



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

*Verificação do Efeito de Cabos Longos no Acionamento de
Motores Elétricos*

Aluno: Daniel Araújo de Freitas

Matrícula: 20621633

Campina Grande

2011

Daniel Araújo de Freitas

*Verificação do Efeito de Cabos Longos no Acionamento de
Motores Elétricos*

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da UFCG, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Área de concentração: Eletrônica de Potência e Petróleo.

Orientador: Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa

Doutor em Engenharia Elétrica - UFCG

Campina Grande

2011

Daniel Araújo de Freitas

*Verificação do Efeito de Cabos Longos no Acionamento de
Motores Elétricos*

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica UFCG, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Área de concentração: Eletrônica de Potência e Petróleo.

Aprovado em __/__/_____

BANCA EXAMINADORA

Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa

Doutor em Engenharia Elétrica - UFCG

Nome do Professor Convidado

Título do Professor Convidado

Aos meus pais e irmãos.

Aos amigos, pelo apoio e companheirismo.

À minha namorada pela força, apoio e compreensão.

*“O único lugar onde o sucesso vem antes
do trabalho é no dicionário.”*

Albert Einstein

Resumo

O presente trabalho aborda uma problemática bastante discutida na área do petróleo nos dias de hoje. O controle e acionamento de bombas centrífugas submersas de alta potência é bastante complexo e nos dias atuais existem poucos especialistas pesquisando na área. Esse foi o grande incentivo da escolha do tema. O trabalho consiste em verificar os efeitos causados no sinal de tensão alternada gerado por um inversor no terminal de um motor quando o mesmo percorre um alimentador muito longo. No início temos uma abordagem básica sobre inversores e suas topologias assim como algumas técnicas utilizadas para realizar o chaveamento dos mesmos. Discutimos alguns problemas em se utilizar um inversor mais simples de três níveis e quais são as vantagens de se utilizar um inversor multinível no problema em questão. Logo em seguida discutimos sobre as distorções causadas pelos cabos longos. Temos o efeito pelicular que na verdade não é o grande agente dos resultados obtidos e em especial o efeito da reflexão de ondas viajantes que representa boa parte da distorção do sinal transmitido. Em seguida, discutiremos um modelo matemático de um cabo longo para possibilitar a simulação do sistema. Como não há nenhum modelo nos dias de hoje para tal situação, é utilizada a teoria das linhas de transmissão que se assemelha bastante ao problema em questão. Por fim, temos a simulação total do sistema utilizando a ferramenta simulink do matlab. O sistema consiste em um inversor trifásico PWM de nove níveis conectado ao modelo de cabo longo escolhido que se conecta a um motor de indução trifásico. Após a simulação, vários gráficos foram gerados para que possamos visualizar e analisar os resultados obtidos.

Palavras-chaves: bombas centrífugas submersas, inversores, inversores multinível, PWM, efeito pelicular, reflexão de ondas, cabo longo, motor de indução.

Abstract

This study addresses a widely debated issue in the oilfield nowadays. The control and drive of high power submersible centrifugal pumps is very complex and nowadays there are few experts researching in the area. That was the great incentive of choice of topic. The work is to verify the effects on the alternating voltage signal generated by an inverter into the terminal of an engine when it goes a very long feeder. At the beginning we have a basic approach on inverters and their topologies as well as some techniques used to perform the switching of the same. We discuss some problems in using a simple inverter with three levels and what are the advantages of using a multilevel inverter in the problem at hand. Soon after we discussed the distortions caused by long cables. We have the skin effect which actually is not the great agent of the results and in particular the effect of reflection of traveling waves which represents much of the distortion of the transmitted signal. Then, we discuss a mathematical model of a long cable to allow the simulation of the system. As there is no model today for such a situation, we took part of the transmission lines theory that is very similar to the problem at hand. Finally, we have the full system simulation using matlab simulink tool. The system consists of a three-phase nine level PWM inverter connected to chosen long cable model that connects to a three-phase induction motor. After the simulation, several graphs were generated so that we can visualize and analyze the results.

Keywords: submersible centrifugal pumps, inverters, multilevel inverters, PWM, skin effect, wave reflection, long cable, induction motor.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças e capacidade para aprender um conteúdo que tive bastante dificuldade durante o curso de engenharia elétrica e por ter iluminado meu caminho nas horas mais difíceis me fazendo chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais Ione e José por todo o suporte e subsídio para que eu concluísse meu curso da melhor forma possível.

Agradeço aos meus Irmãos Diogo e Danilo por estarem sempre presentes compartilhando comigo os momentos vividos durante o curso.

Agradeço também ao meu professor orientador Maurício por ter aceitado me orientar, proposto esse desafio que me fez crescer bastante em uma área muito importante para a engenharia elétrica e me ajudado com o progresso do meu trabalho sempre que precisei.

Agradeço também ao colega e amigo Vagner Fonsêca pelo conhecimento compartilhado que foi essencial para o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço a todos que fazem a equipe de coordenação do DEE pelo tempo, ajuda e dedicação dispensados sempre que necessitei.

Agradeço a todos os meus amigos que estiveram comigo desde o começo dessa intensa caminhada pelos ótimos e difíceis momentos que vivenciamos juntos. Tenho certeza que depois dessa dolorosa, porém valiosa jornada que hoje estamos colhendo os frutos, uma grande família se formou.

Em especial, agradeço à minha namorada Ana Paula pois foi ela quem mais me apoiou e me deu força durante todo o meu curso com toda sua paciência sacrificando muitos finais de semana para para que eu pudesse estudar.

Sumário

Lista de Figuras	8
Lista de Tabelas	10
1 Introdução	11
2 Inversores	13
2.1 Técnicas de Chaveamento	14
2.1.1 PWM Senoidal	14
2.1.2 Modulação Multiportadora com Deslocamento de Nível	16
2.2 Inversor Trifásico PWM	16
2.3 Inversor Multinível Monofásico PWM	18
2.3.1 Simulação	18
2.4 Inversor Multinível Trifásico PWM	20
2.4.1 Simulação	23
3 Distorções em Sinais Causadas por Cabos Longos	25
3.1 Efeito de Reflexão	25
3.2 Efeito Pelicular	28
4 Cabos Longos	29
4.1 Modelo de Cabo Longo	29
5 Simulação do Sistema Completo Utilizando a Ferramenta Simulink	32
5.1 Resultados Obtidos	33

6 Conclusão	38
Referências Bibliográficas	39

Lista de Figuras

1	Sistema de extração de petróleo submarino.[1]	11
2	Diagrama Geral do Sistema a ser Simulado.	12
3	Circuito esquemático de um inversor em ponte H.[2]	13
4	Circuito esquemático de um inversor em meia ponte.	14
5	Diagrama de circuito para aplicação em modulação senoidal.[3]	15
6	Formas de onda geradas a partir da técnica PWM senoidal.[2]	15
7	Sinal de saída do inversor monofásico ao aplicarmos a modulação PWM senoidal.[2]	16
8	Modulação multiportadora com deslocamento de nível para um inversor de cinco níveis.[2]	17
9	Diagrama de circuito para geral tensão trifásica utilizando três inversores em ponte H.	17
10	Diagrama de circuito para geral tensão trifásica utilizando um único inversor.	17
11	Diagramas de inversores em cascata. O diagrama da esquerda produz sete níveis e o da direita nove níveis.[2]	19
12	Diagrama de blocos de um inversor em cascata de nove níveis projetado no Simulink.	20
13	Diagrama de blocos que gera os sinais de controle para inversor em cascata de nove níveis.	21
14	Sinais gerados pelo bloco de controle.	21
15	Diagrama de blocos do inversor em ponte H da Fig. 12.	22
16	Saída do inversor da Fig. 12.	22
17	Diagrama de blocos de um inversor trifásico de nove níveis projetado no Simulink.	23

18	Saída do inversor da Fig. 17	24
19	Espectro de tensão da saída de um inversor de 2 níveis.	26
20	Espectro de tensão da saída de um inversor de 9 níveis.	26
21	Diagrama espaço-tempo.[1]	27
22	Tensão nos terminais do motor.[1]	28
23	Modelo de circuito para uma linha a dois fios.[1]	30
24	Bloco <i>Distributed Parameters Line</i> do simulink.	31
25	Diagrama de blocos completo da simulação do sistema no simulink.	34
26	Tensão de saída do inversor conectado ao cabo longo e motor.	34
27	Tensão no terminal do motor conectado ao inversor por um cabo longo.	35
28	Comparativo entre a tensão no terminal do motor(vermelho) e na saída do inversor(azul).	36
29	Gráfico ampliado da tensão nos terminais do motor.	36
30	Tensão no terminal do motor com e sem o cabo longo.	37
31	FFT da tensão na saída do inversor (gráfico superior) e da tensão no ter- minal do motor (gráfico inferior).	37

Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros do cabo para simulação com a ferramenta simulink.[1]	31
-----	---	-----------	----

1 Introdução

Na indústria de petróleo utilizam-se bastante bombas elétricas que são inseridas no poço para bombear os fluidos presentes. Diferentemente de um poço em solo, poços marítimos não possuem uma plataforma de extração fixa acima do mesmo o que dificulta todo o procedimento de extração do petróleo. Nesse caso, existem as plataformas móveis que muitas vezes ficam a quilômetros do poço. Assim, as bombas elétricas submersas necessitam de uma certa complexidade para serem acionadas e controladas visto que a fonte de alimentação da bomba assim como a estação coletora estão distantes da bomba. Nesse caso, quaisquer intervenções para possível manutenção são sinônimas de periculosidade e custo elevado. A Fig. 1 representa um sistema de extração submarino.[4]

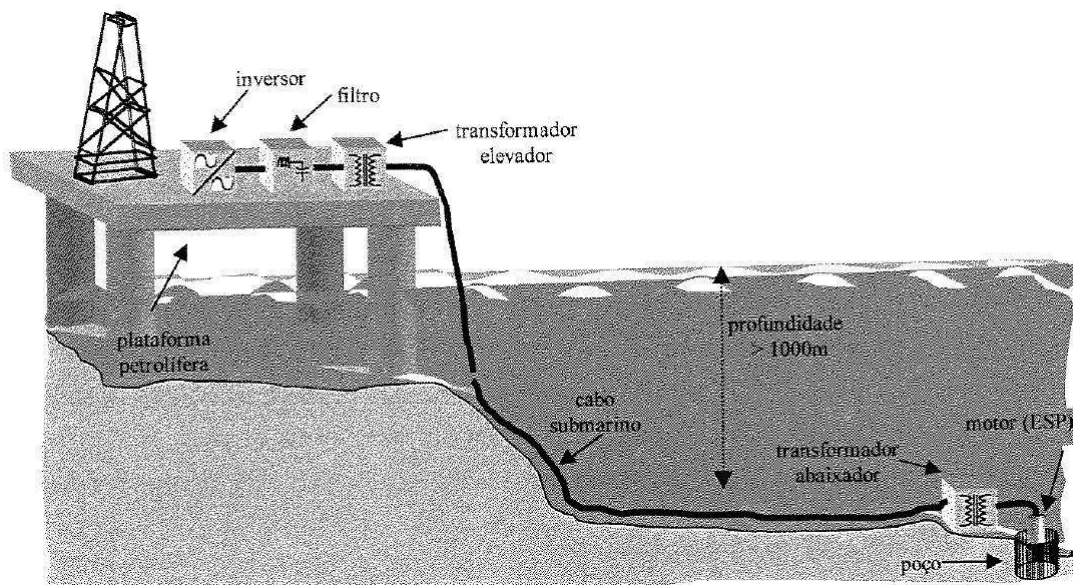


Figura 1: Sistema de extração de petróleo submarino.[1]

Os sistemas de extração atuais utilizam conversores de frequência que permitem a partida e/ou parada do motor suavemente, aumentando sua vida útil. Mecanicamente, os cabos submarinos são projetados para suportarem ondas e correntes marinhas, assim como o seu próprio peso. A isolamento elétrica é reforçada para suportar a salinidade e o diâmetro do cabo é tanto maior quanto maior a distância entre o poço e a plataforma. [1]

No poço RJS-477A, a distância entre a plataforma e o mesmo é de $6,5\text{Km}$. O custo da instalação foi reduzido utilizando um cabo submarino com tensão nominal de

isolação de $12/20kV$ e diâmetro nominal de $35mm^2$. O cabo lançado dentro do poço é um cabo simples, somente com blindagem mecânica, devido ao pequeno espaço dentro do poço. No poço RJS-477A o diâmetro do cabo é de 2 AWG. O transformador de potência, submarino, tem potência nominal de $750kVA$ e tensão nominal de $10,5kV - 3,5kV$ projetado para operar na profundidade máxima de $1150m$. O conjunto necessário para a extração, chamado simplesmente de bomba elétrica submersível, é na verdade constituído de múltiplos módulos, tais como motor elétrico, separador de gás, selo e bomba centrífuga propriamente dita.[4]

A bomba elétrica submersa por ser acionada através de cabos longos está suscetível a falhas de operação e diminuição da vida útil. Isto acontece porque normalmente ocorrem distorções no sinal como sobretensões e sobrecorrentes, devido a ressonâncias entre os elementos do sistema. As ressonâncias podem ocorrer entre o cabo e o motor.

