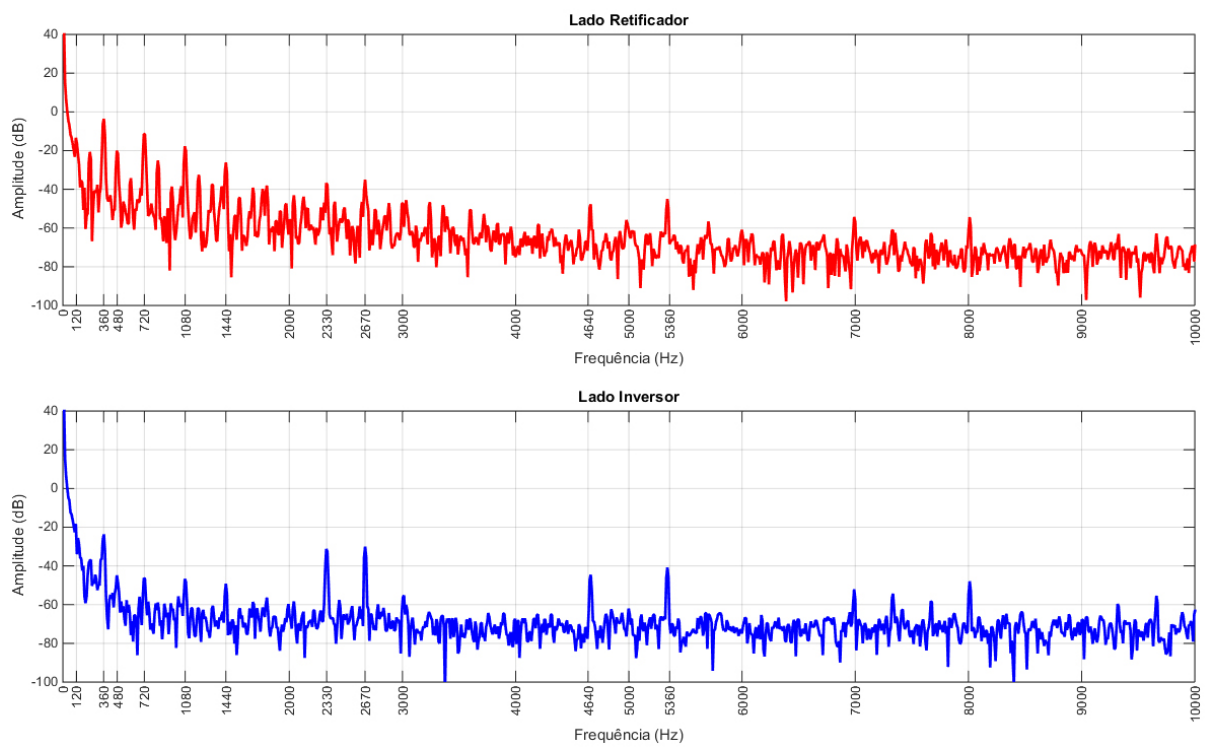


Figura 39 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 100 m - 0 a 10 kHz.

### 4.2.1.3 Cabo de 500 metros

Para o barramento com cabo de 500 metros realizou-se as mesmas análises feitas para os cabos de 15 e 100 metros. Na figura 40 é possível visualizar a forma de onda da tensão presente no barramento c.c., nos lados retificador e inversor.

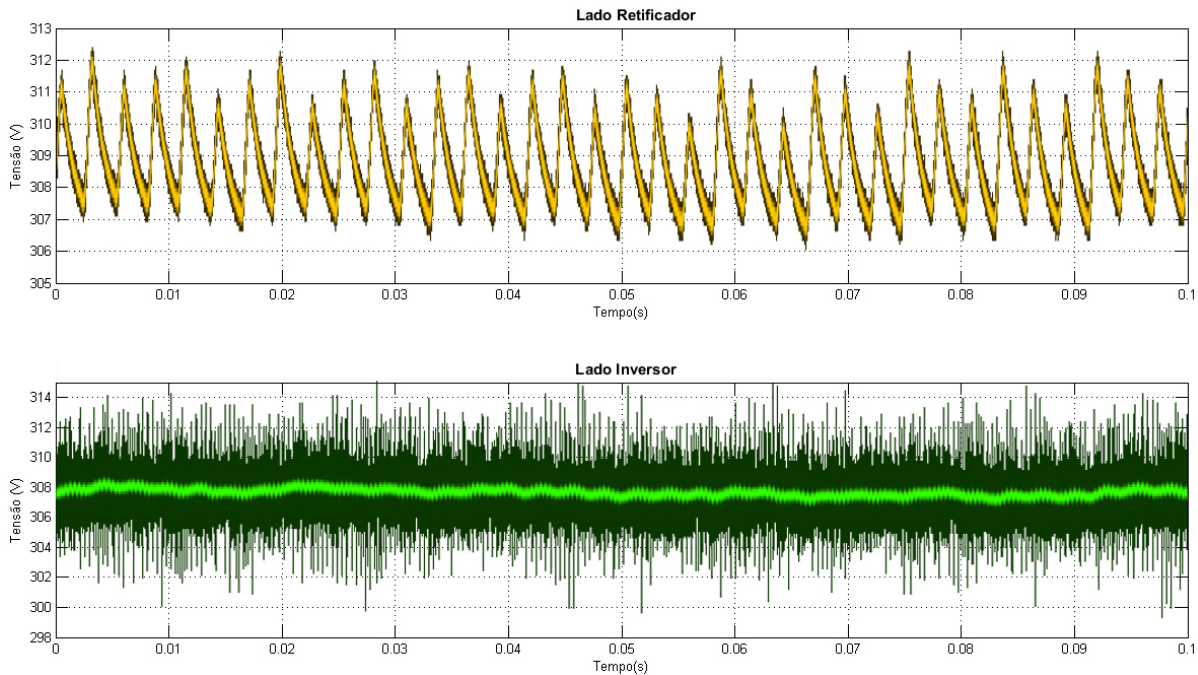


Figura 40 – Tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 500 m.

Através da comparação das figuras 37 e 40, verifica-se que não houve variação significativa quanto à amplitude do *ripple* de tensão de baixa frequência presente no barramento c.c., em ambas as extremidades, relativo ao aumento do comprimento do cabo de 100 para 500 metros.

As figuras 41 e 42 apresentam o espectro de frequências no barramento c.c. para o cabo de 500 metros de comprimento. Novamente, a primeira apresenta o espectro entre 0 e 130 kHz, enquanto a segunda é relativa à faixa compreendida entre 0 e 10 kHz.

Pela análise da figura 41, percebe-se que com o cabo de 500 metros e do lado retificador, ocorreu um aumento da amplitude do ruído presente na tensão do barramento, para a faixa entre 88 kHz e 128 kHz, quando comparado com os cabos de 15 e 100 metros. Estima-se que tal ruído seja devido à interação entre o barramento e a corrente drenada pela fonte de alimentação dos circuitos eletrônicos do inversor. De forma a avaliar esta hipótese, a figura 43 apresenta o espectro de frequências presente no barramento c.c. quando o inversor não está aplicando nenhuma tensão ao motor, ou seja, a única corrente circulando pelo cabo é a necessária para a alimentação dos circuitos eletrônicos do inversor.

Como visto na figura 41, o espectro de frequências para o motor parado (*i.e.*, sem

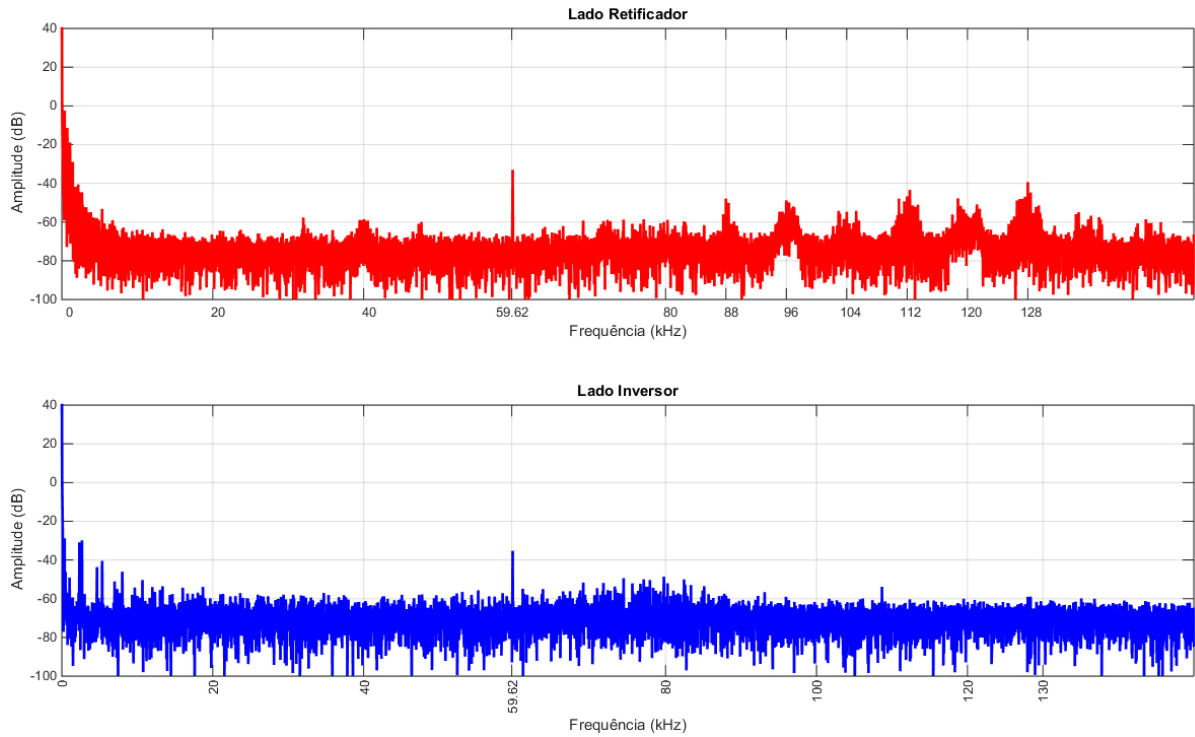


Figura 41 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 500 m.

