

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**HENRIQUE HELMUTH KREUTZ PFEIFER**

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE MODULAÇÃO POR  
LARGURA DE PULSOS SPACE VECTOR APLICADA EM INVERSORES  
MONOFÁSICO E TRIFÁSICO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2016**

**HENRIQUE HELMUTH KREUTZ PFEIFER**

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE MODULAÇÃO  
POR LARGURA DE PULSOS SPACE VECTOR APLICADA EM  
INVERSORES MONOFÁSICO E TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Jean Patric da Costa

**PATO BRANCO**

**2016**

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**Estudo e implementação da estratégia de modulação por largura de pulsos space vector aplicada em inversores monofásico e trifásico**”, do aluno “**Henrique Helmuth Kreutz Pfeifer**” foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **94/2016** de 2016.

Fizeram parte da banca os professores:

**Prof. Dr. Jean Patric da Costa**

**Prof. Dr. César Rafael Claire Torrico**

**Prof. Dr. Rafael Cardoso**

**A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao orientador Prof. Dr. Jean Patric da Costa que se dedicou e me guiou para que eu alcançasse esse objetivo.

Agradeço também ao mestrando Jean Prigol pelo suporte técnico e auxílio durante a montagem das plataformas experimentais.

Aos colegas de engenharia que me acompanharam pela minha trajetória desde o início, sempre ao meu lado, também pelo suporte emocional e técnico.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica por ter disponibilizado recursos para realização deste trabalho.

A minha família, pelo suporte emocional e financeiro.

## RESUMO

PFEIFER, Henrique H. K.. **Estudo e implementação da estratégia de modulação por largura de pulsos space vector aplicada em inversores monofásico e trifásico**. 2016. x f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Este trabalho aborda a modulação por largura de pulso *Space Vector* aplicada a um inversor monofásico ponte completa e a um inversor trifásico a três fios, bem como o projeto destes e a implementação experimental das modulações. São implementadas duas sequências provenientes da modulação *space vector* que são comparadas com a modulação PWM convencional. Além dos dados experimentais são apresentadas simulações. A modulação *space vector* permite uma maior utilização do barramento CC, melhora no desempenho harmônico e redução das perdas de comutação. Como estudo de caso conecta-se o inversor monofásico a um motor de corrente contínua com ímãs permanentes e o trifásico a uma máquina de indução com rotores bobinados.

**Palavras-chave:** modulação por largura de pulso, space vector, inversor monofásico, inversor trifásico.

## ABSTRACT

PFEIFER, Henrique H. K.. **Study and implementation of space vector pulse width modulation applied to a single-phase and a three-phase inverters.** 2016. x f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

This work is a space vector pulse width modulation approach, applied to a full bridge single-phase voltage source inverter and to a three-wire three-phase voltage source inverter, as well as their projects and the experimental implementation of modulations. Two sequences from space vector modulation are implemented and compared to the conventional modulation. Besides the experimental data, simulations are shown. The space vector modulation allows better CC link utilization; improve the harmonic performance and reduction of switching losses. As case study, a permanent magnet motor is connected as load to the single-phase inverter and a wound rotor induction machine to the three-phase inverter.

**Keywords:** pulse width modulation, space vector, full bridge single-phase inverter, three wire three-phase inverter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de conexão de um gerador em uma unidade de geração eólica. ....	17
Figura 2 - Inversor monofásico ponte completa .....	20
Figura 3 - Inversor trifásico .....	21
Figura 4 - Obtenção convencional de sinal PWM .....	22
Figura 5 - Combinações possíveis de chaves no inversor monofásico ponte completa .....	24
Figura 6 - Espaço da tensão de saída do inversor monofásico ponte completa .....	24
Figura 7 - Combinações possíveis de chaves no inversor trifásico.....	27
Figura 8 - Possíveis vetores estacionários em um inversor trifásico no plano d-q .....	29
Figura 9 - Síntese de um fasor qualquer pela soma geométrica dos dois vetores mais próximos .....	29
Figura 10 - Setores no espaço dos vetores da tensão de saída .....	31
Figura 11 - Space Vector PWM - Sequência simétrica para Inversor monofásico ponte completa .....	35
Figura 12 - Space vector PWM - Sequência braço fixo para inversor monofásico ponte completa .....	35
Figura 13 - Distribuição dos vetores no período .....	36
Figura 14 - Space vector PWM - Sequência simétrica fixo para inversor trifásico.....	37
Figura 15 - Space vector PWM - Segunda sequência para inversor trifásico.....	37
Figura 16 - Circuito driver do MosFET .....	38
Figura 17 - Esquema de ligação - Inversor Monofásico .....	40
Figura 18 - Diagrama da Chave IGBT .....	40
Figura 19 - Diagrama básico do circuito condicionador de sinais .....	42
Figura 20 - Arranjo do inversor trifásico .....	42
Figura 21 - Space Vector PWM monofásico - Sequência simétrica - 50% positivo .....	45
Figura 22 - Space Vector PWM monofásico - Sequência simétrica - 90% Positivo .....	45
Figura 23 - Space Vector PWM monofásico - Sequência simétrica - 50% Negativo .....	46
Figura 24 - Space Vector PWM monofásico - Sequência simétrica - 90% Negativo .....	46
Figura 25 - Space Vector PWM monofásico - Sequência simétrica - 10Hz 100%.....	47
Figura 26 - Espectro de frequência onda de 10Hz, amplitude de 1p.u. - Sequência Simétrica .....	48
Figura 27 - Space Vector PWM monofásico - Sequência simétrica - 10Hz 80%.....	48
Figura 28 - Espectro de frequência onda de 10Hz, amplitude de 0,8p.u. - Sequência Simétrica .....	49
Figura 29 - Space Vector PWM monofásico - Sequência braço fixo - 50% Positivo .....	50
Figura 30 - Space Vector PWM monofásico - Sequência braço fixo - 50% Negativo .....	50
Figura 31 - Space Vector PWM monofásico - Sequência braço fixo - 90% Positivo.....	51
Figura 32 - Space Vector PWM monofásico - Sequência braço fixo - 90% Negativo .....	51
Figura 33 - Space Vector PWM monofásico - Sequência braço fixo - 10Hz 1p.u. ....	52
Figura 34 - Espectro de frequência onda de 10Hz, amplitude de 1p.u. - Sequência braço fixo. ....	52
Figura 35 - Space Vector PWM monofásico - Sequência braço fixo - 10Hz 0,8p.u. ....	53
Figura 36 - Espectro de frequência onda de 10Hz, amplitude de 0,8p.u. - Sequência Braço Fixo.....	53
Figura 37 - Formas de onda no inversor monofásico ponte completa. Canal 1 (Amarelo): sinal de saída do DSP, Canal 2 (Azul): sinal nos terminais gate-source do MosFET, Canal 3 (Roxo): tensão nos terminais do inversor. ....	54
Figura 38 - Tempo Morto inserido entre os sinais PWM complementares entre as chaves do mesmo braço. Canal 1 (Amarelo): sinal para chave S1, Canal 2 (Azul): sinal para chave S2. ....	55

Figura 39 – PWM1 (Canal 1, em amarelo) e PWM2 (Canal 2, em azul) aplicados ao inversor monofásico utilizando a sequência simétrica. Referência de tensão: a)0,15 p.u. positivo, b)+0,5 p.u. positivo, c)+0,9 p.u. positivo, d)0,15 p.u. negativo, e)0,5 p.u. negativo, f)0,9 p.u. negativo. ....	56
Figura 40 - Tensões sintetizadas no inversor monofásico operando a vazio utilizando a sequência simétrica para as referências de a)0,5 p.u. positivo e b)0,5 p.u. negativo. ....	56
Figura 41 - Resposta do inversor com uma referência senoidal 10Hz amplitude de 1p.u. - Sequência simétrica. a) Tensão nos terminais do inversor, b) Análise de Fourier da tensão. ....	57
Figura 42 - Resposta do inversor com uma referência senoidal 10Hz amplitude de 0.8p.u. - Sequência simétrica.....	57
Figura 43 - PWM1 e PWM2 aplicados ao inversor monofásico - Sequência braço fixo. Canal 1 (amarelo): sinal para chave S1, Canal 2 (azul): sinal para chave S3. Referências de tensão: a) 0,5 p.u. positivo, b) 0,9 p.u. positivo, c) 0,5 p.u. negativo, d) 0,9 p.u. negativo. ....	58
Figura 44 - Tensões sintetizadas no inversor monofásico operando a vazio - Sequência braço fixo – para as referências de a) 0,5 p.u. positivo, b) 0,9 p.u. positivo, c) 0,5 p.u. negativo e d) 0,9 p.u. negativo.....	59
Figura 45 - Resposta do inversor com uma referência senoidal 10Hz amplitude de 1p.u. - Sequência braço fixo. a) Tensão nos terminais do inversor monofásico, b) Análise de Fourier da tensão. ....	60
Figura 46 - Resposta do inversor com uma referência senoidal 10Hz amplitude de 0.8p.u. - Sequência braço fixo. a) Tensão nos terminais do inversor monofásico, b) Análise de Fourier da tensão. ....	60
Figura 47 - Tensão e corrente no motor CC – a) Sequência simétrica e b) braço fixo, ambas para uma referência de 0,5 p.u. positivo. ....	61
Figura 48 - Tensão e corrente no motor CC - Sequência simétrica – Para referências de tensão de a) 0,15 p.u., b) 0,5 p.u. e c) 0,9 p.u., todas com polaridade positiva. ....	61
Figura 49 - Tensão e corrente no motor – Tensão de 0,5 p.u. com polaridade negativa, utilizando a) sequência simétrica e b) sequência de braço fixo .....	62
Figura 50 - Tensões e correntes no barramento CC - Inversor monofásico.....	63
Figura 51 - PWM convencional para 311V de fase no inversor trifásico .....	65
Figura 52 - Tensões de linha para 311V com modulação convencional no inversor trifásico .....	66
Figura 53 - Espectro de frequência da tensão de 311V sintetizada no inversor trifásico por PWM convencional .....	66
Figura 54 - PWM convencional para tensão de linha máxima no inversor trifásico.....	67
Figura 55 -Tensões de linha máxima com modulação convencional no inversor trifásico.....	67
Figura 56 - Espectro de frequência da tensão linha máxima sintetizada no inversor trifásico por PWM convencional .....	68
Figura 57 - PWM e tensões de linha para o setor 1 da sequência simétrica no inversor trifásico .....	69
Figura 58 -SVPWM sequência simétrica para tensão de linha de 311V no inversor trifásico .....	70
Figura 59 - Tensões de linha obtidas pela SVPWM com sequência simétrica no inversor trifásico com referência de 311V linha .....	70
Figura 60 - Espectro de frequência da tensão linha de 311V sintetizada no inversor trifásico por SVPWM de sequência simétrica.....	71
Figura 61 -SVPWM sequência simétrica para tensão de linha de 400V no inversor trifásico .....	71
Figura 62- Tensões de linha obtidas pela SVPWM com sequência simétrica no inversor trifásico com referência de 400V linha .....	72
Figura 63 - Espectro de frequência da tensão linha de 400V sintetizada no inversor trifásico por SVPWM de sequência simétrica.....	72



Figura 64 - PWM e tensões de linha para o setor 1 da segunda sequência no inversor trifásico .....	73
Figura 65 -SVPWM segunda sequência para tensão de linha de 311V no inversor trifásico.....	74
Figura 66- Tensões de linha obtidas pela SVPWM com segunda sequência no inversor trifásico com referência de 311V linha .....	74
Figura 67 - Espectro de frequência da tensão linha de 311V sintetizada no inversor trifásico por SVPWM de segunda sequência.....	75
Figura 68 -SVPWM segunda sequência para tensão de linha de 400V no inversor trifásico.....	76
Figura 69- Tensões de linha obtidas pela SVPWM com segunda sequência no inversor trifásico com referência de 400V linha .....	76
Figura 70 - Espectro de frequência da tensão linha de 400V sintetizada no inversor trifásico por SVPWM de segunda sequência.....	77
Figura 71 - Formas de onda no inversor trifásico, Canal 1 (azul): sinal do DSP, Canal 2 (ciano): sinal de saída do driver, Canal 3 (roxo): tensão de saída no inversor.....	78
Figura 72 – Resposta do inversor a partir da modulação convencional para tensão de linha máxima e espectro de frequência. a) Tensões de linha nos terminais do inversor. Canal 1 (azul): Tensão Vab, Canal 2 (ciano): Tensão Vbc, Canal 3 (roxo): Tensão Vca. b) Espectro de frequência da tensão Vab. .	78
Figura 73 – Resposta do inversor trifásico para referência de 220Vrms utilizando modulação convencional. a) Tensões de linha nos terminais do inversor. Canal 1 (azul): Tensão Vab, Canal 2 (ciano): Tensão Vbc, Canal 3 (roxo): Tensão Vca. b) Espectro de frequência da tensão Vab.....	79
Figura 74 - Sinal PWM obtido experimentalmente para sequência simétrica - Setor 1. Canal 1 (amarelo) PWM1 (chave S1), Canal 2 (azul): PWM2 (chave S3), Canal 3 (roxo): PWM3 (chave S5). ...	79
Figura 75 - Resposta do inversor trifásico para referência de 400 V de linha, utilizando modulação space vector - sequência simétrica. a) Tensões de linha nos terminais do inversor. Canal 1 (azul): Tensão Vab, Canal 2 (ciano): Tensão Vbc, Canal 3 (roxo): Tensão Vca. b) Espectro de frequência da tensão Vab.....	80
Figura 76 - Resposta do inversor trifásico para referência de 220Vrms, utilizando modulação space vector – sequência simétrica. a) Tensões de linha nos terminais do inversor. Canal 1 (azul): Tensão Vab, Canal 2 (ciano): Tensão Vbc, Canal 3 (roxo): Tensão Vca. b) Espectro de frequência da tensão Vab. ....	80
Figura 77- Sinal PWM obtido experimentalmente para segunda sequência - Setor 1. Canal 1 (amarelo) PWM1 (chave S1), Canal 2 (azul): PWM2 (chave S3), Canal 3 (roxo): PWM3 (chave S5). ....	81
Figura 78 - Resposta do inversor trifásico para referência de 400 V, utilizando modulação space vector – segunda sequência. a) Tensões de linha nos terminais do inversor. Canal 1 (azul): Tensão Vab, Canal 2 (ciano): Tensão Vbc, Canal 3 (roxo): Tensão Vca. b) Espectro de frequência da tensão Vab. ....	81
Figura 79 - Resposta do inversor trifásico para referência de 311 V, utilizando modulação space vector – segunda sequência. a) Tensões de linha nos terminais do inversor. Canal 1 (azul): Tensão Vab, Canal 2 (ciano): Tensão Vbc, Canal 3 (roxo): Tensão Vca. b) Espectro de frequência da tensão Vab. ....	82
Figura 80 - Tensões de linha e corrente de fase na máquina de indução operando como motor. Utilizando segunda sequência. Canal 1 (azul): tensão Vab, Canal 2 (ciano): tensão Vbc, Canal 3 (roxo): tensão Vca, canal 4 (verde): corrente de linha. ....	83
Figura 81 - Tensões de linha e corrente de fase na máquina de indução operando como motor. Utilizando sequência simétrica. Canal 1 (azul): tensão Vab, Canal 2 (ciano): tensão Vbc, Canal 3 (roxo): tensão Vca, canal 4 (verde): corrente de linha. ....	83

Figura 82 - Tensões de linha e PWM de fase na máquina de indução operando como motor - SVPWM com sequência simétrica. Canal 1 (azul): tensão $V_{ab}$ , Canal 2 (ciano): tensão $V_{bc}$ , Canal 3 (roxo): tensão $V_{ca}$ , canal 4 (verde): PWM2-PWM3.....	84
Figura 83 - Tensões de linha no rotor e no estator - Alinhamento dos polos.....	85
Figura 84 - Formas de onda no inversor trifásico para índice de modulação baixo. Canal 1 (azul): tensão $V_{ab}$ , Canal 2 (ciano): tensão $V_{bc}$ , Canal 3 (roxo) tensão $V_{ca}$ . a) Tensão obtida através da modulação convencional, b) Tensão obtida através da modulação space vector – sequência simétrica, c) Tensão obtida através da modulação space vector – segunda sequência. ....	86

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Inversor monofásico ponte completa .....	39
Fotografia 2 - Plataforma experimental - Inversor trifásico.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Possíveis combinações de comutação do inversor monofásico ponte completa.....	24
Tabela 2- Possíveis combinações de comutação do inversor trifásico .....	28
Tabela 3 – Correntes de saída do inversor .....	62
Tabela 4 - Corrente solicitada pelo Driver operando em 1 kHz - Inversor monofásico .....	63
Tabela 5 - Corrente solicitada pelo inversor monofásico operando em 1 kHz .....	63
Tabela 6 - Potência consumida pelo inversor alimentando o motor a vazio.....	63
Tabela 7 – TDH - Sequências .....	64
Tabela 8 - Correntes - Sequência .....	64
Tabela 9 - Resultados de TDH obtidos por simulação e experimentalmente.....	86
Tabela 10 - Resultados de utilização do barramento CC obtidos por simulação e experimentalmente .....	87

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tempo de ativação de vetores.....	32
Quadro 2 - Sequências de comutação inversor monofásico ponte completa .....	34
Quadro 3 - Sequências de comutação para o inversor trifásico .....	36

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (processador de sinal digital)
GIDA	Gerador de Indução Duplamente Alimentado
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor bipolar de porta isolada)
MosFET	<i>Metal Oxide Field Effect Transistor</i> (Transistor de efeito de campo de óxido de metal semicondutor)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (modulação por largura de pulso)
SVPWM	<i>Space Vector Pulse Width Modulation</i> (Modulação por largura de pulso <i>Space Vector</i> )
TDH	Taxa de Distorção Harmônica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{ref}$	Tensão de referência
$V_o$	Amplitude da tensão de referência no espaço de vetores
$\theta_o$	Ângulo do vetor de referência no espaço de vetores
$V_d$	Tensão no eixo d
$V_q$	Tensão no eixo q
$V_0$	Tensão no eixo 0
$f$	Frequência
$t$	Tempo
$V_{cc}$	Tensão no barramento CC
$v_{in}$	Tensão de fase
$V_{ij}$	Tensão de linha entre as fases genéricas i e j
$V_m$	Amplitude do vetor no espaço de vetores
$V_l$	Tensão de linha
$M$	Índice de modulação
$M_{di}$	Matriz de decomposição para o setor i
$\Delta T$	Período de comutação
$v_i$	Vetor no espaço de vetores para o caso monofásico
$SV_i$	Vetor no espaço de vetores para o caso trifásico
$T_{SV_i}$	Tempo de ativação do vetor $SV_i$
$\Delta t_i$	Tempo de ativação do vetor $v_i$
$V_{oq}$	Componente no eixo d de $V_o$
$V_{od}$	Componente no eixo q de $V_o$

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	17
1.1.1 Objetivos Gerais.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos .....	18
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	18
<b>2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>20</b>
2.1 CONCEITOS BÁSICOS .....	20
2.1.1 Inversor Monofásico Ponte Completa .....	20
2.1.2 Inversor Trifásico.....	21
2.1.2 Taxa de Distorção Harmônica (TDH) .....	21
2.1.3 Modulação Por Largura De Pulso PWM.....	22
2.1.4 Modulação <i>Space Vector</i> .....	23
2.1.5 Modulação <i>Space Vector</i> Inversor Trifásico .....	26
2.1.7 Máquina De Indução De Rotores Bobinados .....	33
2.3 METODOLOGIA.....	34
2.3.1 Modulação <i>Space Vector</i> Para Inversor Monofásico Ponte Completa .....	34
2.3.2 Modulação <i>Space Vector</i> Para Inversor Trifásico A Três Fios .....	36
2.3.3 Projeto Do Inversor Monofásico Ponte Completa.....	38
2.3.4 Plataforma Experimental – Inversor Trifásico.....	40
<b>3.RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>44</b>
3.1 SIMULAÇÕES INVERSOR MONOFÁSICO PONTE COMPLETA.....	44
3.1.1 Sequência Simétrica.....	44
3.1.2 Sequência Braço Fixo .....	49
3.2 IMPLEMENTAÇÕES EXPERIMENTAIS NO INVERSOR MONOFÁSICO PONTE COMPLETA.....	54
3.2.1 Sequência Simétrica.....	55



3.2.2 Sequência Braço Fixo .....	58
3.2.3 Motor De Corrente Contínua Acionado Pelo Inversor Monofásico .....	60
3.2.4 Eficiência do Inversor Monofásico Ponte Completa .....	62
3.2.5 Conclusões Sobre A Modulação <i>Space Vector</i> No Inversor Monofásico .....	63
3.3 SIMULAÇÕES INVERSOR TRIFÁSICO .....	65
3.3.1 PWM Convencional .....	65
3.3.2 Modulação <i>Space Vector</i> .....	68
3.4 IMPLEMENTAÇÃO INVERSOR TRIFÁSICO.....	77
3.3.1 PWM Convencional .....	78
3.3.2 Modulação <i>Space vector</i> .....	79
3.3.2.1 Sequência simétrica .....	79
3.3.2.2 Segunda sequência.....	81
3.3.3 Máquina De Rotor Bobinado Acionada Pelo Inversor Trifásico.....	82
3.5 CONCLUSÕES SOBRE A MODULAÇÃO <i>SPACE VECTOR</i> NO INVERSOR TRIFÁSICO .....	85
<b>4.CONCLUSÕES .....</b>	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>89</b>
<b>APÊNDICE A –</b> Circuito completo inversor monofásico ponte completa .....	91
<b>APÊNDICE B –</b> Circuito completo isolador condicionador de sinais Piccolo-Driver para inversor trifásico .....	92
<b>APÊNDICE C -</b> Sinais PWM e tensão de linha por setor, obtidos por simulação para modulação <i>Space Vector</i> sequência simétrica.....	93
<b>APÊNDICE D -</b> Sinais PWM e tensão de linha por setor, obtidos por simulação para modulação <i>Space Vector</i> sequência simétrica.....	94
<b>APÊNDICE E –</b> Sinais PWM por setor, obtidos experimentalmente para modulação <i>Space Vector</i> sequência simétrica .....	95
<b>APÊNDICE F –</b> Sinais PWM por setor, obtidos experimentalmente para modulação <i>Space Vector</i> segunda sequência.....	96

<b>APÊNDICE G</b> - Circuito driver alternativo para MosFet tipo depleção. ....	97
---	----

## 1. INTRODUÇÃO

Fontes de energias renováveis estão assumindo parte significativa da produção de energia elétrica. Deixar de usar fontes não renováveis como petróleo e carvão mineral e migrar para fontes mais limpas é um curso natural da humanidade. No final de 2013, o consumo energético mundial proveniente de fontes renováveis era de 19,1%. No final de 2014, esse número chegou a 27,7%. Houve também um investimento estimado de 270 bilhões de dólares em 2014, 6 vezes maior do aplicado em 2004. Em 10 anos a capacidade fotovoltaica foi aumentada em 10 vezes e a eólica em 8 vezes (GREENPEACE, 2015).

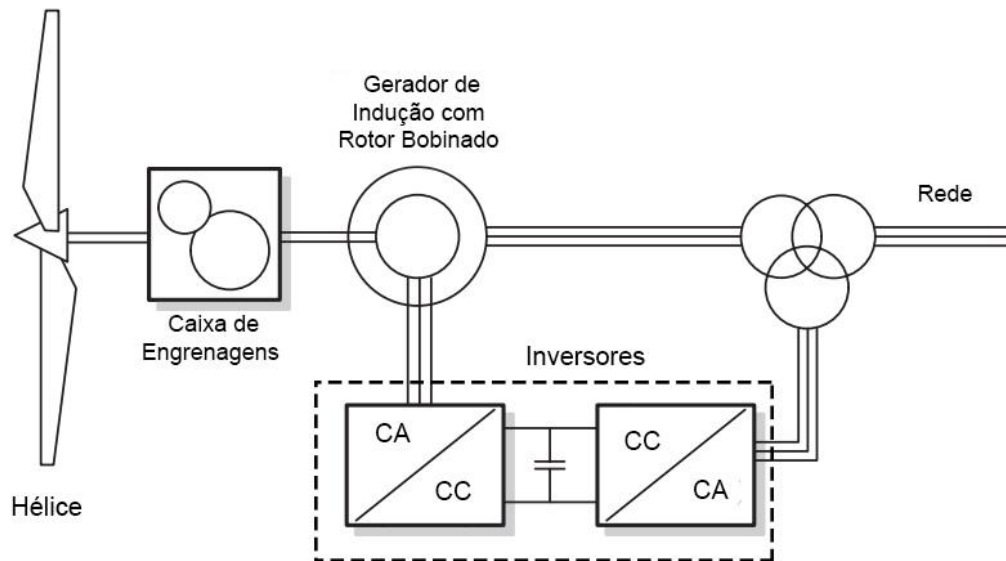
Assim como na geração de energia, também é necessário um cuidado no consumo, de forma que não tenha tantos impactos ambientais, sociais e econômicos. Por isso, a eficiência, qualidade e natureza dos equipamentos empregados em todas as etapas que envolvem energia são importantes. Segundo Greenpeace (2015) a matriz energética global é predominantemente fóssil. As máquinas a combustão, além de emitir poluentes, não apresentam boa eficiência. Conforme Çengel e Boles (2006) o rendimento de um motor a combustão interna a gasolina é de aproximadamente 30%.

Uma alternativa no uso de motores a combustão são os motores elétricos. Dessa forma, o combustível fóssil empregado no motor é substituído por energia elétrica. Sem emissão de poluentes e com rendimento aproximadamente de até 96% (FITZGERALD; JUNIOR; UMANS, 2006).

Mesmo com o alto rendimento, não é eficiente empregar um motor elétrico em um sistema com carga variável sem uma estratégia de controle. Dessa forma, o motor fará grande esforço em determinados intervalos de tempo. De acordo com Fitzgerald (2006), os motores de corrente alternada eram considerados motores de velocidade fixa, antes da utilização dos inversores. Portanto, o uso de inversores é ideal em uma situação como essa, pois permitem o acionamento com velocidade variável, controlando frequência e amplitude da tensão nos terminais do motor (SOUSA, 2012).

Tanto quanto o motor, o inversor também deve apresentar um rendimento elevado para que o sistema seja eficiente e viável. As diferentes estratégias de modulação aplicadas a um inversor tem como objetivos diminuir as perdas de

comutação, maximizar a utilização do barramento de corrente contínua (CC), reduzir o conteúdo harmônico e manter a precisão do controle (TRIPURA; BABU; TAGORE, 2011). Um exemplo de aplicação de inversores é em um sistema de geração eólica de energia elétrica. Na Figura 1 é apresentado uma topologia de controle, que usa como referência a tensão da rede, ajustando a corrente do rotor do gerador de indução com rotor bobinado.



**Figura 1 - Esquema de conexão de um gerador em uma unidade de geração eólica.**  
**Fonte: Adaptado de TEODORESCUS (2011)**

Sem uma estratégia de controle é muito difícil conectar um gerador em paralelo com a rede. Com inversores, é possível modificar a forma de onda de tensão e adequá-la ao padrão da rede, o que torna os inversores uma boa opção para geradores eólicos e solares (TEODORESCUS; LISERRE; RODRÍGUEZ, 2011).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivos Gerais

Estudar e implementar diferentes tipos de modulação *Space Vector* aplicados a inversores. Os inversores em questão serão um monofásico ponte

completa e um trifásico a três fios. O monofásico ligado em um motor de imã permanente e o trifásico conectado a um gerador eólico, especificamente um GIDA (Gerador de Indução Duplamente Alimentado).

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a montagem de um inversor monofásico ponte completa para alimentar um motor de imã permanente de 85 W;
- Realizar a montagem de um inversor trifásico que conecta o barramento de corrente contínua (CC) aos terminais de um gerador eólico (GIDA) de 3 kW;
- Implementar a modulação por largura de pulso *Space Vector* nos inversores, utilizando o TMS320F28069 Piccolo;
- Determinar as diferenças de cada técnica, destacando as vantagens e desvantagens de cada uma, assim como os efeitos em cada uma das aplicações;
- Encontrar um melhor aproveitamento de energia sem alterar os componentes dos circuitos inversor trifásico e monofásico.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Com o intuito de facilitar a compreensão do trabalho, o documento é dividido em quatro capítulos:

No capítulo 2, apresenta-se os conhecimentos básicos necessários para compreender as simulações e implementações realizadas, assim como o equacionamento necessário para implementação da modulação. Nesse capítulo, também estão as metodologias empregadas no desenvolvimento da modulação, direcionando o caso para as implementações.

No capítulo 3 são apresentados os resultados obtidos com as simulações e implementações, assim como alguns detalhes práticos de implementação, com análises desses resultados para cada um dos casos: monofásico e trifásico.

Por fim, no capítulo 4 estão conclusões de aspectos gerais e trabalhos futuros para o aperfeiçoamento dos inversores.

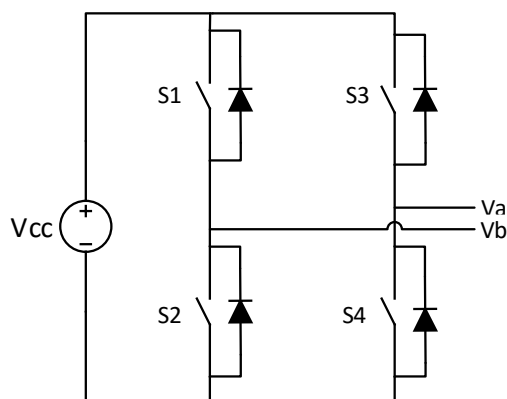
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados conceitos necessários para o desenvolvimento das modulações e das plataformas experimentais. Também são apresentados os equacionamentos e as fundamentações matemáticas proveniente da geometria para implementação da modulação *Space Vector*.

### 2.1 CONCEITOS BÁSICOS

#### 2.1.1 Inversor monofásico ponte completa

O inversor monofásico ponte completa é capaz de converter uma tensão contínua, em uma tensão de frequência e amplitude variável (FITZGERALD; JUNIOR; UMANS, 2006). Este circuito é apresentado na Figura 2. A tensão alternada nos terminais do inversor é criada chaveando o circuito de forma apropriada. (ROSHAN, *et al.*, 2007).



**Figura 2 - Inversor monofásico ponte completa**  
**Fonte: Autoria Própria**

Em geral, esse conversor permite fluxo bidirecional de potência, podendo operar como inversor (fluxo de potência de CC para CA) ou retificador (fluxo de potência de CA para CC) (HOLMES; LIPO, 2003).

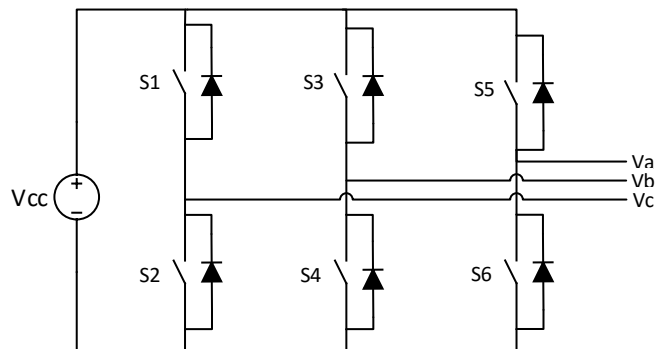
O controle das chaves do inversor normalmente é feito utilizando a modulação por largura de pulso, conhecida como PWM (*Pulse Width Modulation*).

Observa-se que as chaves S1 e S2 não podem conduzir ao mesmo tempo, pois provocam curto circuito no barramento CC, o mesmo vale para as chaves S3 e S4.

### 2.1.2 Inversor Trifásico

A configuração padrão de um inversor trifásico consiste em 6 chaves semicondutoras de potência controladas e 6 diodos. As chaves são controladas por PWM que são gerados a partir de uma referência. A função dos diodos é criar um caminho alternativo para a corrente de saída (TRZYNADLOWSKI, 1996).

O diagrama básico do inversor trifásico a 3 fios é mostrado na Figura 3.