Para verificar tais efeitos, serão feitas simulações com uso da ferramenta SIMULINK aplicando modelos de cabos longos assim como simulando inversores PWM multinível.

Os sistema que será simulado para verificar tais efeitos será composto por um inversor trifásico de nove níveis controlado utilizando a técnica modulação multiportadora com deslocamento de nível, um modelo de cabo longo que será estudado mais adiante e um motor de indução trifásico.

O diagrama da Fig. 2 representa o sistema que será simulado nesse trabalho.

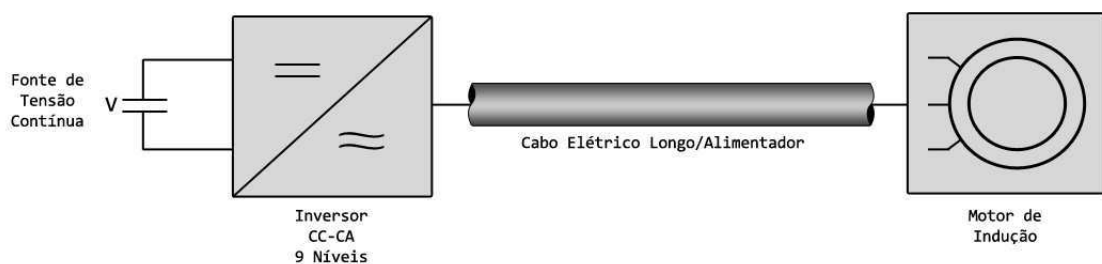


Figura 2: Diagrama Geral do Sistema a ser Simulado.

O objetivo da simulação se resume a verificar o efeito que o cabo longo causa no sistema, ou seja, a distorção causada no sinal que sai do inversor e chega aos terminais do motor.

2 Inversores

Os inversores são bastante utilizados hoje em dia. Suas aplicações são inúmeras e estão tão presentes no nosso dia a dia que não nos damos conta da sua importância. As aplicações variam desde simples fontes de tensão para computadores até acionamentos de motores que é o caso estudado nesse trabalho.

Uma das formas elementares de um inversor pode ser construída usando a topologia ponte H como visto na Fig. 3. Também pode ser chamado de ponte completa. Também existe o conversor em meia ponte que utiliza apenas um braço como na Fig. 4, porém nos ateremos apenas ao inversor em ponte H ou ponte completa. As quatro chaves utilizadas no circuito podem ser IGBTs que são as mais utilizadas no mercado, porém outros tipos de dispositivos podem ser usados. Basicamente as chaves são controladas de forma a gerar dois níveis de tensão na saída a partir de uma fonte de tensão contínua. Quando as chaves S1 e S2 estão fechadas, a corrente flui pela carga no sentido positivo da fonte de tensão colocando V_d na saída. Por outro lado, quando as chaves S3 e S4 estão fechadas, a corrente flui pela carga no sentido negativo da fonte de tensão colocando assim $-V_d$ na saída.

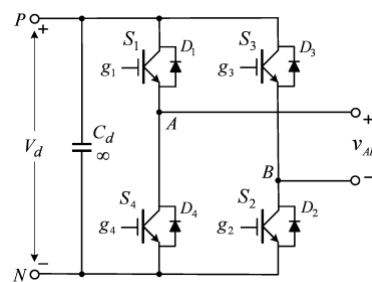


Figura 3: Circuito esquemático de um inversor em ponte H.[2]

Dependendo da técnica aplicada para controlar o chaveamento, pode-se gerar até três níveis de tensão com este circuito. Isso acontece quando fechamos as chaves S1 e S3 ou S2 e S4, curtcircuitando a carga e colocando deste modo tensão nula na saída.

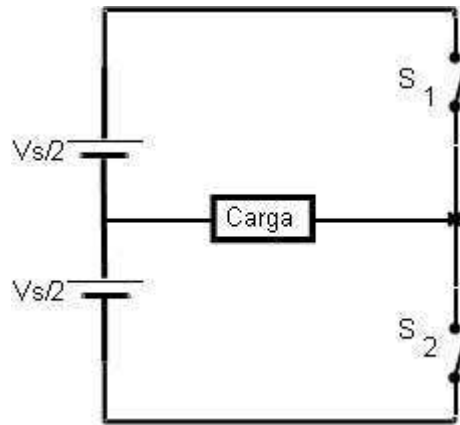


Figura 4: Circuito esquemático de um inversor em meia ponte.

2.1 Técnicas de Chaveamento

Existem inúmeras técnicas de controle das chaves de um inversor. Todas as técnicas possuem o mesmo objetivo que é gerar uma tensão alternada na saída a partir do chaveamento de uma fonte de tensão contínua. No presente estudo iremos nos reter apenas na técnica conhecida como modulação multiportadora com deslocamento de nível já que não é o foco do trabalho analisar tais técnicas. A técnica se baseia na geração de sinais de controle a partir de outra técnica conhecida como PWM senoidal que será discutida a seguir.

2.1.1 PWM Senoidal

A técnica PWM senoidal tem como objetivo gerar sinais PWM (*Pulse Wave Modulation*) e aplicá-los nas entradas de controle das chaves.

Cada chave receberá um sinal diferenciado que é gerado simplesmente comparando-se uma onda senoidal (modulante) com uma onda triangular (portadora) como mostrado na Fig. 5. As duas curvas são sobrepostas e enquanto a amplitude da senóide for maior que a amplitude da onda triangular, o sinal resultante será um nível alto, caso contrário será um nível baixo, gerando assim o sinal PWM. A Fig. 6 é bastante explicativa.[3]

O sinal gerado v_{g1} é aplicado a uma chave (S1) enquanto que v_{g2} , complemento de v_{g1} é aplicado a outra chave (S3). Para realizarmos o controle das outras duas chave, basta aplicarmos a mesma técnica com a senóide defasada de 180° . Essa é a forma bipolar.

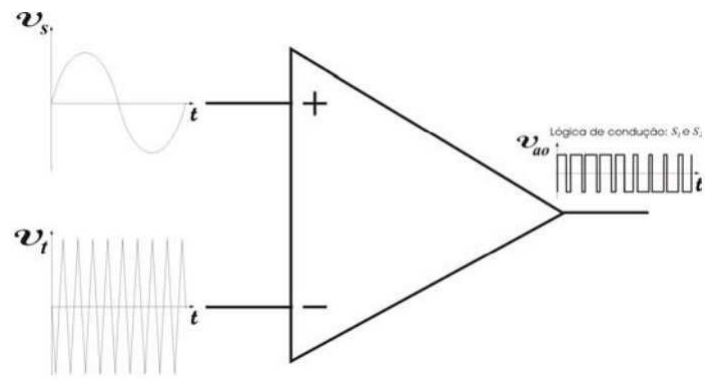


Figura 5: Diagrama de circuito para aplicação em modulação senoidal.[3]

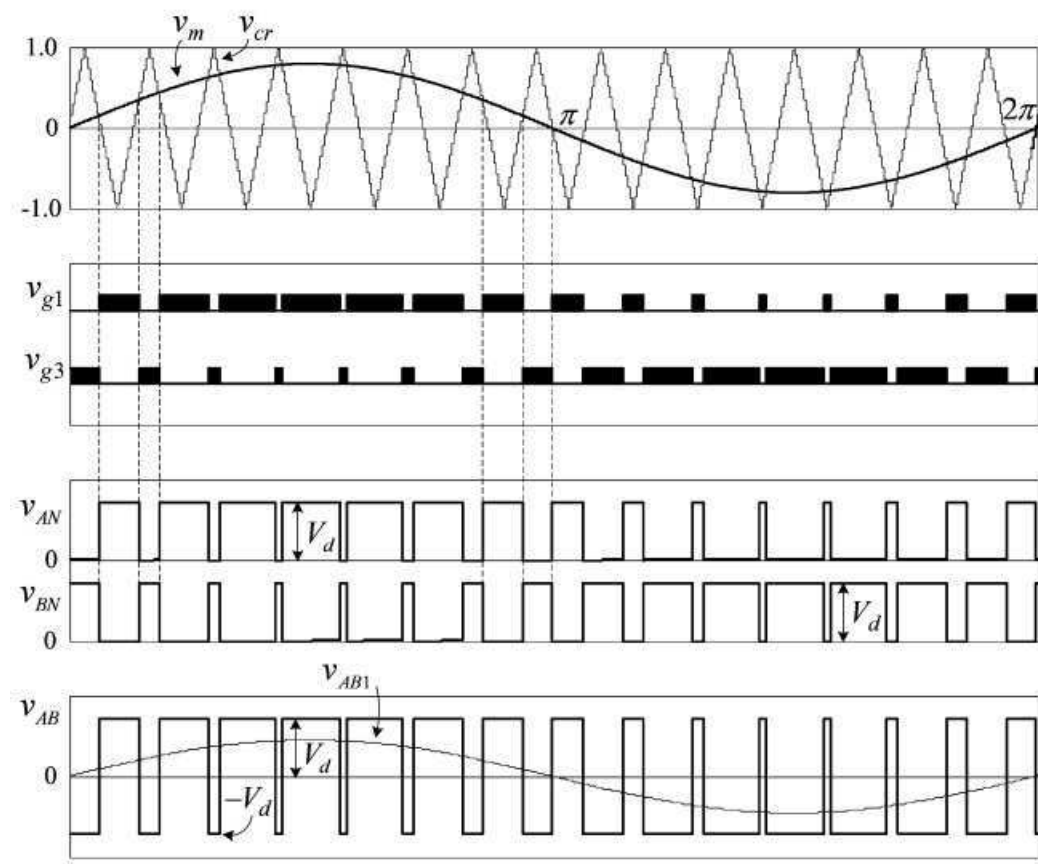


Figura 6: Formas de onda geradas a partir da técnica PWM senoidal.[2]

Existe também outra alternativa que consiste em defasar a onda triangular ao invés da senóide, a qual chamamos de unipolar.[2]

O sinal de saída do inversor ao aplicarmos esse tipo de modulação pode ser visto na Fig. 7.