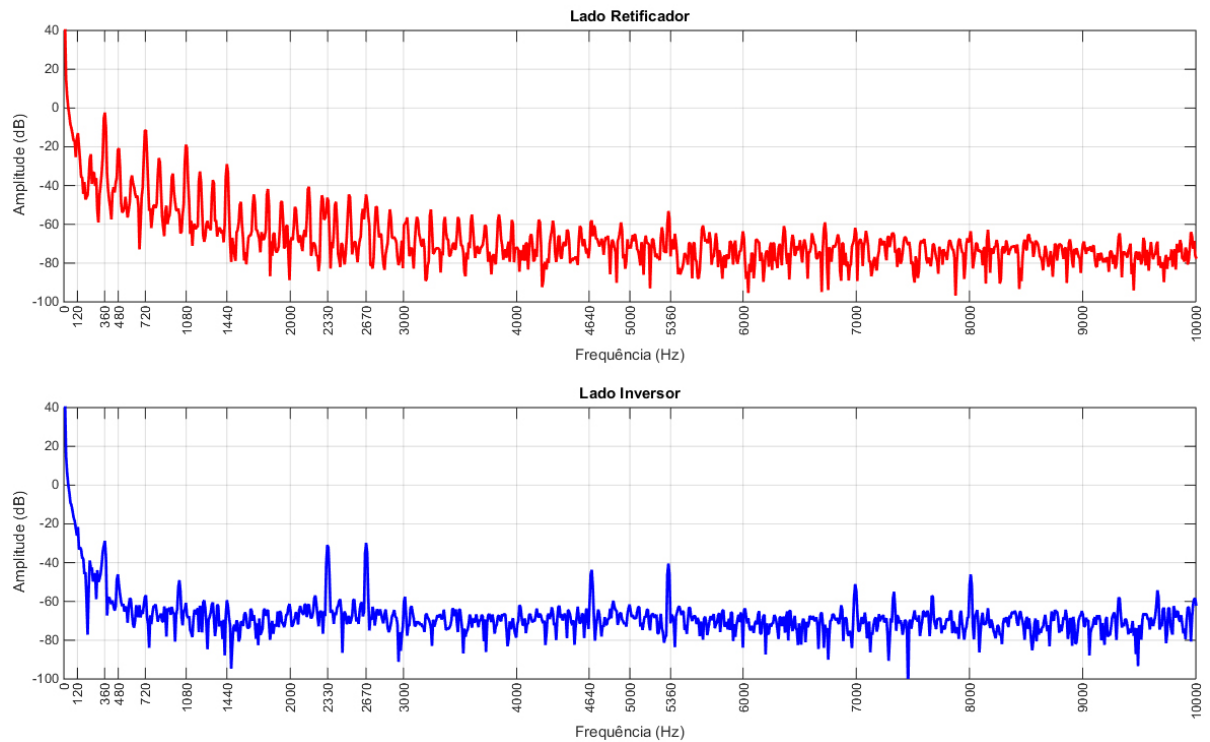


Figura 42 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 500 m - 0 a 10 kHz.

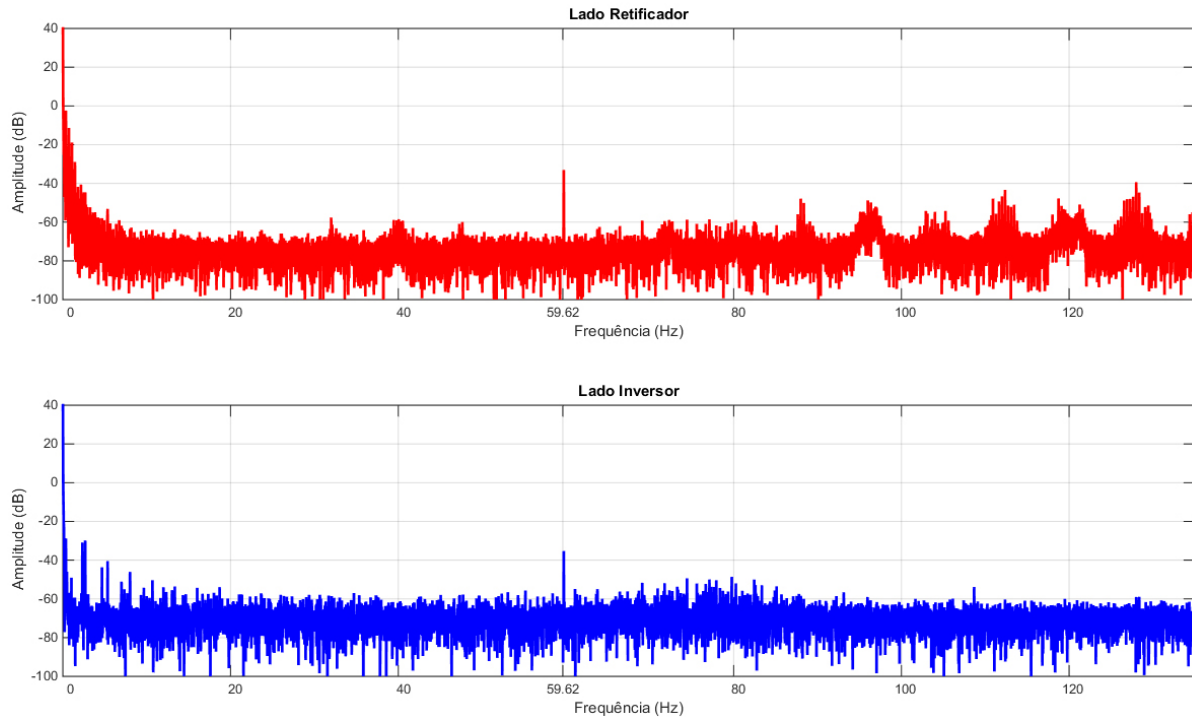


Figura 43 – FFT da tensão no barramento c.c - Motor a vazio, 0 RPM e cabo de 500 m.

tensão de alimentação) é essencialmente aquele visualizado na figura 41, para o motor acionado a 1700 RPM. Desta forma, percebe-se que o ruído existente na faixa entre 88 e 128 kHz, do lado retificador, não é devido ao chaveamento da tensão para acionamento do motor.

#### 4.2.2 Atenuação do Sinal de Comunicação

Uma vez verificado o comportamento do espectro de frequências no barramento c.c. durante o acionamento do motor para diversos comprimentos de cabo, torna-se necessário verificar a atenuação imposta pelo barramento ao sinal de comunicação injetado pelo modem PLC. Para realizar esta avaliação, o modem do lado inversor foi configurado para enviar uma sequência de 15 bytes aleatórios para o modem do lado retificador, com um intervalo de 100 ms entre envios. As análises foram feitas em momentos distintos, utilizando para o barramento c.c. cabos com comprimentos de 15, 100 e 500 metros.

##### 4.2.2.1 Cabo de 15 metros

Nesta seção são apresentados os resultados relativos ao cabo de 15 metros de comprimento. A figura 44 apresenta as formas de onda de tensão dos lados retificador e inversor, durante o envio do sinal de comunicação.

De forma a facilitar a visualização do sinal de comunicação sobreposto à tensão contínua do barramento, aplicou-se um *zoom* horizontal na área indicada em vermelho na

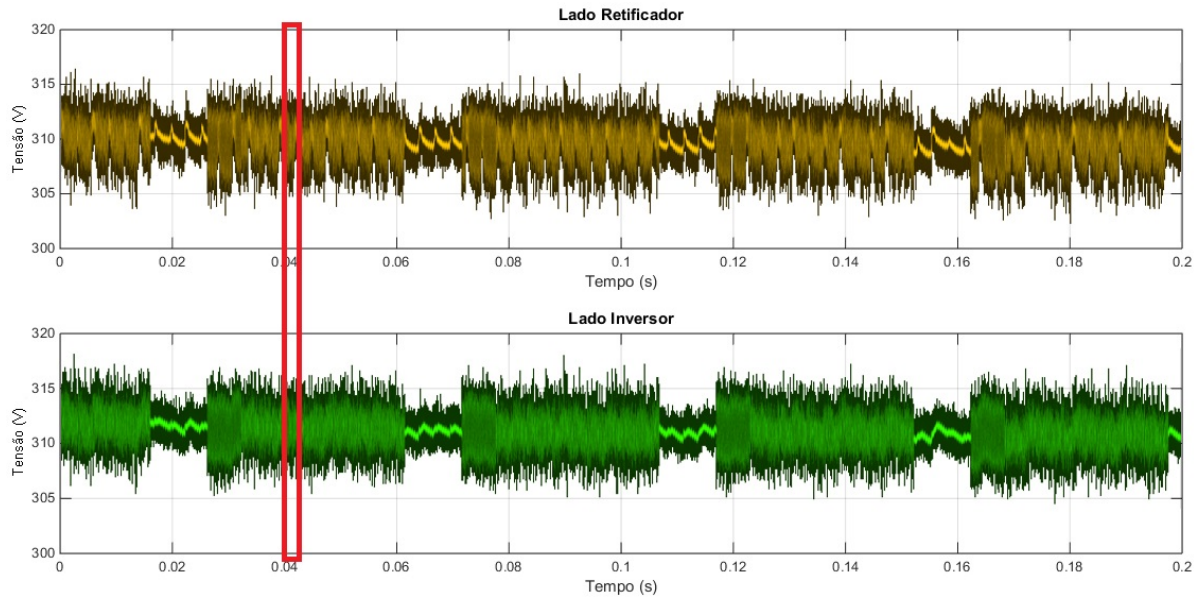


Figura 44 – Tensão nas extremidades do barramento c.c com adição do sinal de comunicação PLC - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 15 m.

figura 44, sendo que a forma de onda resultante pode então ser vista na figura 45.