**Figura 3 - Inversor trifásico**  
Fonte: Autoria Própria

Considerando uma carga balanceada, como um motor trifásico de corrente alternada (CA), a soma das correntes é igual a zero e a conexão de retorno a um ponto neutro ( $V_{cc}/2$ ) não é necessária (HOLMES; LIPO, 2003).

### 2.1.2 Taxa de Distorção Harmônica (TDH)

De acordo com Holmes e Lipo (2003) A taxa de distorção harmônica (TDH) é um método que pode ser usado para comparar a efetividade de processos de modulação de conversores. É uma comparação da forma de onda ideal com a forma de onda em questão.

A TDH é uma relação entre os valores eficazes de cada componente de frequência de um sinal ( $V_h$ ) com o valor eficaz da onda fundamental ( $V_1$ ). Conforme



definido no PRODIST (2016), a atual definição atual da TDH é apresentada na Equação (1).

$$TDH(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_h^2}}{V_1} \quad (1)$$

### 2.1.3 Modulação por largura de pulso PWM

A modulação por largura de pulso (PWM) consiste na variação em alta frequência da razão cíclica do sinal responsável pelo acionamento das chaves, aplicando a tensão de barramento CC na carga durante determinado período, resultando em uma tensão média de saída em baixa frequência. Convencionalmente, o processo PWM é obtido por uma simples comparação entre o sinal de referência e uma onda portadora, triangular ou dente de serra, como pode ser visto na Figura 4 (HOLMES; LIPO, 2003).

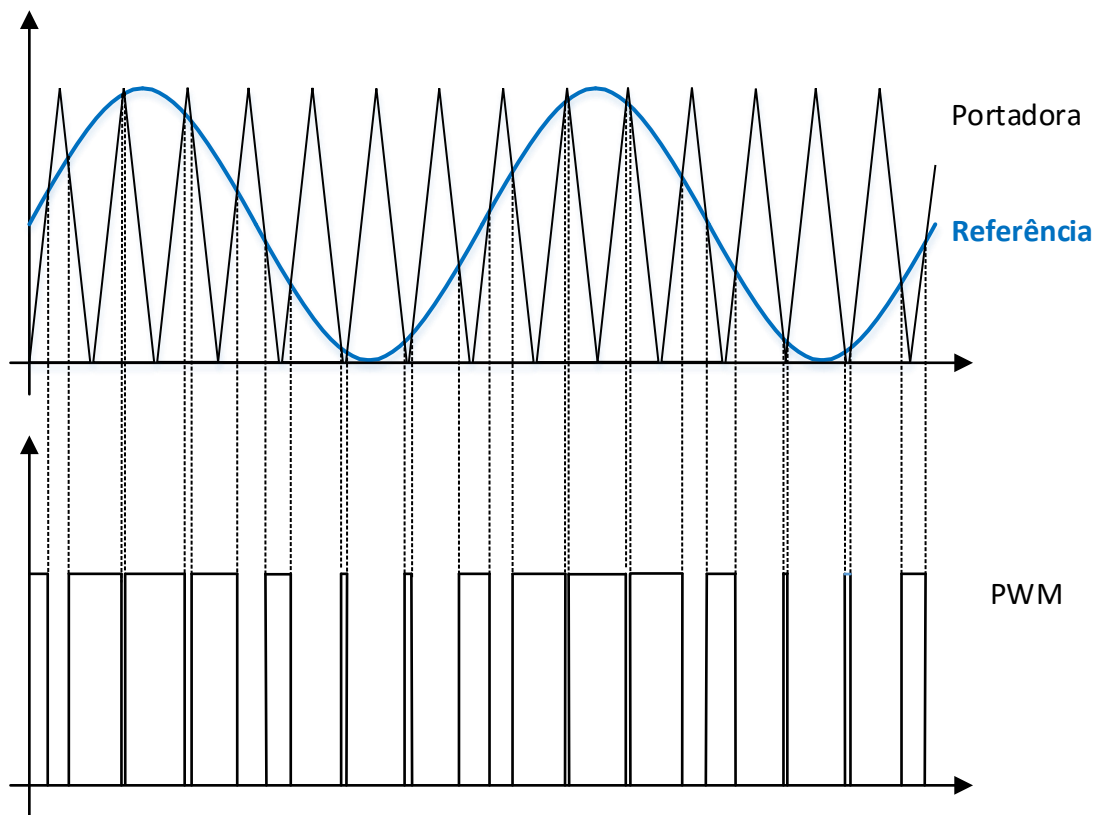


Figura 4 - Obtenção convencional de sinal PWM  
Fonte: Autoria Própria

O maior revés da modulação PWM é que contém uma variedade de componentes harmônicas que deveriam ser minimizadas (HOLMES; LIPO, 2003).

### 2.1.3.1 Modulação PWM convencional para Inversor trifásico

A modulação PWM convencional compara um sinal de referência com uma onda portadora de frequência 15 kHz. Para o inversor trifásico, são necessárias 3 referências, defasadas em  $120^\circ$ , uma para cada braço do inversor, a referência da tensão de fase do inversor. O ponto neutro ( $n$ ) equivale a metade da tensão do barramento CC ( $V_{cc}/2$ ). Dada uma referência de frequência fundamental  $f$ , as referências se comportam conforme a Equação (2), considerando a defasagem em  $120^\circ$  entre elas (HOLMES; LIPO, 2003).

$$\begin{aligned}v_{an} &= V_o \sin(2\pi ft) \\v_{bn} &= V_o \sin(2\pi ft + 2\pi/3) \\v_{cn} &= V_o \sin(2\pi ft - 2\pi/3)\end{aligned}\tag{2}$$

Sendo  $M$  o índice de modulação da tensão de fase  $V_o/V_{cc}$ , a tensão de linha ( $V_{ab}$ ) terá amplitude dada pela Equação (3).

$$V_{ab} = v_{an} - v_{bn} = M\sqrt{3}V_{cc} \cos\left(2\pi f + \frac{\pi}{6}\right)\tag{3}$$

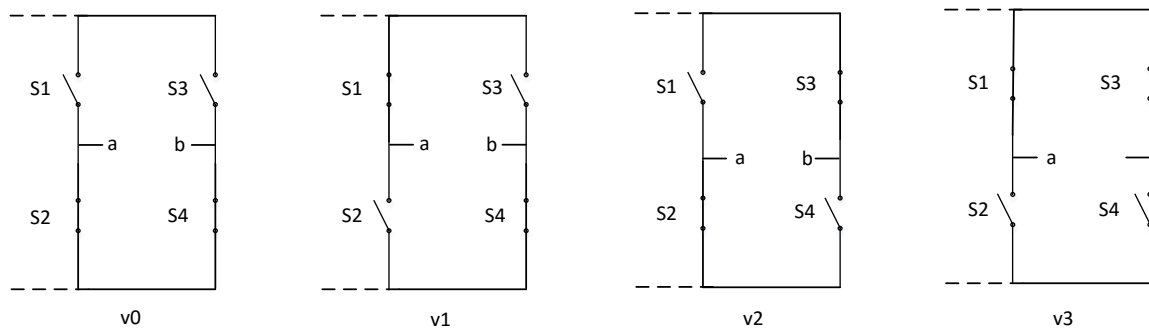
A partir da Equação (3), a máxima amplitude pico a pico da tensão de linha é de  $\sqrt{3}V_{cc}$ .

### 2.1.4 Modulação *Space Vector*

A modulação *Space Vector* surgiu nos anos 80 sugerindo significantes melhorias em comparação a modulação PWM convencional. Trata-se de um método alternativo para calcular largura de pulsos que traz uma liberdade para escolher o posicionamento dos pulsos que pode trazer melhoras nos desempenhos harmônicos de um inversor (HOLMES; LIPO, 2003).

### 2.1.4.1 Modulação *Space Vector* inversor monofásico

A modulação *Space Vector* Consiste em uma abordagem geométrica de PWM de inversores. Em um inversor monofásico ponte completa são possíveis 4 combinações de comutação, representadas na Figura 5, em que o valor 1 representa a chave fechada, e o valor 0 representa chave aberta. As tensões entre os pontos a e b ( $V_{ab}$ ), entre ponto a e neutro ( $V_{an}$ ) e entre ponto b e neutro ( $V_{bn}$ ), normalizadas em função da tensão no barramento CC, são apresentadas na Tabela 1 (PINHEIRO, *et al.*, 2005).



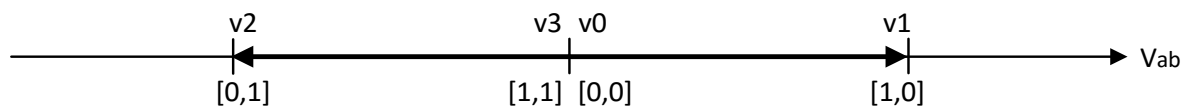
**Figura 5 - Combinações possíveis de chaves no inversor monofásico ponte completa**  
Fonte: Autoria própria

**Tabela 1 - Possíveis combinações de comutação do inversor monofásico ponte completa**

S1	S3	$V_{ab}$	$V_{an}$	$V_{bn}$	Vetores
0	0	0	0	0	v0
1	0	1	1	0	v1
0	1	-1	0	1	v2
1	1	0	1	1	v3

Fonte: PINHEIRO, *et al.*, 2005

As tensões possíveis neste inversor podem ser representadas em uma reta, um espaço unidimensional, conforme exibido na **Error! Reference source not found.** Nessa figura, também estão representados os estados das chaves S1 e S3. Os vetores v3 e v0 correspondem a uma tensão  $V_{ab}$  nula.



**Figura 6 - Espaço da tensão de saída do inversor monofásico ponte completa**  
Fonte: Autoria Própria

A partir desse espaço, são identificados dois setores onde o vetor de referência ( $V_{ref}$ ) pode percorrer. O setor 1 se localiza onde  $V_{ab} > 0$  e o setor 2 onde  $V_{ab} < 0$ . Eles são separados por um “plano” que intercepta  $V_{ab} = 0$ . No entanto, existe um limite de amplitude que a referência pode assumir. Esse limite é designado pela tensão do barramento CC, sendo que na saída do inversor monofásico ponte completa não é possível obter tensão maior que do barramento CC. Portanto, esses limites são definidos pelos planos que interceptam  $V_{ab} = 1$  e  $V_{ab} = -1$  (PINHEIRO, *et al.*, 2005).

Se a  $V_{ref}$  se encontra dentro das especificações, é possível estipular o período de duração de cada vetor de comutação. Supondo que a referência se encontra no setor 1, e os vetores de comutação escolhidos são  $v_0$ ,  $v_1$  e  $v_3$ , - que na equação representam suas respectivas coordenadas cartesianas na reta da **Error! Reference source not found.**, para que a tensão média na saída do inversor, em um período de comutação ( $\Delta T$ ), seja igual a referência, a Equação (4) deve ser satisfeita.

$$V_{ref} = \frac{1}{\Delta T} \left( \int_0^{t_1} v_0 dt + \int_{t_1}^{t_2} v_1 dt + \int_{t_2}^{T_s} v_3 dt \right) \quad (4)$$

Os vetores  $v_0$  e  $v_3$  são nulos, portanto:

$$V_{ref} = \frac{1}{\Delta T} v_1 (t_2 - t_1) = \frac{1}{\Delta T} v_1 \Delta t_1 \quad (5)$$

Admitindo que a matriz  $v_1$  é maior que zero :

$$\Delta t_1 = V_{ref} \Delta T v_1^{-1} \quad (6)$$

A duração dos demais vetores de comutação ( $v_0$  e  $v_3$ ) são definidos a partir da relação da Equação (7).

$$\Delta T - \Delta t_1 = \Delta t_0 + \Delta t_3 \quad (7)$$

A especificação de  $\Delta t_0$  e  $\Delta t_3$  e a distribuição desses vetores no período está de acordo com a sequência de comutação escolhida pelo projetista, detalhada no Capítulo 2.3.1 (PINHEIRO, *et al.*, 2005).

### 2.1.5 Modulação *Space Vector* inversor trifásico

Para a representação espacial do inversor trifásico, é necessária uma transformação que relaciona as tensões produzidas pelos braços do inversor com suas diferentes tensões de saída (PINHEIRO, *et al.*, 2005).

Dado um espaço tridimensional de coordenadas  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$ , é possível representar as tensões equilibradas dispostas nesse espaço em um plano, chamado de plano d-q. Caso as tensões sejam desequilibradas, um componente de sequência zero surge ( $V_0$ ).

A mudança do referencial é feita através da transformada de Park. (KUNDUR, 1994)Kundur (1994) define essa transformada, conhecida também por transformada d-q-0, conforme a equação (8).

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (8)$$

Considerando o eixo q coincidente com o eixo a, e determinando o eixo de componente zero formado pelo produto vetorial do eixo d com o eixo q, a transformação se torna:

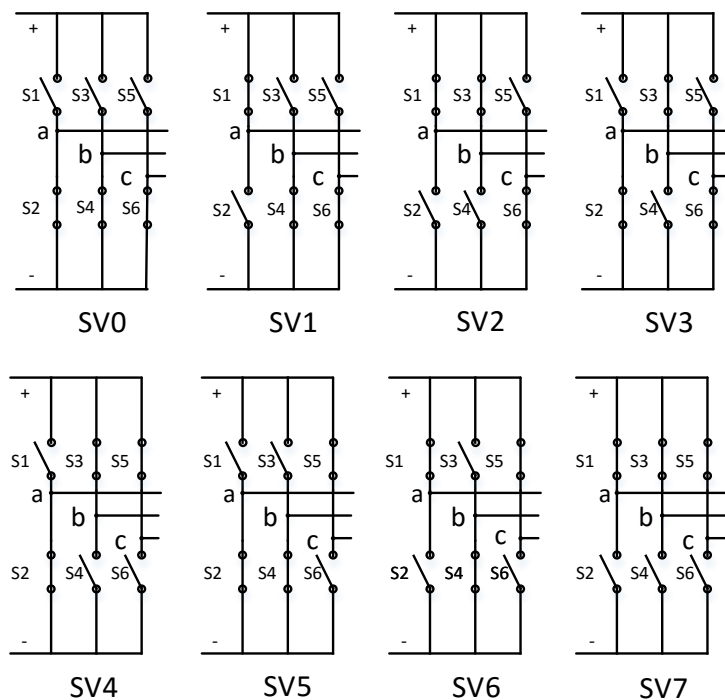
$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}. \quad (9)$$

As tensões sintetizadas nos terminais do inversor são estacionárias, portanto, o ângulo  $\theta$  é fixo. Para que o eixo q seja coincidente com o eixo a, o valor do ângulo  $\theta$  é zero. Aplicando essas condições, a transformação é definida de acordo com a Equação (10).

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

A bem conhecida transformação  $\alpha\beta$  denota as mesmas variáveis, porém, a terceira componente (componente de sequência zero), não é determinada pelos mesmos fatores das duas componentes de Clarke (HOLMES; LIPO, 2003).

As possíveis tensões sintetizadas pelo inversor trifásico nas configurações da Figura 7 e seus vetores correspondentes no plano d-q são apresentadas na Tabela 2. Duas dessas configurações (SV0 e SV7) produzem tensão de saída zero, produzindo um curto circuito entre as saídas.



**Figura 7 - Combinações possíveis de chaves no inversor trifásico**  
**Fonte: Autoria Própria**

A posição dos vetores no plano d-q podem ser determinados investigando o circuito resultante da conexão das chaves. Por exemplo, para o vetor SV6, a chave S4 está fechada, conectando a fase b ao terminal negativo enquanto as chaves S1 e S5 conectam as fases a e c ao terminal positivo. Considerando uma carga conectada em estrela (Y), a fase b assume dois terços da tensão CC enquanto as outras duas

fases, em paralelo, assumem 1/3 da tensão (HOLMES; LIPO, 2003). Respeitando a polaridade, da Equação (10), tem-se:

$$V_q = -\frac{1}{3}V_{cc}, \quad (11)$$

$$V_d = \frac{2}{3} \left( -\frac{2\sqrt{3}}{3}V_{cc} - \frac{\sqrt{3}}{3}V_{cc} \right) = -\frac{\sqrt{3}}{3}V_{cc}. \quad (12)$$

O módulo desse vetor é:

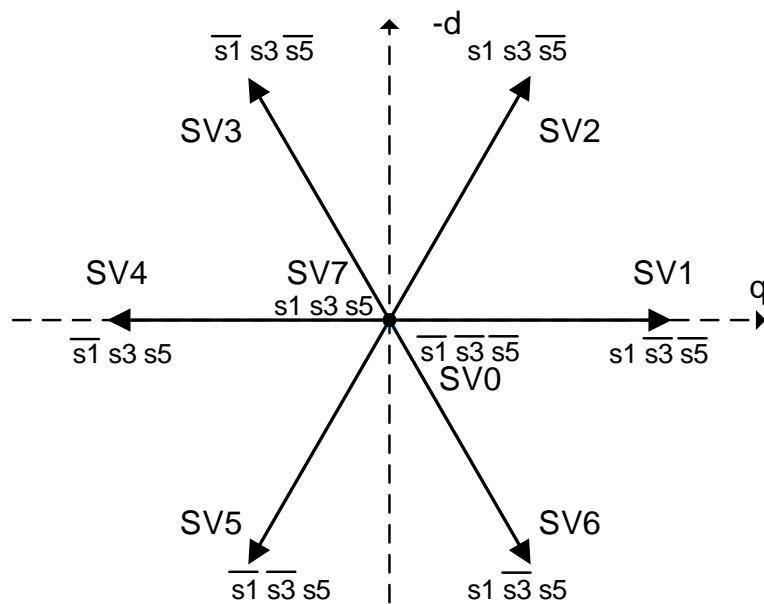
$$|SV6| = \sqrt{V_q^2 + V_d^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{3}V_{cc}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{3}V_{cc}\right)^2} = \frac{2}{3}V_{cc}. \quad (13)$$

**Tabela 2- Possíveis combinações de comutação do inversor trifásico**

S1	S3	S5	v' <sub>a0</sub>	v' <sub>b0</sub>	v' <sub>c0</sub>	v' <sub>ab</sub>	v' <sub>bc</sub>	v' <sub>ca</sub>	Vetor
0	0	0	0	0	0	0	0	0	SV0
1	0	0	1	0	0	1	0	-1	SV1
1	1	0	1	1	0	0	1	-1	SV2
0	1	0	0	1	0	-1	1	0	SV3
0	1	1	0	1	1	-1	0	1	SV4
0	0	1	0	0	1	0	-1	1	SV5
1	0	1	1	0	1	1	-1	0	SV6
1	1	1	1	1	1	0	0	0	SV7

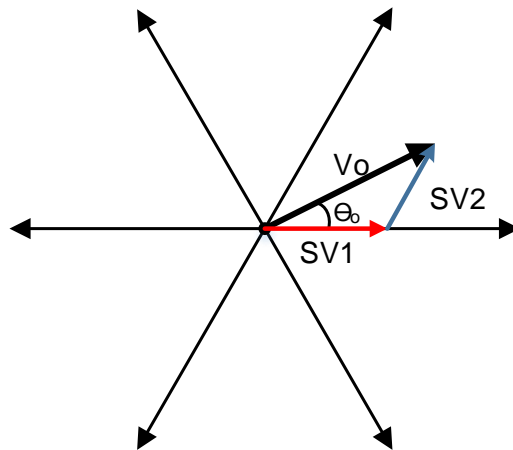
Fonte: adaptado de PINHEIRO, et al., 2005

O módulo de todos os seis vetores não nulos é o mesmo. Aplicando a Equação (10) nas tensões de fase apresentadas na Tabela 2, o resultado dos vetores no plano d-q é mostrado na Figura 7, assim como a combinação das chaves para cada vetor. Como as chaves de um mesmo braço são acionadas de forma complementar, quando a chave superior estiver aberta (representada por 0 na Tabela 2) ela é representada como negada (como por exemplo:  $\overline{s1}$ ). Os vetores SV7 e SV0 são vetores nulos.



**Figura 8 - Possíveis vetores estacionários em um inversor trifásico no plano d-q**  
**Fonte: Adaptado de HOLMES; LIPO, 2003**

A partir dos vetores estacionários, um vetor da tensão de saída  $V_o$  pode ser formado pela soma de determinados desses vetores durante um período de comutação ( $\Delta T$ ), como mostrado na Figura 9.



**Figura 9 - Síntese de um fasor qualquer pela soma geométrica dos dois vetores mais próximos**  
**Fonte: Autoria Própria**

O número de componentes do *space vector* requeridas para síntese de um vetor qualquer é de no mínimo dois, mas pode ser de três ou mais. Para o exemplo da Figura 9, a soma geométrica pode ser expressa através do tempo em que os vetores  $SV1$  ( $T_{SV1}$ ) e  $SV2$  ( $T_{SV2}$ ) são ativos, o período de comutação

( $\Delta T$ ) e o módulo dos vetores, conforme a Equação (14) (HOLMES; LIPO, 2003).



$$|V_o| = \frac{T_{SV_1}}{\Delta T} |SV_1| + \frac{T_{SV_2}}{\Delta T} |SV_2| \quad (14)$$

Na forma polar, utilizando a tensão de pico dos vetores ( $V_m$ ), a Equação (14) pode ser descrita como:

$$\Delta T V_o \angle \theta_o = T_{SV_1} V_m \angle 0 + T_{SV_2} V_m \angle \frac{\pi}{3}. \quad (15)$$

Ou na forma cartesiana:

$$V_o (\cos \theta_o + j \sin \theta_o) \Delta T = T_{SV_1} V_m + T_{SV_2} V_m \left( \cos \frac{\pi}{3} + j \sin \frac{\pi}{3} \right). \quad (16)$$

Equacionando as componentes real e imaginária, obtém-se a dada solução para os tempos ativos dos vetores SV1 e SV2:

$$T_{SV_1} = \frac{V_o \sin \left( \frac{\pi}{3} - \theta_o \right)}{V_m \sin \frac{\pi}{3}} \Delta T, \quad (17)$$

$$T_{SV_2} = \frac{V_o \sin \theta_o}{V_m \sin \frac{\pi}{3}} \Delta T. \quad (18)$$

Sendo  $T_{SV_1}$  maior que zero e  $T_{SV_2}$  menor que o período de comutação, a maior amplitude de  $V_o$  acontece quando  $\theta_o = 0$  ou  $\theta_o = \pi/3$ . No entanto é previsto que a soma dos tempos de ativação dos vetores não deve ultrapassar o período de comutação  $\Delta T$ . Portanto, a maior magnitude que o vetor  $V_o$  pode assumir é limitada por uma reta que conecta a extremidade dos dois vetores. Portanto, esse valor é alcançado quando a referência assume os ângulos de  $\pi/6$ ,  $\pi/2$ ,  $5\pi/6$ ,  $7\pi/6$ ,  $3\pi/2$  e  $11\pi/6$  (HOLMES; LIPO, 2003).

Para o caso limitante em  $\pi/6$ :

$$\frac{T_{SV_1} + T_{SV_2}}{\Delta T} = \frac{2V_o \sin \frac{\pi}{6}}{V_m \sin \frac{\pi}{3}} \leq 1. \quad (19)$$

A Equação (19) restringe o valor máximo de  $V_o$  em:

$$V_o = V_m \sin \frac{\pi}{3} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{cc}. \quad (20)$$

$V_o$  é o módulo da saída da tensão de fase, a máxima tensão de linha  $V_l$  é:

$$V_l = \sqrt{3}V_o, \quad (21)$$

$$V_l = V_{cc}. \quad (22)$$

De pico a pico, a tensão máxima de linha é:

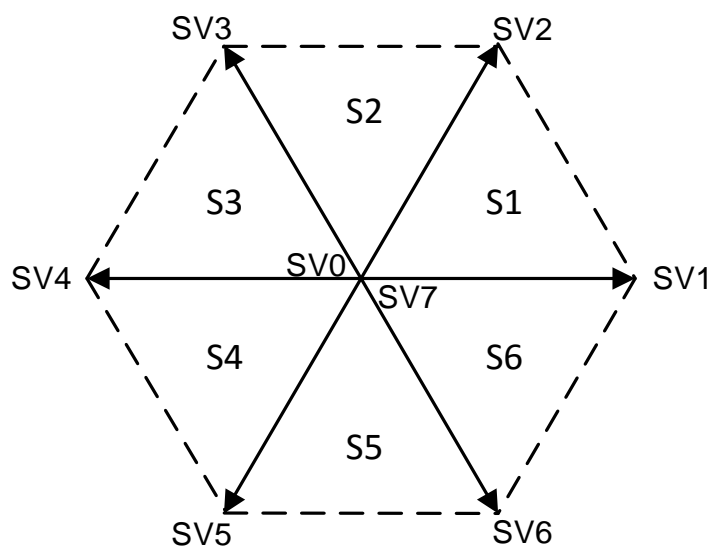
$$V_{lp} = 2V_{cc}. \quad (23)$$

Comparando com a modulação convencional, existe 15% a mais de aproveitamento do barramento CC.

Qualquer combinação dos vetores SV0 e SV7 devem ocorrer para completar o tempo restante do período  $\Delta T$ , satisfazendo a Equação (24) (PINHEIRO, *et al.*, 2005).

$$\Delta T = T_{SV_1} + T_{SV_2} + T_{SV_0} + T_{SV_7} \quad (24)$$

O espaço onde o vetor de referência pode percorrer é definido. Esse espaço é subdividido em 6 setores, como mostra a Figura 10. Para cada setor, existem 2 vetores estacionários não nulos adjacentes ao vetor de referência  $V_o$  (PINHEIRO, *et al.*, 2005). O Quadro 1 apresenta as equações necessárias para síntese de um vetor  $V_o$  em um dado setor. As equações têm estrutura idêntica e apenas refletem os  $60^\circ$  entre um setor e outro.



**Figura 10 - Setores no espaço dos vetores da tensão de saída**  
**Fonte: Autoria Própria**

Setor	Ângulo	Vetores	Tempos de ativação dos vetores
1	$0 \leq \theta_0 < \frac{\pi}{3}$	SV1	$T_{SV_1} = \frac{V_o \sqrt{3}}{V_{cc}} \frac{1}{2} \cos\left(\theta_o + \frac{\pi}{6}\right) \Delta T$
		SV2	$T_{SV_2} = \frac{V_o \sqrt{3}}{V_{cc}} \frac{1}{2} \cos\left(\theta_o - \frac{\pi}{6}\right) \Delta T$
2	$\frac{\pi}{3} \leq \theta_0 < \frac{2\pi}{3}$	SV2	$T_{SV_2} = \frac{V_o \sqrt{3}}{V_{cc}} \frac{1}{2} \cos\left(\theta_o - \frac{\pi}{6}\right) \Delta T$
		SV3	$T_{SV_3} = \frac{V_o \sqrt{3}}{V_{cc}} \frac{1}{2} \cos\left(\theta_o - \frac{5\pi}{6}\right) \Delta T$
3	$\frac{2\pi}{3} \leq \theta_0 < \pi$	SV3	$T_{SV_3} = \frac{V_o \sqrt{3}}{V_{cc}} \frac{1}{2} \cos\left(\theta_o - \frac{\pi}{6}\right) \Delta T$
		SV4	$T_{SV_4} = \frac{V_o \sqrt{3}}{V_{cc}} \frac{1}{2} \cos\left(\theta_o - \frac{7\pi}{6}\right) \Delta T$
4	$\pi \leq \theta_0 < \frac{4\pi}{3}$	SV4	$T_{SV_4} = \frac{V_o \sqrt{3}}{V_{cc}} \frac{1}{2} \cos\left(\theta_o - \frac{5\pi}{6}\right) \Delta T$
		SV5	$T_{SV_5} = \frac{V_o \sqrt{3}}{V_{cc}} \frac{1}{2} \cos\left(\theta_o - \frac{3\pi}{2}\right) \Delta T$
5	$\frac{4\pi}{3} \leq \theta_0 < \frac{5\pi}{3}$	SV5	$T_{SV_5} = \frac{V_o \sqrt{3}}{V_{cc}} \frac{1}{2} \cos\left(\theta_o - \frac{7\pi}{6}\right) \Delta T$
		SV6	$T_{SV_6} = \frac{V_o \sqrt{3}}{V_{cc}} \frac{1}{2} \cos\left(\theta_o - \frac{11\pi}{6}\right) \Delta T$
6	$\frac{5\pi}{3} \leq \theta_0 < 2\pi$	SV6	$T_{SV_6} = \frac{V_o \sqrt{3}}{V_{cc}} \frac{1}{2} \cos\left(\theta_o - \frac{3\pi}{2}\right) \Delta T$
		SV1	$T_{SV_1} = \frac{V_o \sqrt{3}}{V_{cc}} \frac{1}{2} \cos\left(\theta_o - \frac{\pi}{6}\right) \Delta T$

**Quadro 1 - Tempo de ativação de vetores**  
**Fonte: Adaptado de (HOLMES; LIPO, 2003)**

Um modo alternativo para calcular os tempos que cada setor deve permanecer ativo no período é através das Matrizes de Decomposição ( $M_d$ ). A partir da identificação do setor onde o vetor de referência  $V_o$  está localizado, os períodos de ativação dos vetores para que a tensão de referência seja sintetizada, supondo o setor 1, a Equação (25) deve ser satisfeita (PINHEIRO, *et al.*, 2005).

$$SV_1 \Delta t_1 + SV_2 \Delta t_2 + (SV_0 \text{ ou } SV_7) \Delta t_0 = V_o \Delta T \quad (25)$$

Os vetores SV1 e SV2 não são nulos, então a Equação (25) pode ser reescrita da seguinte forma matricial:

$$[SV_1 \quad SV_2] \begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix} = V_o \Delta T. \quad (26)$$

O vetor de referência  $V_o$ , para este caso, é decomposto em componentes no eixo d ( $V_{od}$ ) e no eixo q ( $V_{oq}$ ). Os vetores SV1 e SV2 são linearmente independentes (PINHEIRO, *et al.*, 2005), portanto:

$$\begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix} = M_{d1} \begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \end{bmatrix} \Delta T ; \quad M_{d1} = [SV_1 \quad SV_2] \quad (27)$$

Essa mesma equação é válida para outros setores. Em caso de implementação desse segundo método, os vetores estacionários de tensão, SV1 e SV2 para o exemplo, devem ser inseridos na equação na forma decomposta nos planos d q, assim como a tensão de referência.

O segundo método não é empregado no trabalho, houve apenas uma verificação computacional para averiguar a equivalência dos métodos.

### 2.1.7 Máquina de indução de rotores bobinados

A máquina utilizada se trata de uma máquina de indução de rotores bobinados com potência nominal de 3 kW de frequência 60 Hz. O estator possui 12 terminais e pode ser ligado em 220 V, 380 V, 440 V ou 760 V. Sua velocidade nominal é 1750 RPM. Para a tensão de 220 V, a corrente nominal é de 10,5 A e fator de potência de 0,83.

A máquina de rotor bobinado é acionada de duas maneiras: com o inversor conectado no estator e com o inversor conectado no rotor. Quando o rotor está curto circuitado e a máquina é alimentada pelo estator, ela funciona como um motor de indução.

Quando o rotor é alimentado e o estator está aberto, a máquina não produz torque. Porém, dessa maneira é possível estimar a posição dos polos elétricos em relação aos polos mecânicos. Sem movimento, a máquina funciona de maneira similar a um transformador. Quando uma bobina do rotor está alinhada com a bobina do estator, a tensão induzida na bobina do estator é produzida pelo fluxo de apenas uma bobina do rotor, portanto, as tensões do estator e do rotor estão em fase.

Ao acionar uma máquina de indução, a corrente de partida solicitada é cerca de sete vezes a corrente nominal (FITZGERALD; JUNIOR; UMANS, 2006). Sua variação repentina pode causar um afundamento de tensão. Se os equipamentos forem dimensionados para a corrente de partida do motor, haverá subutilização, já que a corrente de partida tem curta duração. Portanto é conveniente utilizar uma estratégia para reduzir a corrente de partida.

A estratégia utilizada é a partida VF. Essa partida consiste em incrementar a frequência e a tensão suavemente até seus respectivos valores nominais.

Com a modulação *space vector*, basta incrementar o módulo da referência e sua velocidade angular no plano d-q até os valores desejados.