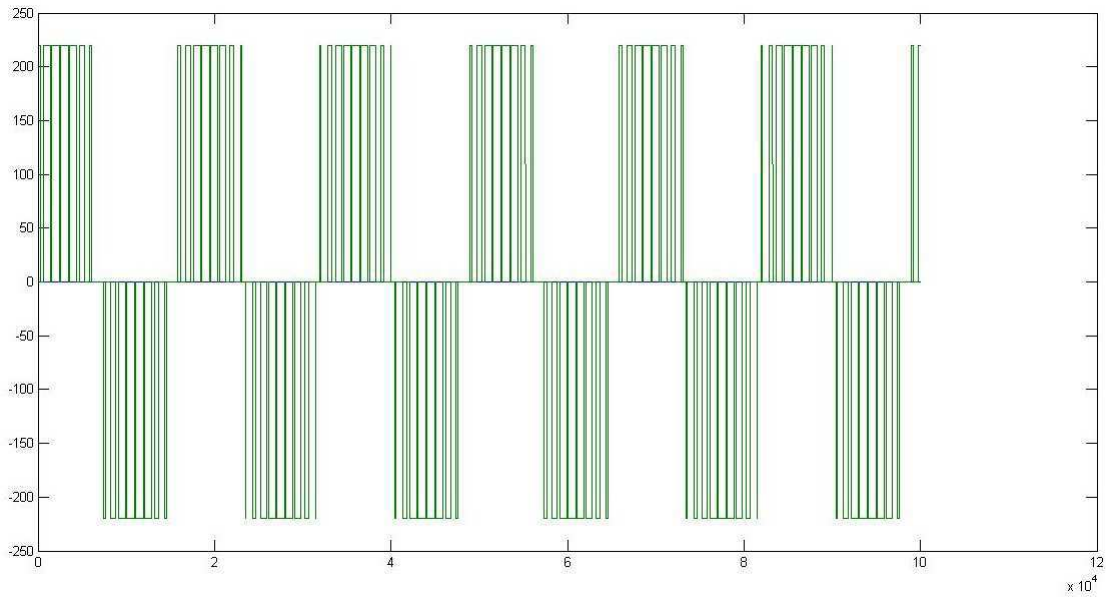


Figura 7: Sinal de saída do inversor monofásico ao aplicarmos a modulação PWM senoidal.[2]

2.1.2 Modulação Multiportadora com Deslocamento de Nível

Essa técnica só é aplicada quando colocamos inversores em cascata. Utilizando várias pontes H em cascata, podemos obter uma tensão na saída mais aproximada de uma senóide reduzindo assim os harmônicos do mesmo. Como desejamos controlar mais de quatro chaves, como no caso de dois inversores em cascata, no qual temos oito chaves, precisamos de mais sinais de controle. A técnica utiliza várias portadoras e uma única senóide. Todas as portadoras possuem a mesma frequência, fase e amplitude pico a pico, porém cada uma se encontra em um nível diferente não ultrapassando a amplitude pico a pico da modulante. A Fig. 8 demonstra de forma clara a aplicação do método.

2.2 Inversor Trifásico PWM

O inversor trifásico na verdade é um conjunto de três inversores, no qual cada um gera uma fase da tensão trifásica. Como visto anteriormente, a frequência e fase do sinal de saída são determinadas pelo sinal modulante aplicado no controle das chaves. Deste modo, como precisamos gerar três sinais defasados de 120° um do outro, basta que a modulante que controla cada inversor possua a mesma defasagem. A Fig. 9 representa um inversor trifásico. Outra forma de se obter a tensão trifásica é apenas utilizando três

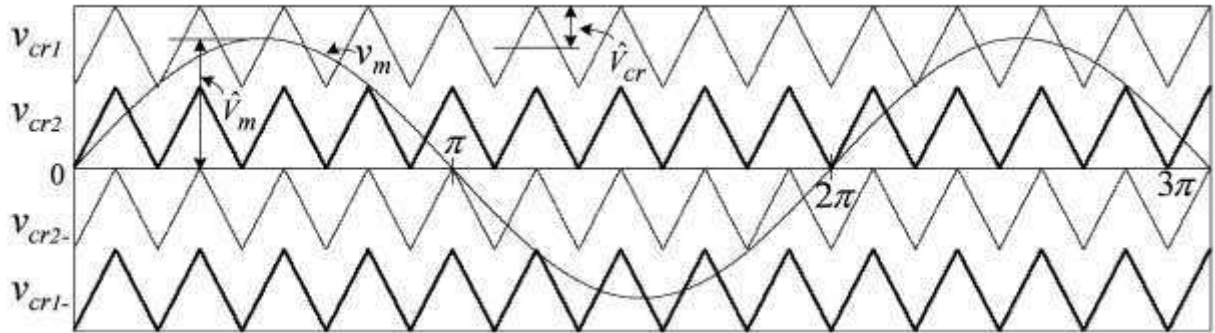


Figura 8: Modulação multiportadora com deslocamento de nível para um inversor de cinco níveis.[2]

braços em um só inversor ao invés de três inversores em ponte H como mostra a Fig. 10. Nesse caso, o controle da chave é feito da mesma forma.

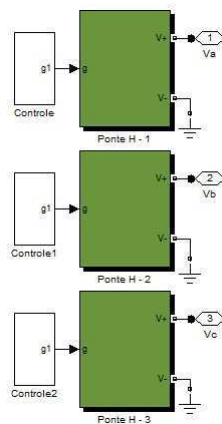


Figura 9: Diagrama de circuito para gerar tensão trifásica utilizando três inversores em ponte H.

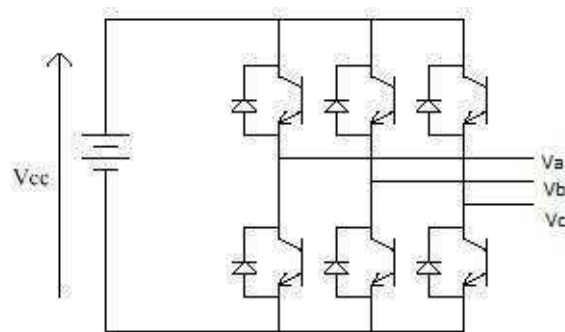


Figura 10: Diagrama de circuito para gerar tensão trifásica utilizando um único inversor.

2.3 Inversor Multinível Monofásico PWM

Como visto anteriormente, a saída do inversor possui apenas dois níveis de tensão e em alguns casos a depender do controle utilizado, podemos obter três níveis. Sendo assim, podemos utilizar um filtro passa-baixa na saída do mesmo para extrairmos a senóide pura que é o que desejamos no final de tudo. Sabemos que filtros não são sempre a melhor opção devido aos diversos problemas que surgem devido a sua utilização, como por exemplo a injeção de harmônicos no sinal. Uma das soluções que existem para contornar esse problema consiste em construirmos circuitos mais complexos afim de obtermos não apenas três níveis na saída, mas quantos níveis desejarmos. Quanto mais níveis adicionamos na nossa saída, mais o sinal se aproxima de uma senóide, o que nos trás diversos benefícios.

Existem várias topologias em estudo para se obter um inversor multinível. Abordaremos aqui apenas a que iremos utilizar no trabalho já que ela cumpre com os requisitos desejados para realizarmos o experimento. Essa topologia consiste em colocarmos inversores em ponte H em cascata como representado pela Fig. 11.

Podemos colocar quantos inversores desejarmos em cascata. Quanto mais inversores, mais próximo de uma senóide será nossa saída. uma fórmula básica para sabermos quantos níveis de saída teremos em função do números de inversores em cascata é:

$$N = 2H + 1$$

Onde,

- N = Quantidade de níveis na saída;
- H = Quantidade de inversores em ponte H em cascata.

Para realizarmos o controle das chaves de um inversor em cascata, utilizaremos a técnica já discutida anteriormente, Modulação Multiportadora com Deslocamento de Nível.

2.3.1 Simulação

Com o auxílio da ferramenta Simulink do Matlab, simulamos um sistema de inversores em cascata com quatro pontes H gerando 9 níveis na saída. A Fig. 12 representa o diagrama de blocos gerado para a simulação.

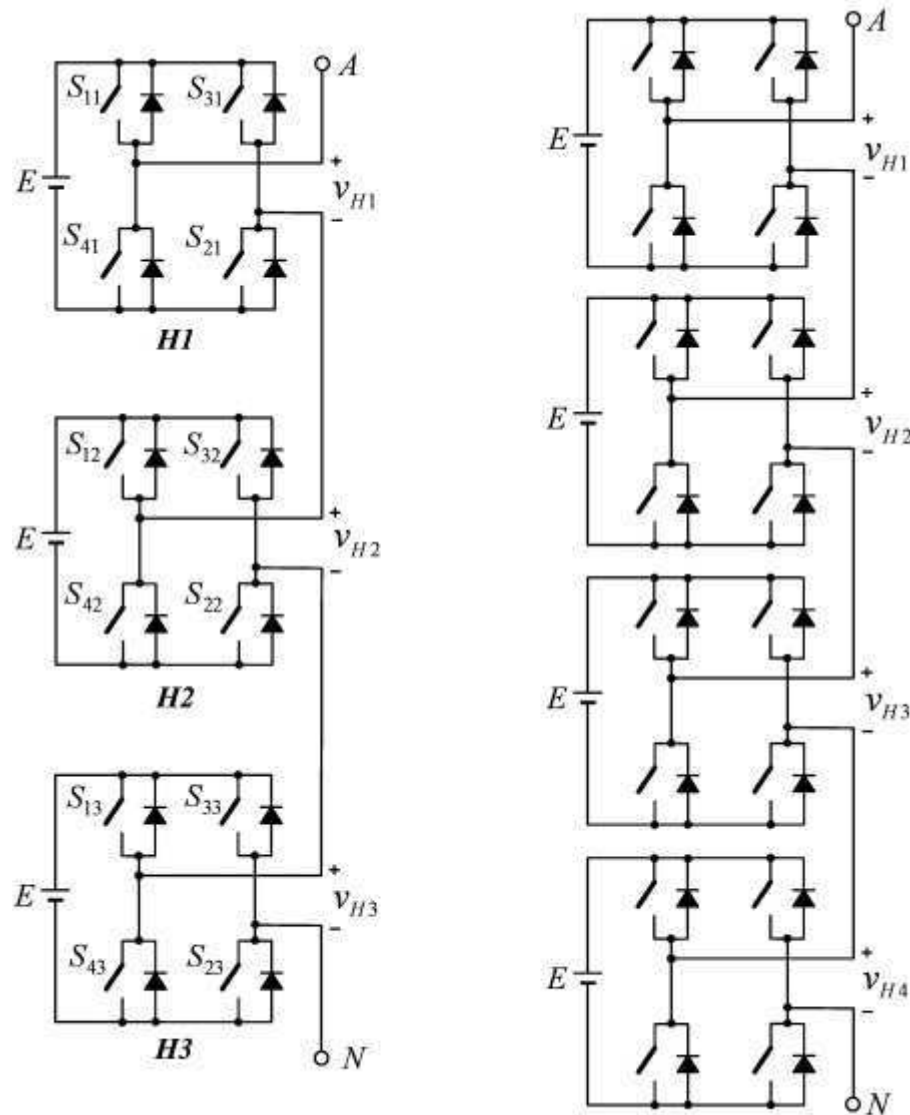


Figura 11: Diagramas de inversores em cascata. O diagrama da esquerda produz sete níveis e o da direita nove níveis.[2]

O bloco de controle em vermelho tem como função gerar os sinais que controlam todas as chaves do sistema. Uma fórmula simples para sabermos o número de chaves utilizadas no sistema em cascata é dada por: $N_{sw} = 6(N - 1)$. Seu diagrama de blocos pode ser visto na Fig. 13 e os sinais gerados por ele na Fig. 14.

O bloco verde da Fig. 12 é o inversor em ponte H e seu diagrama está representado pela Fig. 15.

Com o sistema simulado na Fig. 12 obtivemos na saída do inversor o sinal da Fig. 16.

Para configurar o sistema utilizamos os seguintes dados:

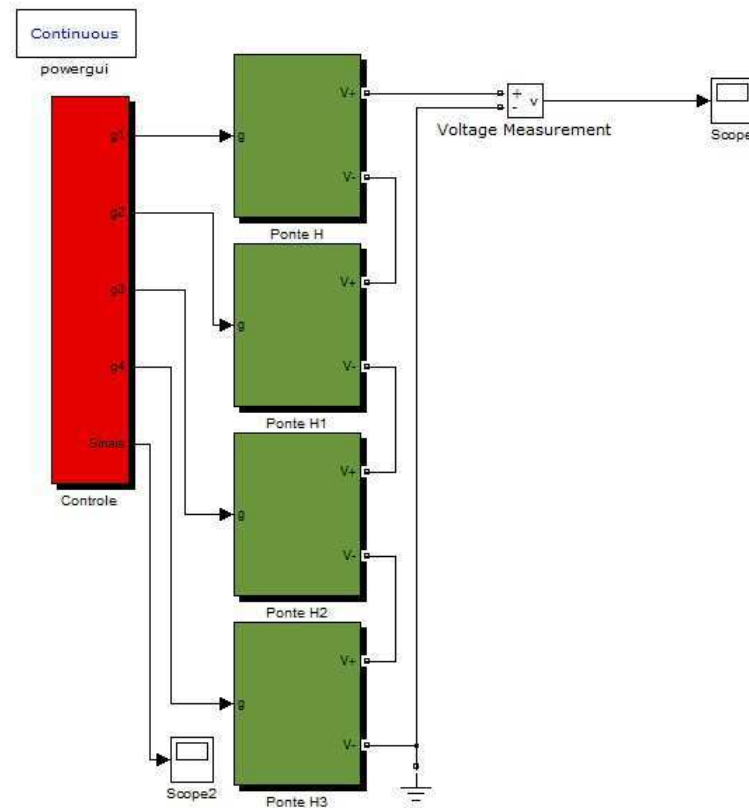


Figura 12: Diagrama de blocos de um inversor em cascata de nove níveis projetado no Simulink.