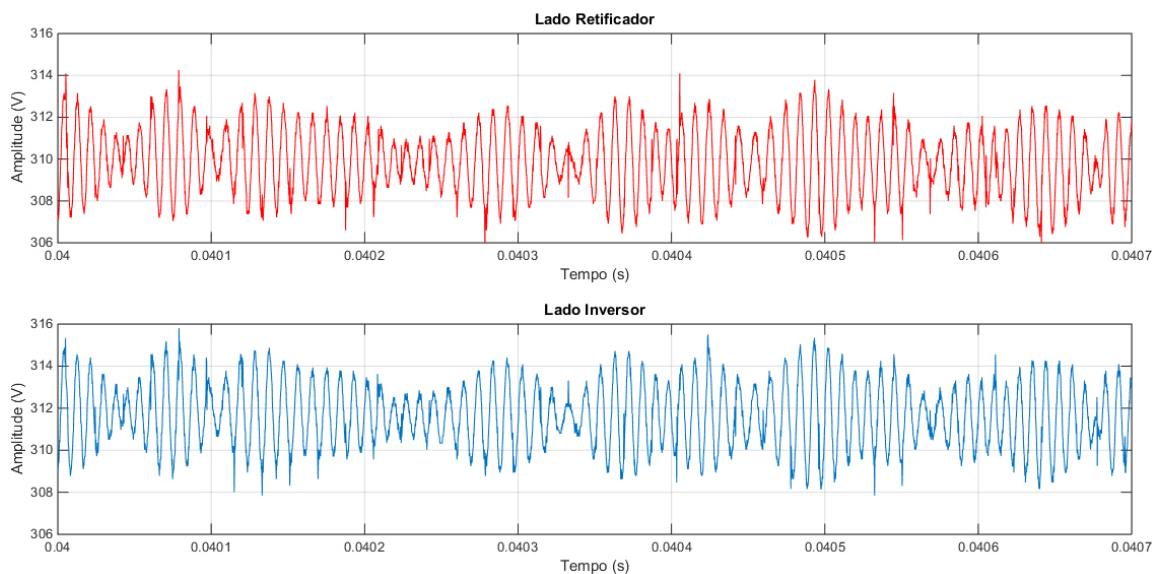


Figura 45 – Detalhe do sinal de comunicação adicionado a tensão do barramento c.c. - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 15 m.

Na figura 45 é fácil perceber o sinal de comunicação modulando a tensão contínua do barramento c.c., tanto do lado retificador quanto do lado inversor.

Analisando ponto a ponto a figura 45, para as formas de onda referentes aos lados retificador e inversor, verifica-se que a amplitude do sinal, em ambas as extremidades do barramento, possui amplitudes semelhantes, embora o nível médio da tensão seja maior do lado inversor do que do lado retificador, em aproximadamente 2 volts. Outra característica

importante de ser observada é que, na faixa de frequências utilizada para comunicação, o cabo praticamente não impõe atraso relevante para a transmissão de dados, estando então os sinais emitidos e recebidos praticamente em fase em ambas as extremidades.

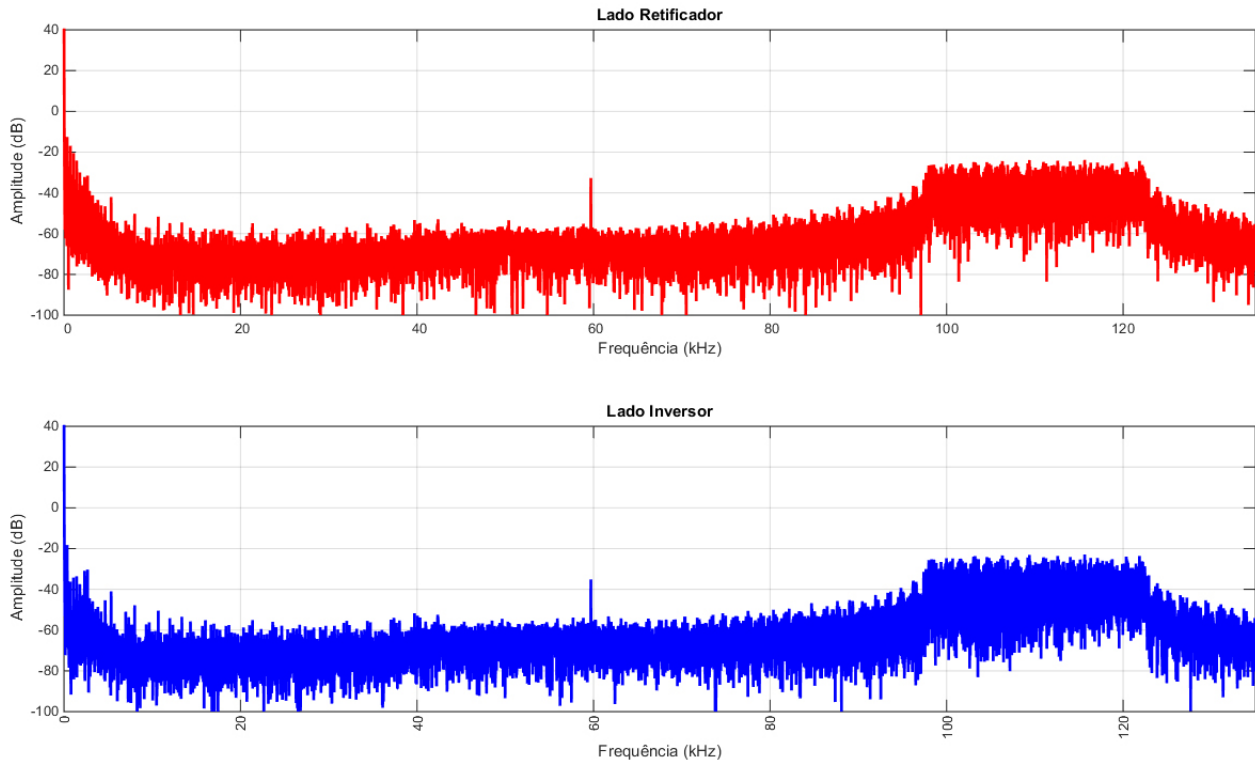


Figura 46 – FFT da tensão no barramento c.c com sinal de comunicação - Cabo de 15 m.

A figura 46 apresenta o espectro de frequências das formas de onda apresentadas na figura 44. Conforme pode ser facilmente percebido, a relação sinal/ruído, para o sinal de comunicação, em ambas as extremidades do barramento, é superior a 20 dB, o que é suficiente para que a comunicação possa ocorrer sem grandes problemas.

#### 4.2.2.2 Cabo de 100 metros

Nesta seção são apresentados os resultados relativos ao cabo de 100 metros de comprimento. Para o cabo de 100 m, realizou-se as mesmas análises feitas para o cabo de 15 m. Seguindo o mesmo procedimento de testes descrito na seção anterior, as figuras 47 e 48 apresentam a forma de onda da tensão no barramento c.c. e um *zoom* buscando mostrar o sinal de comunicação sobreposto à tensão contínua, respectivamente.

Com base na forma de onda apresentada na figura 47, é possível calcular o espectro de frequências presente em ambas as extremidades do cabo de 100 metros. Os resultados podem ser visualizados na figura 49.

Também para o cabo de 100 metros verifica-se que a amplitude do sinal em ambas as extremidades do barramento não possui diferenças significativas. Novamente não foi

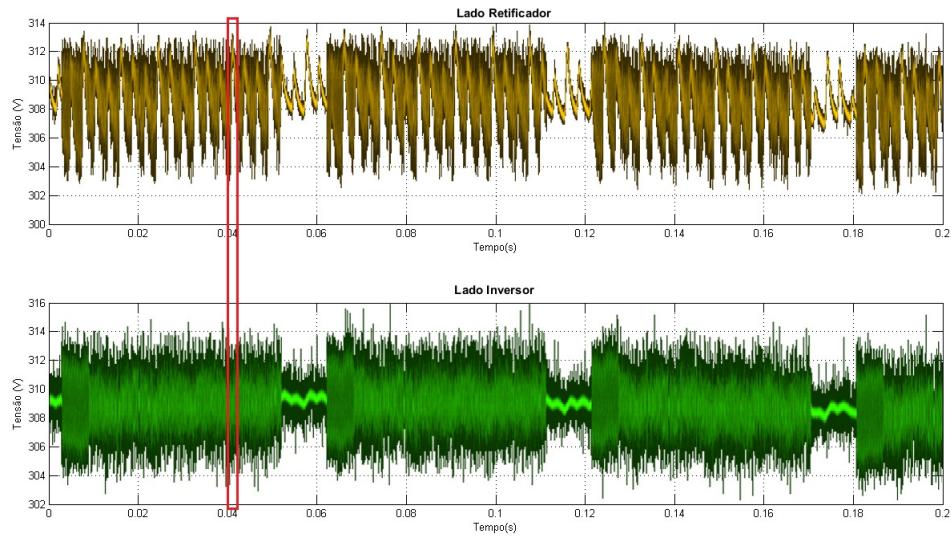


Figura 47 – Tensão nas extremidades do barramento c.c com adição do sinal de comunicação PLC - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 100 m.