## 2.3 METODOLOGIA

### 2.3.1 Modulação *Space Vector* para Inversor Monofásico Ponte Completa

A modulação *Space Vector* provê um grau de liberdade sobre a distribuição dos vetores de comutação no período  $\Delta T$ . Existem inúmeras sequências de comutação possíveis. Entretanto é interessante que os vetores escolhidos sejam os mais próximos dentro de determinado setor. Isso é desejável para diminuir ondulações sobre as variáveis de interesse (PINHEIRO, *et al.*, 2005).

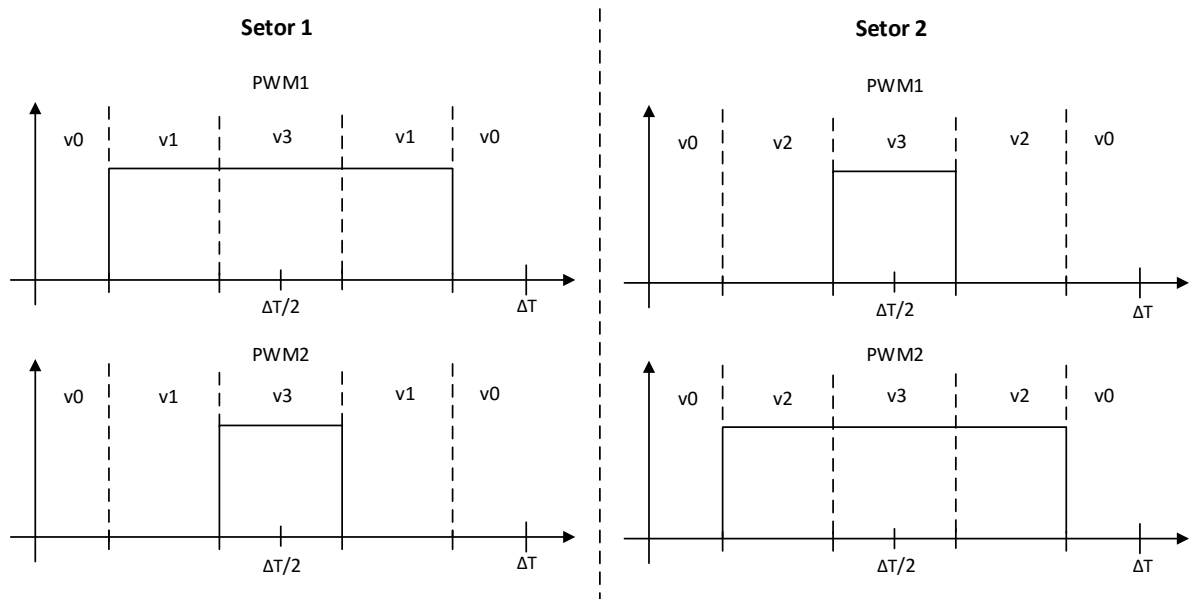
Neste inversor foram implementadas duas sequências de comutação, são elas: simétrica e braço fixo. A sequência simétrica mantém sinal centralizado no período e como resultado disso, provê uma baixa TDH na tensão de saída. A sequência de braço fixo, mantém um braço comutando em baixa frequência (PINHEIRO, *et al.*, 2005).

Setor	Sequência Simétrica	Sequência Braço Fixo
1	v0-v1-v3-v1-v0	v0-v1
2	v0-v2-v3-v2-v0	v3-v2

**Quadro 2 - Sequências de comutação inversor monofásico ponte completa**  
Fonte: PINHEIRO, *et al.* 2005

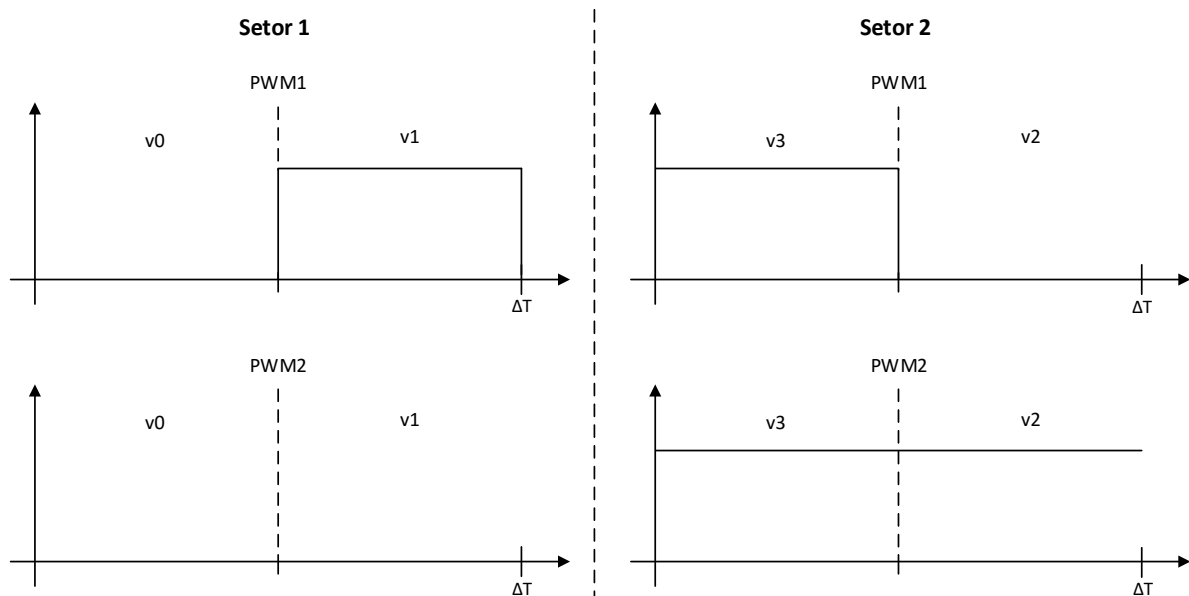
A frequência de comutação utilizada é de 1 kHz, relativamente baixa, mas o necessário para controlar a tensão do motor de corrente contínua.

Para a sequência simétrica, o PWM de comando da chave S1 (PWM1) e da chave S3 (PWM2), devem se comportar de acordo com a Figura 11. Nota-se que existe uma simetria em  $\Delta T/2$  e o pulso se localiza centralizado no período  $\Delta T$ . Em cada setor, a largura de um dos sinais PWM aumenta de acordo com o aumento do módulo tensão de referência, enquanto o outro diminui.



**Figura 11 - Space Vector PWM - Sequência simétrica para Inversor monofásico ponte completa**  
**Fonte: Autoria Própria**

A sequência de braço fixo, mantém um dos braços comutando em baixa frequência, ou no caso de uma tensão contínua, mantém esse braço fixo. Neste caso, o braço correspondente ao do PWM2, da chave S3. O pulso genérico previsto para cada um dos setores é mostrado na Figura 12.



**Figura 12 - Space vector PWM - Sequência braço fixo para inversor monofásico ponte completa**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 2.3.2 Modulação *Space Vector* para Inversor trifásico a três fios

Para implementação da modulação *Space Vector*, a referência é um vetor girante no plano d-q. Suas coordenadas podem ser polares, um ângulo ( $\theta$ ) e um módulo ( $V_o$ ), como proposto por Holmes e Lipo (2003), ou podem ser cartesianas, com uma parcela no eixo d ( $ud$ ) e outra no eixo q ( $uq$ ) como proposto por Prasad (1997). Ambos produzem os mesmos tempos de duração para os vetores e a partir de uma referência, uma transformação geométrica pode ser feita facilmente.

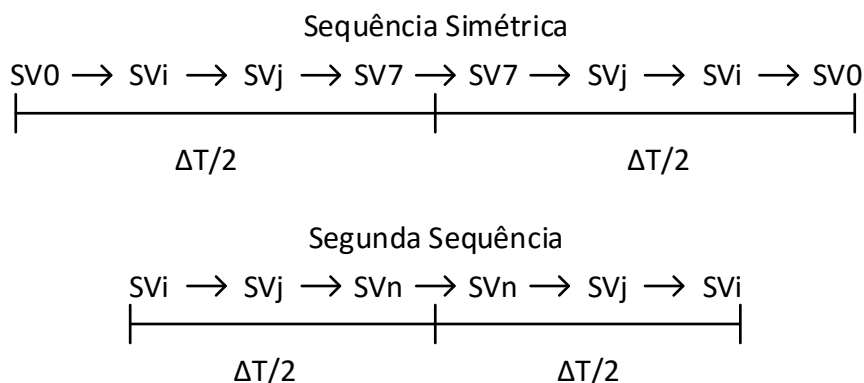
Tratando das sequências de comutação, parâmetro que as define é o posicionamento dos vetores nulos (SV1 e/ou SV7) no período  $\Delta T/2$ . O posicionamento desses vetores afeta no desempenho harmônico do inversor (HOLMES; LIPO, 2003).

As sequências implementadas são apresentadas no Quadro 3. A primeira sequência é conhecida como sequência simétrica e produz um baixo TDH na tensão de saída. A segunda sequência, em cada setor, mantém um dos braços sem chavear (PINHEIRO, *et al.*, 2005).

Setor	Primeira Sequência	Segunda Sequência
1	SV0-SV1-SV2-SV7-SV2-SV1-SV0	SV1-SV2-SV7-SV2-SV1
2	SV0-SV3-SV2-SV7-SV2-SV3-SV0	SV2-SV3-SV0-SV3-SV2
3	SV0-SV3-SV4-SV7-SV4-SV3-SV0	SV3-SV4-SV7-SV4-SV3
4	SV0-SV5-SV4-SV7-SV4-SV5-SV0	SV4-SV5-SV0-SV5-SV4
5	SV0-SV5-SV6-SV7-SV6-SV5-SV0	SV5-SV6-SV7-SV6-SV5
6	SV0-SV1-SV6-SV7-SV6-SV1-SV0	SV6-SV1-SV0-SV1-SV6

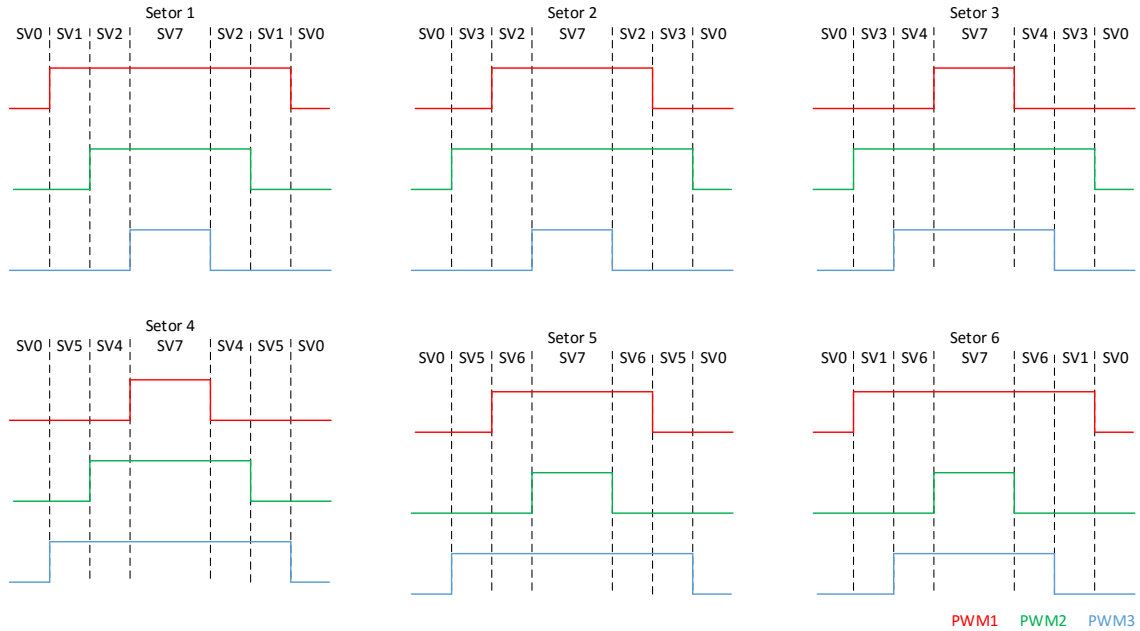
**Quadro 3 - Sequências de comutação para o inversor trifásico**  
**Fonte: Adaptado de (PINHEIRO, *et al.*, 2005)**

De forma gráfica, no período  $\Delta T$ , os vetores são distribuídos de acordo com a Figura 13. Os vetores  $SV_i$  e  $SV_j$  representam os vetores mais próximos do vetor de referência e  $SV_n$  representa os vetores nulos  $SV_0$  e  $SV_7$ .



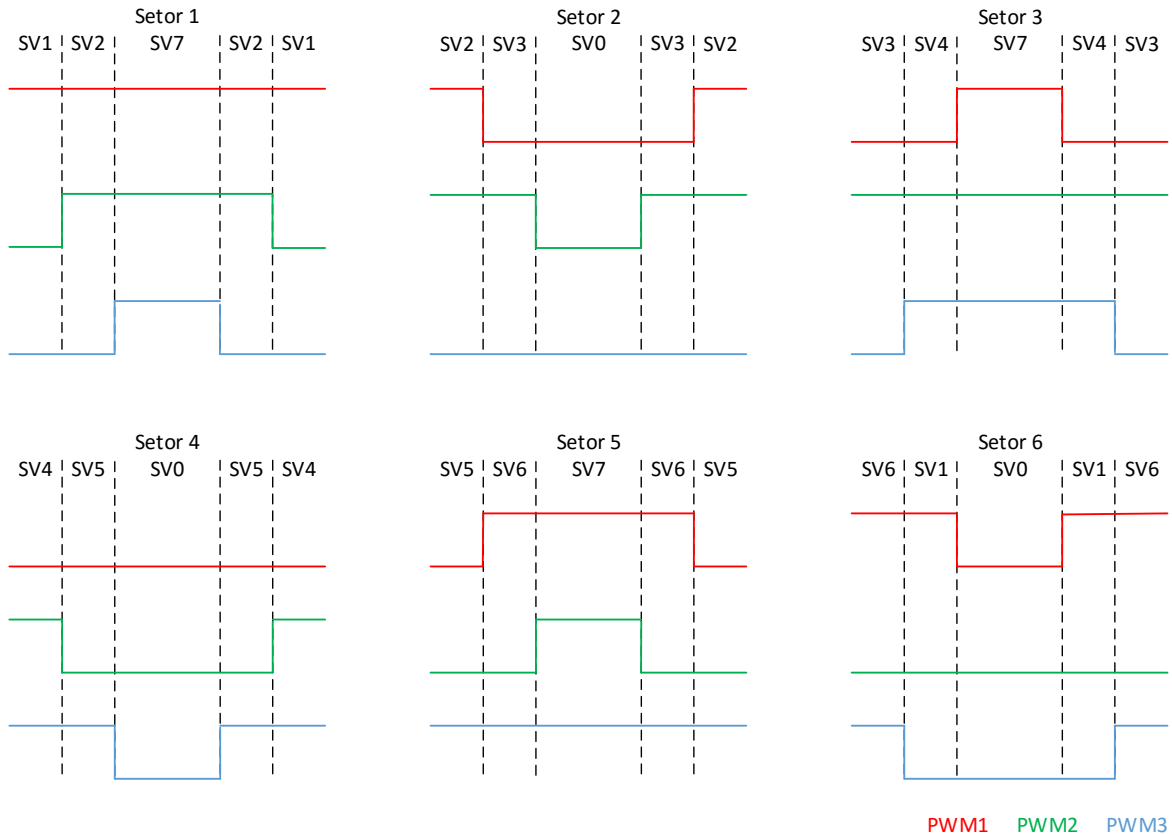
**Figura 13 - Distribuição dos vetores no período**  
**Fonte: Autoria Própria**

Para a seqüência simétrica, os sinais PWM por setor se comportam da maneira descrita na **Figura 14**, para a segunda seqüência, os sinais se encontram na **Figura 15**. Nessas figuras, o PWM1 (vermelho) comanda a chave S1, o PWM2 (verde) a chave S3 e o PWM3 (azul) a chave S5.



**Figura 14 - Space vector PWM - Sequência simétrica fixo para inversor trifásico**

Fonte: Autoria Própria



**Figura 15 - Space vector PWM - Segunda seqüência para inversor trifásico**

Fonte: Autoria Própria



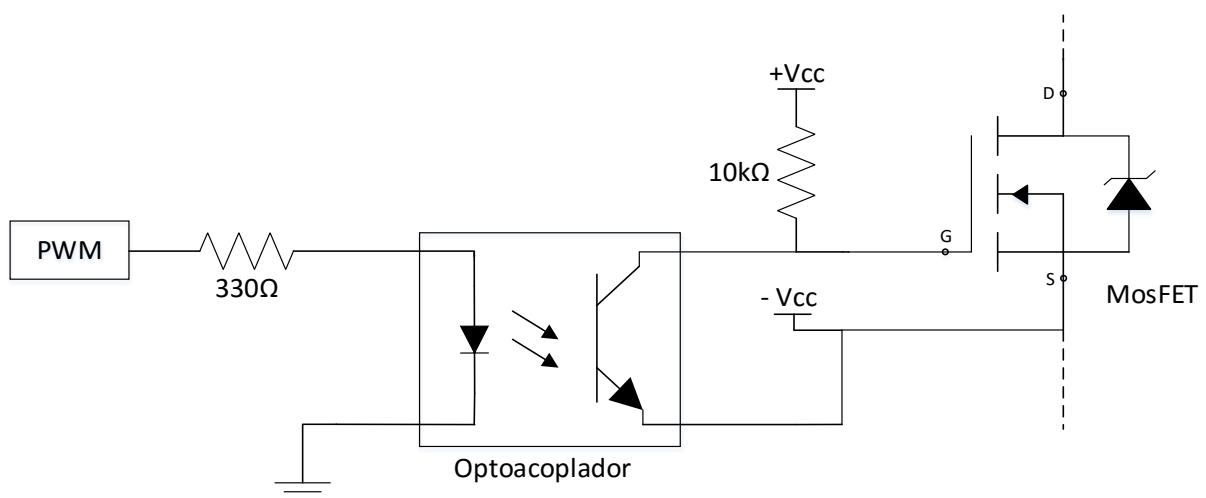
### 2.3.3 Projeto do inversor monofásico ponte completa

O inversor requer 4 chaves semicondutoras. Foram usados 4 MosFETs tipo N para realizar a comutação. Essas chaves possuem um diodo em paralelo. As chaves necessitam de uma diferença de potencial entre os terminais *Gate* e *Source* de pelo menos 6 V para conduzir. Porém, a tensão no terminal *Source* de cada chave é diferente, por isso existe a necessidade de diferentes potenciais, para não criar um caminho de corrente indesejado entre os terminais *Source* das chaves. Para solucionar esse problema, fontes de tensão isoladas com transformador foram utilizadas.

A limitação de potência do circuito é dada pelos MosFETs, de capacidade máxima de corrente de 33 A e consegue comutar no máximo 100 V.

Para que o sinal de saída do microcontrolador seja adequado ao sinal que as chaves devem receber, é necessário a utilização de um *driver*. Para esse fim, um optoacoplador 4N25 foi utilizado. É necessário limitar sua corrente de entrada em 10 mA, portanto é utilizado um resistor de 330  $\Omega$ , sendo que a amplitude do sinal PWM do microcontrolador é de 3,3 V.

O terminal coletor do optoacoplador é conectado ao terminal *gate* do MosFET e a um resistor de 10 K $\Omega$  que está conectado na fonte. Esse resistor tem valor indicado pelo fabricante como valor de resistência que produz menor atraso de propagação do sinal PWM. O emissor do optoacoplador é conectado ao terminal *Source* do MosFET e ao negativo da fonte. O circuito é apresentado na Figura 16.



**Figura 16 - Circuito driver do MosFET**  
Fonte: Autoria própria

O optoacoplador conduz quando o PWM está em nível alto, tornando zero a diferença de tensão entre os terminais *Gate* e *Source* do MosFET. Quando o PWM está em nível lógico baixo, a diferença de potencial entre *Gate* e *Source* é igual a da fonte de tensão. Para que a chave acompanhe o sinal PWM, conduzindo em nível lógico alto, o MosFET utilizado deve ser de intensificação.

O circuito inversor é a junção de 4 circuitos mostrados na Figura 16 em conjunto com as entradas da fonte de tensão contínua e saída da tensão modulada, de acordo com o circuito apresentado na Figura 2. O desenho completo do circuito se encontra no Apêndice A.

As tensões utilizadas no barramento CC e para acionamento das chaves são de 12 V. Nota-se que as chaves S2 e S4 podem ter o mesmo referencial, que pode ser o mesmo do barramento CC, portanto, 3 fontes isoladas são suficientes. O inversor utilizado é apresentado na Fotografia 1.

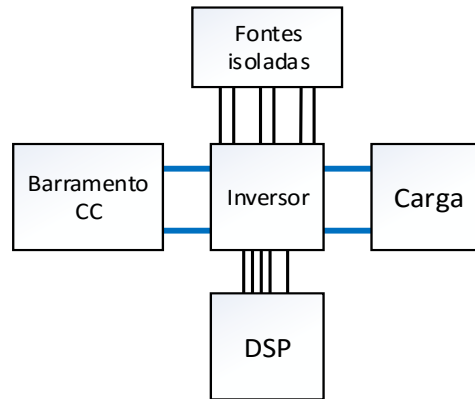


**Fotografia 1 - Inversor monofásico ponte completa**  
**Fonte: Autoria Própria**

#### 2.3.3.1 Descrição da plataforma experimental

Para controle do inversor são necessários 4 sinais PWM, um para cada chave e um fio de potencial comum, provenientes do processador lógico de sinais (DSP). Os *drivers* do inversor são conectados as fontes de 12 V isoladas com transformador. Por fim, o barramento CC é conectado ao inversor, juntamente com a

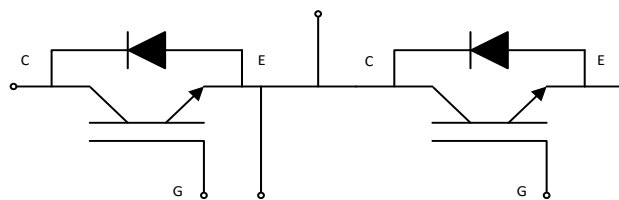
carga. O circuito de potência (Barramento – Inversor – Carga), não possui acoplamento elétrico com o circuito de controle (DSP – Inversor). Esse isolamento é feito pelo uso dos optoacopladores presentes no circuito *driver*. A Figura 17 apresenta o esquema de ligação utilizado, as conexões em azul indicam o circuito de potência.



**Figura 17 - Esquema de ligação - Inversor Monofásico**  
Fonte: Autoria Própria

#### 2.3.4 Plataforma experimental – Inversor Trifásico

Para o inversor trifásico, as chaves utilizadas foram IGBTs SKM50GB06. Cada IGBT forma um braço do inversor, é constituída de 2 chaves, cada uma em paralelo com um diodo, como mostrado na Figura 18. Essas chaves suportam 600 V entre os terminais coletor e emissor. Sua corrente máxima é de 50 A e o tempo de resposta é de 50 ns.



**Figura 18 - Diagrama da Chave IGBT**  
Fonte: Autoria Própria

O *driver* utilizado para cada IGBT é o SKHI22BR, que a partir de dois sinais PWM de amplitude 15 V, adequa o sinal para as chaves. Sua alimentação é de 15 V e gera um sinal de erro em caso de curto circuito ou nível de alimentação baixo. No estado de erro, o *driver* não transmite o sinal PWM para as chaves. O SKHI22BR introduz o tempo-morto, que foi ajustado para 2,3  $\mu$ s. O módulo possui supressão de pulso curto, que inibe pulsos menores que 500 ns. A isolação elétrica acontece por meio de um transformador de pulsos.

Para adequar os sinais do DSP com o *driver*, um circuito adicional é necessário. Os sinais do DSP têm uma amplitude de 3,3 V e precisam ser adequados para uma amplitude de 15 V. O sinal de erro proveniente do *driver* também tem amplitude de 15 V e deve ser adequado para 3,3 V. Para realizar essa adequação de sinal, um *Buffer* de coletor aberto é utilizado. Existem alguns *drivers* que utilizam uma amplitude de 5 V ao invés de 15 V, portanto, este circuito foi projetado para atender às duas especificações.

Como existem três IGBT's, são necessários três *drivers*, que geram três sinais distintos de erro. Com portas *NOT*, o circuito transforma os três sinais de erro em um, e para qualquer um dos três sinais dos *drivers*, esse sinal vai para nível baixo.

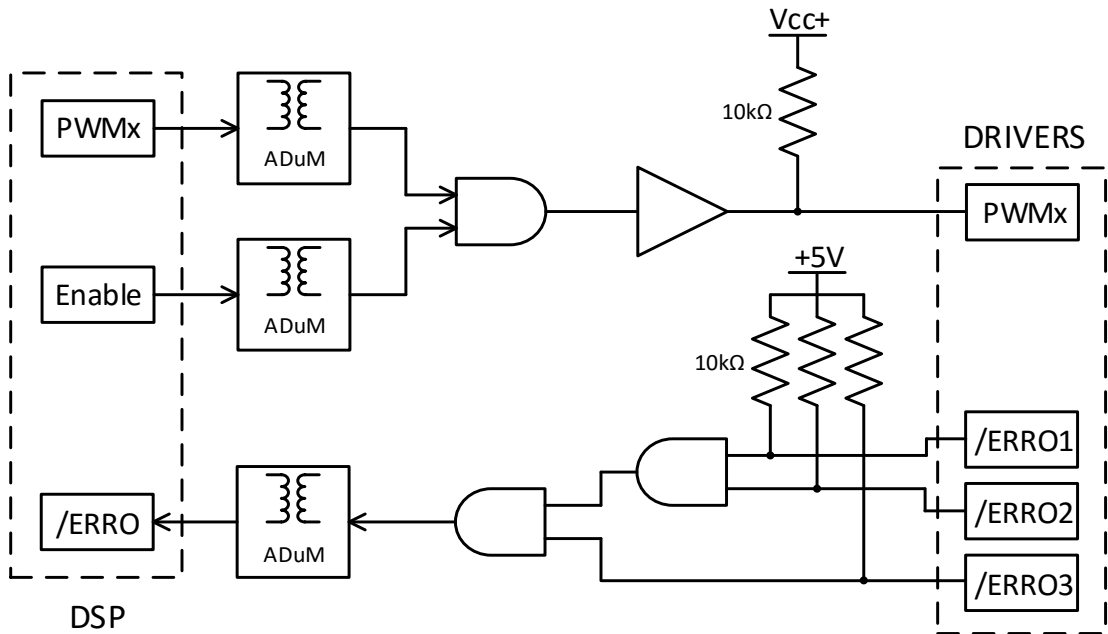
O circuito necessita de um sinal de ativação *Enable* do DSP. Caso esse sinal seja nível baixo, todos os sinais PWM não são transmitidos para os *drivers*. Portas lógicas *NOT* foram introduzidas, fazendo a comparação com o sinal PWM e o sinal de *Enable*.

Como forma adicional de proteção, o sinal do DSP é isolado eletricamente. O CI ADuM6404 e ADuM6401 são utilizados com esse propósito. Além da isolação dos pulsos, esse CI possui isolação da alimentação, fornecendo isoladamente uma tensão de 3,3 V ou 5 V e aproximadamente 65 mA para alimentação de outros circuitos. Esse CI não é bidirecional, o ADuM6404 possui quatro canais de mesma direção enquanto o ADuM6401 possui três canais de entrada e um de saída de dados. No total, são seis sinais PWM e um sinal de ativação provenientes do DSP e um sinal de erro proveniente do *driver*.

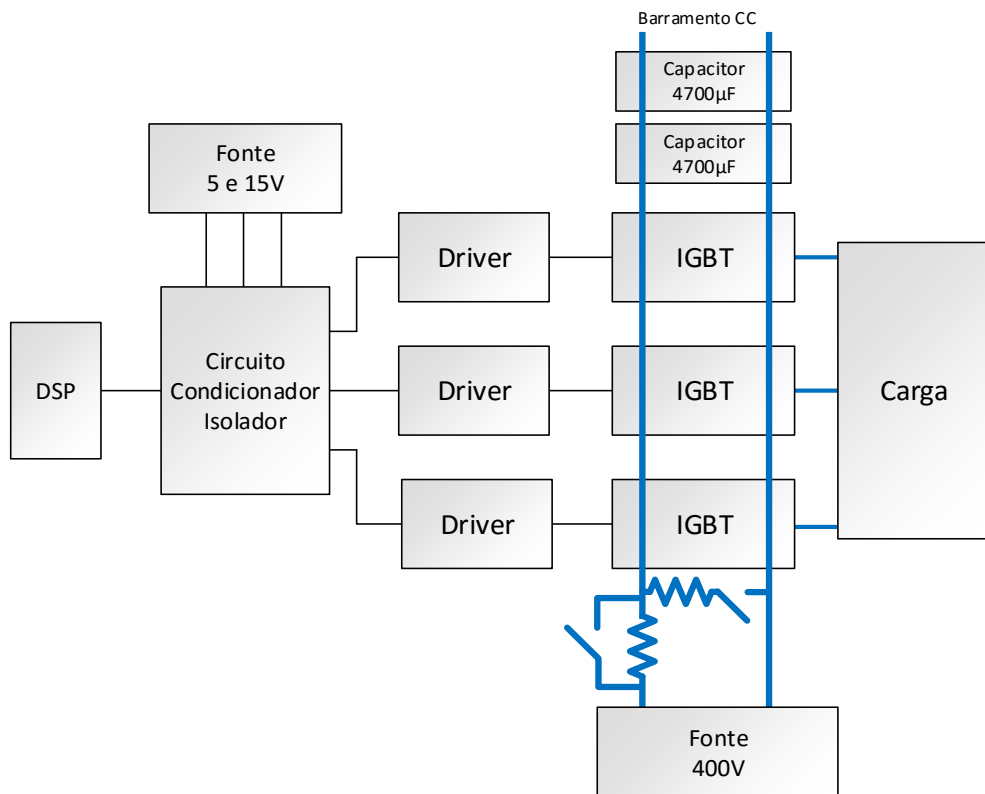
O diagrama básico para cada PWM, assim como para os sinais de erro e *enable* são apresentados na Figura 19. O circuito completo encontra-se no Apêndice B.

O Barramento CC necessita de capacitores, que possuem uma taxa de variação de corrente mais alta do que da fonte. Dessa forma, caso a carga necessite subitamente de corrente, o capacitor fornece. São utilizados dois capacitores de 4700  $\mu\text{F}$ , ambos em paralelo com o barramento CC. Uma resistência em série e uma em paralelo foram adicionadas, para limitar a corrente quando a fonte do barramento CC for ligada e para descarregar os capacitores, respectivamente. Esses resistores são inseridos ou removidos do barramento complementarmente e essa comutação é feita através de um disjuntor. O diagrama da Figura 20 apresenta o arranjo da plataforma experimental. As conexões em azul indicam o circuito de potência.