- Índice de modulação de amplitude = 0.9;
- Frequência de chaveamento = 1,5KHz;
- Tensão Contínua E_d de alimentação do inversor = 220V;
- Frequência da modulante = 60Hz.

2.4 Inversor Multinível Trifásico PWM

Para o inversor multinível trifásico, utilizamos a mesma teoria discutida na seção 2.2. Colocamos três inversores em cascata apresentado na seção 2.3 de modo que cada um é responsável por uma fase. A única modificação que precisamos fazer é alterar a fase da modulante em cada inversor. O primeiro inversor em cascata terá uma senóide defasada de 0° , o segundo inversor terá uma senóide defasada de 120° e o terceiro uma senóide defasada de 240° .

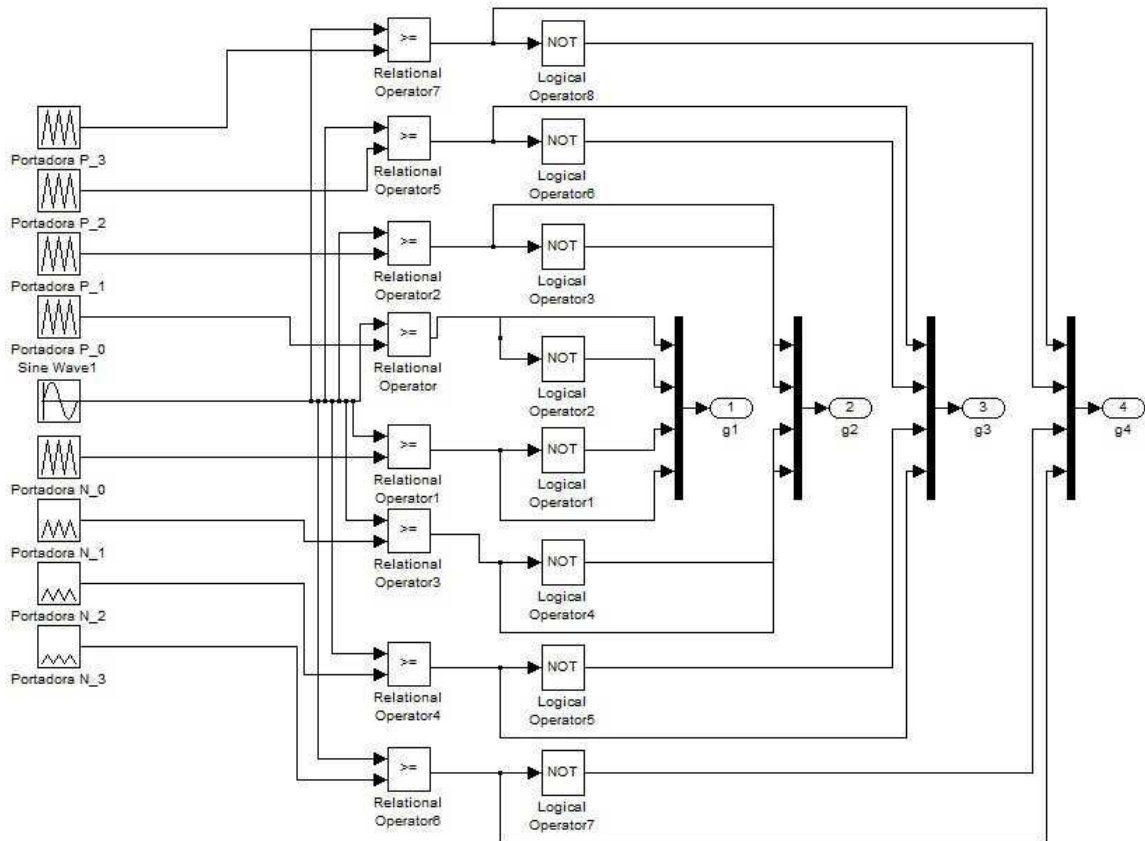


Figura 13: Diagrama de blocos que gera os sinais de controle para inversor em cascata de nove níveis.

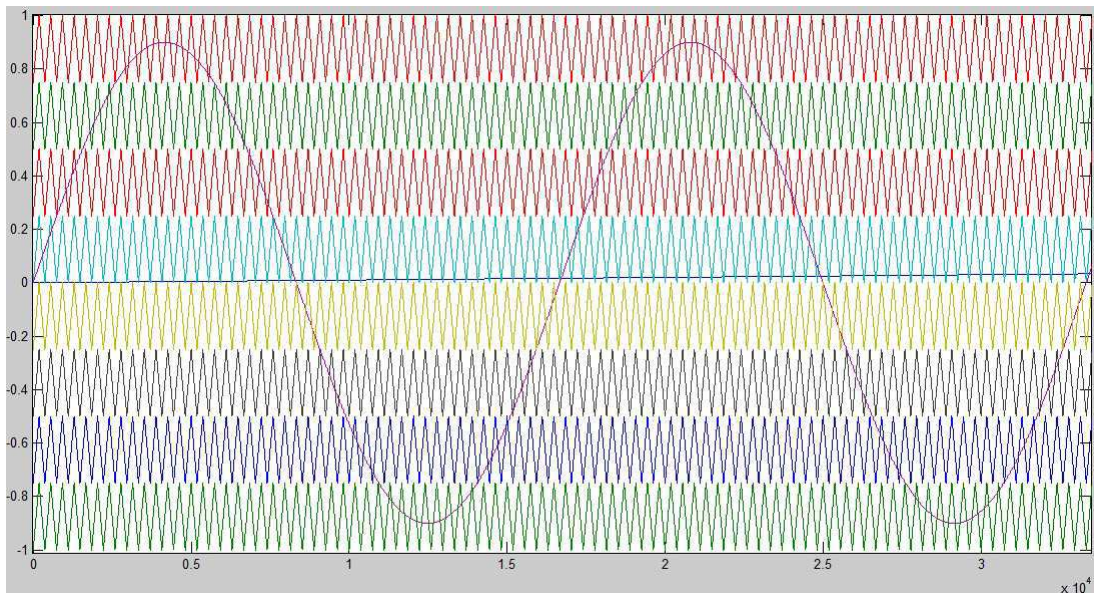


Figura 14: Sinais gerados pelo bloco de controle.

Esse é o tipo de inversor que iremos utilizar na simulação completa do sistema ao

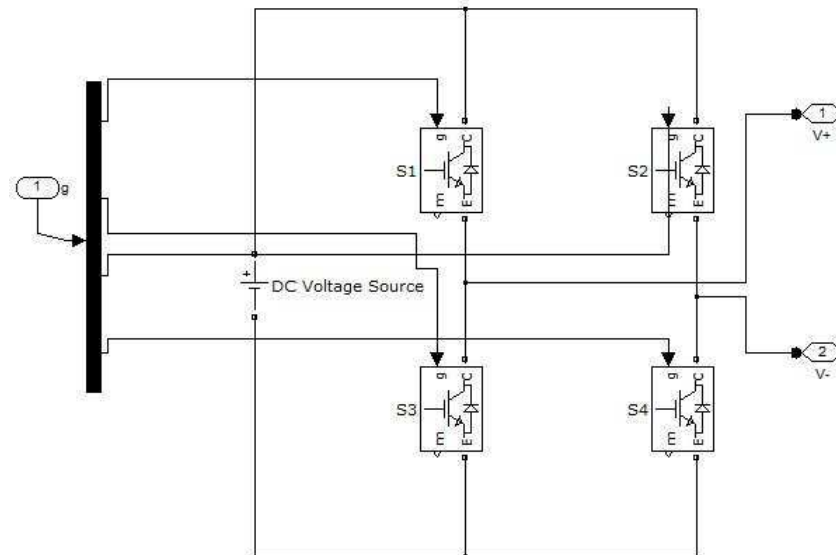


Figura 15: Diagrama de blocos do inversor em ponte H da Fig. 12.

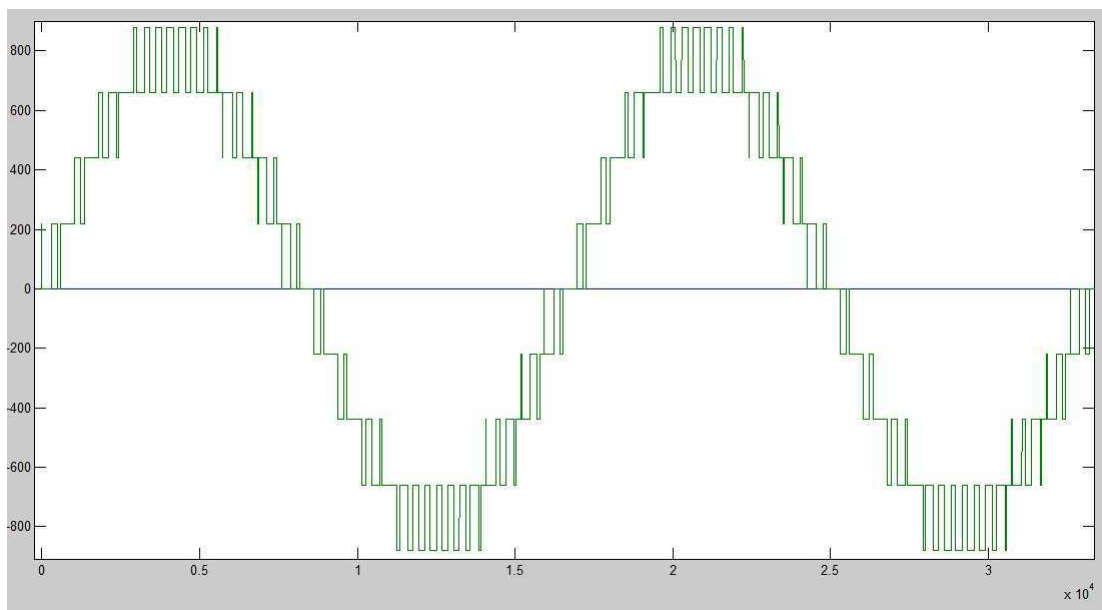


Figura 16: Saída do inversor da Fig. 12.

final deste trabalho. O porquê de escolhermos o inversor multinível ao invés de um mais simples será abordado mais adiante. Porém, precisamos saber que o principal fundamento para o uso de um inversor multinível é que para o contexto em que ele está inserido (acionamentos e controle de velocidade de bombas centrífugas submersas) é necessária elevada potência devido ao grande porte do motor. Nesse caso, precisa-se de tensões muito altas para alimentar o motor o que implica diretamente na tensão contínua que será chaveada. Teremos que chavear uma tensão muito alta no inversor e os dispositivos

utilizados, como os IGBT's, não suportam tais tensões.

Usar um inversor multinível em cascata possibilita distribuímos a tensão contínua em cada inversor do conjunto fazendo com que cada um receba uma tensão menor, entretanto, na saída do sistema o pico de tensão resultante será a soma de cada tensão aplicada nos inversores do conjunto em cascata. Desse modo, temos um alívio na tensão chaveada em cada dispositivo.

2.4.1 Simulação

A Fig. 17 representa o diagrama de blocos criado no Simulink para simular um inversor multinível trifásico.