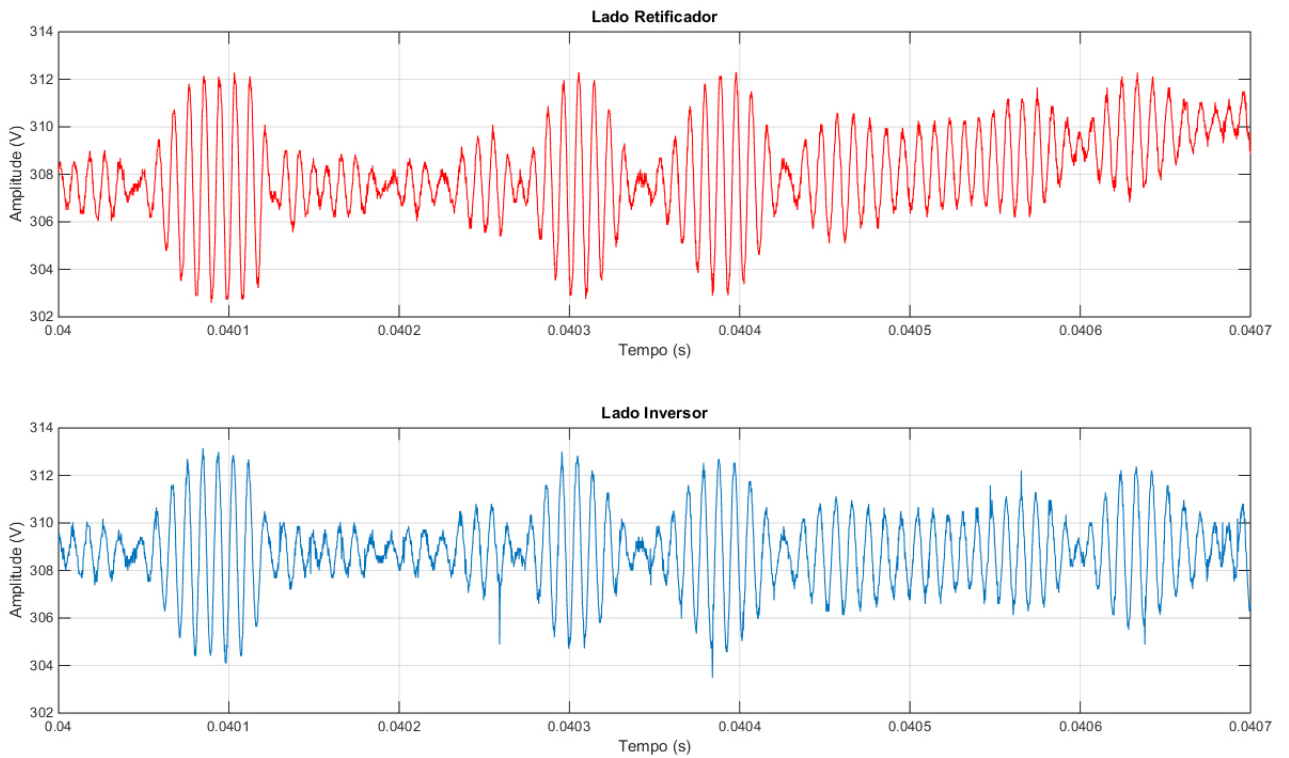


Figura 48 – Detalhe do sinal de comunicação adicionado a tensão do barramento c.c. - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 100 m.

verificado atraso relevante na transmissão de dados, para o sinal recebido no lado retificador. A relação SNR se manteve acima dos 20 dB.

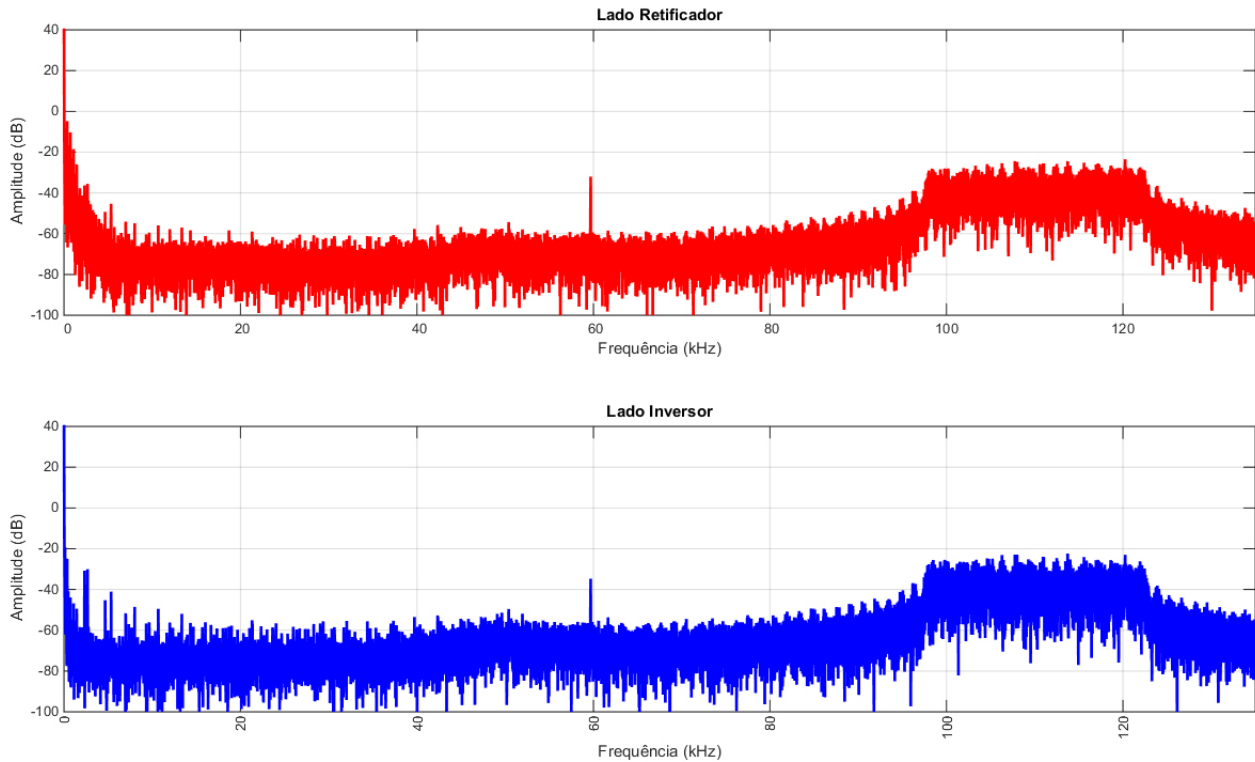


Figura 49 – FFT da tensão no barramento c.c com sinal de comunicação - Cabo de 100 m.

#### 4.2.2.3 Cabo de 500 metros

Nesta seção são apresentados os resultados relativos ao cabo de 500 metros de comprimento. Para este cabo foram realizadas as mesmas análises feitas para os cabos de 15 e 100 metros. A figura 50 apresenta a forma de onda de tensão nas extremidades do cabo, ao passo que a figura 51 apresenta um *zoom* horizontal da figura 50. Já na figura 53 é apresentado a FFT das formas de onda apresentadas na figura 50.

Como pode ser visto, mesmo com o aumento do comprimento do cabo em 5 vezes (*i.e.*, de 100 para 500 metros), a SNR continuou em cerca de 20 dB, o que leva a crer que a comunicação via PLC entre as extremidades do cabo poderá ocorrer sem problemas significativos para todos os comprimentos de cabo analisados.

Como pode ser visto nas figuras 46, 49 e 53, o espectro na faixa de frequências utilizada para comunicação possui forma plana, com pico em cerca de -27 dB, ou seja, a energia é igualmente distribuída dentro da faixa. No início de cada bloco de comunicação, os dois modems PLC utilizados realizam uma etapa de sincronismo, enviando as portadoras sem modulação, ou seja, sem a transmissão de dados. Esta etapa também serve para a estimativa da atenuação e nível de ruídos do canal de comunicação, uma vez que a amplitude do sinal enviado pelo transmissor é conhecida, bastando apenas o receptor verificar a amplitude do sinal recebido e realizar a comparação com os níveis esperados.

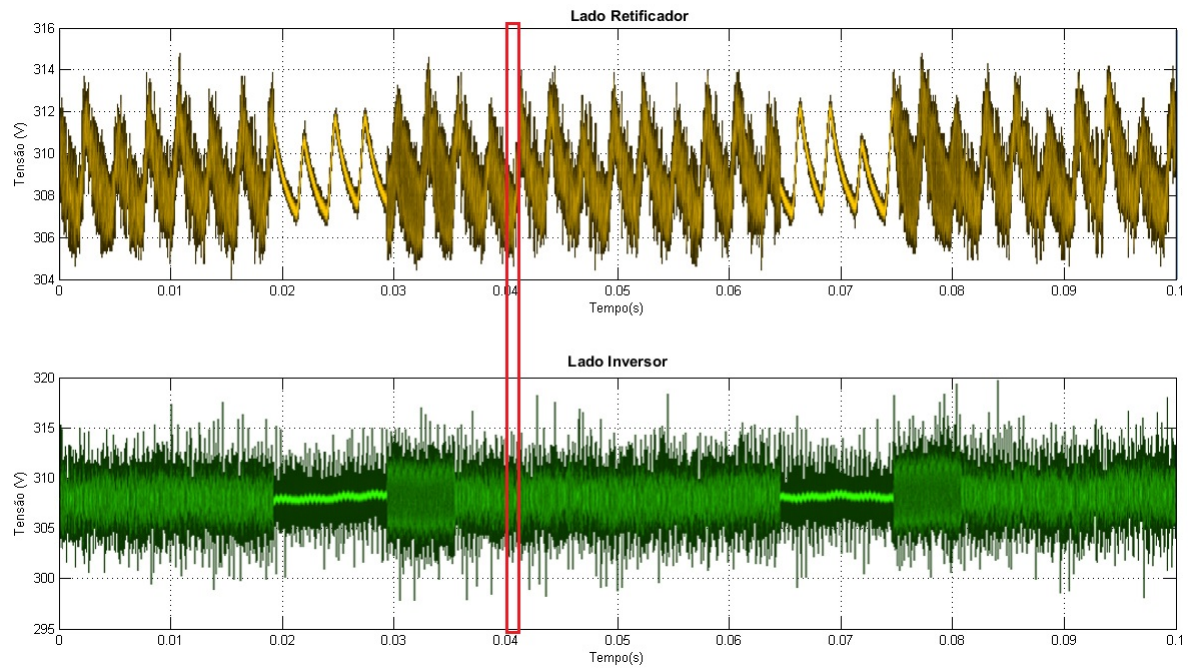


Figura 50 – Tensão nas extremidades do barramento c.c. com adição do sinal de comunicação PLC - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 500 m.