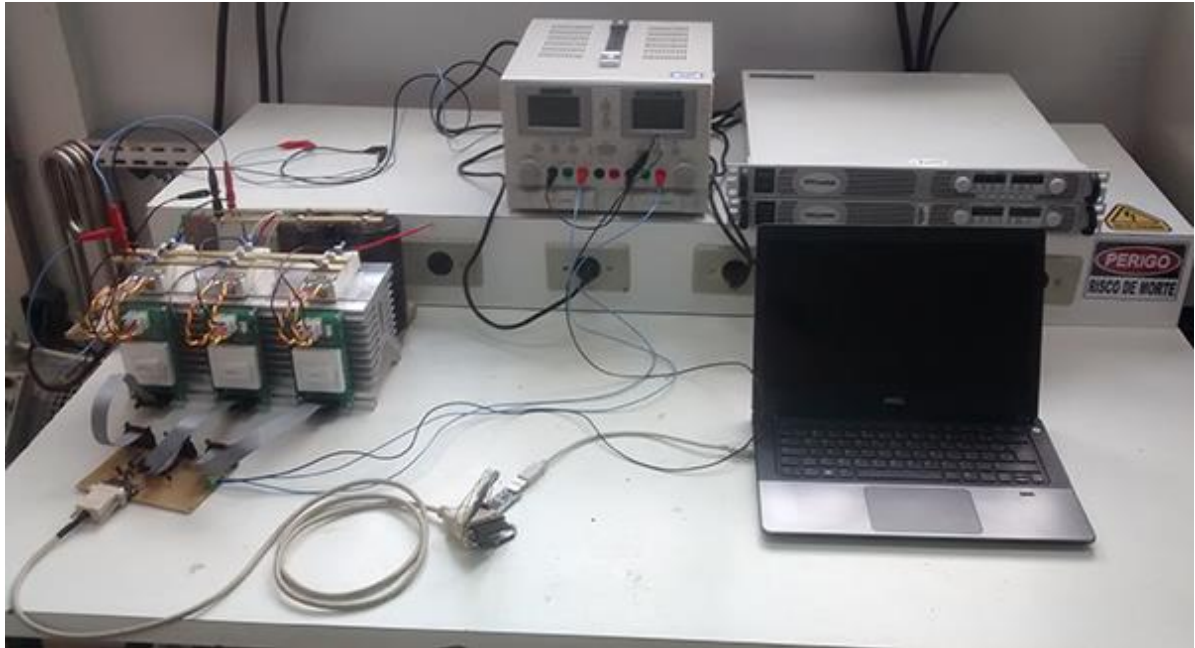
A frequência de comutação utilizada é de 15 kHz. A tensão no barramento CC de 400 V. As resistências são de 320 Ω.



**Figura 19 - Diagrama básico do circuito condicionador de sinais**  
 Fonte: Autoria Própria



**Figura 20 - Arranjo do inversor trifásico**  
 Fonte: Autoria Própria



**Fotografia 2 - Plataforma experimental - Inversor trifásico**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para validar a modulação e sequencias propostas, foram realizadas simulações no software PSim. Depois das devidas simulações, a modulação foi implementada nos inversores através do DSP F28069.

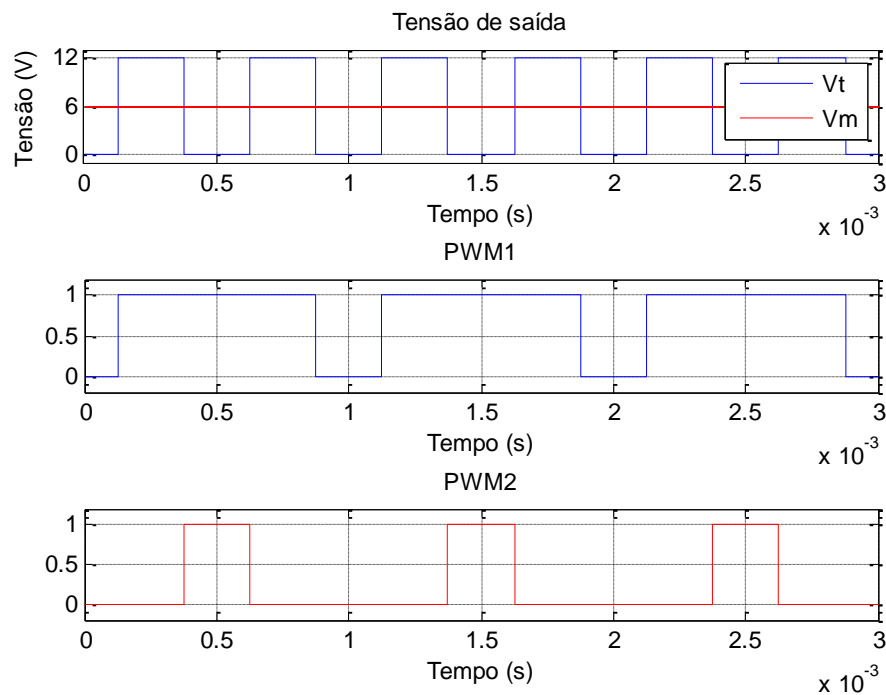
O DSP é configurado com uma frequência de *clock* de 80 MHz. Os módulos utilizados para geração dos sinais PWM são os *ePWM*, contadores próprios para essa função. Quando o contador atinge o valor máximo estipulado, uma interrupção é disparada e o algoritmo de modulação é efetuado. Os valores resultantes da modulação ficam armazenados e só são carregados quando o contador volta a ser zero, isto é, a razão cíclica dos sinais PWM são atualizados apenas em zero, quando o período do pulso anterior termina.

#### 3.1 SIMULAÇÕES INVERSOR MONOFÁSICO PONTE COMPLETA

As modulações *Space Vector* implementadas nas simulações do software PSIM, foram desenvolvidas previamente no MatLab, e posteriormente adaptada para o “*Simplified C Block*” do PSIM.

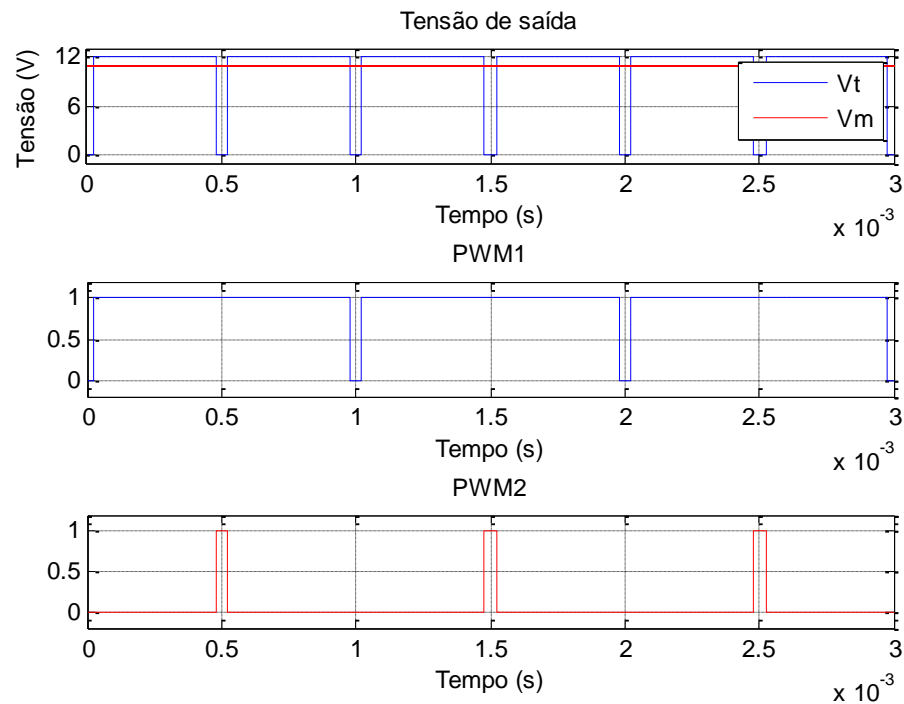
##### 3.1.1 Sequência Simétrica

Utilizando uma frequência de chaveamento de 1 kHz, as formas de onda do PWM1 e PWM2 da modulação de sequência simétrica, assim como a forma de onda da tensão nos terminais do inversor e sua média são apresentados na Figura 21, para uma referência positiva de 50 % da tensão máxima. O PWM1 é o sinal de comando da chave S1 e o PWM2 da chave S3. Percebe-se que a frequência da tensão nos terminais do inversor corresponde ao dobro da frequência do pulso. Isso ocorre devido aos vetores nulos  $v_0$  e  $v_3$ , que de acordo com o Quadro 2, são distribuídos no início, no final e no meio do período do sinal.



**Figura 21 - Space Vector PWM monofásico - Sequência simétrica - 50% positivo**  
 Fonte: Autoria Própria

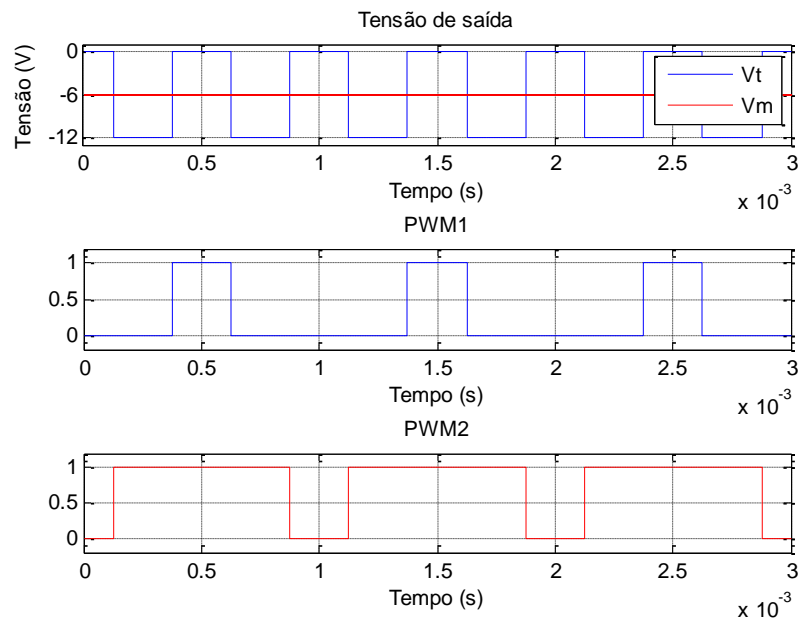
Para um valor de referência positiva de 90% da tensão máxima, o resultado é mostrado na Figura 22. O PWM1 tem uma razão cíclica maior que o PWM2. O PWM2 é nível alto somente quando o vetor  $v_3$  é acionado.



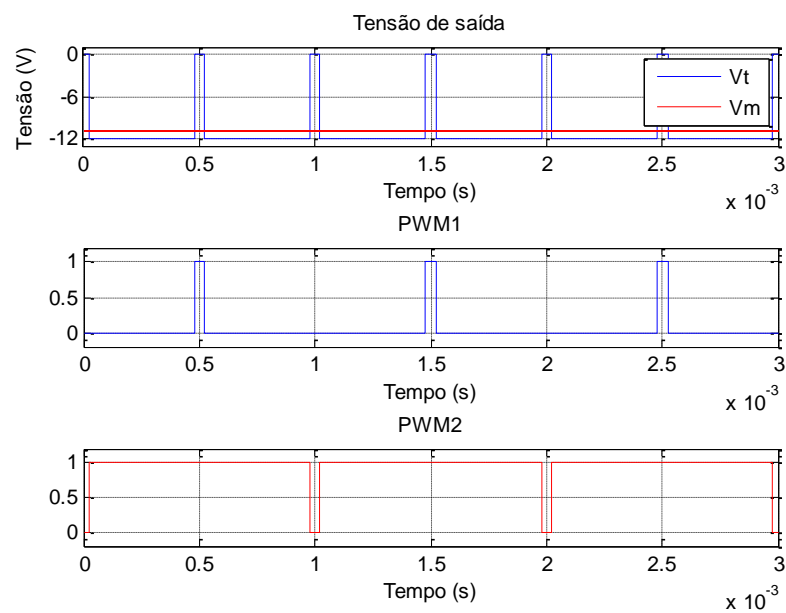
**Figura 22 - Space Vector PWM monofásico - Sequência simétrica - 90% Positivo**  
 Fonte: Autoria Própria



Os valores negativos de referência, também de 50% e de 90%, são apresentados na Figura 23 e Figura 24 respectivamente. Quando a razão cíclica do PWM1 é maior que a do PWM2, o setor correspondente é o Setor 1, e a tensão nos terminais do inversor é positiva. Quando o contrário acontece, ou seja a razão cíclica do PWM2 é maior do que a do PWM1, o setor correspondente é o 2 e a tensão nos terminais do inversor é negativa. Portanto, quando a razão cíclica do PWM1 ser igual a do PWM2, temos tensão média igual a zero.

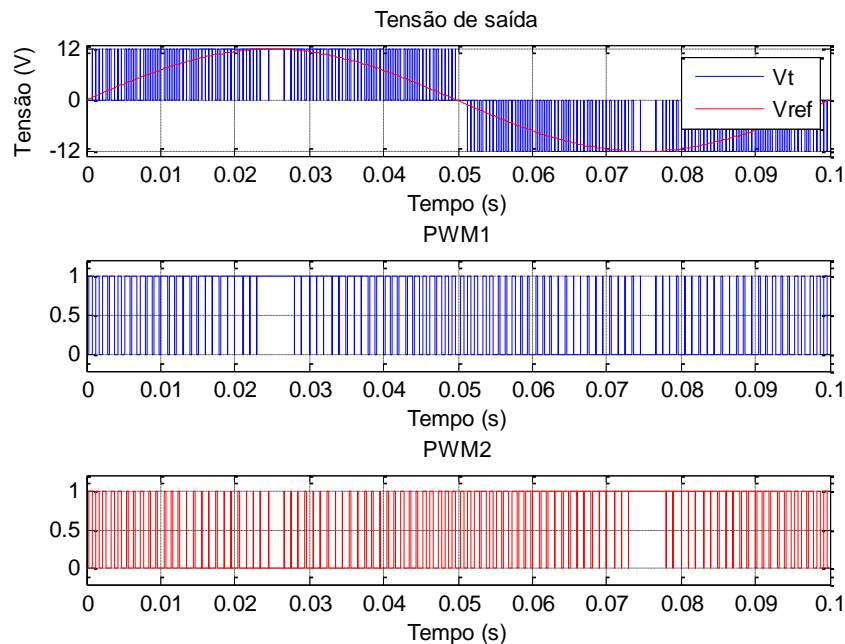


**Figura 23 - Space Vector PWM monofásico - Sequência simétrica - 50% Negativo**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 24 - Space Vector PWM monofásico - Sequência simétrica - 90% Negativo**  
**Fonte: Autoria Própria**

A Figura 25 mostra o sinal PWM para uma referência senoidal de 10Hz com amplitude de 100% da tensão do barramento CC (1p.u.). Quando a tensão de referência se aproxima da máxima do barramento, o sinal de um braço se mantém em nível alto. Isso não é um problema, pois o outro braço também tem influência na modulação da tensão.

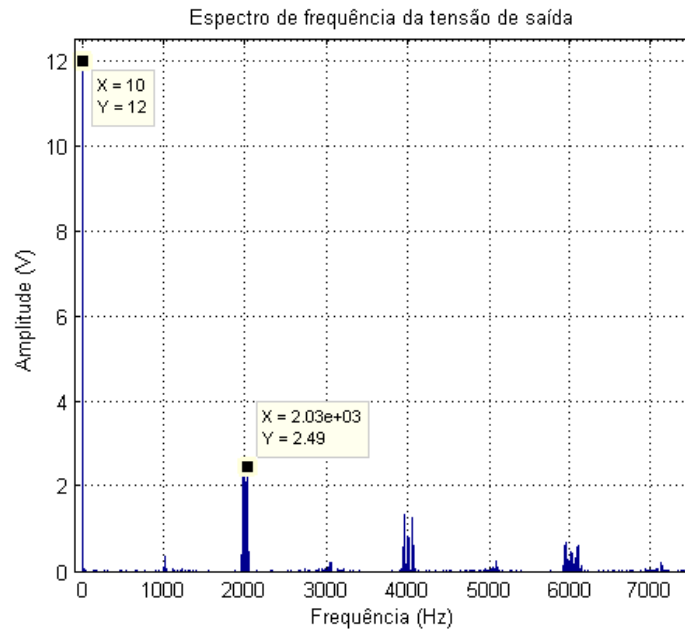


**Figura 25 - Space Vector PWM monofásico - Sequência simétrica - 10Hz 100%**  
**Fonte: Autoria Própria**

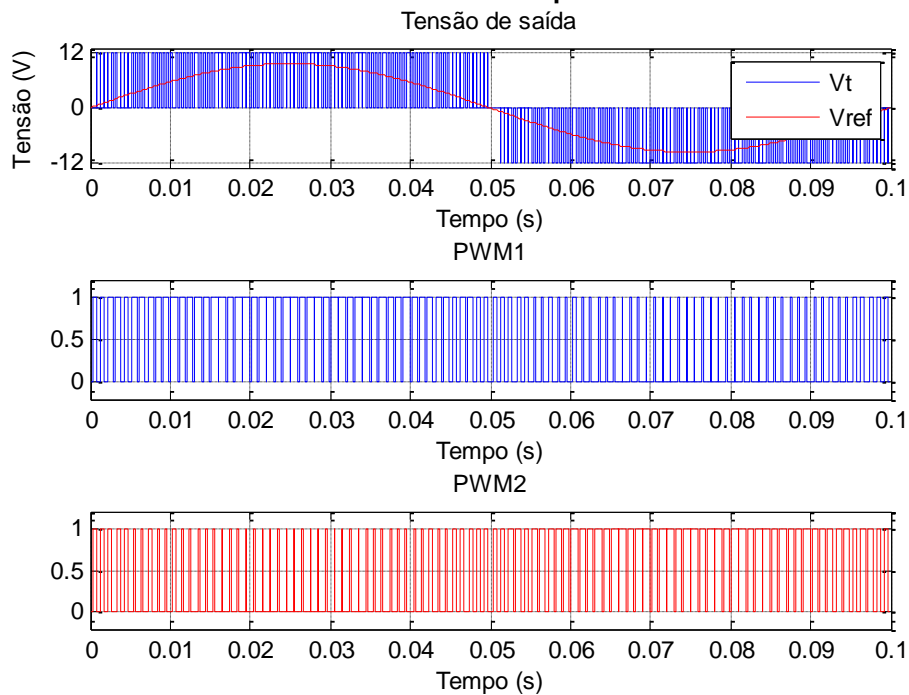
O espectro de frequência dessa onda, mostrado na Figura 26, indica que a tensão de 1 p.u. e 10 Hz está sendo sintetizada conforme o esperado. Também surgem espectros em torno de 2 kHz devido a comutação e a forma de onda quadrada, assim como em 4 kHz, 6 kHz e assim por diante, são frequências múltiplas da frequência de comutação. Essas frequências situadas nos múltiplos da frequência de comutação existem para todos os próximos gráficos da análise de Fourier, porém, os gráficos serão truncados em para facilitar a visualização da amplitude da onda fundamental. Para a análise da distorção harmônica, a amplitude dessas componentes de frequência são consideradas. As pequenas amplitudes que aparecem nas proximidades de 1 kHz são recorrentes a comutação de apenas um dos braços do inversor, quando a referência está próxima de zero.

O resultado do cálculo de THD da forma de onda da tensão é de 50,7683%.

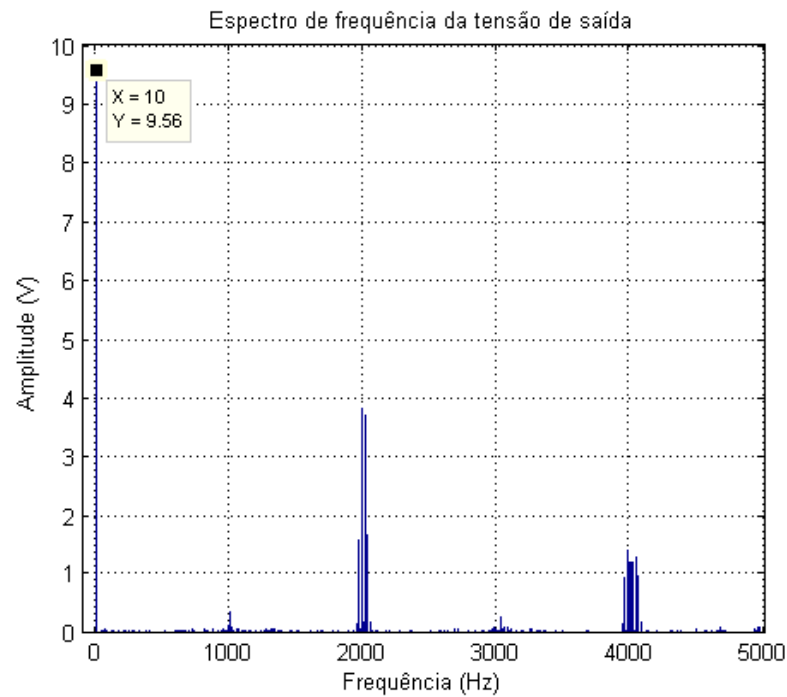
Quando a referência de 10 Hz tem amplitude de 0,8 p.u., equivalente a 9,6 V, o resultado é o mostrado na Figura 27. A THD desse sinal é maior, 75,3726%. Isso ocorre pois a amplitude da onda fundamental é menor, enquanto os valores das componentes harmônicas se mantêm iguais, já que a tensão do barramento CC não é alterada. Na Figura 28 o resultado pode ser comprovado, a tensão de referência para a onda fundamental de 10 Hz foi alcançada.



**Figura 26 - Espectro de frequência onda de 10Hz, amplitude de 1p.u. - Sequência Simétrica**  
**Fonte: Autoria Própria**



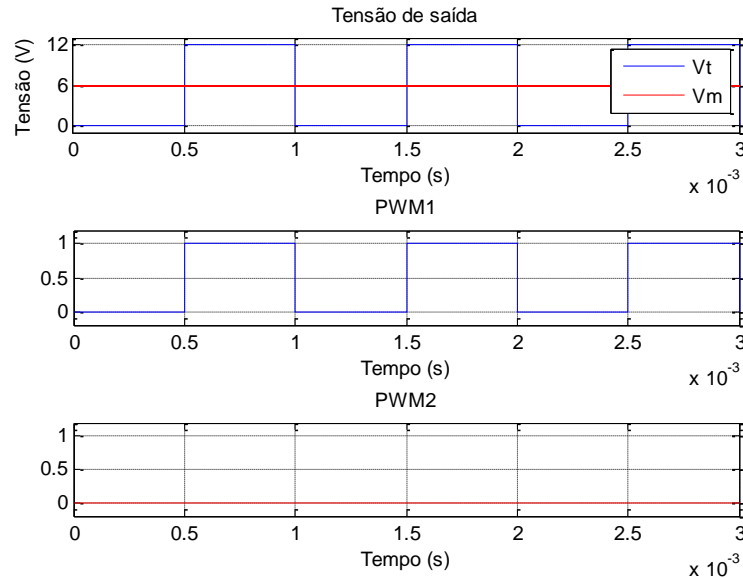
**Figura 27 - Space Vector PWM monofásico - Sequência simétrica - 10Hz 80%**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 28 - Espectro de frequência onda de 10Hz, amplitude de 0,8p.u. - Sequência Simétrica**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 3.1.2 Sequência Braço Fixo

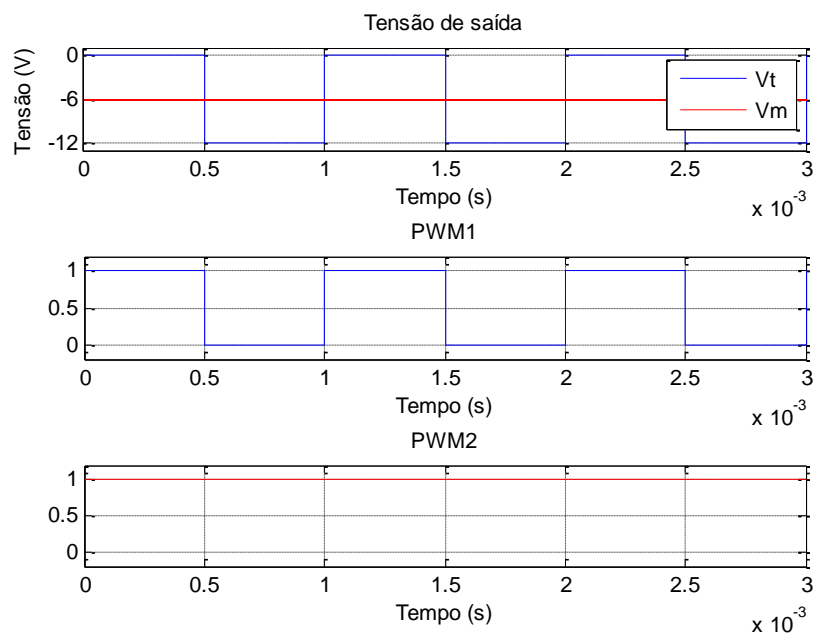
Com a frequência de comutação determinada em 1 kHz, as formas de onda do PWM1 e PWM2 da modulação de sequência braço fixo, assim como a forma de onda da tensão nos terminais do inversor e sua média são apresentados na Figura 29, para uma referência positiva de 50% da tensão máxima (0,5 p.u.). Conforme o esperado, um braço manteve sua posição enquanto o outro modulava a tensão. Nota-se que o sinal PWM não está mais centralizado no meio do período. Para a mesma tensão de 0,5 p.u. mas com polaridade trocada, a forma de onda é apresentada na Figura 30.



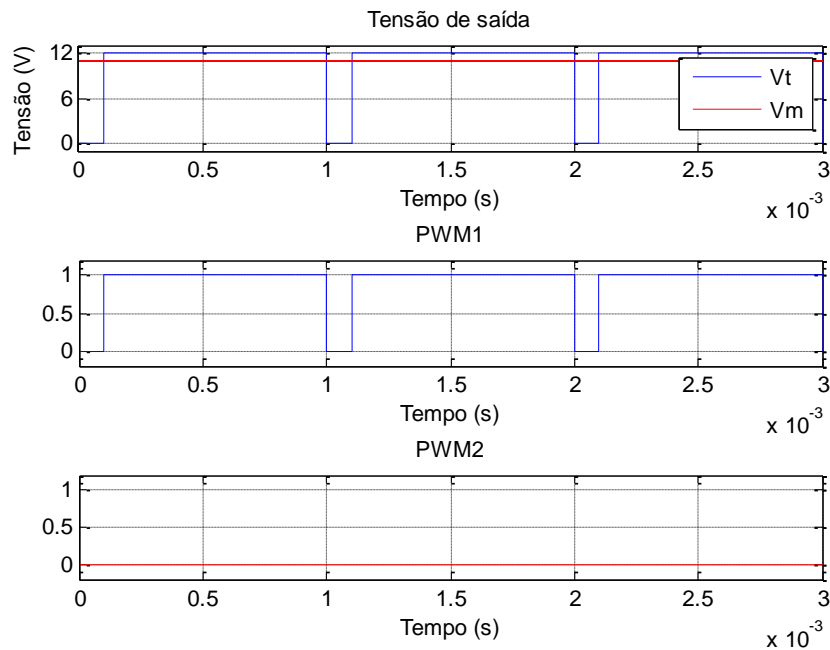
**Figura 29 - Space Vector PWM monofásico - Sequência braço fixo - 50% Positivo**  
**Fonte: Autoria Própria**

Para 0,9 p.u., as formas de onda dos sinais PWM e da tensão nos terminais do inversor são apresentadas na Figura 31.

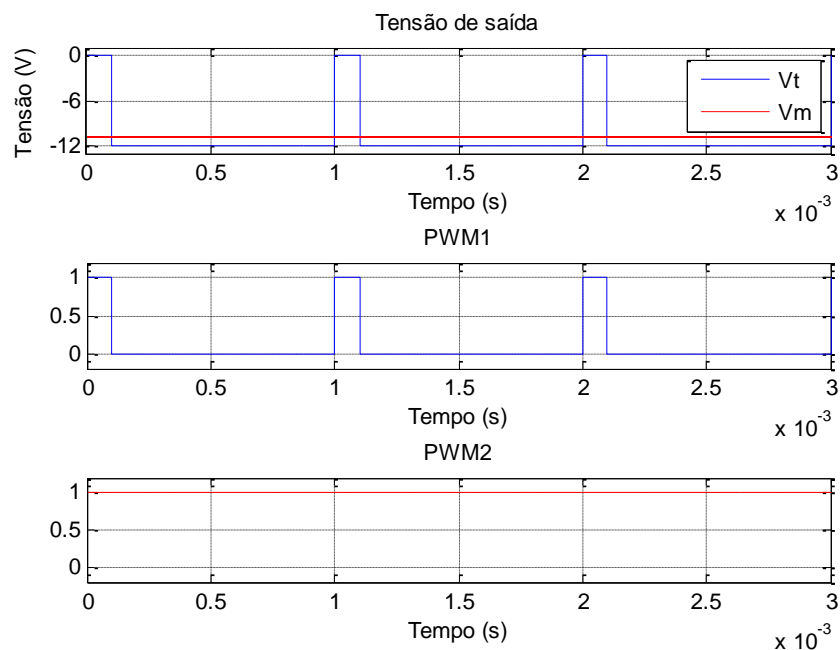
Quando a referência de tensão é negativa, o PWM1 em nível alto significa tensão igual a zero. Portanto, a proporcionalidade se inverte e a razão cíclica do PWM1 diminui enquanto o módulo da tensão aumenta. Esse efeito pode ser visto com clareza na Figura 32, que apresenta a forma de onda dos sinais PWM das chaves S1 (PWM1) e S3 (PWM2), a tensão de saída e seu valor médio para 0,9 p.u. de tensão de polaridade negativa.



**Figura 30 - Space Vector PWM monofásico - Sequência braço fixo - 50% Negativo**  
**Fonte: Autoria Própria**



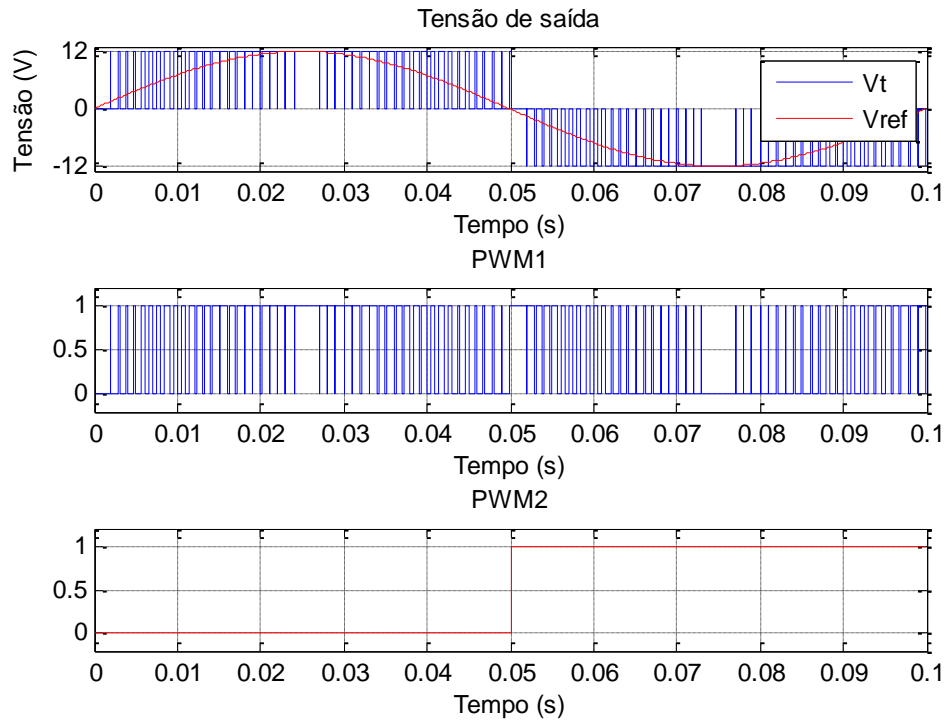
**Figura 31 - Space Vector PWM monofásico - Sequência braço fixo - 90% Positivo**  
**Fonte: Autoria Própria**



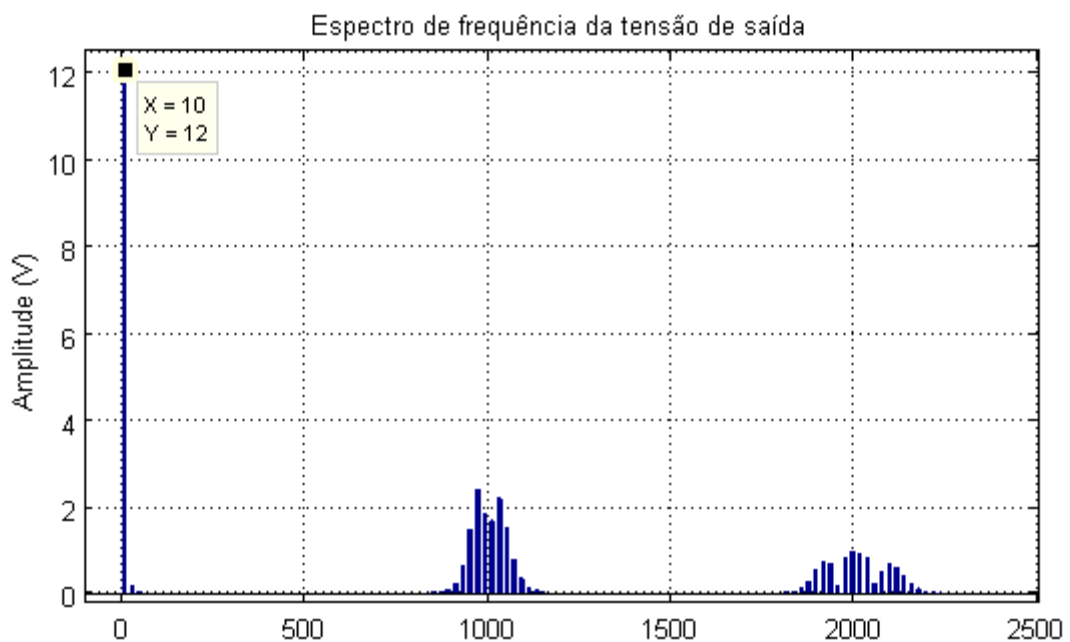
**Figura 32 - Space Vector PWM monofásico - Sequência braço fixo - 90% Negativo**  
**Fonte: Autoria Própria**

Com uma referência senoidal, um dos braços mantém a comutação em baixa frequência, mudando apenas quando a tensão altera a polaridade. Para essa situação, as formas de onda para uma referência de 10 Hz e amplitude de 1 p.u. estão representados na Figura 33, e para uma amplitude de 0,8 p.u. na Figura 35.