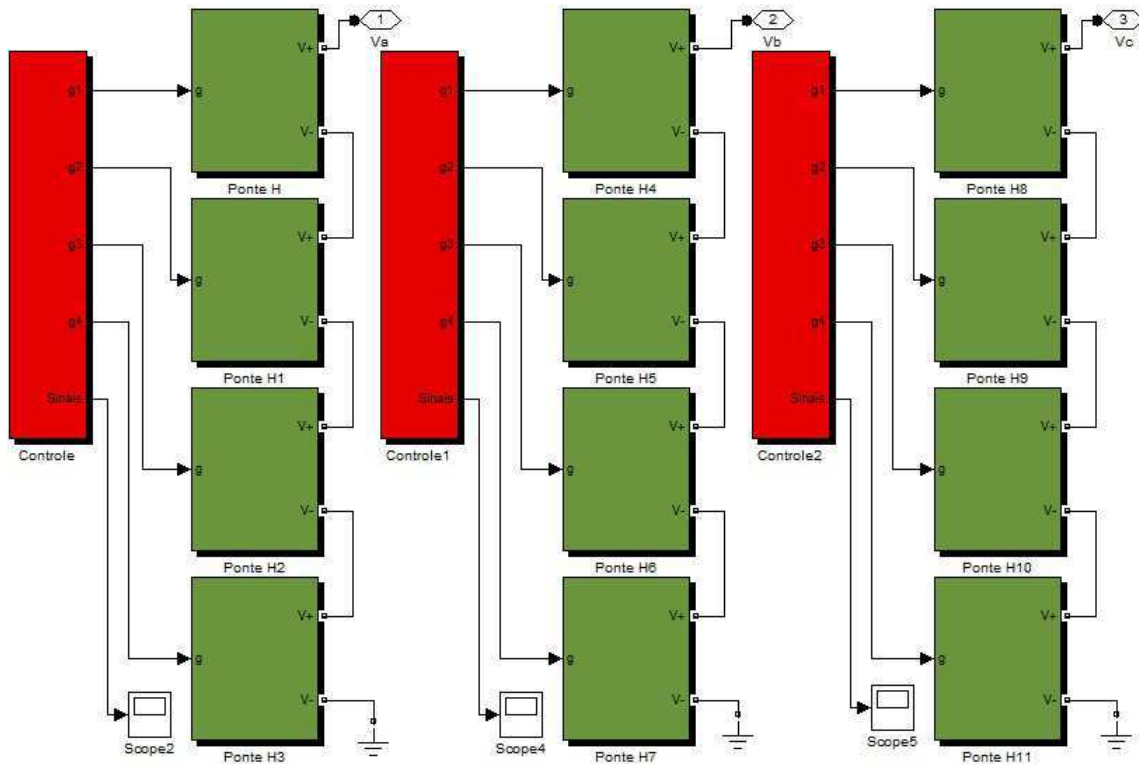


Figura 17: Diagrama de blocos de um inversor trifásico de nove níveis projetado no Simulink.

Os blocos em vermelho e verde são os mesmos apresentados na seção 2.3.1. Temos agora nas saídas as tensões V_a , V_b e V_c de um sistema trifásico, as mesmas estão representadas pela Fig. 18.

Para configurar o sistema utilizamos os seguintes dados:

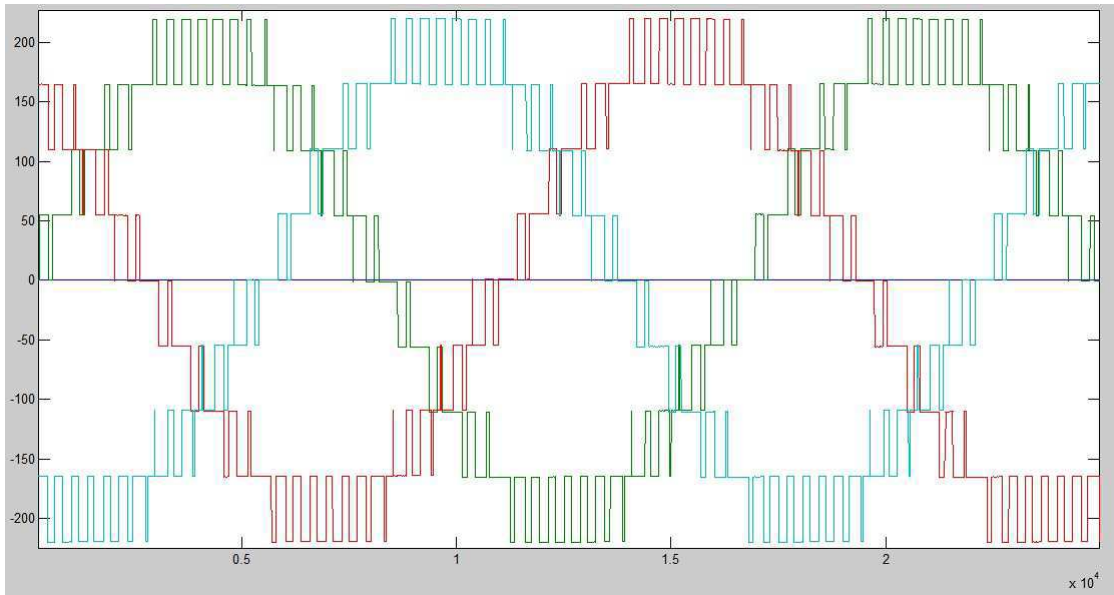


Figura 18: Saída do inversor da Fig. 17

- Índice de modulação de amplitude = 0.9;
- Frequência de chaveamento = 1,5KHz;
- Tensão Contínua E_d de alimentação do inversor = 220V;
- Frequência de todas as modulantes = 60Hz;
- Fase da modulante do bloco controle = 0° ;
- Fase da modulante do bloco controle1 = 120° ;
- Fase da modulante do bloco de controle2 = 240° .

3 Distorções em Sinais Causadas por Cabos Longos

Precisamos gerar um sinal alternado a partir de um sinal contínuo. Quanto mais esse sinal alternado se aproxima de uma senóide, menos harmônicos são injetados na rede beneficiando assim o motor como veremos mais adiante. Os harmônicos gerados pelo inversor podem produzir diversos fenômenos indesejáveis como: interferência eletromagnética em outros equipamentos, efeitos torsionais no eixo do motor, super-aquecimento, ressonância mecânica no eixo e fadiga mecânica.[5]

Ao utilizarmos um conversor multinível, aproximamos o sinal gerado de uma senóide, o que causa a diminuição e até eliminação de alguns harmônicos. Quando um longo alimentador está envolvido no sistema de acionamento, o conteúdo harmônico na tensão e na corrente é aumentado. Interações entre o alimentador e o inversor geram oscilações de tensão no motor e podem até criar ressonâncias no sistema. Dependendo das características do acionamento, estas oscilações podem danificar os enrolamentos estatóricos. Os harmônicos ainda são responsáveis pelo aumento de temperatura no cabo e no motor, e por um decréscimo na eficiência total.[6]

Deste modo, o uso de um inversor multinível (quanto mais níveis, melhor) já se apresenta como uma maneira de contornar os problemas causados com o uso de cabos longos. A figura 19 apresenta a FFT da tensão na saída de um inversor de três níveis com frequência fundamental em $60Hz$ e frequência de chaveamento em $1500Hz$. Podemos verificar a presença de alguns harmônicos em torno da frequência de chaveamento e ainda outros espalhados pelo espectro. Já na figura 20, que representa a FFT da tensão da saída de um inversor de nove níveis, não apresenta tantos harmônicos quanto o primeiro caso.

3.1 Efeito de Reflexão

Problemas de sobretensão em unidades que utilizam cabos longos tem se tornado grande objeto de estudo na última década. Esse problema é causada devido ao curto

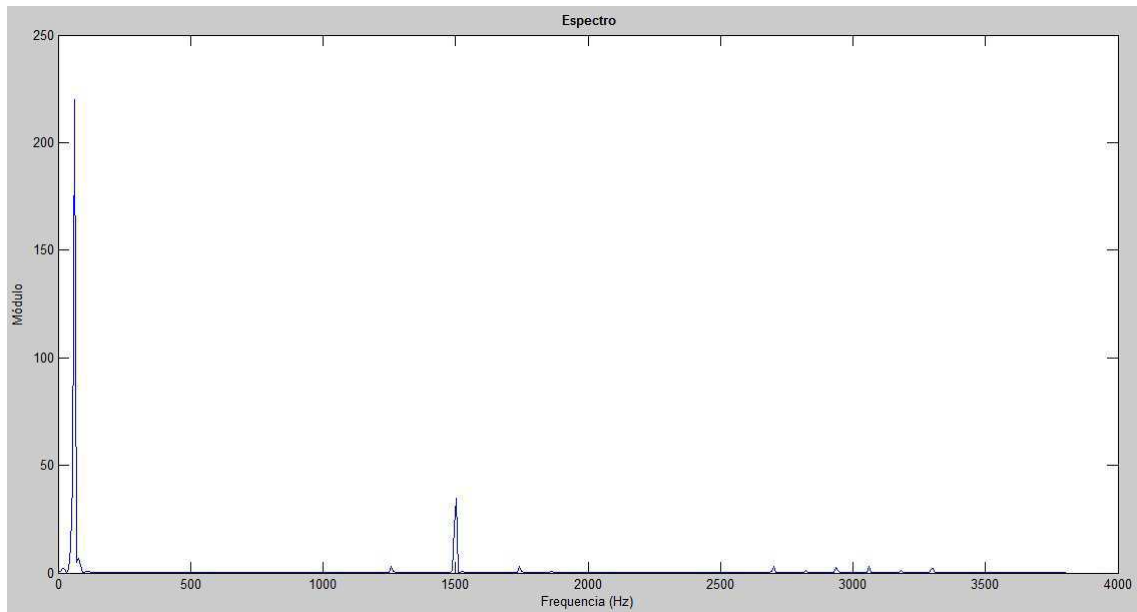


Figura 19: Espectro de tensão da saída de um inversor de 2 níveis.

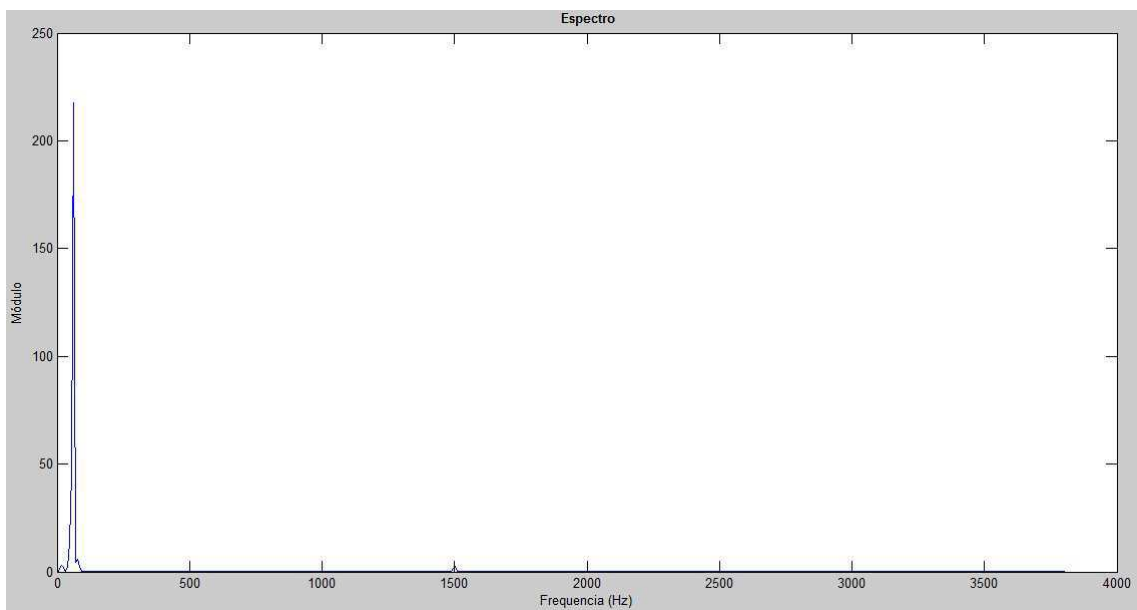


Figura 20: Espectro de tensão da saída de um inversor de 9 níveis.