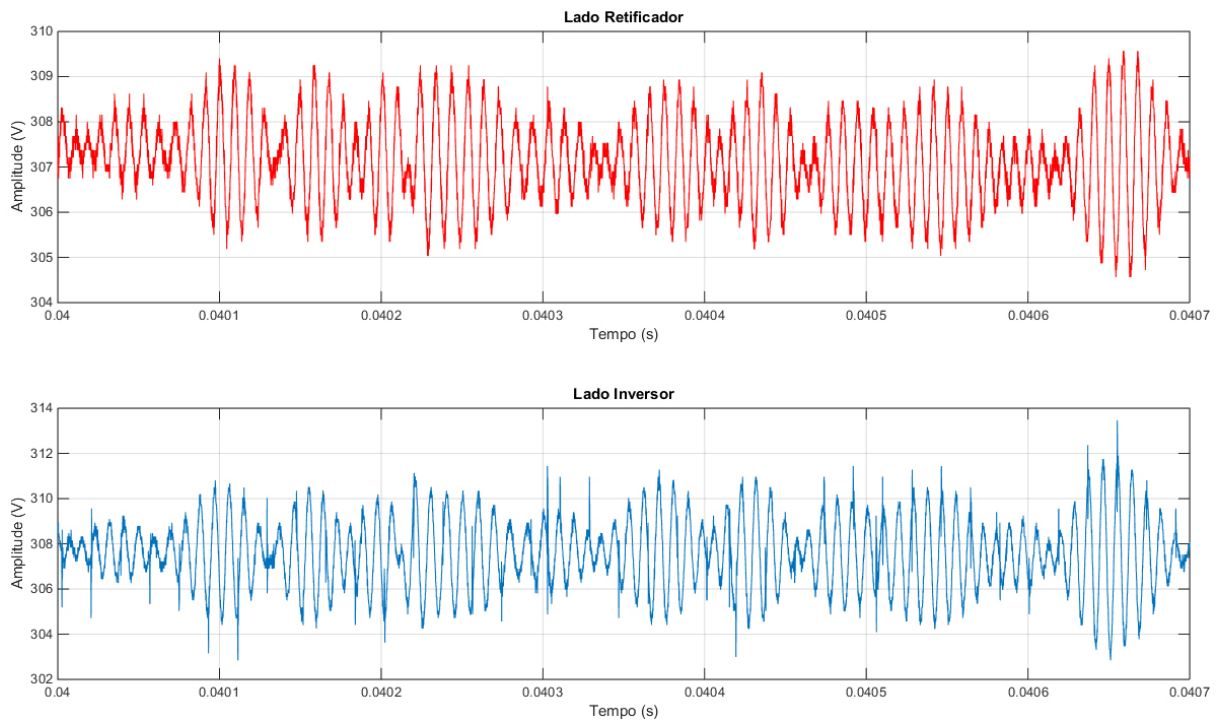


Figura 51 – Detalhe do sinal de comunicação adicionado a tensão do barramento c.c. - Motor a vazio, 1700 RPM e cabo de 500 m.

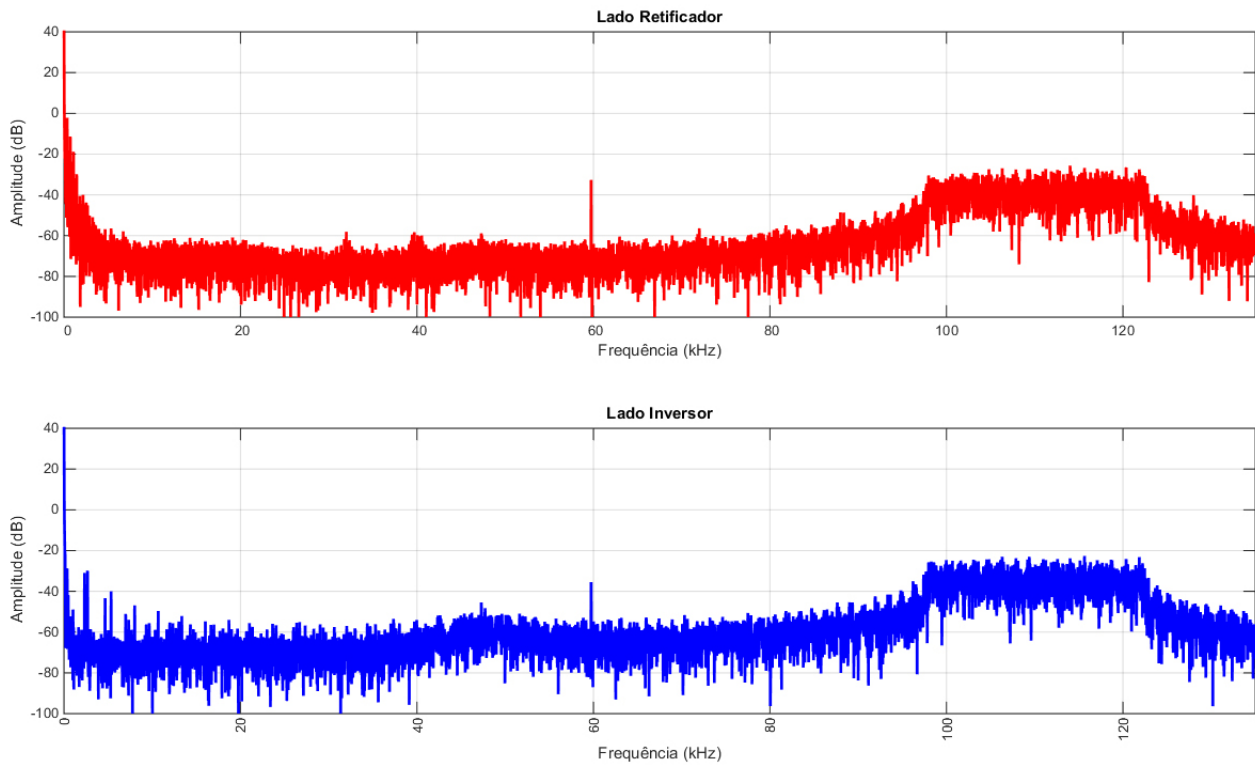


Figura 52 – FFT da tensão no barramento c.c com sinal de comunicação - Cabo de 500 m.

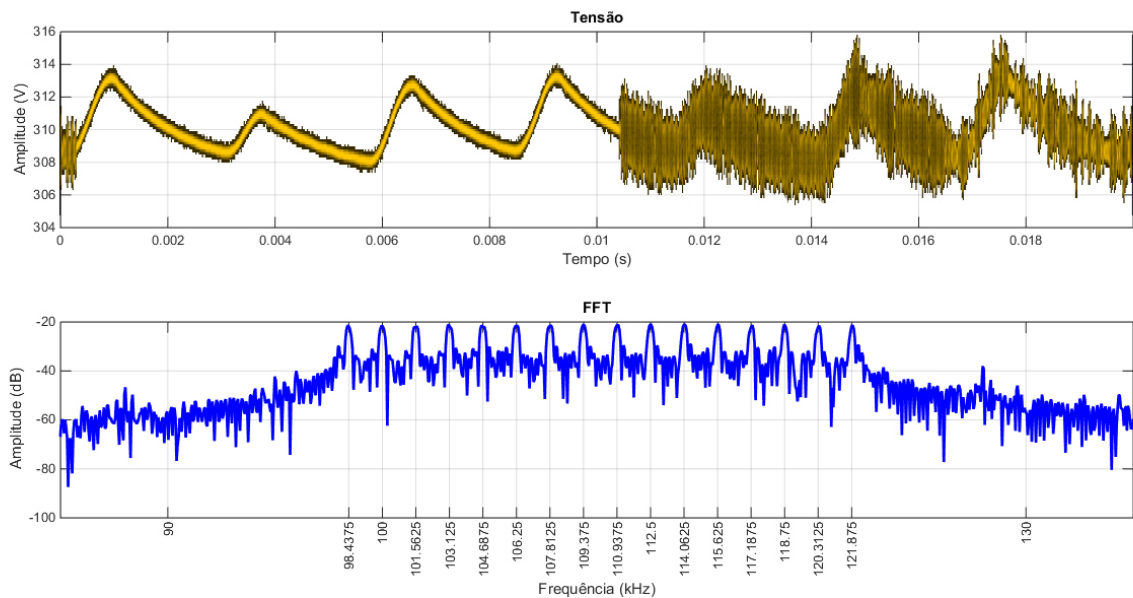


Figura 53 – Medição do sinal captado em cada portadora de comunicação - Cabo de 500 m.

### 4.2.3 Velocidade Máxima de Transmissão de Dados

De forma a verificar qual a máxima taxa de transmissão de dados possível através do barramento do protótipo, três técnicas de modulação, estabelecidas para o protocolo G3-PLC, foram avaliadas. Todas estão disponíveis através da API disponibilizada pela Texas Instruments. Utilizou-se como frequências alvo para comunicação as bandas B e BCD da padronização CENELEC, por serem destinadas a aplicações do usuário em geral. Os testes foram realizados programando um dos modems para a transmissão contínua de um pacote compreendendo 256 *bytes* de dados, e o outro modem como receptor. A taxa de transmissão de dados pode então ser conhecida calculando a quantidade de *bytes* recebidos em um dado intervalo de tempo. A cada pacote de dados é necessário adicionar 35 *bytes* de controle, contendo, além dos *bytes* referentes ao endereçamento da comunicação (*i.e.*, um número indicando o endereço do modem transmissor e outro número indicando o endereço do modem ao qual a informação se destina), *bytes* de CRC e paridade para a detecção de erros de transmissão. Para cálculo do CRC foi utilizada a estrutura CRC-16, com codificação XMODEM. A explicação acerca das técnicas utilizadas para a detecção de erros de comunicação foge ao escopo deste trabalho.

Tabela 7 – Taxas de transmissão de dados alcançadas.

Taxa de Transmissão (bps)		
Modulação	Faixa B	Faixa BCD
<b>BPSK</b>	9240	18129
<b>QPSK</b>	16300	31305
<b>8PSK</b>	21415	39304

A tabela 7 apresenta as taxas de transmissão de dados máximas encontradas. Sendo que em tais análises, foi utilizado o cabo de comprimento igual a 500 metros. Verifica-se que os menores valores são encontrados para a modulação BPSK, por esta utilizar apenas 2 símbolos. Os maiores valores são atingidos pela modulação D8PSK, que utiliza 8 símbolos para representar os bits a serem transmitidos. A modulação QPSK, que utiliza 4 símbolos, apresenta valores intermediários de taxa de transmissão. Também como era de se esperar, a faixa BCD possibilita maiores taxas de transmissão, por possuir uma banda de frequências mais ampla.

Para as técnicas de modulação BPSK E QPSK não foram verificados erros de comunicação; contudo, para a modulação 8PSK, verificou-se, quando transmitindo na faixa B, as taxas de erro apresentadas na figura 8.

A tabela 8 indica que, para um total de 500 pacotes de dados (256 bytes de dados mais 35 bytes de cabeçalho, por pacote), em 8 pacotes o CRC calculado pelo receptor não correspondeu ao CRC recebido junto com o pacote. Dentre um total de 1.164 Mbits

Tabela 8 – Taxas de erros de comunicação para modulação 8PSK e banda CENELEC B.