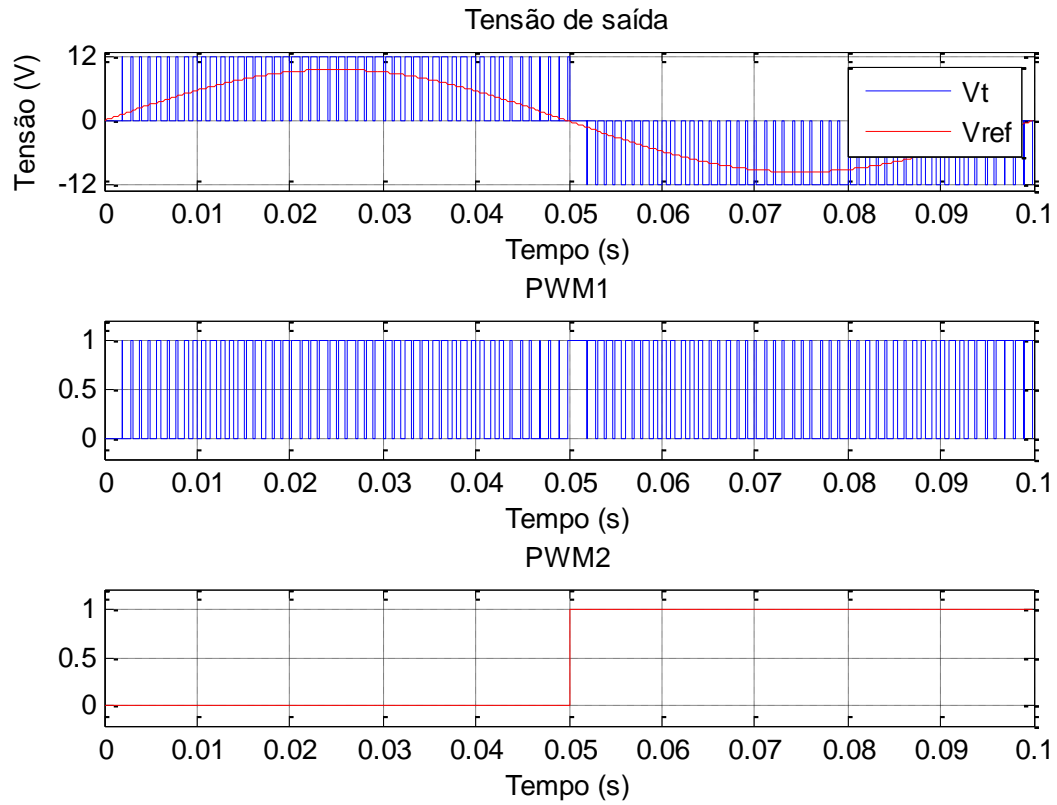
De acordo com os espectros de frequência da Figura 34 e Figura 36, referentes as referências senoidais de amplitude 1 p.u. e 0,8 p.u. respectivamente, em torno da frequência de comutação (1 kHz) surgem espectros que a sequência simétrica não apresenta. Isso resulta em um TDH um pouco mais elevada, de 51,6% para 1 p.u. de amplitude, e de 76,2% para 0.8 p.u.



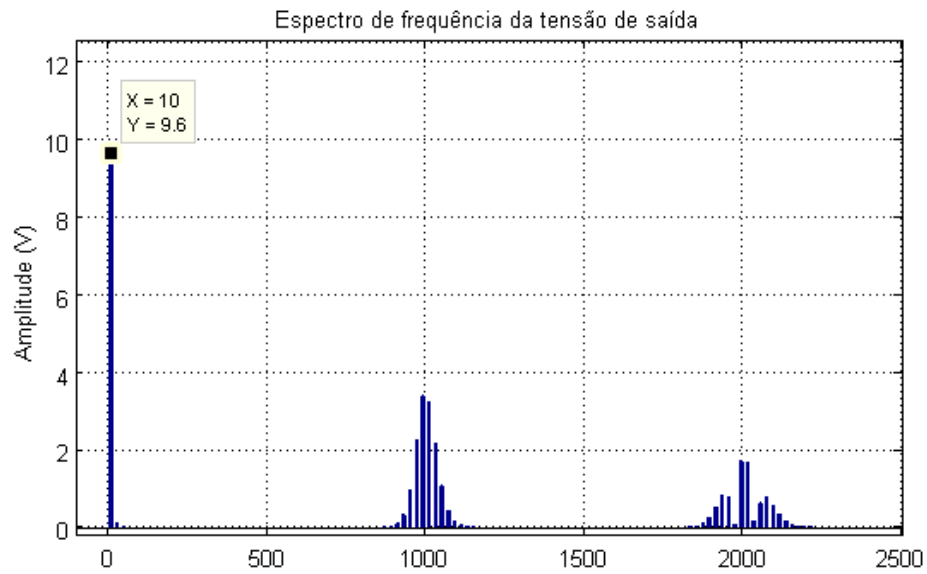
**Figura 33 - Space Vector PWM monofásico - Sequência braço fixo - 10Hz 1p.u.**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 34 - Espectro de frequência onda de 10Hz, amplitude de 1p.u. - Sequência braço fixo.**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 35 - Space Vector PWM monofásico - Sequência braço fixo - 10Hz 0,8p.u.  
Fonte: Autoria Própria**



**Figura 36 - Espectro de frequência onda de 10Hz, amplitude de 0,8p.u. - Sequência Braço Fixo  
Fonte: Autoria Própria**



### 3.2 IMPLEMENTAÇÕES EXPERIMENTAIS NO INVERSOR MONOFÁSICO PONTE COMPLETA

Como teste inicial, é utilizado um sinal no PWM1 de razão cíclica de 50% enquanto o outro braço se manteve fixo. Dessa forma é possível confirmar o funcionamento do inversor. A Figura 37 mostra o PWM na saída do DSP (canal 1, em amarelo), do sinal nos terminais *Gate-Source* do MosFET, na saída do *driver* (canal 2, em azul) e da forma de onda sintetizada pelo inversor (canal 3, em roxo). Nota-se os diferentes níveis de tensão entre os pontos.

A resposta da chave ao pulso não é instantânea. Por isso é necessário introduzir um intervalo de bloqueio entre a comutação das chaves de um mesmo braço (tempo morto ou *deadband*), para garantir que elas não conduzam ao mesmo tempo e criem um caminho de curto circuito entre os terminais do barramento CC. Este intervalo foi inserido pelo DSP, via software e seu valor foi determinado em 12  $\mu$ s. O resultado é mostrado na Figura 38, que mostra os sinais complementares aplicados as chaves de um mesmo braço, às chaves S1 (canal 1, em amarelo) e S2 (canal 2, em azul).

As referências senoidais são resultado de um vetor gerado via software, através do MatLab, armazenado na memória do DSP.

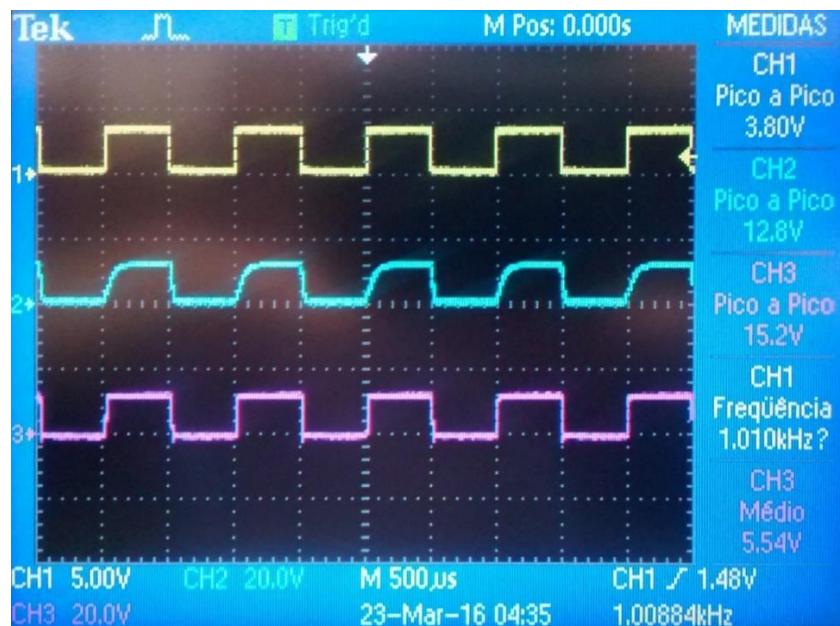
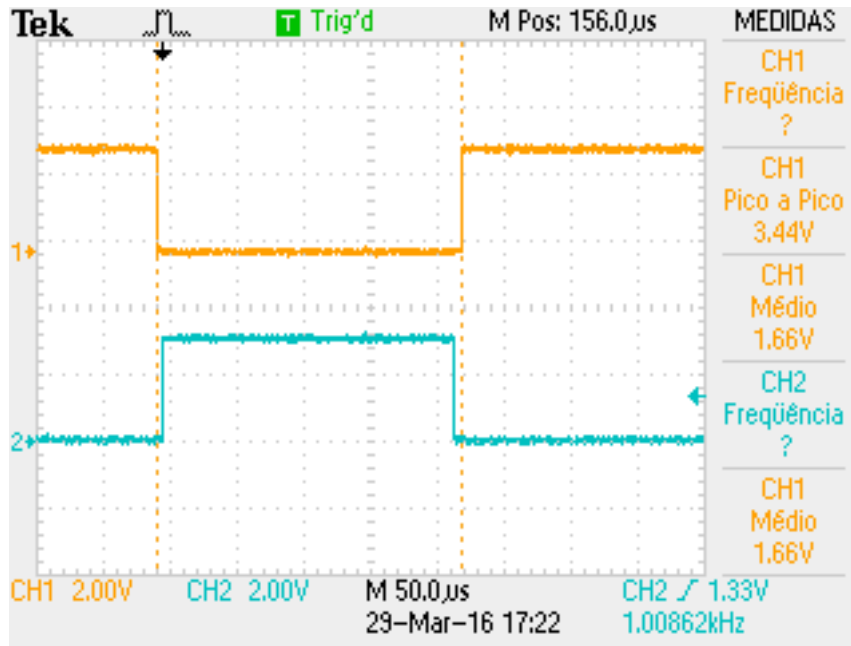


Figura 37 - Formas de onda no inversor monofásico ponte completa. Canal 1 (Amarelo): sinal de saída do DSP, Canal 2 (Azul): sinal nos terminais gate-source do MosFET, Canal 3 (Roxo): tensão nos terminais do inversor.

Fonte: Autoria Própria



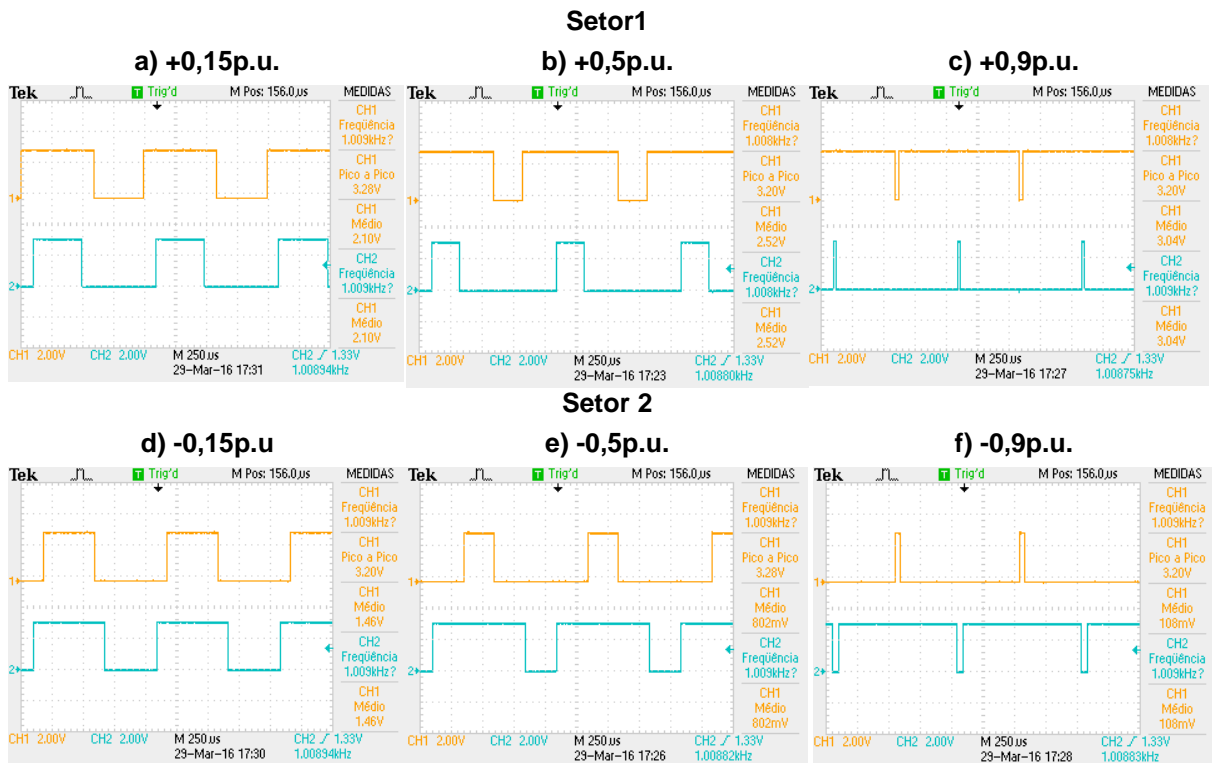
**Figura 38 - Tempo Morto inserido entre os sinais PWM complementares entre as chaves do mesmo braço. Canal 1 (Amarelo): sinal para chave S1, Canal 2 (Azul): sinal para chave S2. Fonte: Autoria Própria**

### 3.2.1 Sequência Simétrica

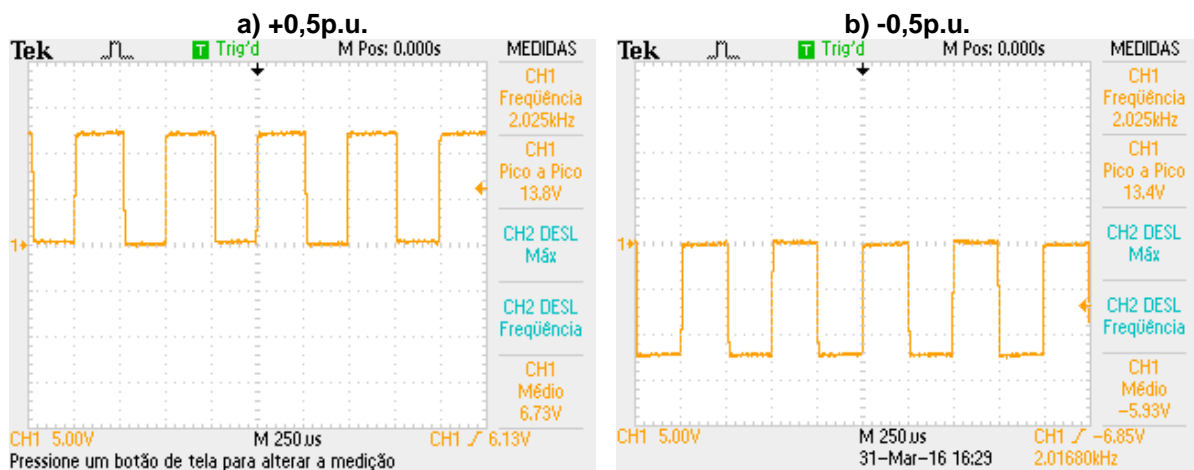
O inversor foi submetido aos sinais PWM1 (canal 1 – amarelo), referente ao sinal para a chave S1, e PWM2 (canal 2 – azul), referente ao sinal para a chave S3, mostrados na Figura 39, e seus complementares.

Quando a tensão de referência diminui, os sinais PWM tendem a se tornar iguais. Portanto, quando a referência é igual a 0, PWM1 é igual ao PWM2, os vetores  $v_0$  e  $v_3$ , correspondentes a tensão nula, se distribuem igualmente no período. Consequentemente, as chaves não param de comutar.

O inversor sintetiza as formas de onda de acordo com a simulação. A capacidade de inversão da polaridade da tensão também é validada, como pode ser visto na Figura 40.



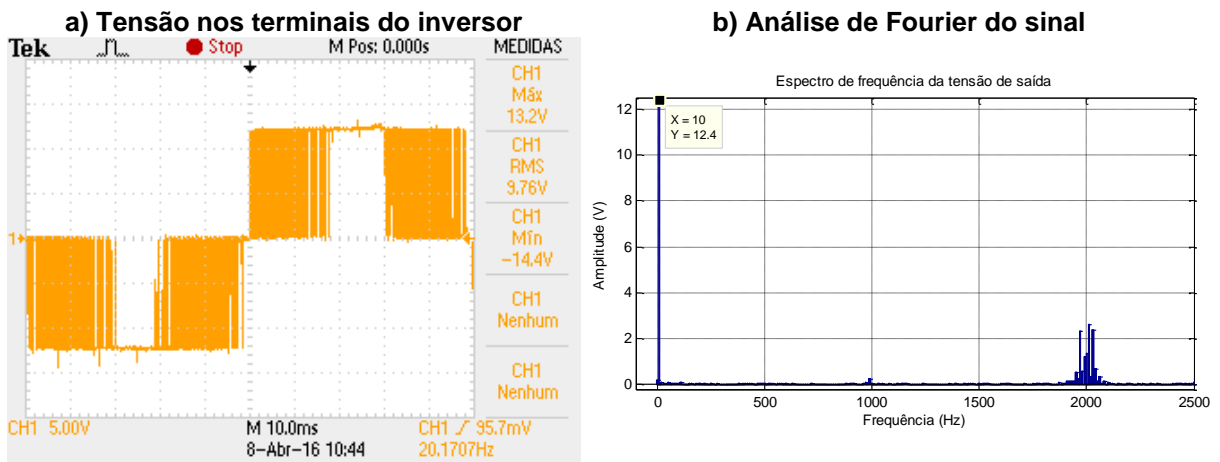
**Figura 39 – PWM1 (Canal 1, em amarelo) e PWM2 (Canal 2, em azul) aplicados ao inversor monofásico utilizando a sequência simétrica. Referência de tensão: a)0,15 p.u. positivo, b)+0,5 p.u. positivo, c)+0,9 p.u. positivo, d)0,15 p.u. negativo, e)0,5 p.u. negativo, f)0,9 p.u. negativo.**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 40 - Tensões sintetizadas no inversor monofásico operando a vazio utilizando a sequência simétrica para as referências de a)0,5 p.u. positivo e b)0,5 p.u. negativo.**  
**Fonte: Autoria Própria**

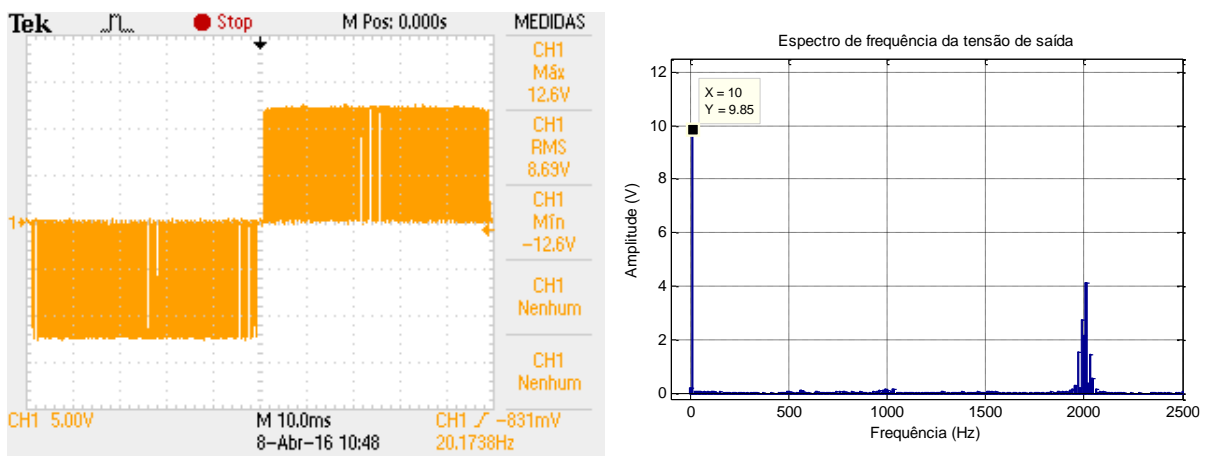
Conforme a Figura 41 com uma referência senoidal de 10 Hz com amplitude 1 p.u., apesar de manter a tensão em nível alto por um período de tempo maior do que na simulação, o inversor consegue sintetizar o sinal de acordo como o esperado. Como o sistema não está em malha fechada, a razão do valor um pouco alterado da amplitude da onda de frequência fundamental são as flutuações na tensão

contínua do barramento CC, como ruído e precisão do ajuste. Neste caso, a TDH é de 50,1364%.



**Figura 41 - Resposta do inversor com uma referência senoidal 10Hz amplitude de 1p.u. - Sequência simétrica. a) Tensão nos terminais do inversor, b) Análise de Fourier da tensão.**  
Fonte: Autoria Própria

Quando a amplitude da referência cai para 0.8p.u., a TDH aumenta para 75,0035%.



**Figura 42 - Resposta do inversor com uma referência senoidal 10Hz amplitude de 0.8p.u. - Sequência simétrica**  
Fonte: Autoria Própria

Mais detalhes nas formas de onda sintetizadas pelo inversor no Capítulo 3.2.3, acionamento com carga.

### 3.2.2 Sequência Braço Fixo

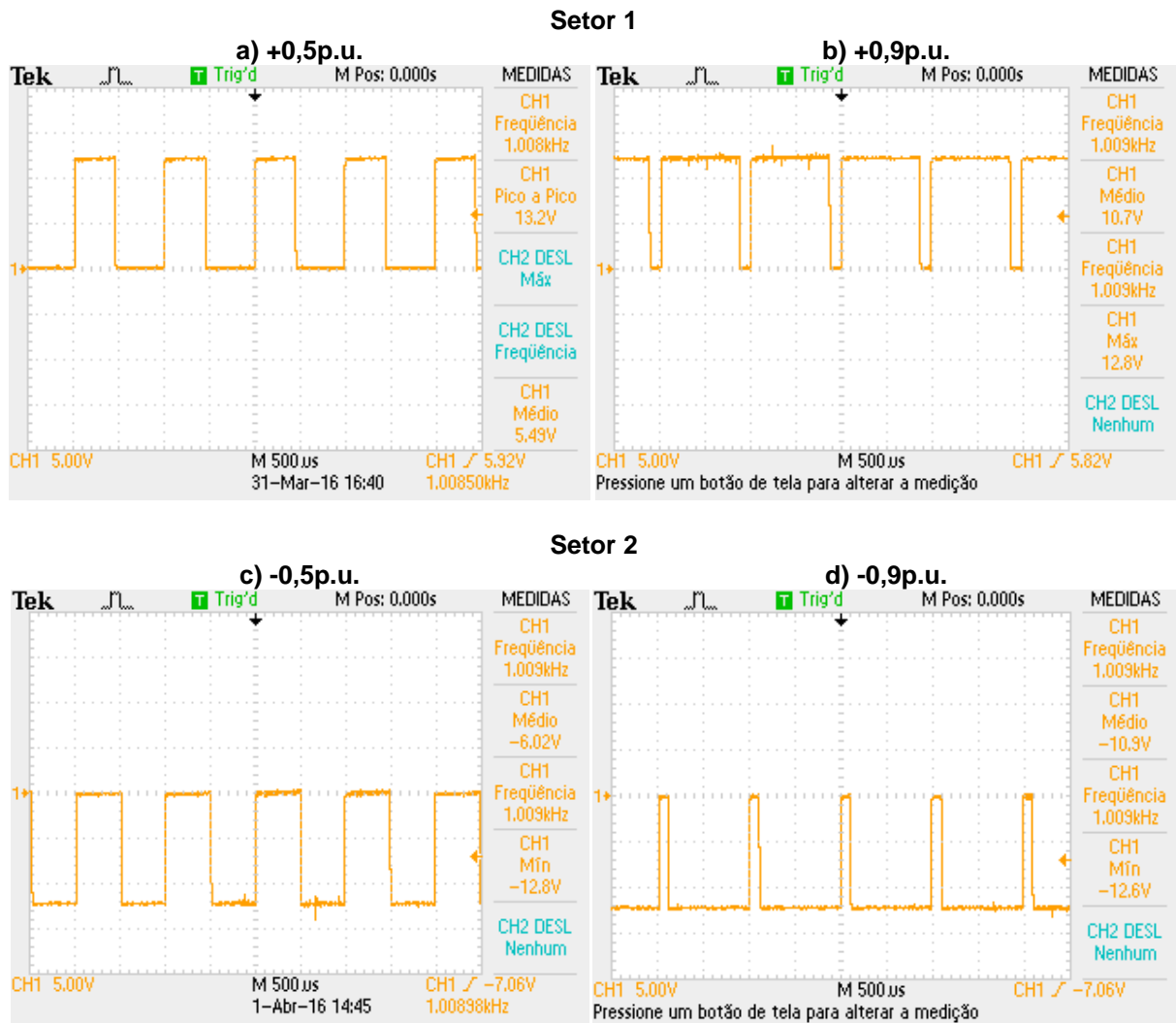
O inversor foi submetido aos sinais PWM1 (canal 1 – amarelo) e PWM2 (canal 2 – azul) mostrados na Figura 43, e seus complementares.

De acordo com a simulação, na implementação o PWM2 apenas se altera quando a polaridade da tensão deve mudar. E também verifica-se a inversão da proporcionalidade da razão cíclica do PWM1 quando a polaridade é alterada. Portanto, a modulação implementada experimentalmente é a mesma da implementada por simulação, que condizem com os resultados previstos teoricamente. Na Figura 44 são apresentadas as formas de onda da tensão nos terminais do inversor.



**Figura 43 - PWM1 e PWM2 aplicados ao inversor monofásico - Sequência braço fixo. Canal 1 (amarelo): sinal para chave S1, Canal 2 (azul): sinal para chave S3. Referências de tensão: a) 0,5 p.u. positivo, b) 0,9 p.u. positivo, c) 0,5 p.u. negativo, d) 0,9 p.u. negativo.**

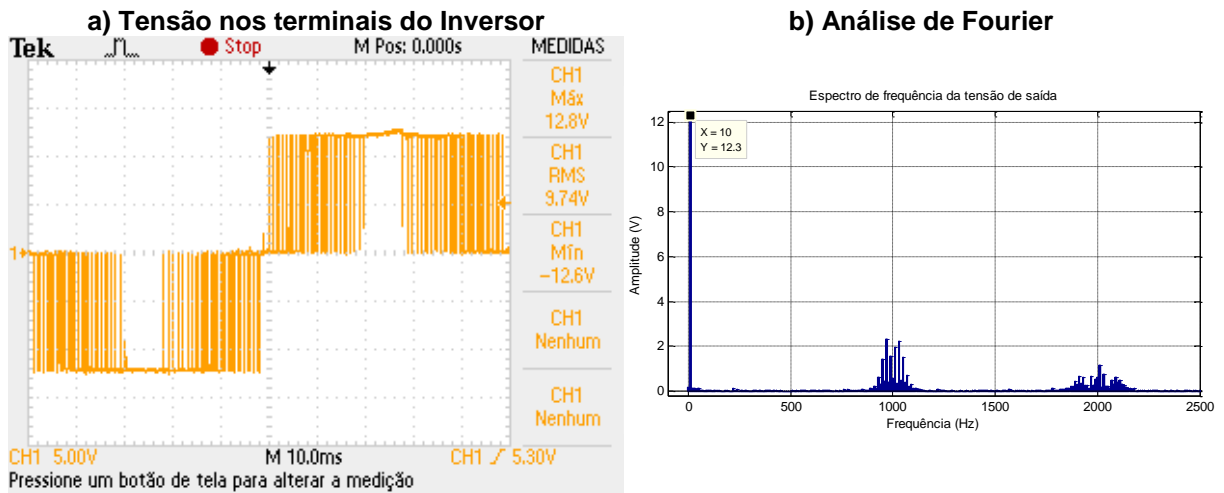
Fonte: Autoria Própria



**Figura 44 - Tensões sintetizadas no inversor monofásico operando a vazio - Sequência braço fixo – para as referências de a) 0,5 p.u. positivo, b) 0,9 p.u. positivo, c) 0,5 p.u. negativo e d) 0,9 p.u. negativo.**

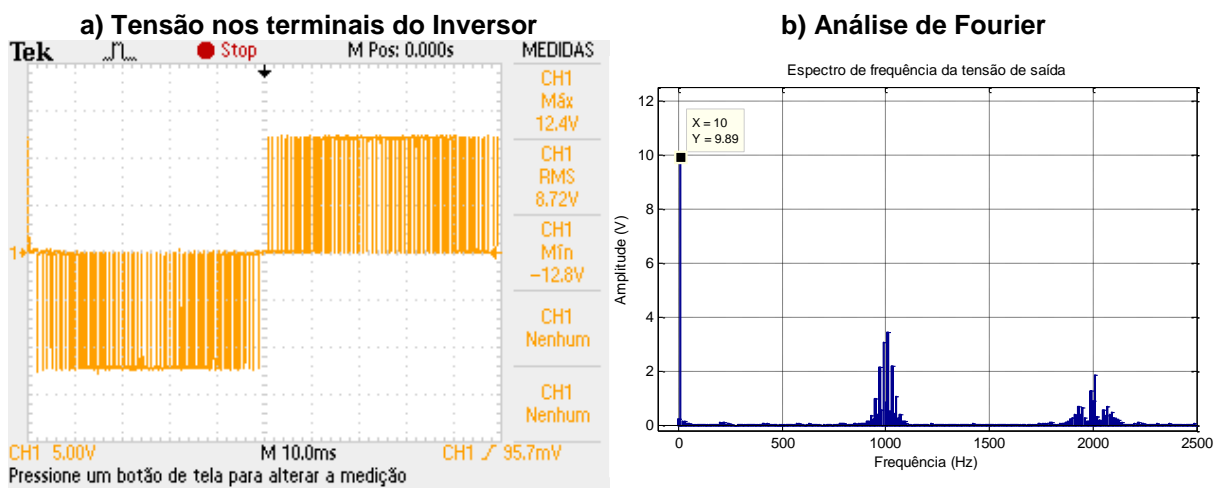
**Fonte: Autoria Própria**

Com as mesmas referências senoidais anteriores, o inversor também mantém a tensão sem variações (sem comutar chaves), quando a referência se aproxima do máximo do barramento CC, por um período de tempo maior do que na simulação. Porém, da mesma forma, a onda fundamental consegue ser sintetizada. Para amplitude de 1 p.u. a TDH é de 51,2218% e para 0,8 p.u. é de 75.1084 %.