tempo de subida dos pulsos gerados pelo inversor. O fenômeno de sobretensão pode ser explicado pelo fenômeno de reflexão de ondas: um pulso de tensão gerado pelo inversor viaja pelo cabo até chegar ao motor e devido a uma incompatibilidade entre a impedância característica do cabo e do motor, uma parcela desse pulso é refletida de volta para o inversor. Entretanto, a magnitude da sobretensão depende do tempo de subida do pulso e das características do cabo.[7]

Estudos indicam que se o pulso demorar mais que a metade do tempo de subida para viajar do inversor para o motor, a reflexão será total e a amplitude do pulso será dobrada.[8]

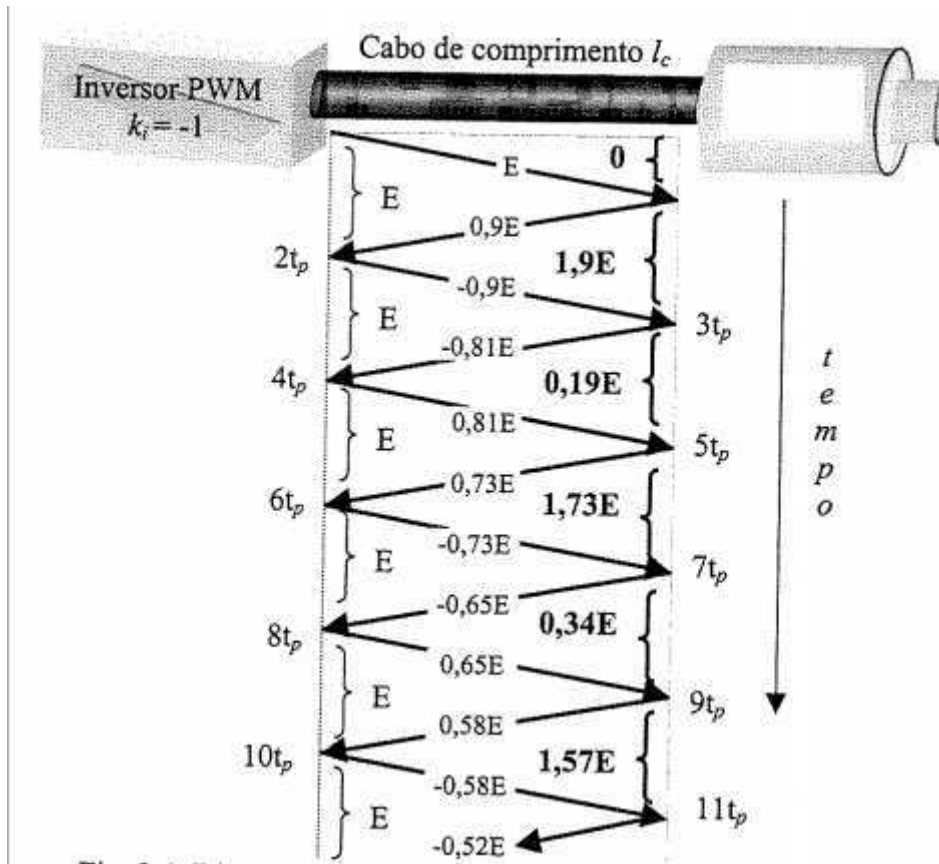


Figura 21: Diagrama espaço-tempo.[1]

O diagrama da Fig. 21 representa um diagrama espaço-tempo e é bastante útil para se compreender o fenômeno. A distância é indicada horizontalmente e tem valor igual ao comprimento do cabo. O tempo é indicado na vertical de forma discreta e múltiplo do tempo de propagação da onda no cabo (t_p). A letra E representa a tensão na saída do inversor e em negrito a tensão resultante nos terminais do motor não levando em consideração as perdas do cabo. Nas setas, tempos a porção do sinal que foi refletida.

O gráfico da Fig. 22 foi obtido a partir do diagrama espaço tempo e mostra como se comporta a tensão nos terminais do motor levando em consideração o efeito de reflexão. A oscilação gerada na tensão é alternada e a frequência com que ela oscila é chamada de frequência natural do cabo, f_0 .

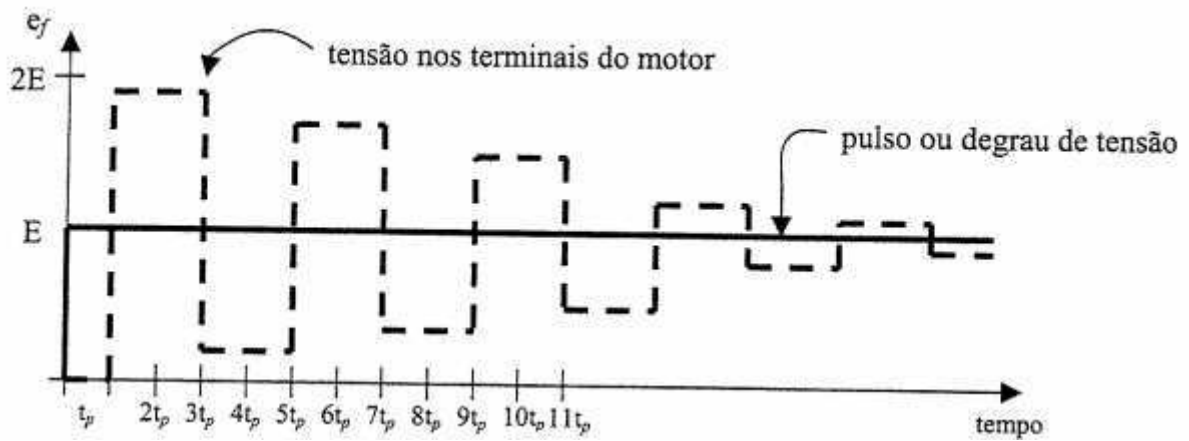


Figura 22: Tensão nos terminais do motor.[1]

3.2 Efeito Pelicular

O efeito pelicular é a tendência que a corrente tem de circular mais intensamente na superfície de um condutor elétrico. Esse efeito é proporcional à intensidade da corrente, logo quanto maior for a corrente que circula no condutor, mais ela tenderá a circular pela superfície do mesmo. O efeito também varia com a frequência da corrente e as características magnéticas do cabo. A consequência desse efeito é o aumento da resistência interna do condutor devido a diminuição da área de condução do mesmo quando a corrente flui mais pela superfície.

4 Cabos Longos

Existem diversos cabos que são utilizados no acionamento de motores. Eles geralmente são do tipo tubulação.[5]

Para o caso específico de longos cabos que necessitam de proteção especial por estarem em ambientes hostis, como no corrente estudo em que necessita-se acionar um motor submerso a distâncias que vão de um a cinco quilômetros e em alguns casos até mais, utilizam-se cabos submarinos trifásicos especialmente projetados para trabalharem nessa profundidade.

Em poços de até 100m de lâmina d'água, utilizam-se cabos de 1km de comprimento devido a distância da plataforma para o poço. Para os casos de águas profundas com lâmina d'água superior a 1000m, o cabo pode chegar a dezenas de quilômetros, a depender da localização do poço e da plataforma.

Devido a alta capacitância distribuída no cabo, o uso de inversores podem causar sobretensões aumentando o desgaste da isolação do motor.[5] Esse assunto já foi discutido anteriormente e representa o maior fator de distorção do sinal enviado para o motor.

Para simularmos o sistema e tornar possível a verificação dessas distorções, é necessário que tenhamos um modelo matemático que represente de forma aproximada as características de um longo condutor.

Até o presente, não existem modelos específicos para esse tipo de estudo. A solução encontrada foi representar os cabos longos a partir de modelos já existentes das linhas de transmissão aéreas.

4.1 Modelo de Cabo Longo

Como dito anteriormente, a teoria das linhas de transmissão pode ser utilizada para determinarmos os parâmetros necessários para se ter um modelo de cabo longo. Uma linha de transmissão pode ser modelada encontrando-se os parâmetros ABCD. Esses parâmetros são bastante conhecidos na eletrotécnica e são encontrados montando-se as equações de

tensão e corrente, 4.1 e 4.2, respectivamente, que circulam pela linha.

$$V = V_R \left(\cosh(\gamma d) + \frac{Z_0}{Z_R} \sinh(\gamma d) \right) \quad (4.1)$$

$$I = I_R \left(\cosh(\gamma d) + \frac{Z_R}{Z_0} \sinh(\gamma d) \right) \quad (4.2)$$

Podemos assim definir os parâmetros ABCD como sendo:

$$ABCD_{cabo} = \begin{pmatrix} A & C \\ B & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma d) & Z_0 \sinh(\gamma d) \\ \sinh(\gamma d)/Z_0 & \cosh(\gamma d) \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

onde:

- d = comprimento do cabo;
- $\gamma = \sqrt{ZY}$;
- $Z_0 = \sqrt{Z/Y}$.

A matriz ABCD representa o circuito da Fig. 23, que é um modelo para uma linha de dois fios proposta por [1] que também desenvolveu todos os cálculos necessários para se chegar ao modelo.

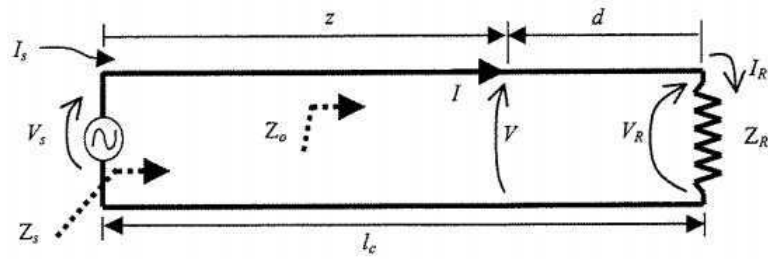


Figura 23: Modelo de circuito para uma linha a dois fios.[1]

Para simularmos tal modelo no Simulink, fizemos uso do bloco *Distributed Parameters Line*, Fig. 24, que representa uma linha de transmissão que consideram todos os efeitos discutidos no presente trabalho. Para utilizá-lo, é necessário se obter os parâmetros de sequência positiva e de sequência zero. Para um cabo de $4mm^2$ e 1km de comprimento, utilizou-se os parâmetros da tabela 4.1.

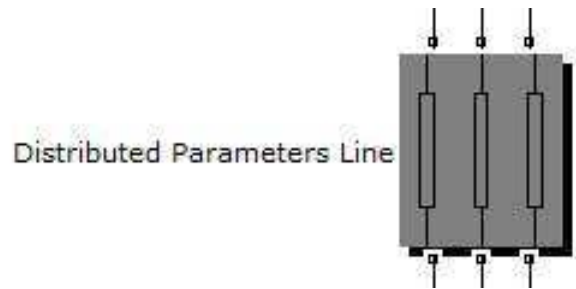


Figura 24: Bloco *Distributed Parameters Line* do simulink.

Tabela 4.1: Parâmetros do cabo para simulação com a ferramenta simulink.[1]

Parâmetros do Cabo	Resistência [Ω/km]	indutância [H/km]	Capacitância [C/km]
Sequência Positiva	5	536e-06	106e-09
Sequência Zero	10	5360e-06	212e-09

5 Simulação do Sistema Completo Utilizando a Ferramenta Simulink

O sistema completo a ser simulado está representado pelo diagrama da Fig. 2. Os dados utilizados na simulação estão especificados logo abaixo.