	Enviado	Corrompido	Erro (%)
<b>Pacotes</b>	500	8	0,04 (PER)
<b>bits</b>	1164000	464	1,6 (BER)

transmitidos, 464 bits provavelmente foram entendidos de foram errônea pelo receptor. Os erros percentuais, taxa de erro de pacotes “PER”, e taxa de erro de bits “BER”, podem então serem vistos nesta tabela.

De posse destes valores, optou-se por não utilizar a modulação 8PSK para o comando do inversor. Devido à baixa taxa de transmissão de dados requerida para o comando e monitoramento do sistema de acionamento, a comunicação para operação do inversor se dará por modulação BPSK.

#### 4.2.4 Comunicação PLC Aplicada ao Comando Remoto do Inversor

Nesta seção é avaliado o funcionamento do sistema de comunicação, sendo este utilizado para enviar comandos para o inversor situado remotamente, alimentado apenas pelo barramento c.c. Como *software* de aplicação, utilizou-se o desenvolvido e disponibilizado pela WEG, empresa fabricante do conversor, denominado “*Superdrive*”. Tal *software* disponibiliza ao usuário a opção “monitorar usando HMI”, que consiste em uma interface gráfica muito semelhante, visualmente, à IHM presente no CFW-09. Tal interface possibilita, dentre outras funcionalidades, que sejam lidos e alterados remotamente quaisquer parâmetros do conversor, bem como realizar a partida, parada, inversão de sentido de giro do acionamento, etc. A imagem da tela inicial do programa, com a interface HMI sendo utilizada, pode ser vista na figura 54.

Utilizando o Superdrive para comandar o inversor, verificou-se o tempo necessário para que o comando enviado pelo usuário efetivamente seja entregue ao inversor. Através do barramento c.c. de 15 m, o comando de “Partida” foi enviado para o inversor. Com o auxílio de um osciloscópio, registrou-se a forma de onda de tensão enviada pelo computador rodando o Superdrive, referente ao comando serial de partida, e registramos também na outra extremidade, lado do inversor, a forma de onda referente a este mesmo comando, sendo entregue ao inversor pelo sistema de comunicação. Foram registradas também as formas de onda da tensão no barramento c.c. em suas duas extremidades, de forma a se poder visualizar a dinâmica de comunicação entre os dois modems. Os resultados são apresentados na figura 55.

Como pode ser facilmente percebido, são necessários 15.8 ms, a partir do instante inicial, para que os 15 *bytes* referentes ao comando de “partida”, no protocolo Weg-Bus, sejam entregues, na velocidade de transmissão serial de 9600 bps, ao circuito de interface

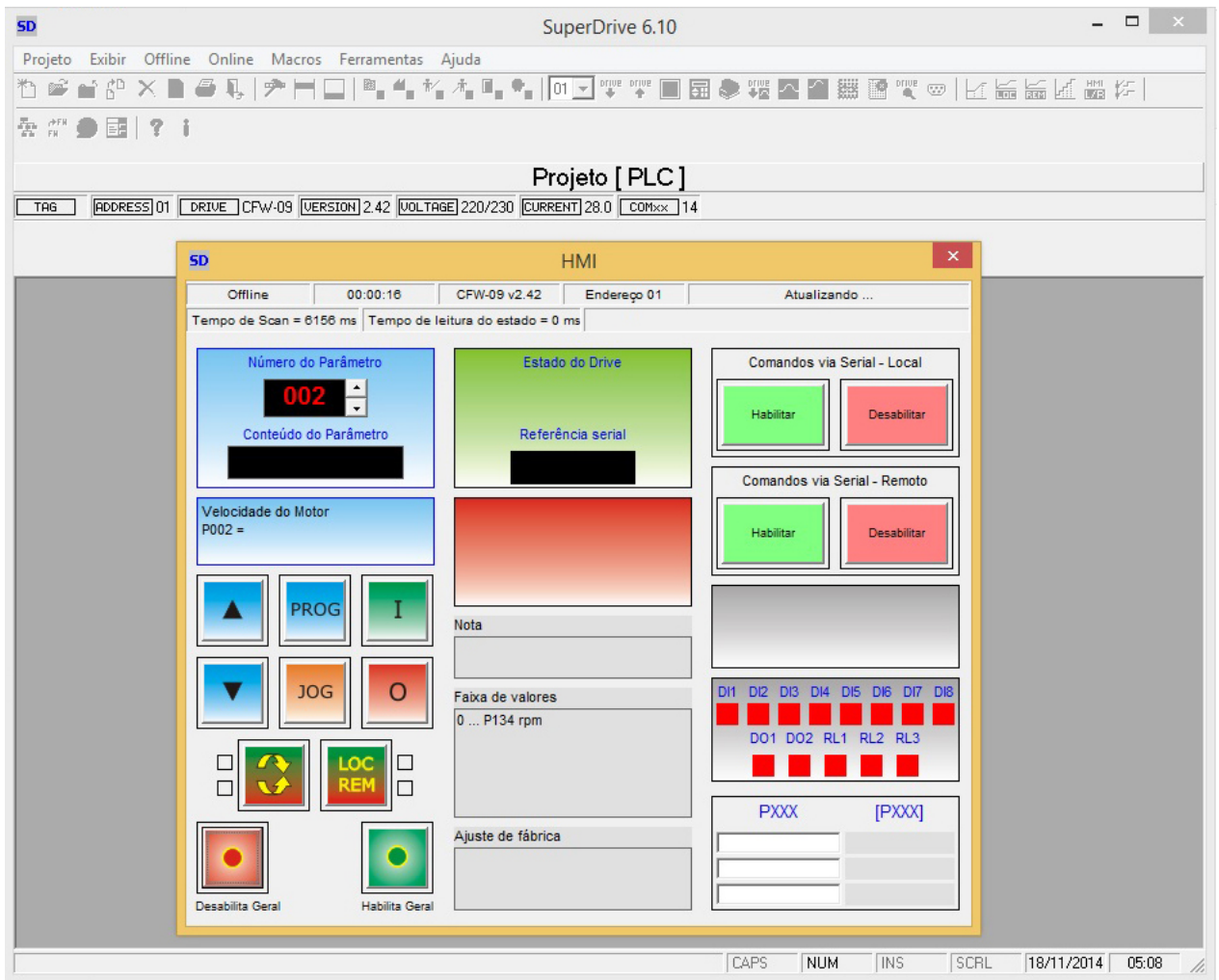


Figura 54 – Tela inicial do software *Superdrive*.

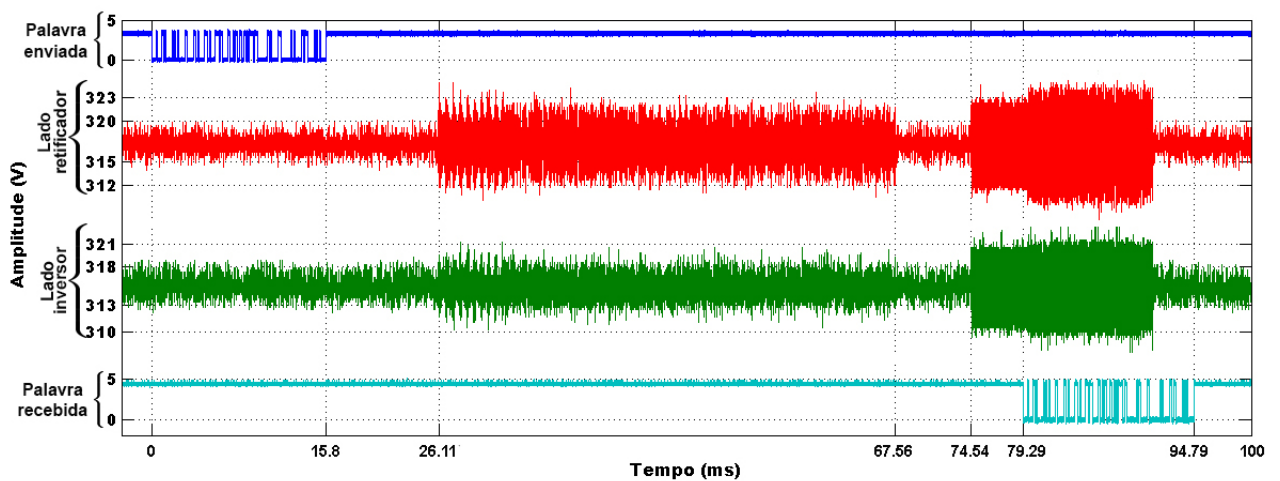


Figura 55 – Envio de comando de partida ao inversor CFW-09 através do barramento c.c. - Cabo de 100 m.

de comunicação. Este por sua vez necessita do intervalo de tempo compreendido entre os instantes 15.8 e 26.11 ms (10.31 ms) para interpretar o comando recebido, traduzir para os 50 *bytes* necessários ao protocolo G3 e enviar estes 50 *bytes* ao modem, a uma velocidade de transmissão serial de 57600 bps. Entre os instantes de 26.11 e 67.56 ms (41.45 ms), inicialmente os dois modems entram em sincronismo, através do envio e captação de portadoras não moduladas pelo barramento (etapa necessária para a correta demodulação dos dados), e logo após os 50 *bytes* são então transmitidos do lado retificador para o lado inversor. Finalmente, entre os instantes de 67.56 e 79.29 ms (11.73 ms), o modem do lado inversor envia os 50 bytes recebidos para o circuito de interface conectado ao mesmo, e este então interpreta os dados recebidos e traduz para os 15 bytes relativos ao comando de “partida”, no protocolo Weg-Bus. No instante de 79.29 ms, o circuito de interface começa a enviar, na velocidade de 9600 bps, o comando de partida para o inversor CFW-09. Na figura ainda é possível observar, nas formas de onda referentes à tensão no barramento, que a partir do instante de 74.54 ms é enviada pelo modem do lado inversor, uma mensagem de resposta para o modem do lado que começou a comunicação, indicando que o pacote de dados foi recebido com sucesso.

Embora evidente pela figura 55, é importante salientar que este tempo de atraso, em torno de 80 ms, para que uma mensagem enviada atinja o receptor, nada tem a ver com o tempo de viagem das ondas através do cabo do barramento c.c. Este tempo é devido unicamente aos tempos de processamento de dados e a forma como foi projetado o sistema. O tempo de propagação de sinais pelo cabo, devido aos comprimentos utilizados para o barramento (até poucos quilômetros de cabo) e as frequências envolvidas no processo de comunicação, podem ser desprezados.