**Figura 45 - Resposta do inversor com uma referência senoidal 10Hz amplitude de 1p.u. - Sequência braço fixo. a) Tensão nos terminais do inversor monofásico, b) Análise de Fourier da tensão.**

Fonte: Autoria Própria



**Figura 46 - Resposta do inversor com uma referência senoidal 10Hz amplitude de 0.8p.u. - Sequência braço fixo. a) Tensão nos terminais do inversor monofásico, b) Análise de Fourier da tensão.**

Fonte: Autoria Própria

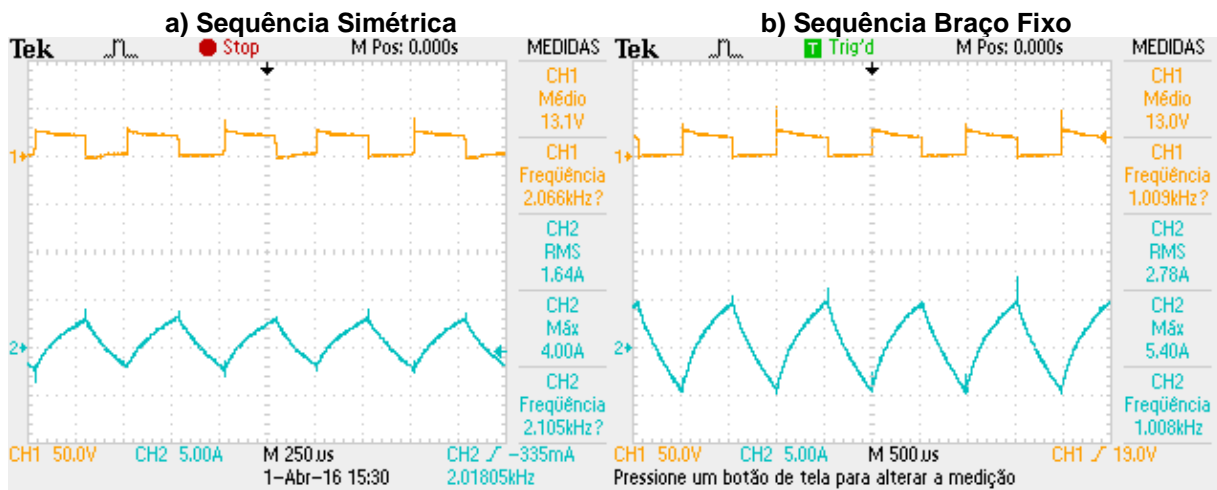
### 3.2.3 Motor de corrente contínua acionado pelo inversor monofásico

O motor de corrente contínua (CC) acionado pelo inversor é de imã permanente, tem tensão nominal de 24 V, 85 W. Portanto, a tensão no barramento CC foi alterada para 24 V. Devido ao motor ser de pequeno porte, sua indutância é baixa. O motor opera à vazio.

Tratando-se de uma referência de tensão contínua, a maior diferença entre as tensões moduladas pelas diferentes sequências aplicadas é a frequência da tensão

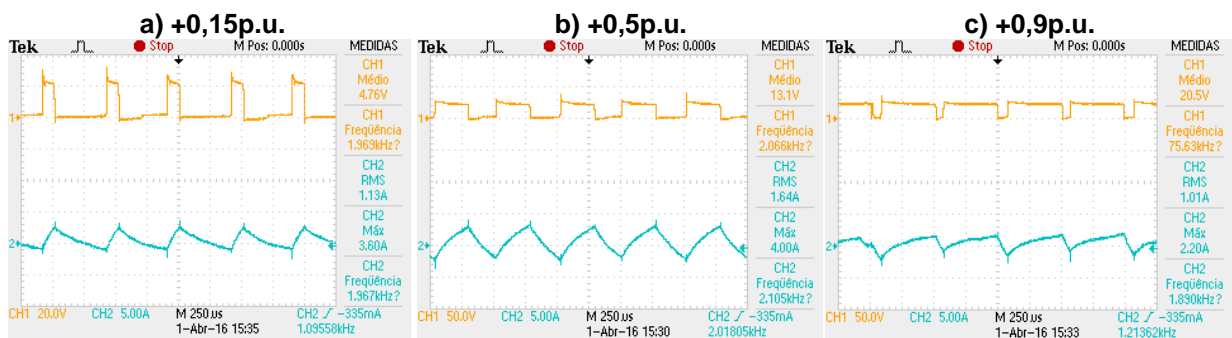


de saída. Portanto, sendo o motor uma carga indutiva, a corrente sofre alterações de acordo com essa frequência. A corrente deve aumentar nos períodos em que a tensão é aplicada no motor e decrescer quando essa tensão é zerada. Se o período em que a tensão aplicada é maior, a corrente cresce por mais tempo. Por isso o valor da corrente máxima é maior para uma frequência menor, de 4 A para 2 kHz e 5,4 A para 1 kHz. No entanto, as correntes médias são muito próximas, 0,5177A para sequência simétrica e 0,5750 A para sequência braço fixo. A tensão (canal 1 - amarelo) e a corrente (canal 2 - azul) obtidas experimentalmente para as duas sequências são apresentadas na Figura 47.



**Figura 47 - Tensão e corrente no motor CC – a) Sequência simétrica e b) braço fixo, ambas para uma referência de 0,5 p.u. positivo.**  
Fonte: Autoria Própria

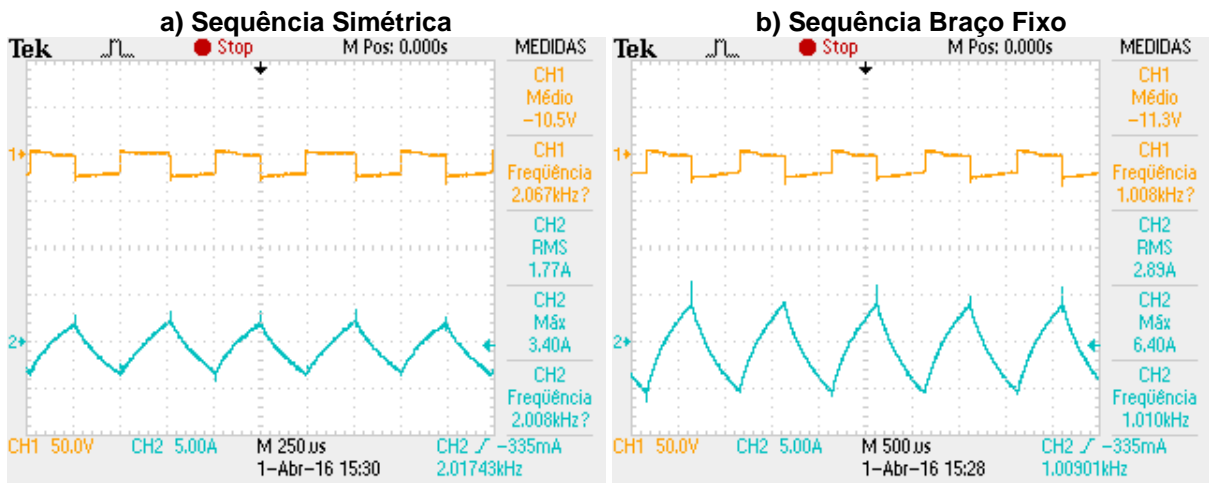
Para outros valores de tensão média, a corrente se comporta de maneira similar. Para a sequência simétrica, seus valores médios para 0,15 p.u. e 0,9p.u. são de 0,4828 A e 0,5672 A respectivamente, seu comportamento é apresentado na Figura 48.



**Figura 48 - Tensão e corrente no motor CC - Sequência simétrica – Para referências de tensão de a) 0,15 p.u., b) 0,5 p.u. e c) 0,9 p.u., todas com polaridade positiva.**  
Fonte: Autoria Própria



Com o uso do inversor, a inversão no sentido de rotação do motor é possível alterando a polaridade da tensão, como mostrado na Figura 49. A corrente também inverte sua polaridade, pois o motor continua consumindo potência. Para a sequência simétrica, a corrente média é de -0,7163 A e para de braço fixo é de -0,7261 A.



**Figura 49 - Tensão e corrente no motor – Tensão de 0,5 p.u. com polaridade negativa, utilizando a) sequência simétrica e b) sequência de braço fixo**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 3.2.4 Eficiência do Inversor monofásico ponte completa

Para um cálculo estimado do rendimento do inversor, medem-se as potências no barramento CC e na saída do inversor em 3 situações diferentes: 0,15 p.u., 0,5 p.u. e 0,9 p.u.. Também é necessário conhecer a potência consumida pelos circuitos *drivers* presentes, que são alimentados por outro módulo de energia. As correntes de saída do inversor são apresentadas na Tabela 3.

<b>Tensão (p.u.)</b>	0,15	0,5	0,9
<b>Corrente (mA)</b>	482,8	517,7	567,2

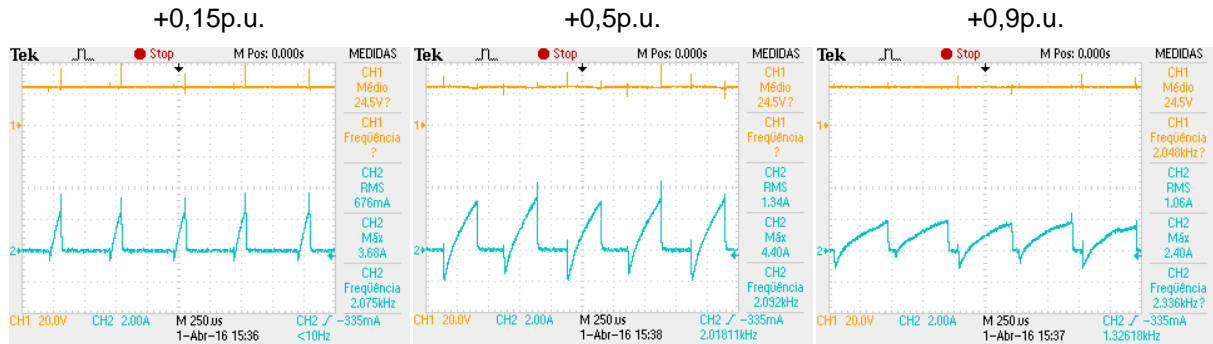
**Fonte: Autoria Própria**

A tensão do barramento é de 24 V para os 3 casos estudados, enquanto nos demais módulos a tensão é de 12 V. A corrente solicitada por cada circuito *driver* é apresentada na Tabela 4. As correntes que fluem do barramento CC para o inversor são apresentadas na Figura 50 e a média dessas correntes na Tabela 5.

**Tabela 4 - Corrente solicitada pelo Driver operando em 1 kHz - Inversor monofásico**

Tensão (p.u.)	0,15	0,5	0,9
Corrente ( $\mu\text{A}$ )	250	610	1100

Fonte: Autoria Própria

**Figura 50 - Tensões e correntes no barramento CC - Inversor monofásico**

Fonte: Autoria Própria

**Tabela 5 - Corrente solicitada pelo inversor monofásico operando em 1 kHz**

Tensão (p.u.)	0,15	0,5	0,9
Corrente (mA)	238,6	648,4	783,1

Fonte: Autoria Própria

A partir desses resultados, a potência consumida pelo inversor ( $P_{inv}$ ) é a diferença entre a potência de entrada ( $P_{in}$ ) e a potência de saída ( $P_{out}$ ) somada com a potência dissipada nos *drivers* ( $P_{drv}$ ), conforme a Equação (28).

$$P_{inv} = P_{in} - P_{out} + 4 * P_{drv} \quad (28)$$

A Tabela 6 mostra a potência consumida pelo inversor em cada ponto de operação.

**Tabela 6 - Potência consumida pelo inversor alimentando o motor a vazio**

Tensão (p.u.)	0,15	0,5	0,9
Potência (W)	5,420	8,810	7,219

Fonte: Autoria Própria

### 3.2.5 Conclusões sobre a modulação *space vector* no inversor monofásico

As sequências apresentam uma TDH similar ao sintetizar uma onda de 10 Hz. No entanto, a TDH da sequência de braço fixo tende a aumentar quando a

frequência da onda fundamental a ser modulada aumenta, pois se aproxima da frequência de variação da tensão.

**Tabela 7 – TDH - Sequências**

Amplitude	Simulação		Experimental	
	TDH Braço Fixo	TDH Simétrica	TDH Braço Fixo	TDH Simétrica
<b>0,8p.u.</b>	76.0477	75.3726	75.1084	75.0035
<b>1p.u.</b>	51.4559	50.7683	51.2218	50.1364

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 8 - Correntes - Sequência**

Sequências	Braço Fixo	Simétrica
<b>Corrente (mA)</b>	575,0	517,0
<b>Corrente (mA)</b>	-0,7261	-0,7163

**Fonte: Autoria Própria**

As perdas por comutação na sequência de braço fixo são menores, pois ocorre apenas a comutação de um braço. Esse fato também permite que um braço seja constituído por chaves de menor custo, que não comutam em frequência tão elevada quanto do outro braço.

A saturação nos casos de modulação da onda de 10 Hz de amplitude 1 p.u., apesar de sintetizar a onda fundamental, pode se tornar um problema para casos de controle em malha fechada. Em algumas situações, um sinal de controle pode ultrapassar essa amplitude. Para corrigir isso, sugere-se aumentar a tensão do barramento CC para uma tensão maior do que a tensão de pico da onda que pretende-se modular.

A frequência de comutação é baixa pois o *driver* não teve o comportamento esperado. O tempo de subida da tensão é alto e isso insere um erro no sinal PWM que impossibilita trabalhar com um período de sinal menor.

O tempo morto é um artifício necessário para esse tipo de aplicação. Porém, também infere um erro na modulação. A distorção causada pelo tempo morto é mais evidente quando a referência de tensão está próxima de zero, pois o período da razão cíclica assume valores muito próximos ao do tempo morto, existindo a possibilidade de ser inferior.

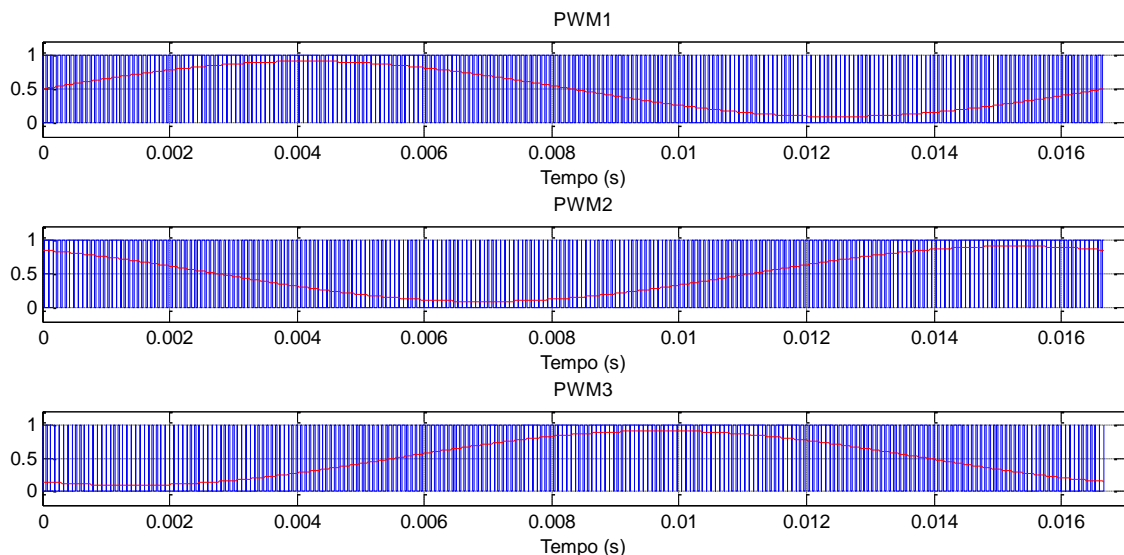
### 3.3 SIMULAÇÕES INVERSOR TRIFÁSICO

#### 3.3.1 PWM convencional

A tensão de referência para a modulação convencional é a tensão de fase. Para uma tensão de linha eficaz de 220 V<sub>rms</sub>, a tensão de pico é de 311 V<sub>p</sub>, respeitando a Equação (29). Conforme a Equação (21) a tensão modulada nos braços deve ter pico de 180 V, que equivalem a 127 V<sub>rms</sub>.

$$V_{rms} = \sqrt{2}V_p \quad (29)$$

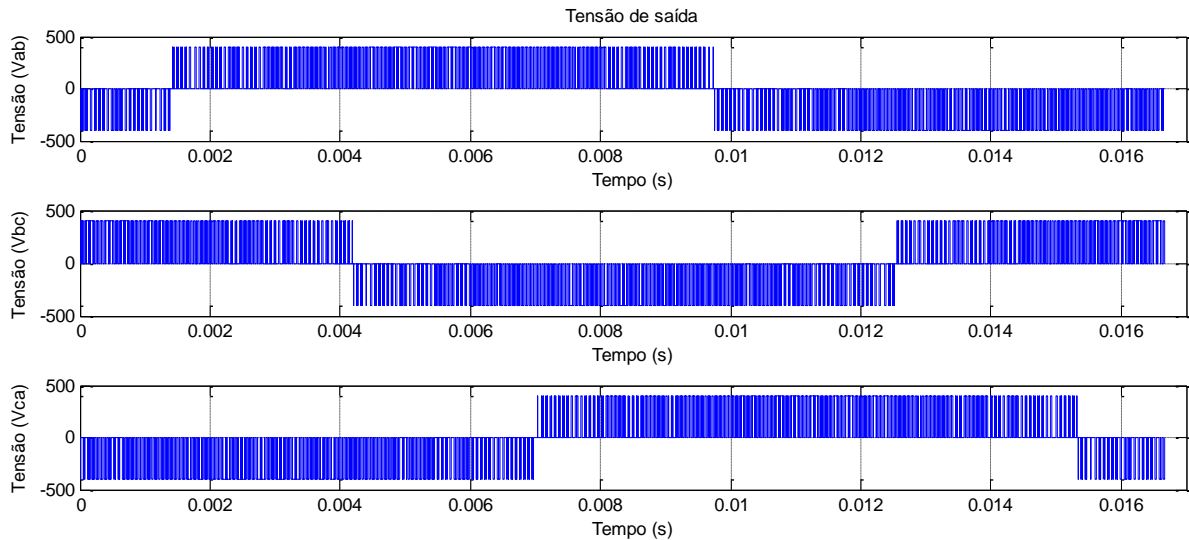
Utilizando a frequência de comutação de 15 kHz, estabelecida previamente, para esse valor de tensão, a modulação se comporta de maneira satisfatória, os sinais PWM possuem um espaço considerável entre os pulsos mesmo quando a referência atinge os valores de pico. Os sinais (em azul) são apresentados na Figura 51, juntos com a referência de tensão de cada braço (em vermelho).



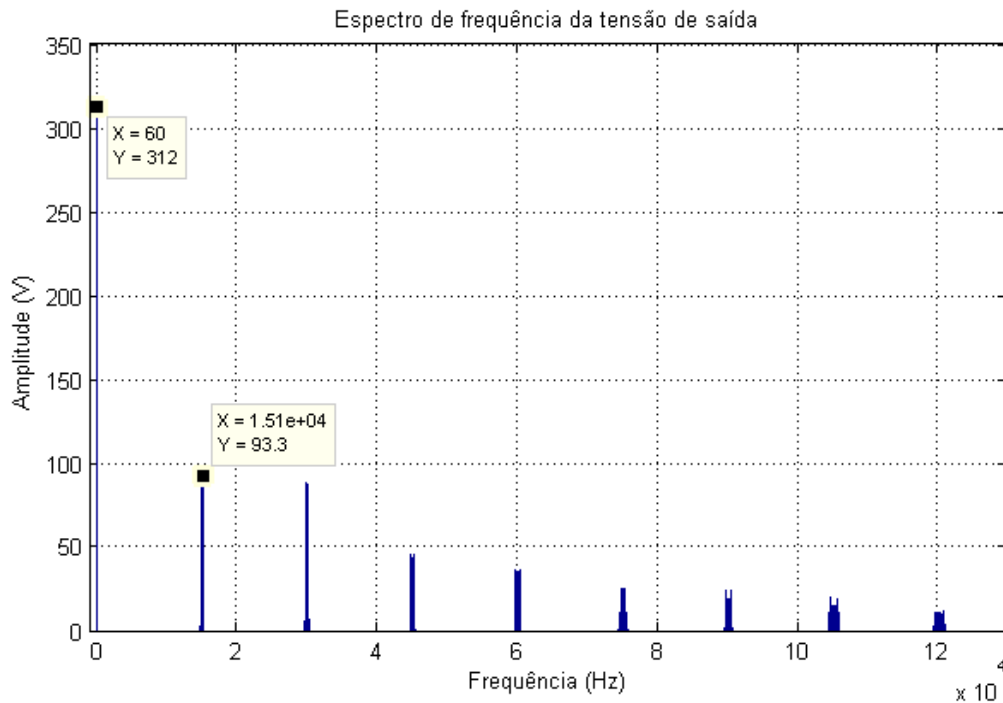
**Figura 51 - PWM convencional para 311V de fase no inversor trifásico**  
**Fonte: Autoria Própria**

As tensões de linha obtidas são apresentadas na Figura 52. De acordo com seu espectro de frequência representado na Figura 53, a tensão fundamental de 311 V<sub>p</sub> é sintetizada. Em torno da frequência de 30 kHz possuem espectros significantes. As frequências de 30 kHz ocorrem quando uma das chaves possui um PWM de razão

cíclica elevada e outra chave possui um PWM de razão cíclica menor, na diferença desses valores ( $v_a - v_b$ ), a frequência é duplicada. Vale lembrar que existem componentes de frequência múltiplas a frequência de chaveamento que são consideradas para a análise de distorção harmônica.

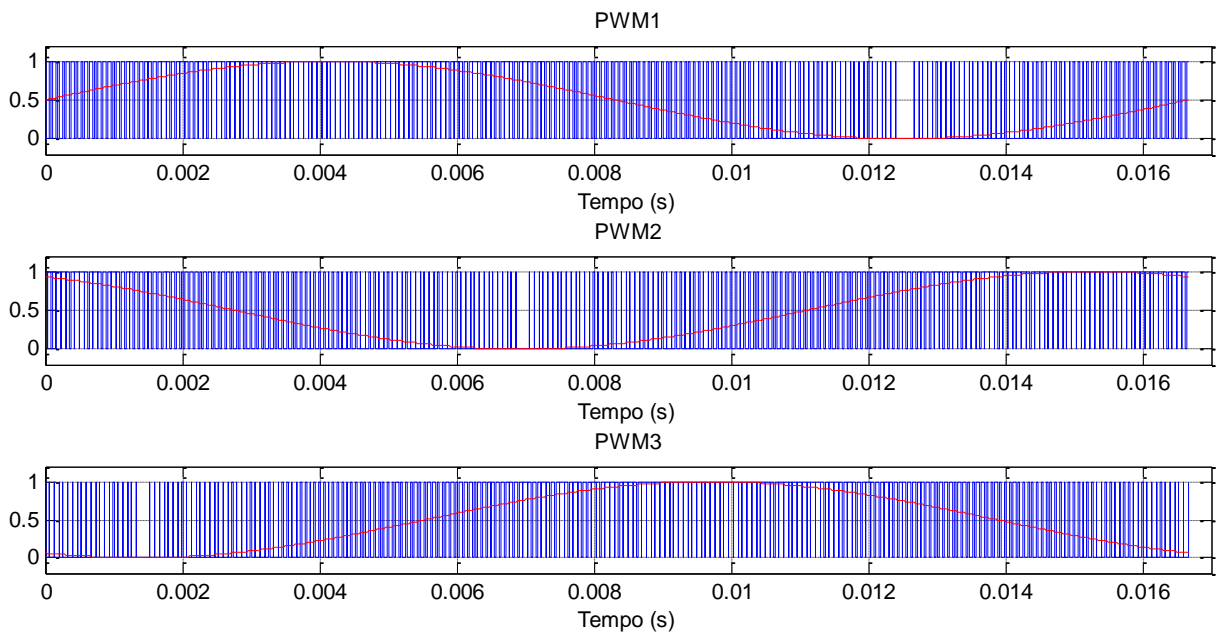


**Figura 52 - Tensões de linha para 311V com modulação convencional no inversor trifásico**  
Fonte: Autoria Própria

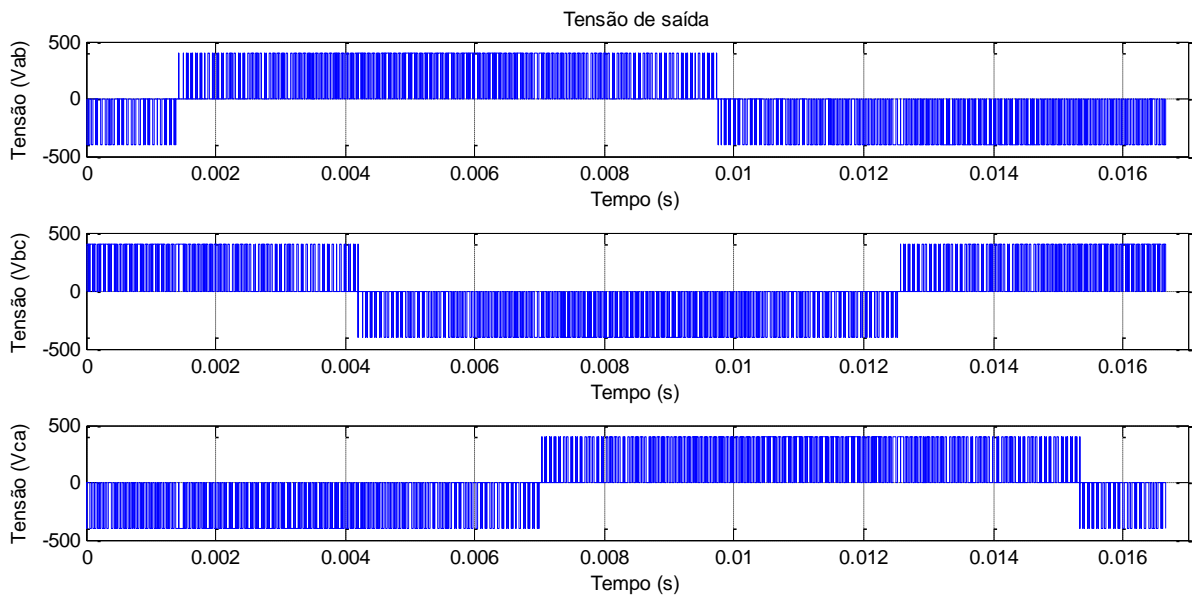


**Figura 53 - Espectro de frequência da tensão de 311V sintetizada no inversor trifásico por PWM convencional**  
Fonte: Autoria Própria

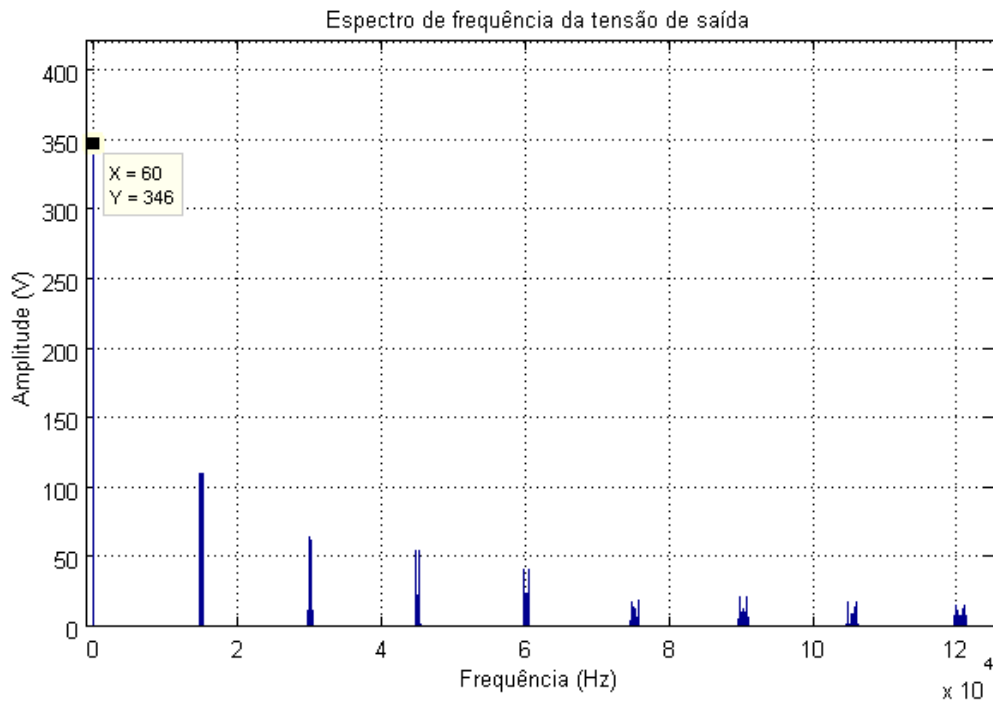
Elevando o referencial para a tensão máxima ( $200 V_p$ ), os sinais PWM encontram-se no limite, como mostrado na Figura 54. A forma de onda da tensão pare essa situação é apresentada na Figura 55 e a análise de Fourier, validando o resultado, na Figura 56. A tensão de fase alcança sua amplitude máxima, de  $345 V_p$ , conforme descrito na Equação (3). Qualquer referência acima de  $200 V_p$  distorce os sinais PWM, as tensões de fase e as tensões de linha.



**Figura 54 - PWM convencional para tensão de linha máxima no inversor trifásico**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 55 - Tensões de linha máxima com modulação convencional no inversor trifásico**  
**Fonte: Autoria Própria**



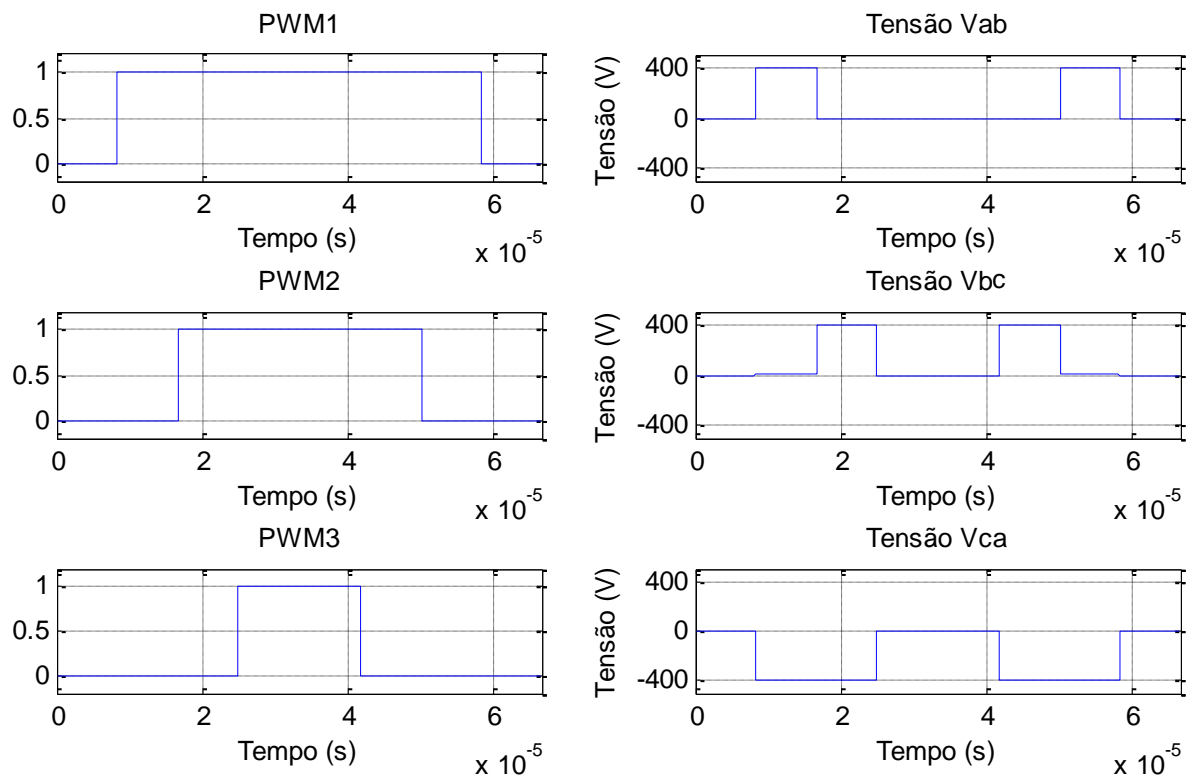
**Figura 56 - Espectro de frequência da tensão linha máxima sintetizada no inversor trifásico por PWM convencional**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 3.3.2 Modulação *Space Vector*

#### 3.3.2.1 Sequência Simétrica

Para um vetor de referência de 200 V de linha com ângulo  $\theta_0$  de  $30^\circ$  no espaço vetorial representado na Figura 10, centrado no Setor1, para uma frequência de comutação de 15 kHz os pulsos PWM1 (chave S1), PWM2 (chave S3) e PWM3 (chave S5) assim como as tensões estão representados na Figura 57. As ondas para os demais setores se encontram no Apêndice C.