Parâmetros do Inversor:

- Frequência da Portadora/Frequência de Chaveamento(f_c) = $1kHz$;
- Frequência da Modulante(f_m) = $60Hz$;
- Índice de Modulação de Amplitude(m_a) = 0,9;
- Tensão de Alimentação do Inversor = $55V$;

Parâmetros do Motor:

- Tipo: Motor de Indução;
- Potência: 150HP;
- Tensão Nominal: 460V;
- Frequência: 60Hz;
- Velocidade de Rotação Nominal: 1785rpm;
- Tipo do Rotor: Gaiola de Esquilo;
- Resistência do Estator: 0,0302;
- Indutância do Estator: 0,000283;
- Resistência do Rotor: 0,01721;
- Indutância do Rotor: 0,000283;
- Indutância Mútua: 0,01095;

- Inércia($J(kg.m^2)$): 2;
- Atrito ($F(N.m.s)$): 0,02154;
- Pares de Pólos: 2;

Parâmetros do Cabo:

- Número de Fases: 3;
- Frequência: 60Hz;
- Ohms/km sequência positiva: 0,057;
- Ohms/km sequência zero: 1,14;
- H/km sequência positiva: 360e-06;
- H/km sequência zero: 3600e-06;
- F/km sequência positiva: 160e-09;
- F/km sequência zero: 360e-09;
- Comprimento da Linha: 1km;

A Fig. 25 apresenta o diagrama completo do sistema simulado nesse trabalho utilizando a ferramenta do Matlab, Simulink. Os subsistemas que representam o inversor na cor verde e o cabo longo na cor cinza já foram apresentados anteriormente

5.1 Resultados Obtidos

Os resultados obtidos se resumem basicamente à tensão nos terminais do motor. Os sinais gerados pelo inversor já foram mostrados na seção 2.4.1, entretanto faremos uma comparação entre a tensão de saída do inversor e a tensão no terminal do motor para verificarmos o efeito do cabo longo no sistema.

Após a montagem de todo o sistema da Fig. 25, a tensão na saída do inversor resultou no gráfico representado pela Fig. 26.

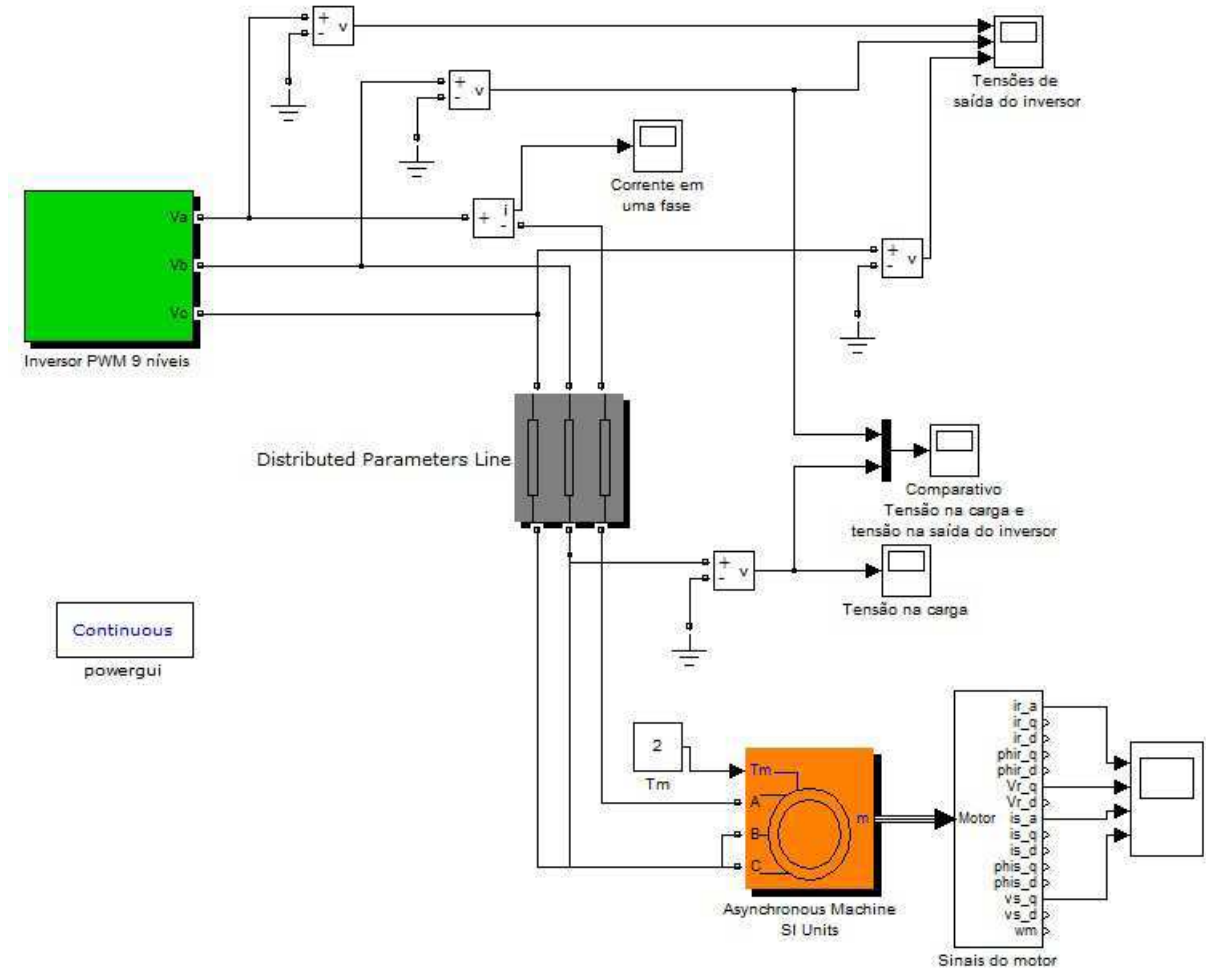


Figura 25: Diagrama de blocos completo da simulação do sistema no simulink.

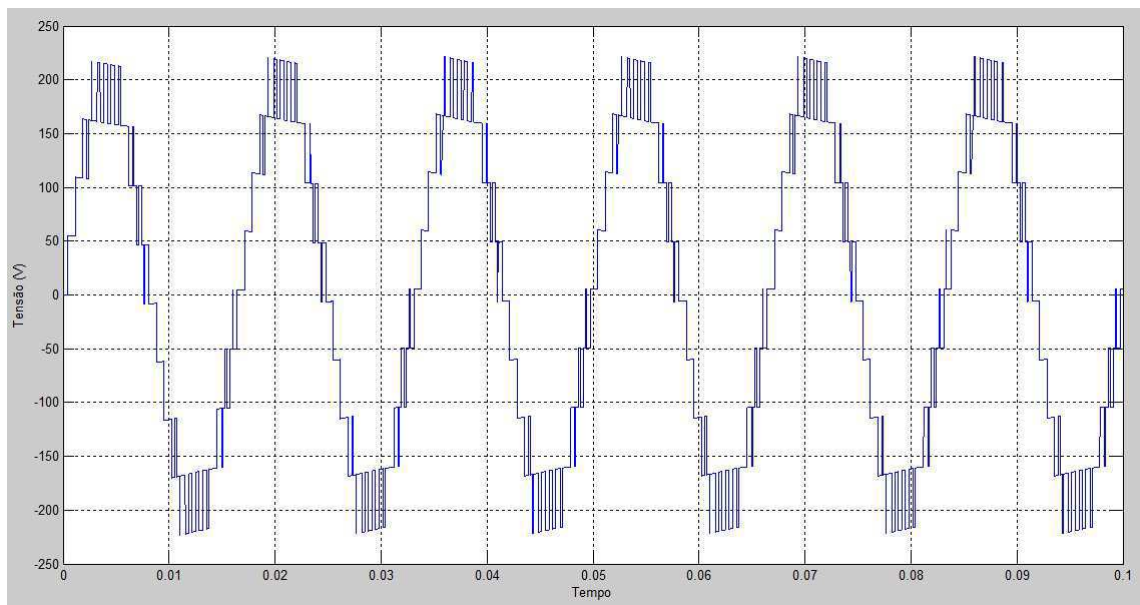


Figura 26: Tensão de saída do inversor conectado ao cabo longo e motor.

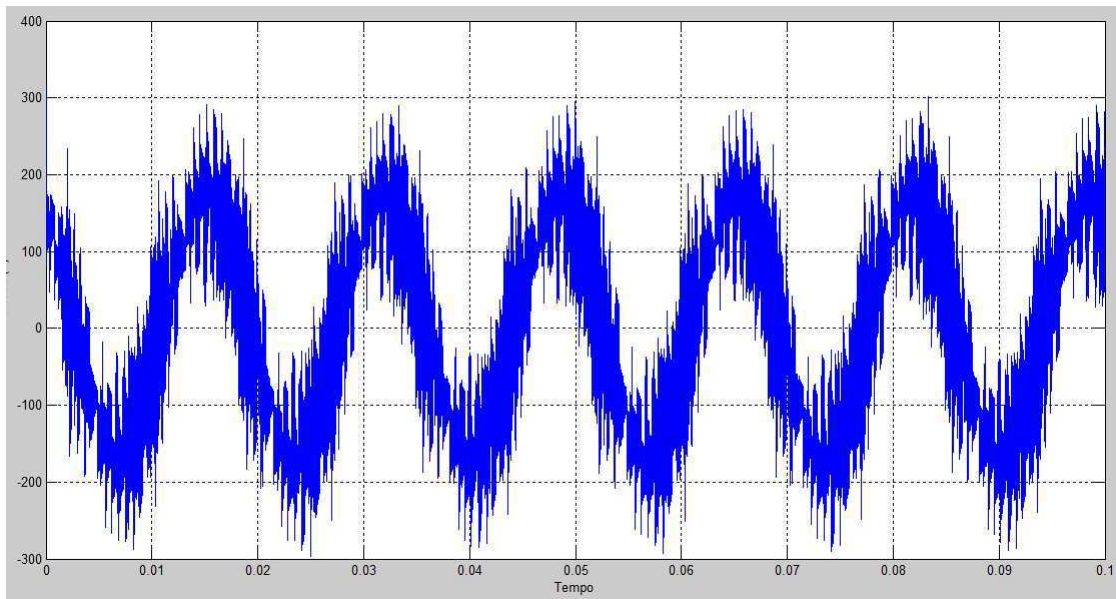


Figura 27: Tensão no terminal do motor conectado ao inversor por um cabo longo.

Podemos ver a tensão no terminal do motor no gráfico da Fig. 27 que o mesmo se apresenta bastante distorcido.

Para visualizar melhor essa distorção, o gráfico da Fig. 28 faz um comparativo entre a tensão na saída do inversor, em azul, e no terminal do motor, em vermelho. Verificamos a sobretensão causada pelo efeito de reflexão de ondas viajantes discutido anteriormente nos picos dos dois sinais. A tensão na saída do inversor é de 220V de pico e a tensão no terminal do motor atinge quase 300V.

Podemos verificar o efeito do fenômeno da reflexão de ondas viajantes de forma mais conveniente pelo gráfico da Fig. 29 que amplia o gráfico da tensão no terminal do motor. Vemos que a cada mudança de nível existe uma oscilação que vai se atenuando com o tempo devido a resistência do cabo e também redução no quantidade de reflexões ocorridas com a estabilização do nível. Essa situação permanece até que haja outra mudança de nível.

De forma a verificarmos de forma efetiva o efeito do cabo longo no sistema, podemos comparar a tensão no terminal do motor sem o cabo, gráfico superior, e com o cabo, gráfico superior na Fig. 30. Podemos ver que o sinal sem o cabo não apresenta nenhuma distorção a não ser as distorções causadas pela impedância do motor.