A partir desse ponto, torna-se possível avaliar o impacto sobre a tensão média no barramento c.c. devido ao acionamento da carga e ao tráfego dos sinais de comunicação. Através do Superdrive e do sistema de comunicação, configurou-se o inversor para tempo de aceleração e desaceleração do motor em 10 segundos. A figura 56 ilustra o momento de partida da motor, inicialmente em repouso. A primeira e última formas de onda de tensão nesta figura são referentes ao comando de partida enviado pelo Superdrive e recebido pelo inversor, respectivamente. A segunda e terceira formas de onda representam as tensões do lado retificador e inversor, conforme indicado na figura. As escalas de tempo e tensão estão indicadas, e a janela da figura totaliza um intervalo de 12 segundos, o que é suficiente para visualizar todo o processo de partida do motor.

Logo após o envio do comando de partida pelo Superdrive, esta informação é transmitida pelos modems pelo barramento c.c. Cerca de 80 ms após, o inversor inicia o processo de partida do motor, o que leva a um decréscimo do valor médio da tensão c.c. no barramento, devido a energia sendo drenada pela máquina. Após 10 segundos, a máquina já atingiu o valor de rotação configurado no inversor e a tensão no barramento

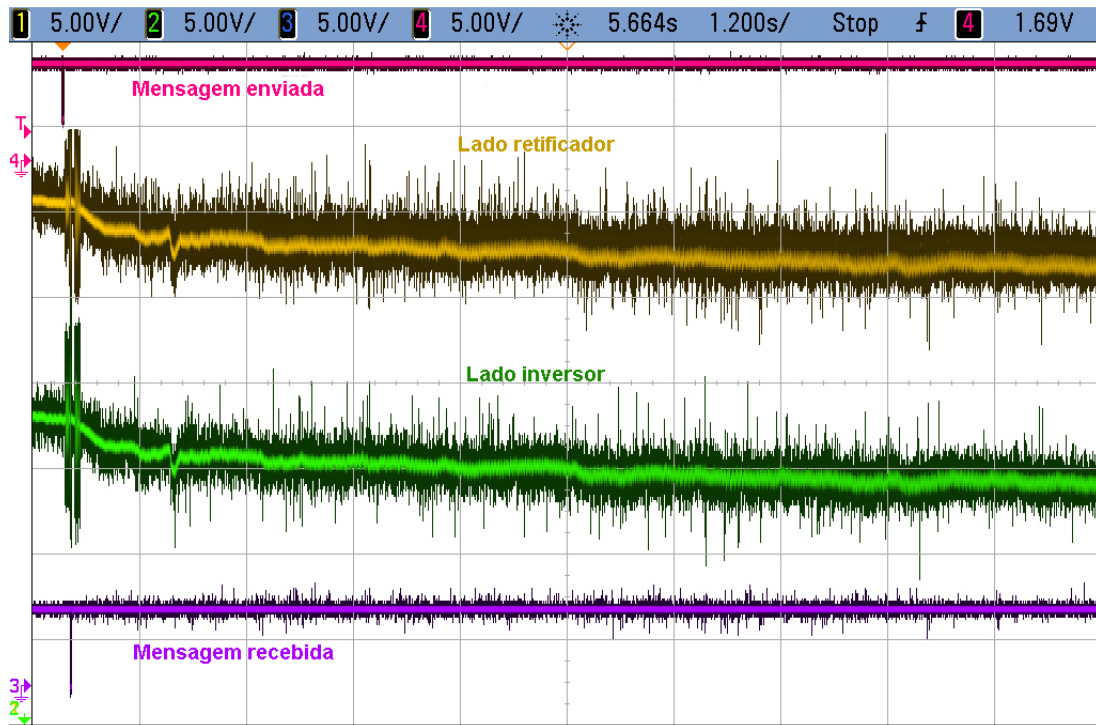


Figura 56 – Tensão no barramento c.c. após envio de comando de partida - Cabo de 100 m.

c.c. atinge o valor permanente para este ponto de operação.

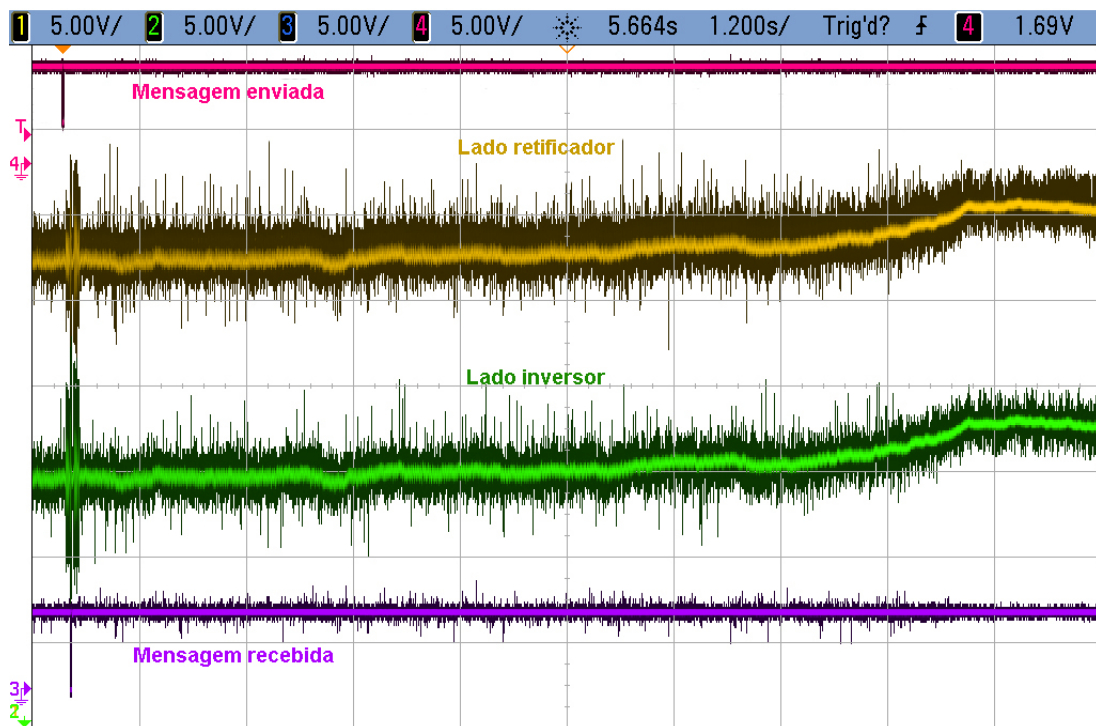


Figura 57 – Tensão no barramento c.c. após envio de comando de parada - Cabo de 100 m.

A figura 57 ilustra o processo contrário ao visualizado na figura 56. Aqui, inicialmente o motor está em funcionamento e, no instante inicial, recebe o comando de parada,

enviado pelo Superdrive, através do sistema de comunicação. Neste ponto o inversor começa o processo de frenagem e após 10 segundos o motor para, permitindo que a tensão no barramento c.c. volte para o nível médio verificado quando o motor está desligado.

Além dos evidenciados neste texto, vários testes foram executados, buscando-se verificar o funcionamento do sistema de comunicação proposto para o maior número possível de funcionalidades oferecidas pelo software Superdrive. Foram realizadas várias simulações de operação, como a variação de velocidade do motor, reversão do sentido de giro, partida e parada da máquina. Foram realizadas também sequências de monitoramento, como leitura de todos os parâmetros do inversor, monitoramento *on-line* de parâmetros, como tensão no barramento c.c., rotação e corrente nas fases do motor, sempre utilizando o *software* superdrive em conjunto com a comunicação PLC. Não foram registrados erros de comunicação durante os testes realizados. Em todos as condições verificou-se um atraso de resposta maior do que na solução convencional, conforme já descrito; porém, julgou-se esse como aceitável, por não comprometer a utilização do sistema.

Neste capítulo foram apresentados os resultados experimentais alcançados com o protótipo construído. Foram avaliados o espectro de frequências, a atenuação e a velocidade de comunicação para diversos comprimentos de cabo. Foram ainda apresentados os resultados decorrentes da utilização do sistema proposto para a operação real do inversor, utilizando o *software* de operação desenvolvido pelo fabricante do inversor. No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como as propostas de continuidade para trabalhos futuros.

# 5 Conclusões e Propostas de Continuidade

## 5.1 Conclusões

Neste trabalho, a utilização de barramentos c.c. longos de conversores de frequência, como meio para a transmissão de informações entre as duas extremidades do mesmo, foi avaliada. Tal comunicação torna-se atrativa principalmente em aplicações onde o inversor, alocado em posição remota, encontra-se inacessível ao usuário, como é o caso das aplicações para extração de petróleo em ambiente *subsea*.

Os resultados de simulação mostraram que o aumento do comprimento do cabo, por si só, não tem a capacidade de modificar, de forma significativa, o conteúdo espectral das tensões, em ambas extremidades, sobretudo na faixa utilizada para comunicação, quando esta é escolhida de forma a se situar em frequências suficientemente elevadas, tipicamente acima dos 10 kHz. Verificou-se ainda que a escolha da técnica de modulação para a inversão da tensão c.c. também não possui a capacidade de causar interferência ao sistema de comunicação, respeitadas as mesmas recomendações feitas quanto à escolha da faixa de frequências utilizada.

O conteúdo espectral medido com o protótipo, em ambas as extremidades do barramento, para cabos de 15 a 500 metros, mostrou-se muito semelhante àqueles apresentados pelos resultados de simulação, indicando uma boa correlação entre o modelo simulado e o sistema físico construído.