Os sinais PWM provenientes dessa sequência tem seu eixo de simetria em  $\Delta T/2$ , e se comportam conforme previsto teoricamente. De forma geral, a forma de onda da tensão está com o dobro frequência de comutação, e também tem o eixo de simetria em  $\Delta T/2$ .

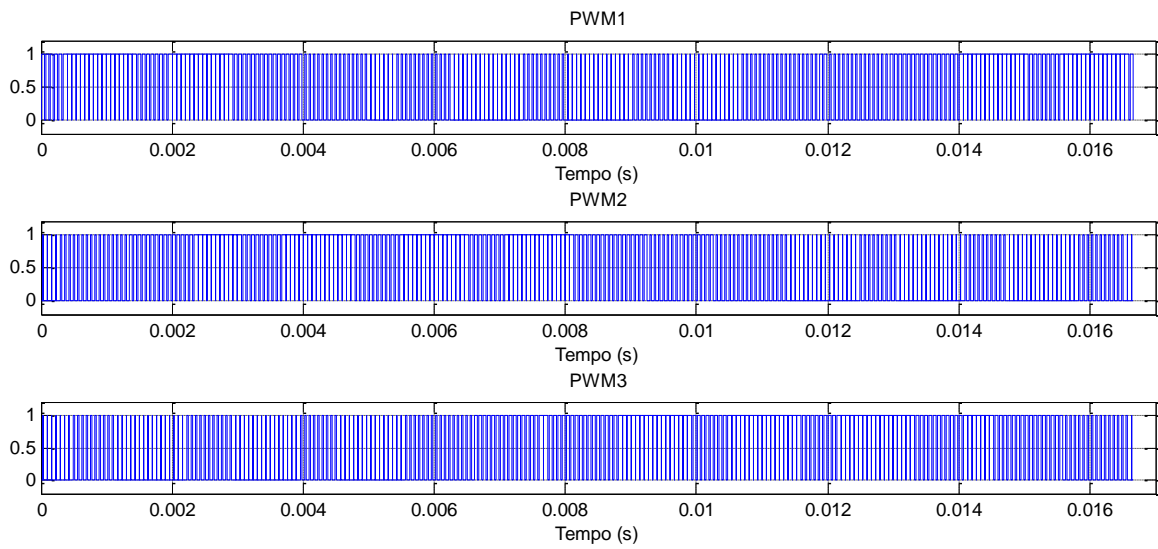


**Figura 57 - PWM e tensões de linha para o setor 1 da seqüência simétrica no inversor trifásico**  
**Fonte: Autoria Própria**

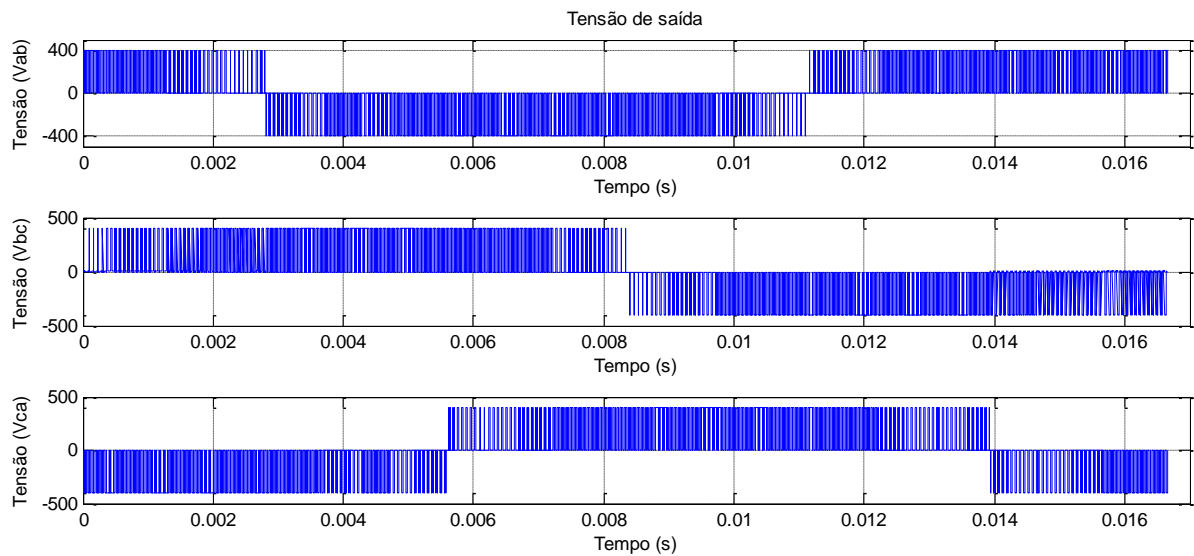
Com um vetor de referência girando no espaço vetorial com velocidade angular de 377 rad/s (60 Hz), com amplitude da tensão de fase de 311 V, o PWM se comporta conforme exposto na Figura 58. Na Figura 59 são apresentadas as tensões de linha para essa situação. A tensão apresenta TDH de 58,5296%.

Nas proximidades da passagem por zero, a tensão não varia mais com o dobro da frequência de comutação, passando a variar na mesma frequência da comutação. A partir do espectro de frequência da tensão de saída da Figura 60, os 311 V de fase, equivalentes a 220 V<sub>rms</sub>, são alcançados e a modulação se mostra efetiva.

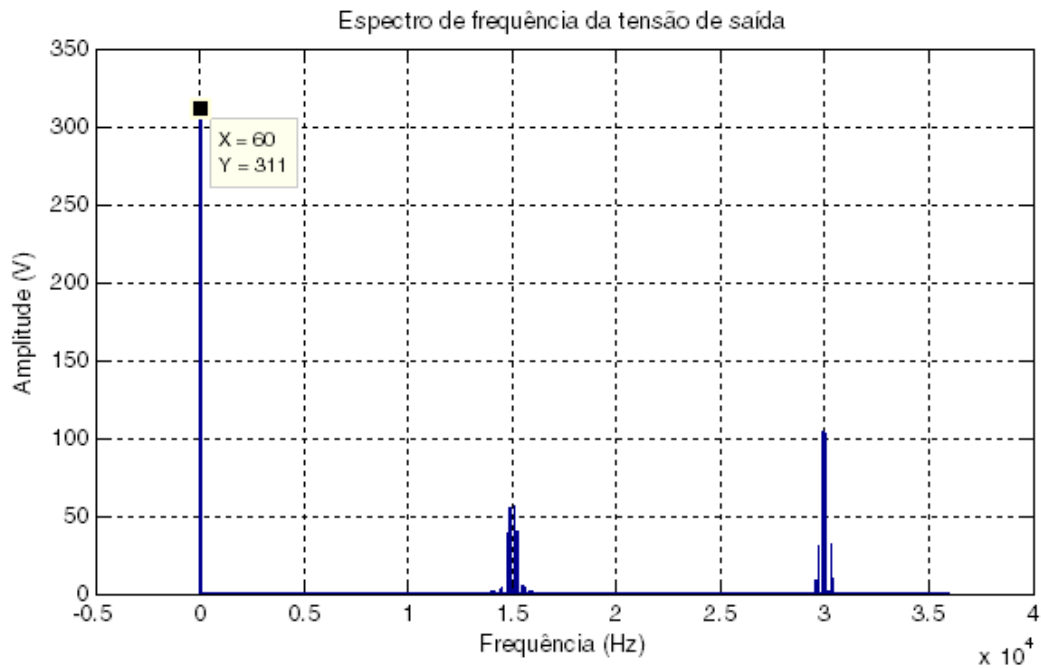




**Figura 58 -SVPWM sequência simétrica para tensão de linha de 311V no inversor trifásico**  
**Fonte: Autoria Própria**

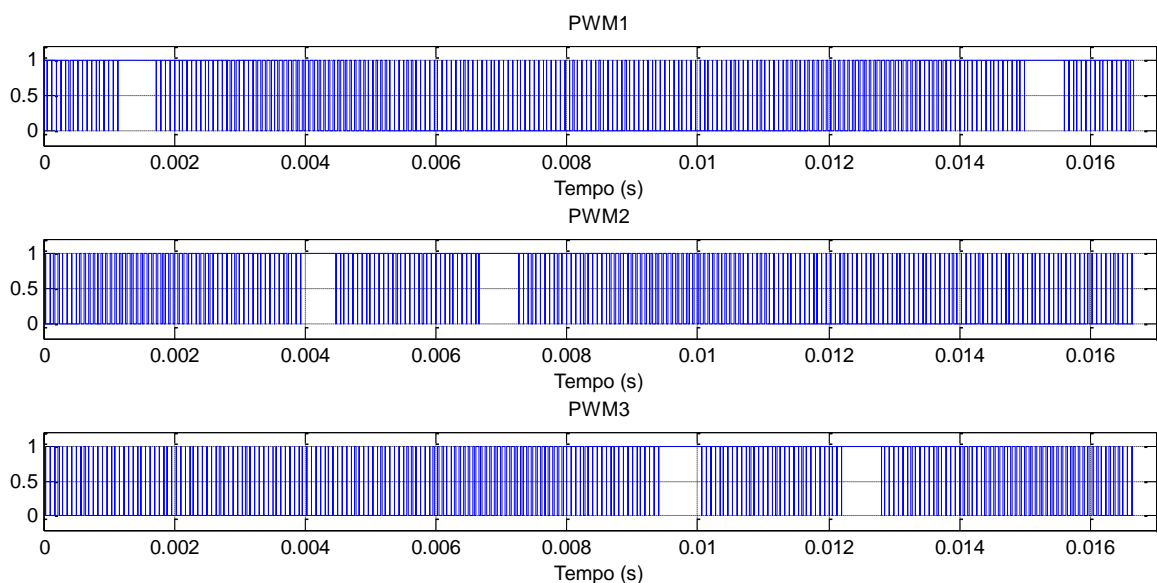


**Figura 59 - Tensões de linha obtidas pela SVPWM com sequência simétrica no inversor trifásico com referência de 311V linha**  
**Fonte: Autoria Própria**

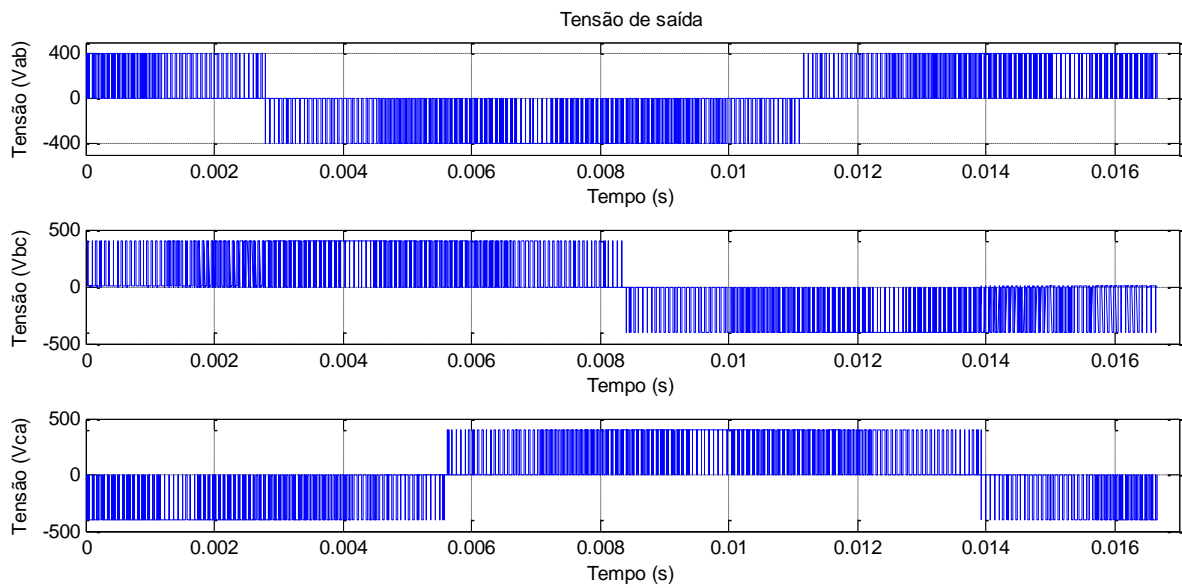


**Figura 60 - Espectro de frequência da tensão linha de 311V sintetizada no inversor trifásico por SVPWM de sequência simétrica**  
**Fonte: Autoria Própria**

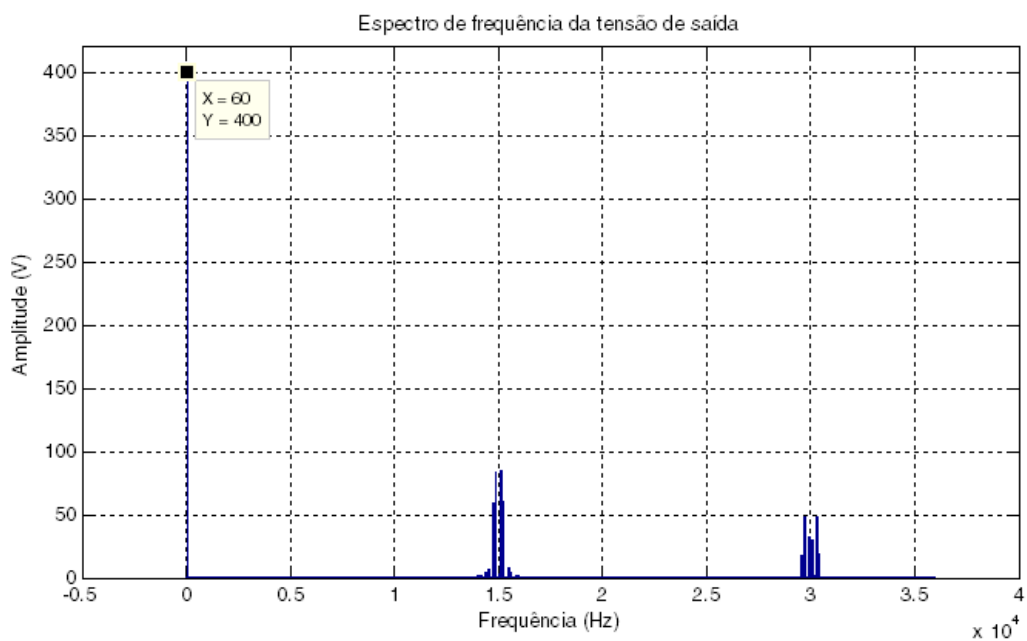
Para uma referência de 400V para a tensão de fase, existe um período de tempo em que um dos braços para de comutar, como pode ser visto na Figura 61, porém os outros dois braços continuam comutando e a tensão de saída ainda é pulsada, como apresentado na Figura 62. A tensão sintetizada atinge a referência, conforme apresentado no espectro de frequência da Figura 63. A tensão apresenta TDH de 42,5615%



**Figura 61 -SVPWM sequência simétrica para tensão de linha de 400V no inversor trifásico**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 62- Tensões de linha obtidas pela SVPWM com seqüência simétrica no inversor trifásico com referência de 400V linha  
Fonte: Autoria Própria**



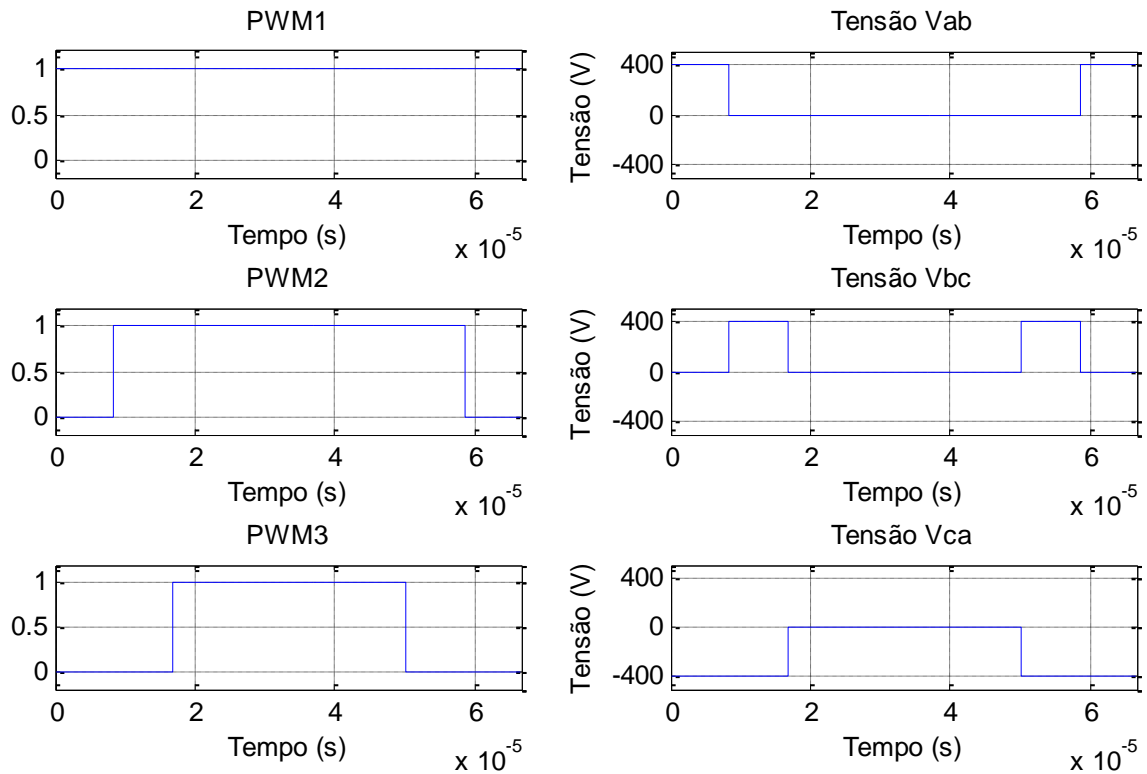
**Figura 63 - Espectro de frequência da tensão linha de 400V sintetizada no inversor trifásico por SVPWM de seqüência simétrica  
Fonte: Autoria Própria**

### 3.2.2.2 Segunda Sequência

Para um vetor de referência centrado no Setor 1, utilizando a frequência de comutação de 15 kHz, conforme especificado anteriormente, os pulsos PWM e as

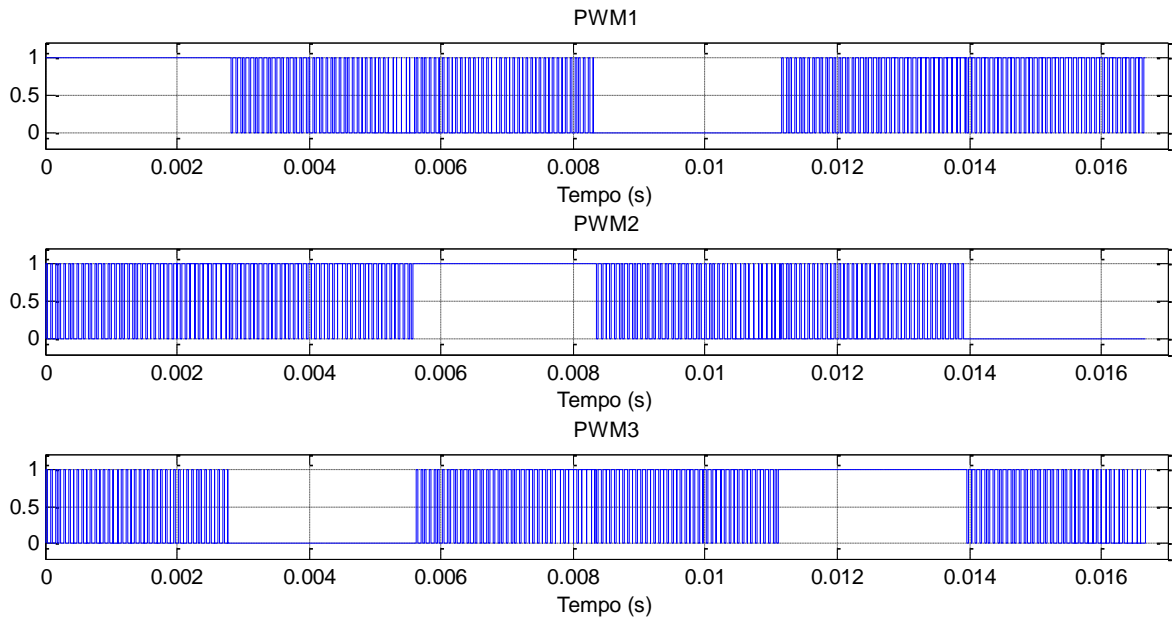
tensões estão representados na Figura 64. As ondas para os demais setores se encontram no Apêndice D.

A segunda sequência mantém um dos braços sem comutar por setor, conforme previsto teoricamente. Por isso, em cada setor, apenas uma das tensões varia com o dobro da frequência de comutação.

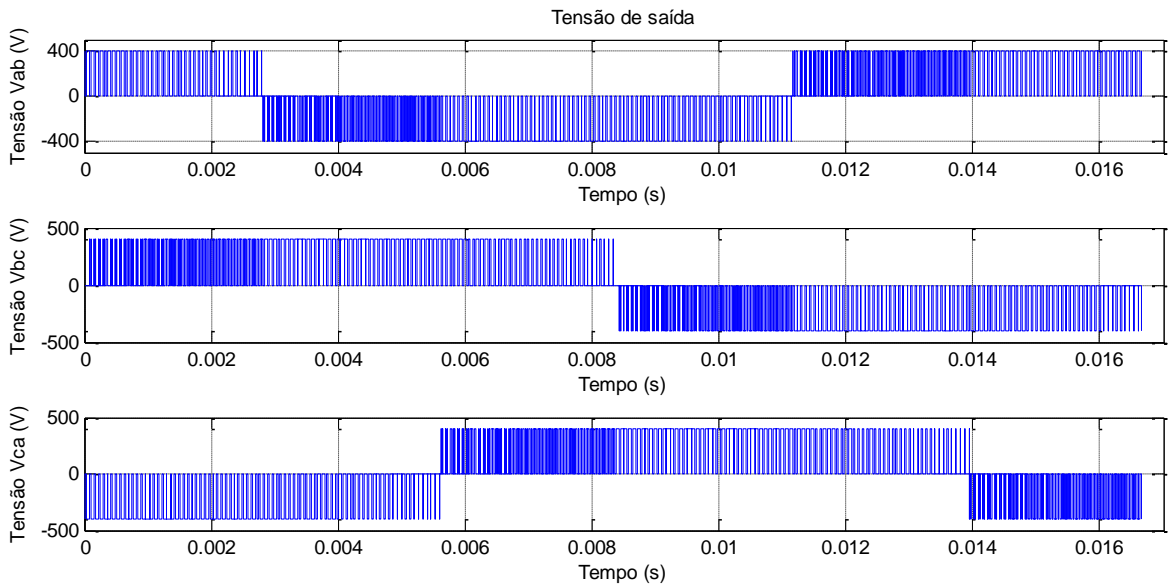


**Figura 64 - PWM e tensões de linha para o setor 1 da segunda sequência no inversor trifásico**  
**Fonte: Autoria Própria**

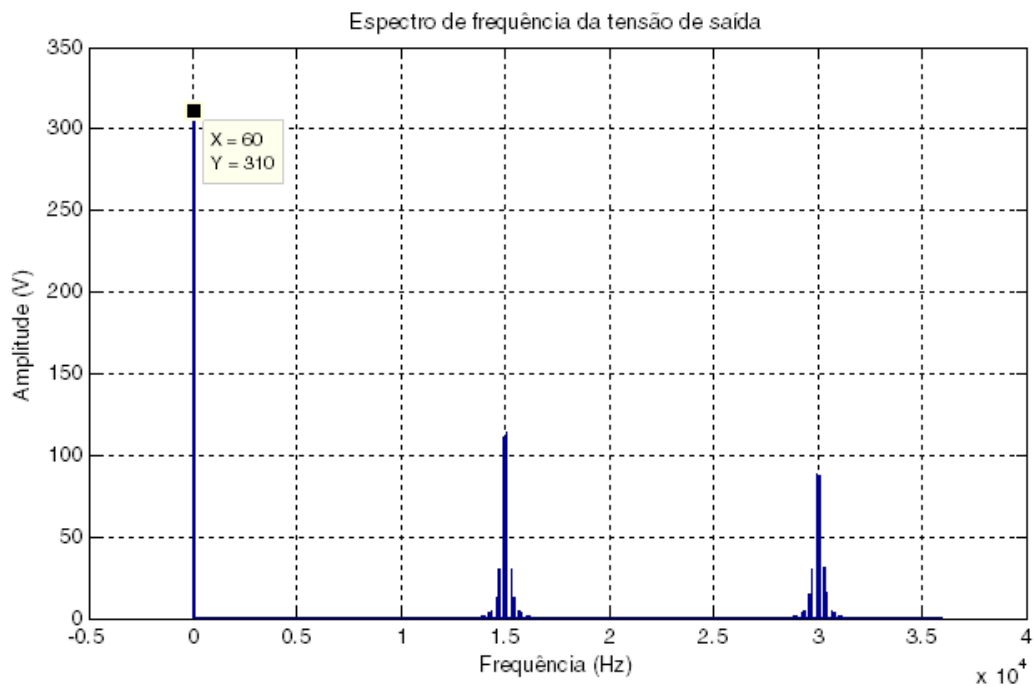
Para uma referência de 60 Hz e 220  $V_{rms}$ , o sinal PWM é apresentado na Figura 65. As tensões de fase da Figura 66 alcançam a referência, conforme exposto no espectro de frequência da Figura 67. Nessa situação, a TDH é de 68,8410%



**Figura 65 -SVPWM segunda sequência para tensão de linha de 311V no inversor trifásico**  
**Fonte: Autoria Própria**

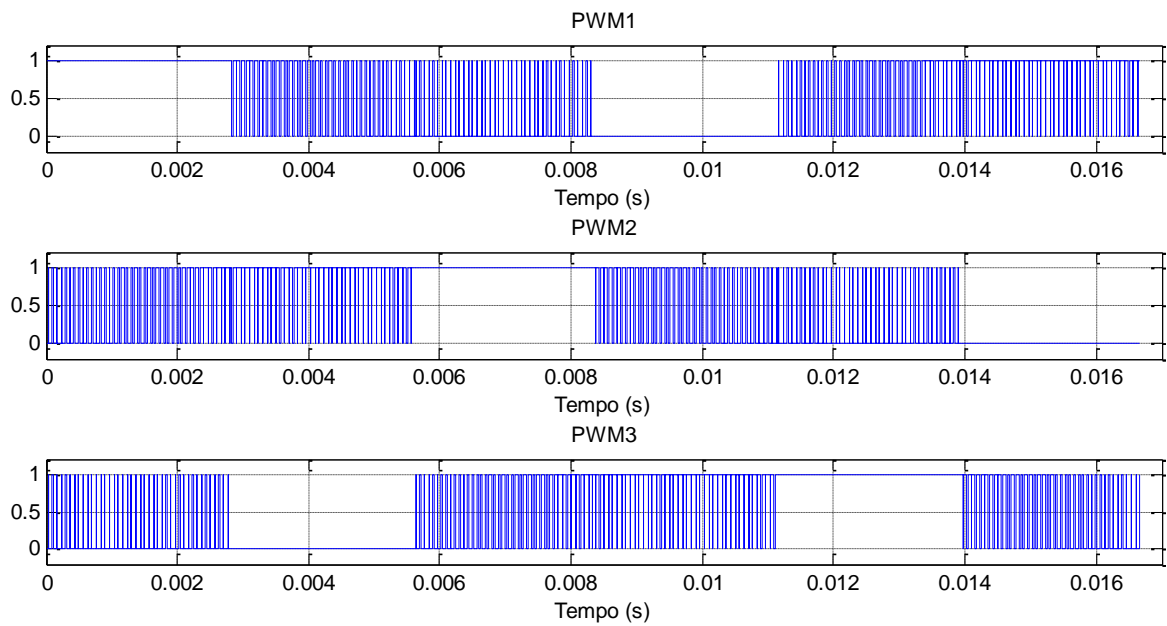


**Figura 66- Tensões de linha obtidas pela SVPWM com segunda sequência no inversor trifásico**  
**com referência de 311V linha**  
**Fonte: Autoria Própria**

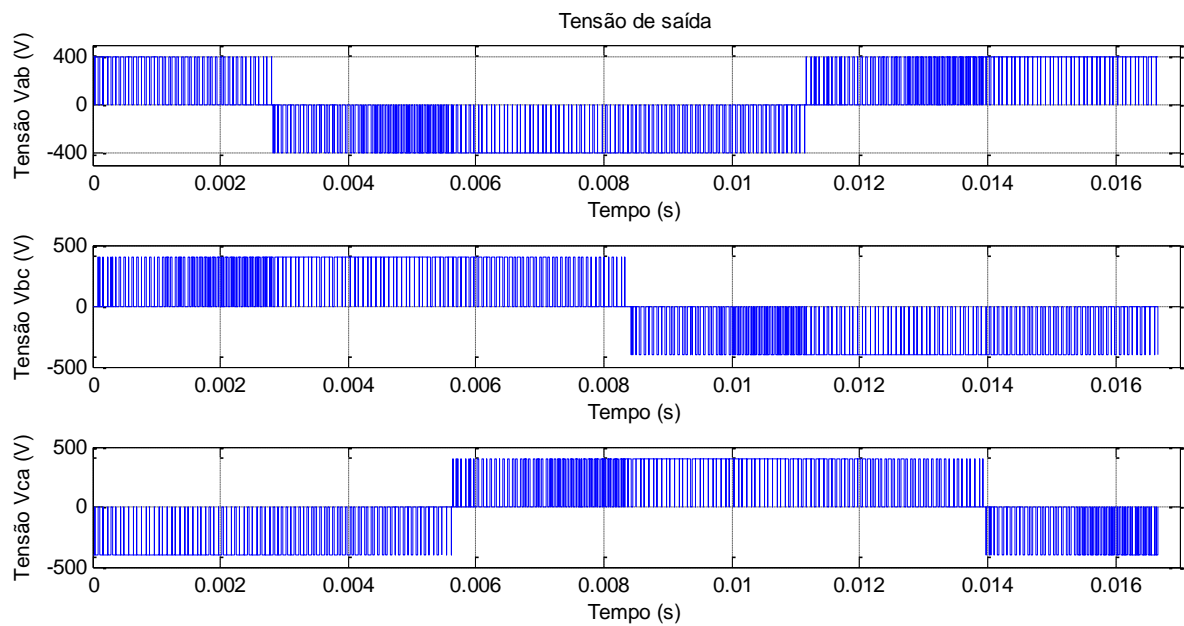


**Figura 67 - Espectro de frequência da tensão linha de 311V sintetizada no inversor trifásico por SVPWM de segunda sequência**  
**Fonte: Autoria Própria**

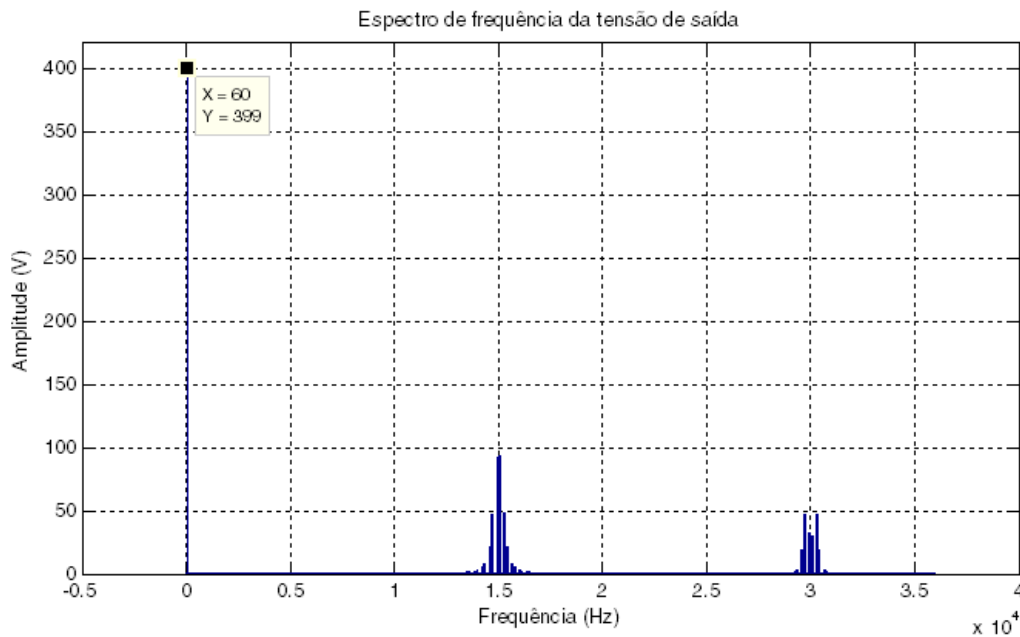
Para uma reverência com a tensão máxima do barramento CC, a tensão de 400 V é sintetizada nos terminais do inversor. Para essa situação, os sinais PWM, a tensão de fase nos terminais do inversor e o espectro de frequência da tensão, estão apresentados na Figura 68, Figura 69 e Figura 70, respectivamente. Para essa situação, a TDH é de 43,4437%.