Fazendo agora uma análise no domínio da frequência, podemos verificar na Fig. 31 que a tensão na saída do inversor (gráfico superior) apresenta apenas harmônicos de maior

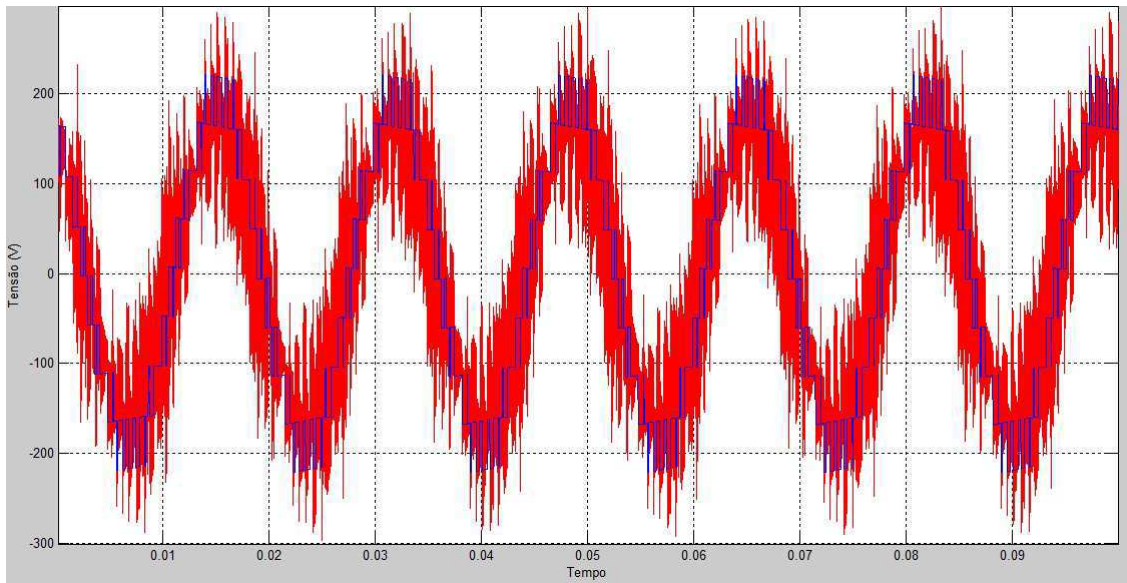


Figura 28: Comparativo entre a tensão no terminal do motor(vermelho) e na saída do inversor(azul).

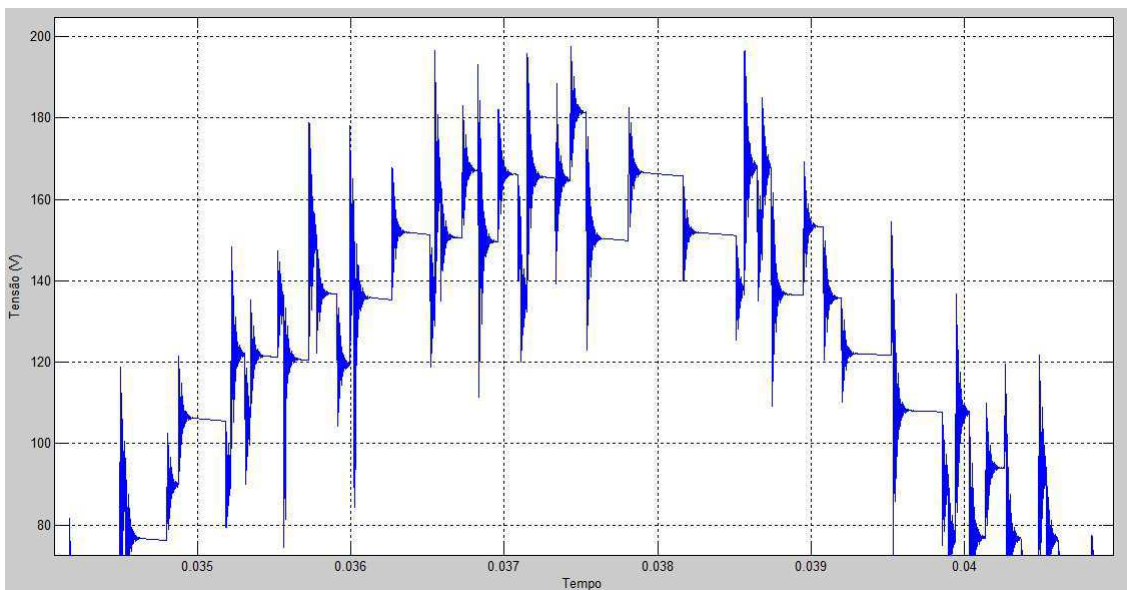


Figura 29: Gráfico ampliado da tensão nos terminais do motor.

relevância em torno da frequência de chaveamento ($1000Hz$), enquanto que no terminal do motor (gráfico inferior), além da presença de harmônicos na frequência de chaveamento, há também harmônicos em torno de $24kHz$.

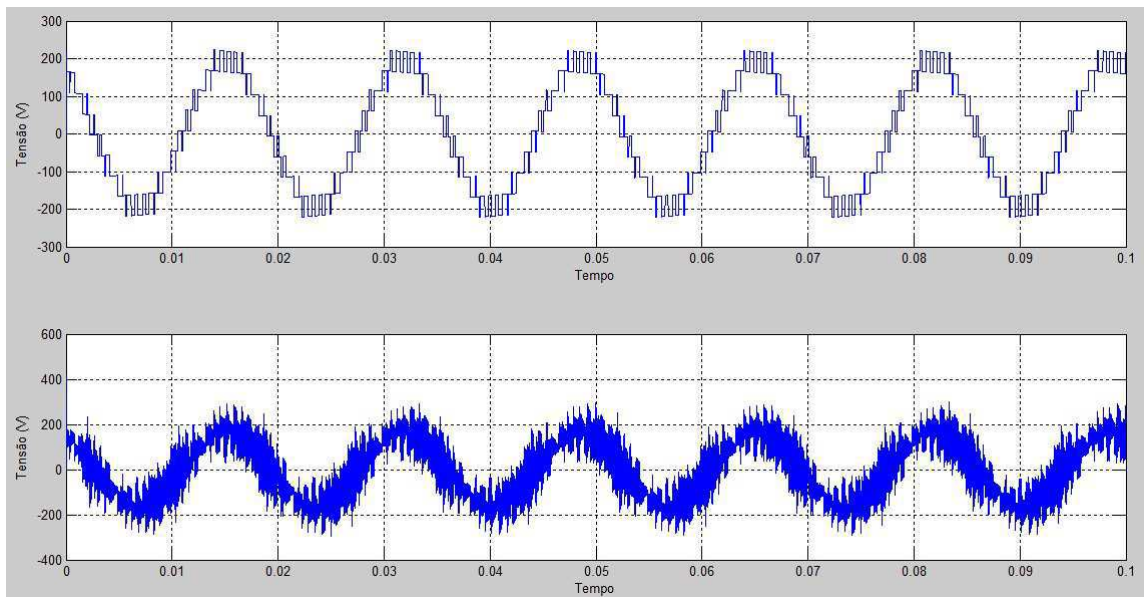


Figura 30: Tensão no terminal do motor com e sem o cabo longo.

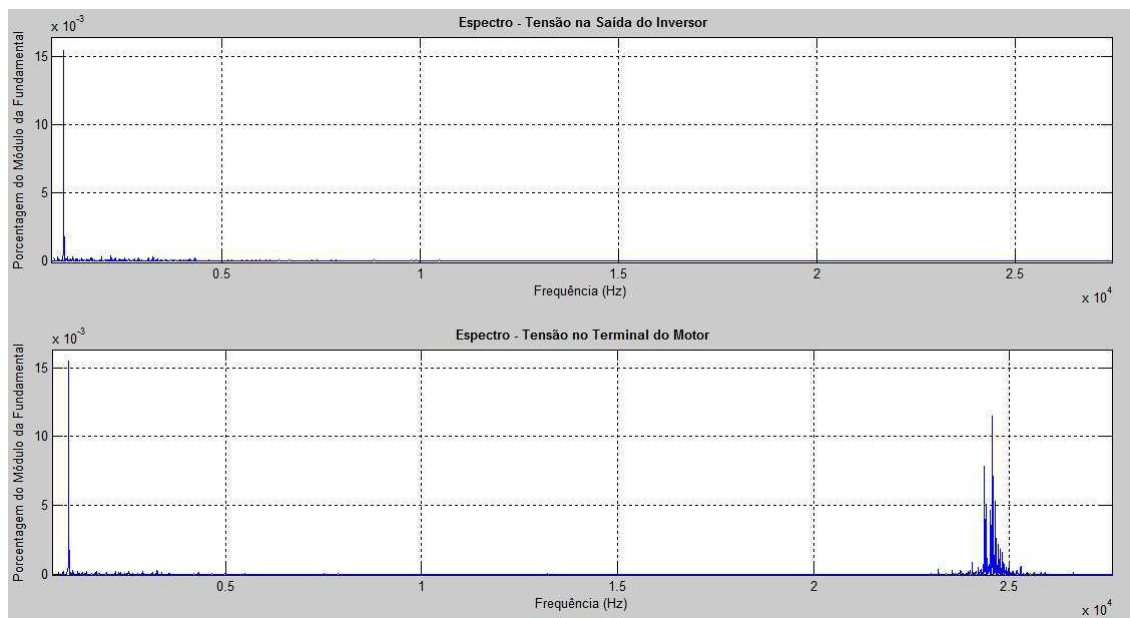


Figura 31: FFT da tensão na saída do inversor (gráfico superior) e da tensão no terminal do motor (gráfico inferior).

6 Conclusão

O presente trabalho apresentou resultados bastante significativos para a problemática existente. Os resultados foram bastante satisfatórios e com eles foi possível verificar o comportamento da tensão aplicada aos terminais de um motor de indução acionado por um inversor trifásico PWM de nove níveis alimentado por um cabo longo.

Com os resultados obtidos, podemos concluir que o maior agente causador de distorções no sinal é o efeito de reflexão. Causado pela incompatibilidade entre a impedância do cabo e do motor, ao haver uma mudança de nível na tensão da fonte, vemos que o pulso é refletido de volta fazendo com que a tensão no terminal do motor seja maior que a gerada pela fonte.

Existem vários estudos que tentam minimizar os efeitos da reflexão. Muitos deles tendem para o uso de filtros, porém na situação descrita pelo presente trabalho, na qual acionamos motores submersos fica bastante complicado a instalação de filtros no lado do motor devido ao grande custo de manutenção e instalação. Também do lado do inversor é inviável, pois os filtros são configurados para trabalharem em uma determinada frequência, entretanto o uso de inversores no acionamento de motores tem como principal objetivo controlar a velocidade deles variando a frequência na tensão de saída. Dessa forma, teríamos que ter um filtro dinâmico que ajustasse sua frequência de corte de acordo com a frequência do inversor.

Podemos verificar então que não se trata de um simples problema. É um assunto bastante complexo e delicado. A necessidade de se utilizar um inversor para controlar o motor é muito importante para a indústria do petróleo, pois o poço não possui vazão constante quando está produzindo. São muitas as variáveis que trazem a necessidade da mudança de velocidade da bomba instalada no poço, como por exemplo a variação na densidade do óleo ou mesmo a proporção de óleo e outra substância que por ventura esteja presente no local de bombeio.

As distorções do sinal de tensão verificadas nesse estudo são bastante prejudiciais ao motor, pois como foi discutido, podem causar aquecimento dos enrolamentos estatóricos reduzindo assim sua vida útil.

Referências Bibliográficas

- [1] VENDRUSCULO, E. A. *Estudo e Implementação de Estratégia para Minimização de Sobretensões Produzidas por inversores PWM em Sistemas de Acionamento de Motores Elétricos com Cabos Longos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Setembro 2001.
- [2] WU, B. *High Power Converters and AC Drives*. [S.l.]: Willey & IEEE, 2006.
- [3] JUNIOR, E. C. dos S. *Caderno dos Guias dos Experimentos: Laboratório de Eletrônica de Potência*. [S.l.]: Universidade Federal de Campina Grande, 2009.
- [4] RIBEIRO, M. P. Field applications of subsea electrical submersible pumps in brazil. *Technology Conferency Offshore*, 2005.
- [5] LIMA, A. C. S. Modelagem do acionamento de motores de indução usando longos cabos. *Furnas Centrais Elétricas S&A*, 2000.
- [6] HUSSAIN, A.; JOOS, G. Modeling and simulation of traveling waves in induction motor drives. *Departement of Electrical and Computer Engineering*, 1997.
- [7] MOREIRA, A. F.; LIPO, T. A.; VENKATARAMANAN, G. High frequency modeling for cable and induction motor over-voltage studies in long cable drives. *University of Wisconsin-Madison*, Outubro 2002.
- [8] FENGTAI, H.; LIN, L. F. Effects of long motor cables and short switching times on inverter fed induction motor drive systems. *IEEE*, 1997.