Os resultados experimentais mostraram que a grande interferência que o barramento c.c. pode causar ao sistema de comunicação não é relativa ao nível de ruído presente no mesmo, mas sim quanto à atenuação imposta ao sinal de alta frequência. Esta atenuação, embora cresça com o aumento do comprimento do cabo, é mais significativa devido a grande capacitância inserida no barramento para o armazenamento de tensão, para ser entregue à carga. De forma a se contornar este problema de atenuação, propôs-se a inserção, em ambas as extremidades do barramento, de indutores com valor de indutância tal que não apresentem impedância significativa para a transferência de energia para o motor. Porém, para a faixa de frequências utilizada para comunicação, os mesmos apresentem impedância tal que a maior parte da tensão injetada no barramento pelos modems possa ser medida sobre estes indutores. Desta forma, o correto posicionamento dos modems, relativo aos indutores inseridos, permite que o problema da atenuação de tensão, imposta pelo elevado comprimento do cabo e grande capacitância do barramento, seja contornado. Com a alta relação sinal/ruído, SNR, de 20 dB, medida para o sinal de comunicação no cabo de 500 metros, estima-se que pequenos ajustes nos valores de indutância destes elementos

permita a comunicação PLC pelo barramento para cabos na casa dos quilômetros de comprimento.

Os valores das taxas máximas de transmissão de dados medidos para o cabo de 500 metros se aproximam dos valores teóricos máximos para o protocolo de comunicação utilizado. Foram alcançadas taxas de comunicação que variam de cerca de 10 a 40 kbps, o que, para aplicações de relativa baixa necessidade de transmissão de dados, como é o caso da aplicação de monitoramento e comando de inversores, onde a transmissão de poucos bytes por segundo é suficiente, possibilitou a correta operação do inversor utilizado neste trabalho.

Através de todos os resultados apresentados neste trabalho, conclui-se que a utilização do barramento c.c. de inversores como meio para a transmissão de dados é uma técnica factível, permitindo o correto envio e recebimento de comandos e leituras para o inversor, sem a necessidade de cabos adicionais. Isso permite que a transmissão de energia para o acionamento seja feita em corrente contínua, através da separação entre retificador e inversor, mesmo em ambientes onde o conjunto inversor/motor fique em locais inacessíveis ao usuário, como o é caso da extração de petróleo em ambiente *subsea*.

## 5.2 Propostas de Continuidade

Há a necessidade de maior estudo e compreensão dos fenômenos de interesse à comunicação PLC quando são utilizados barramentos de comprimento superior aos utilizados neste trabalho. Também é interessante que o protocolo utilizado para a comunicação PLC seja otimizado para trabalhar de maneira mais eficiente em conjunto com o protocolo de comunicação existente no sistema de acionamento, buscando diminuir os tempos de envio e recebimento de informações. Diante de tal cenário, as propostas de continuidade desse trabalho são:

- Realização de testes de comunicação PLC utilizando barramento c.c com cabos com comprimentos acima de 1 km.
- Desenvolvimento de protocolo de comunicação PLC, com base no protocolo G3, que seja otimizado para aplicação em sistemas de acionamento de motores por conversores de frequência.
- Analisar o funcionamento do sistema operando para comandar uma rede de inversores.
- Avaliar a aplicabilidade do sistema em aplicações que envolvam níveis elevados de potência, como redes *Medium-Voltage Direct Current* - MVDC.
- Testes do sistema utilizando barramento c.c. com cabos umbilicais em ambiente *subsea*.

Os testes de comunicação com cabos acima de 1 km podem conter, além das apresentadas neste trabalho, análises referentes à implementação de diversas técnicas de modulação e utilização de cabos com bitolas variadas. Podem ser verificados também os efeitos, relativos à comunicação, quando vários inversores/motores são alimentados pelo mesmo barramento.

O desenvolvimento de um novo protocolo de comunicação deve ter o objetivo de diminuir a relação entre a quantidade de bytes existentes no cabeçalho e a quantidade de bytes existente na mensagem a ser transmitida, de forma a otimizar a comunicação e permitir uma maior eficiência na utilização do canal de comunicação, com relação à transmissão de informações de e para o inversor.

É importante verificar a aplicabilidade do sistema proposto para enviar e receber comandos para um conjunto de inversores que compartilhem o mesmo barramento c.c., analisando, desta forma, a utilização do sistema PLC para comunicação multiponto.

Em última instância, o sistema deve ser capaz de operar em condições reais de utilização, quando instalado para o comando e operação de um sistema de acionamento para extração de petróleo em ambiente subsea. Desta forma, o sistema proposto deve ser analisado utilizando cabos umbilicais, imersos em ambientes oceânicos, para a construção do barramento c.c.

Podem ainda, em trabalhos futuros, ser avaliadas questões relativas à vida útil do sistema de comunicação e as devidas manutenções preventivas necessárias à operação confiável do sistema.



# Referências

- [1] J. Americo de Castro Junior, H. de Paula, B.J.C. Filho, and A.V. Rocha. Rectifier-to-inverter connection through long dc cable;part ii: The complete copper economy characterization. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 48(1):229–235, Jan 2012.
- [2] J.A.C. Junior. Uma nova configuracao de sistemas de acionamento: Conexao retificador-inversor atraves de cabos longos - analise da economia de cobre e de sua protecao contra faltas. Master’s thesis, 2010.
- [3] Descoberto em 2007, pré-sal guarda 50 bilhões de barris de petróleo. [http: redeglobo.globo.com/globociencia/noticia/2012/05/descoberto-em-2007-pre-sal-guarda-50-bilhoes-de-barris-de-petroleo.html](http://redeglobo.globo.com/globociencia/noticia/2012/05/descoberto-em-2007-pre-sal-guarda-50-bilhoes-de-barris-de-petroleo.html). Acessado em: 2014-01-30.
- [4] J. Yazdani, K. Glanville, and P. Clarke. Modelling, developing and implementing sub-sea power-line communications networks. In *Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on*, pages 310–316, April 2005.
- [5] R.T. Jones and J. Lucas. Subsea high bandwidth data transfer using fiber optic technologies. In *OCEANS 2011*, pages 1–5, Sept 2011.
- [6] E. Brekke, V. Horten, and V. Steigen. Method and modem for subsea power line communication, June 12 2012. US Patent 8,199,798.
- [7] Oil and gas careers and vacancy. [http: oilandcareers.com/category/subsea-engineering/page/3/](http://oilandcareers.com/category/subsea-engineering/page/3/). Acessado em: 2014-03-18.
- [8] Moonsuk Choi, Seongho Ju, and Yonghun Lim. Design of integrated meter reading system based on power-line communication. In *Power Line Communications and Its Applications, 2008. ISPLC 2008. IEEE International Symposium on*, pages 280–284, April 2008.
- [9] S. Galli, A. Scaglione, and K. Dostert. Broadband is power: internet access through the power line network. *Communications Magazine, IEEE*, 41(5):82–83, May 2003.
- [10] J. J. Fahie. Edward davy. *The Electrician*, pages 181–227, July 1883.
- [11] J Routin and C.E.L. Brown. Power line signaling elecricity meters. British Patent No.24833.
- [12] C.H. Thordarson. Electric central-station recording mechanism for meters., March 14 1905. US Patent 784,712.

- 
- [13] Xavier Carcelle. *Power line communications in practice*. Artech House, 2009.
- [14] P. A. Brown. Power line communications - past, present and future. *Power Line Communications and Its Applications*, pages 97–100, March/April 1999.
- [15] Niovi Pavlidou, AJ Han Vinck, Javad Yazdani, and Bahram Honary. Power line communications: state of the art and future trends. *IEEE Communications Magazine*, 41(4):34–40, 2003.
- [16] P. A. Brown. Using power lines for internet access: the case of nor.web. *Modern Power Systems*, pages 28–29, November 1998.
- [17] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Resolução normativa nº 375, de 25 de agosto de 2009. <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2009375.pdf>. Acessado em: 2014-05-12.
- [18] CENELEC EN 50 065-1. Signaling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3hz to 148.5 khz; part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances, 1991.
- [19] International Electrotechnical Commission. Cispr16-1, specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus, 1999.
- [20] Federal Communications Commission et al. Fcc part 15–radio frequency devices, code of federal regulation 47 cfr ch. 1 (10-1-).
- [21] Association of Radio Industries and Businesses ARIB. Std-t84: Power line communication equipment (10 khz - 450 khz), 2002.
- [22] Mark D. Pardue. Fine-tuning the osi model: Layer functions and services. In *Military Communications Conference - Crisis Communications: The Promise and Reality, 1987. MILCOM 1987. IEEE*, volume 1, pages 0199–0203, Oct 1987.
- [23] S.-N. Orzen. Interaction understanding in the osi model functionality of networks with case studies. In *Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI), 2014 IEEE 9th International Symposium on*, pages 327–330, May 2014.
- [24] H. Zimmermann. Osi reference model–the iso model of architecture for open systems interconnection. *Communications, IEEE Transactions on*, 28(4):425–432, Apr 1980.
- [25] G3-plc alliance - press releases. <http://www.g3-plc.com/press-releases>. Acessado em: 2014-03-18.
- [26] Electricite Reseau Distribution France. G3-plc physical layer specification, Aug. 2009.

- [27] Maxim Integrated. Supplement to plc g3 physical layer specification for operation in cenelec b/c/bc/bcd/bd frequency bands. <http://www.maximintegrated.com/en/products/powerline/g3-plc/index.cfm>. Acessado em: 2014-05-12.
- [28] A.M. Hava, R.J. Kerkman, and T.A. Lipo. Simple analytical and graphical methods for carrier-based pwm-vsi drives. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 14(1):49–61, Jan 1999.
- [29] C.G. Brennecke. Equivalent t and pi sections for the quarter-wavelength line. *Proceedings of the IRE*, 32(1):15–17, Jan 1944.
- [30] H. de Paula. *Uma Nova Metodologia para a Determinação dos Fenômenos de Alta Freqüência em Sistemas de Acionamento de Motores de Indução através de Inversores PWM*. PhD thesis, 2005.
- [31] H. De Paula, D.A. de Andrade, M.L.R. Chaves, J.L. Domingos, and M.A.A. de Freitas. Methodology for cable modeling and simulation for high-frequency phenomena studies in pwm motor drives. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, pages 744–752, Março 2008.
- [32] H. de Paula, M. Chaves, D.A. Andrade, M.A.A. Freitas, and J.L. Domingos. A simple and accurate cable modeling suitable for high-frequency phenomena analysis in pwm motor drives. In *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th*, pages 680–686, June 2005.
- [33] Compute rlc parameters of overhead transmission line from its conductor characteristics and tower geometry. <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/powerlineparam.html>. Acessado em: 2014-08-18.