**Figura 68 -SVPWM segunda sequência para tensão de linha de 400V no inversor trifásico**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 69- Tensões de linha obtidas pela SVPWM com segunda sequência no inversor trifásico**  
**com referência de 400V linha**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 70 - Espectro de frequência da tensão linha de 400V sintetizada no inversor trifásico por SVPWM de segunda sequência**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 3.4 IMPLEMENTAÇÃO INVERSOR TRIFÁSICO

O sinal de erro proveniente dos drivers é lido pelo DSP. Em caso de erro, o DSP gera uma interrupção nos sinais PWM através do software e leva para nível baixo o sinal de *ENABLE*, que faz com que a placa de condicionamento de sinais bloqueie a saída dos PWM. Para implementação, os algoritmos para modulação utilizados no microcontrolador possuem as mesmas constantes dos algoritmos das simulações.

Para validar o funcionamento do inversor, é usado um PWM fixo, com 50% de razão cíclica. Na Figura 71, o canal 1 indica o sinal PWM2 do DSP, o canal 2 o sinal de saída dos *drivers* e o canal 3 a tensão de saída  $V_{ab}$  nos terminais do inversor. Como no inversor monofásico, no inversor trifásico existem vários potenciais envolvidos.



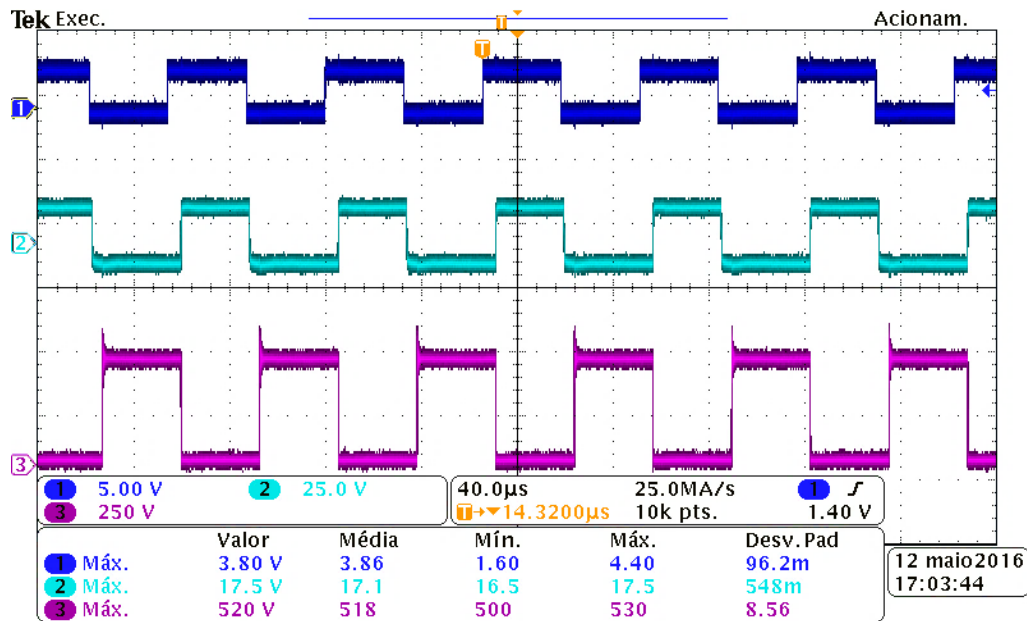


Figura 71 - Formas de onda no inversor trifásico, Canal 1 (azul): sinal do DSP, Canal 2 (ciano): sinal de saída do driver, Canal 3 (roxo): tensão de saída no inversor.  
Fonte: Autoria Própria

### 3.3.1 PWM convencional

A Figura 72 apresenta as tensões de linha nos terminais do inversor para uma referência de tensão máxima. A TDH para esse caso é de 52,8720%. O valor de 351 V representa 87,75% da tensão do barramento.

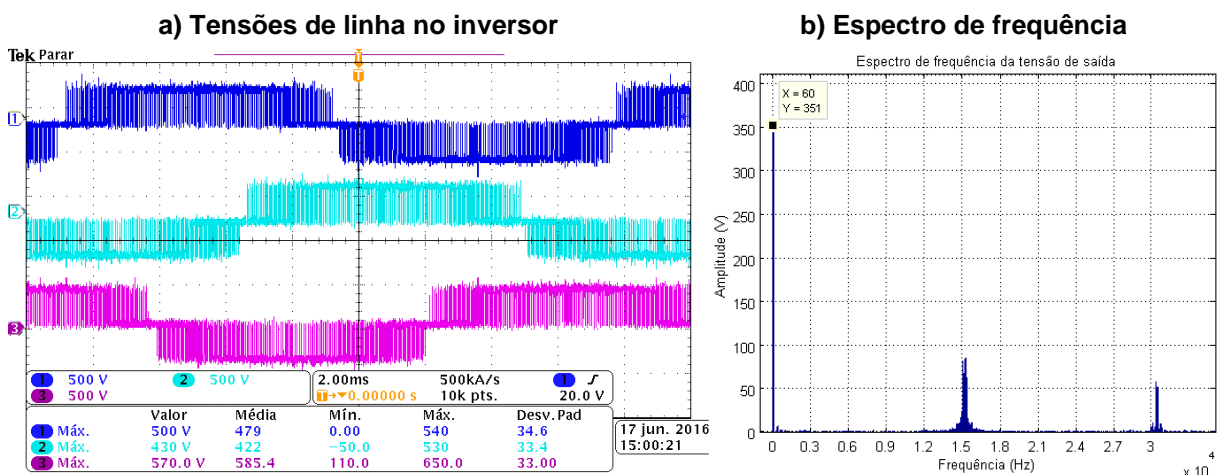


Figura 72 – Resposta do inversor a partir da modulação convencional para tensão de linha máxima e espectro de frequência. a) Tensões de linha nos terminais do inversor. Canal 1 (azul): Tensão Vab, Canal 2 (ciano): Tensão Vbc, Canal 3 (roxo): Tensão Vca. b) Espectro de frequência da tensão da tensão Vab.  
Fonte: Autoria Própria

A Figura 73 expõe os resultados para uma referência de 311 V de linha. Para essa situação, a TDH é de 60,3906% e a tensão, segundo o espectro de frequência, é de 308 V.

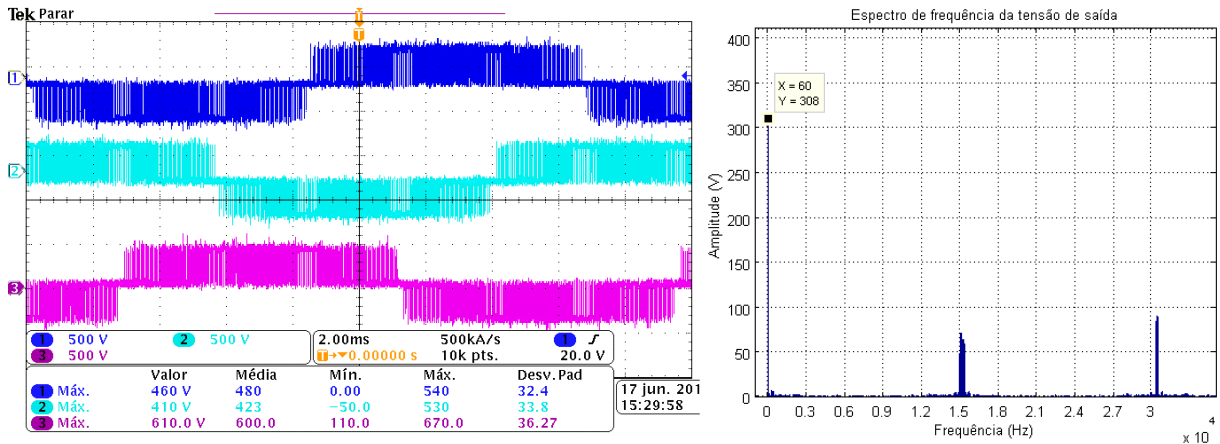


Figura 73 – Resposta do inversor trifásico para referência de 220Vrms utilizando modulação convencional. a) Tensões de linha nos terminais do inversor. Canal 1 (azul): Tensão Vab, Canal 2 (ciano): Tensão Vbc, Canal 3 (roxo): Tensão Vca. b) Espectro de frequência da tensão Vab. Fonte: Autoria Própria

### 3.3.2 Modulação *Space vector*

#### 3.3.2.1 Sequência simétrica

Os sinais PWM para o setor 1, fixando o vetor de referência em 200 V de fase e centralizado no setor, são mostrados na Figura 74. Para os demais setores, os sinais se encontram no Apêndice E.

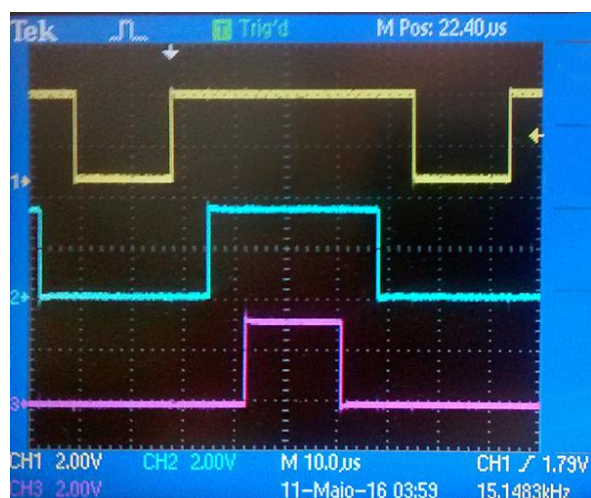
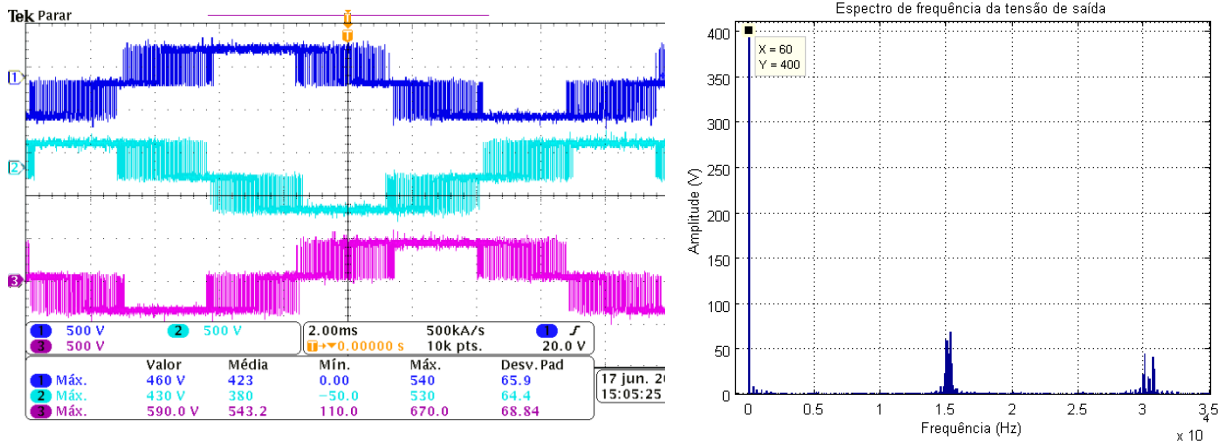


Figura 74 - Sinal PWM obtido experimentalmente para sequência simétrica - Setor 1. Canal 1 (amarelo) PWM1 (chave S1), Canal 2 (azul): PWM2 (chave S3), Canal 3 (roxo): PWM3 (chave S5). Fonte: Autoria Própria

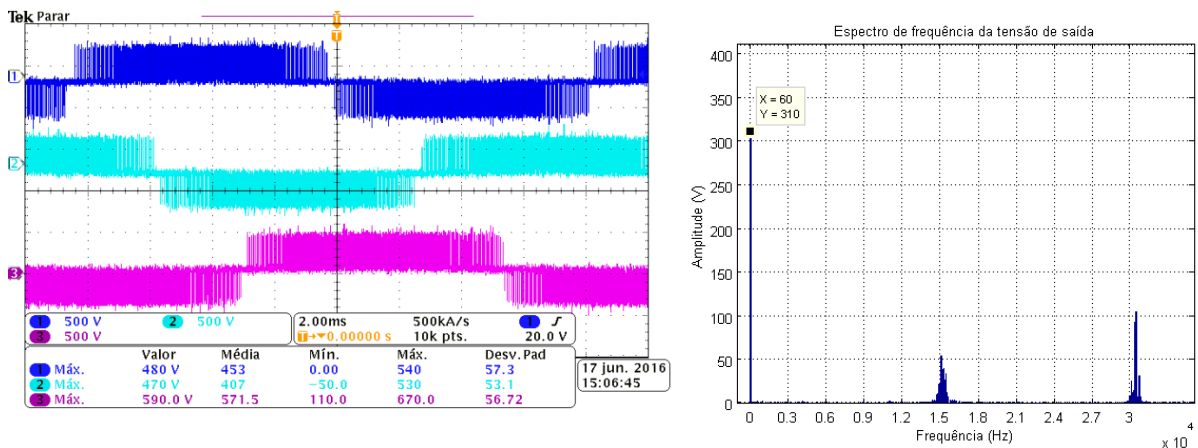
Para uma referência de 60 Hz com amplitude 400 V de linha, as tensões com os terminais do inversor em aberto, são apresentadas na Figura 75. Existe um período considerável de saturação quando a onda de frequência fundamental está se aproximando do valor de pico. A TDH para esse caso é de 43,5500 % e a tensão alcançada é de 400 V.



**Figura 75 - Resposta do inversor trifásico para referência de 400 V de linha, utilizando modulação space vector - sequência simétrica. a) Tensões de linha nos terminais do inversor. Canal 1 (azul): Tensão Vab, Canal 2 (ciano): Tensão Vbc, Canal 3 (roxo): Tensão Vca. b) Espectro de frequência da tensão Vab.**

Fonte: Autoria Própria

Para uma referência de 311 V o resultado é exibido na Figura 76. A TDH para essa situação é de 58,8900% e a tensão alcançada é de 310V.

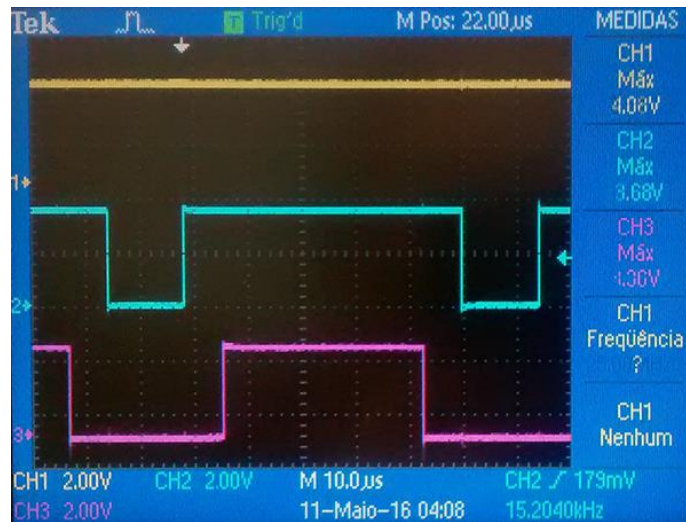


**Figura 76 - Resposta do inversor trifásico para referência de 220Vrms, utilizando modulação space vector – sequência simétrica. a) Tensões de linha nos terminais do inversor. Canal 1 (azul): Tensão Vab, Canal 2 (ciano): Tensão Vbc, Canal 3 (roxo): Tensão Vca. b) Espectro de frequência da tensão Vab.**

Fonte: Autoria Própria

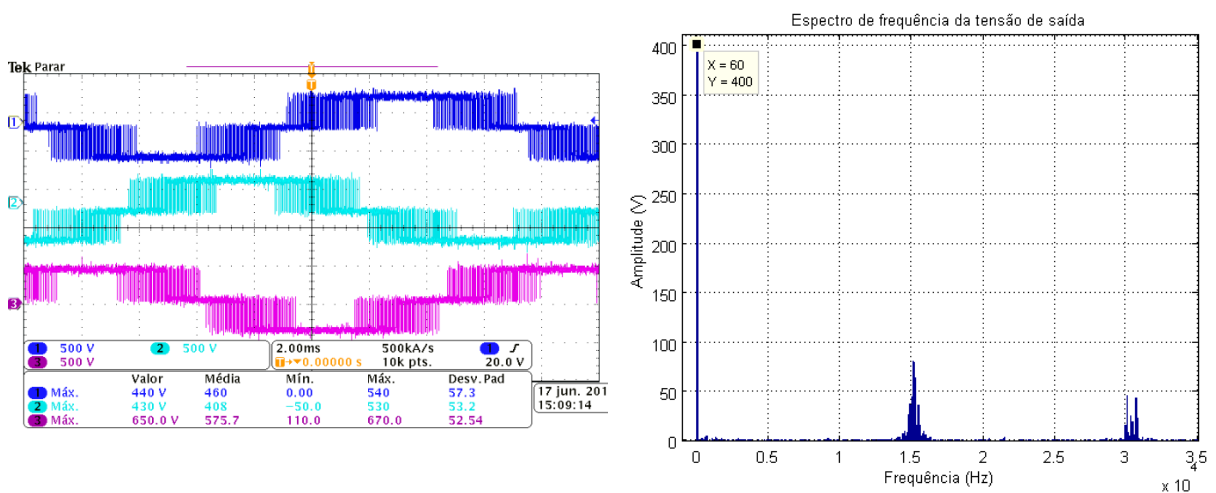
### 3.3.2.2 Segunda Sequência

Para o setor 1, nas mesmas condições de teste da sequência anterior, o sinal PWM se comporta de acordo com o previsto, como pode ser visto teoricamente. Para os demais setores, as formas de onda se encontram no Apêndice F.



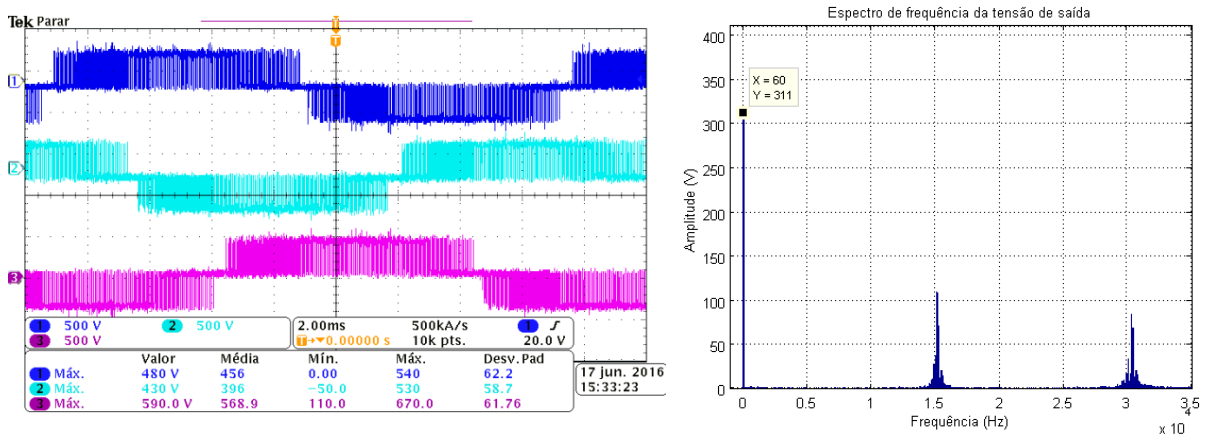
**Figura 77 - Sinal PWM obtido experimentalmente para segunda sequência - Setor 1. Canal 1 (amarelo) PWM1 (chave S1), Canal 2 (azul): PWM2 (chave S3), Canal 3 (roxo): PWM3 (chave S5). Fonte: Autoria Própria**

Para uma referência de 400 V, as tensões se comportam conforme a Figura 78. A TDH desse sinal é de 43,5981% e a tensão alcançada na frequência de 60 Hz é de 400 V.



**Figura 78 - Resposta do inversor trifásico para referência de 400 V, utilizando modulação space vector – segunda sequência. a) Tensões de linha nos terminais do inversor. Canal 1 (azul): Tensão Vab, Canal 2 (ciano): Tensão Vbc, Canal 3 (roxo): Tensão Vca. b) Espectro de frequência da tensão Vab. Fonte: Autoria Própria**

Para uma referência de 311 V, as tensões são apresentadas na Figura 79. A TDH da tensão é de 68.4907% e a tensão da frequência fundamental é 311 V. É possível notar os períodos de maior frequência de variação da tensão, quando os dois braços estão comutando.



**Figura 79 - Resposta do inversor trifásico para referência de 311 V, utilizando modulação space vector – segunda sequência. a) Tensões de linha nos terminais do inversor. Canal 1 (azul): Tensão Vab, Canal 2 (ciano): Tensão Vbc, Canal 3 (roxo): Tensão Vca. b) Espectro de frequência da tensão Vab.**

Fonte: Autoria Própria

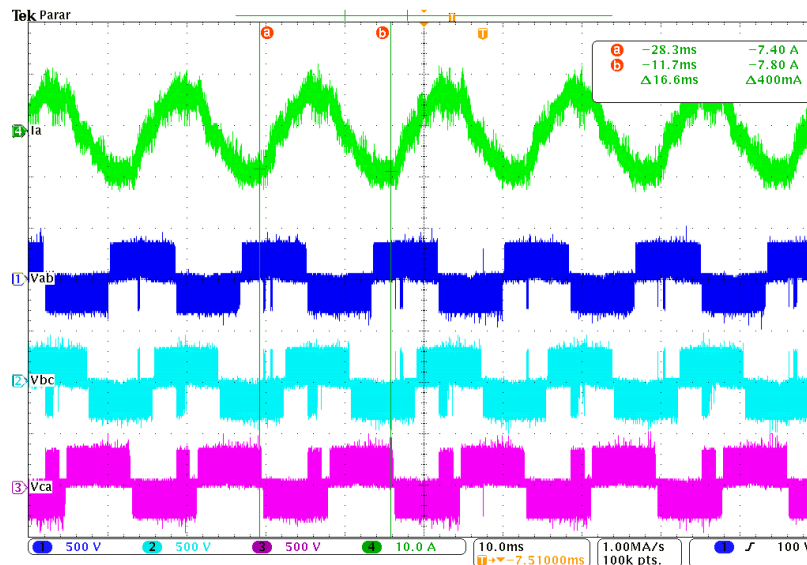
### 3.3.3 Máquina de rotor bobinado acionada pelo inversor trifásico

A máquina foi ligada em delta, conforme especificado pelo fabricante para tensão nominal de 220 V<sub>rms</sub>.

#### 3.3.3.1 Máquina como motor

Operando como máquina síncrona à vazio, a implementação da partida VF se mostrou efetiva, o motor partiu sem complicações e a corrente se manteve baixa. Por ser uma carga indutiva, a corrente que flui para o motor não sofre bruscas variações como a tensão e sua forma se aproxima mais de uma onda senoidal. Conforme a Figura 80, a corrente tem mesma frequência da tensão.

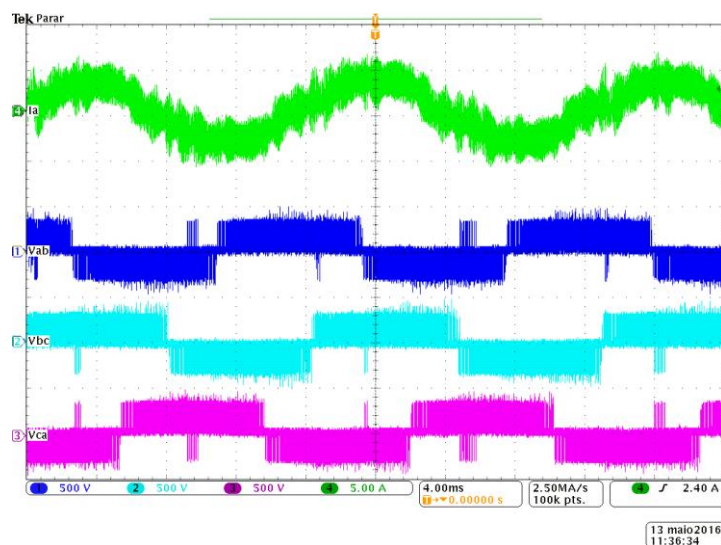
A tensão de linha aplicada é de 220 V<sub>rms</sub>, foi aplicada utilizando a modulação *space vector* com segunda sequência. Utilizando um tacômetro, a velocidade do rotor medida é de 1800 rpm.



**Figura 80 - Tensões de linha e corrente de fase na máquina de indução operando como motor. Utilizando segunda sequência. Canal 1 (azul): tensão Vab, Canal 2 (ciano): tensão Vbc, Canal 3 (roxo): tensão Vca, canal 4 (verde): corrente de linha.**  
**Fonte: Autoria Própria**

Com carga, o inversor apresenta algumas variações de tensão inadequadas, de polaridade inversa a referência. Essas também estão presentes utilizando a sequência simétrica, como apresentado na Figura 81.

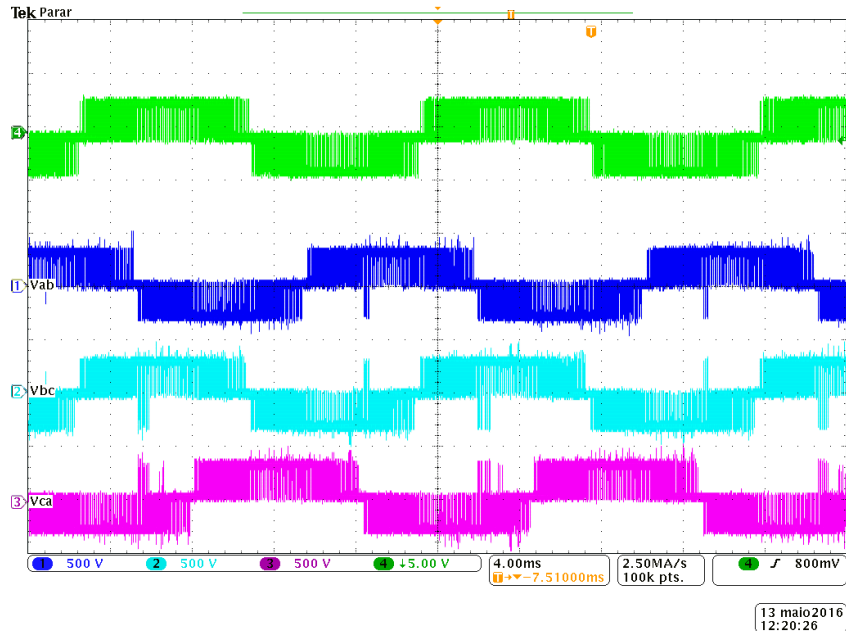
Para ambas modulações, o índice de modulação ( $M$ ) foi elevado até o valor unitário e a tensão de pico era limitada pelo barramento CC. A Figura 81 não apresenta o intervalo sem comutação que os acionamentos em aberto da Figura 71 apresentaram.



**Figura 81 - Tensões de linha e corrente de fase na máquina de indução operando como motor. Utilizando sequência simétrica. Canal 1 (azul): tensão Vab, Canal 2 (ciano): tensão Vbc, Canal 3 (roxo): tensão Vca, canal 4 (verde): corrente de linha.**  
**Fonte: Autoria Própria**



O problema apresentado não é causado pela modulação. A Figura 82 apresenta o PWM de fase, a diferença entre PWM2 e PWM3, correspondente a tensão de linha  $V_{bc}$ . Nota-se que a modulação acontece sem defeitos.

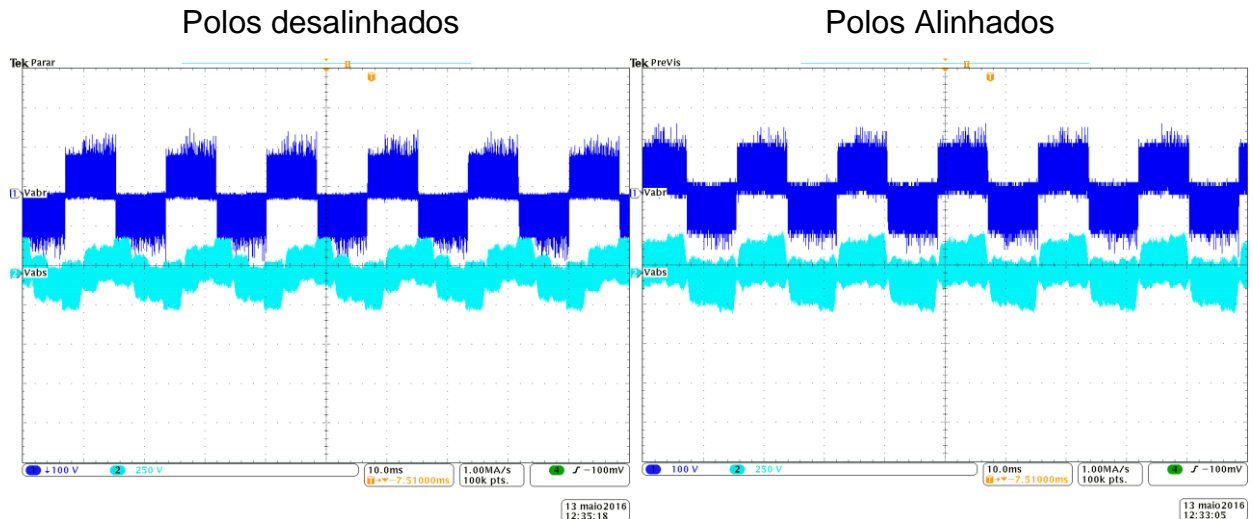


**Figura 82 - Tensões de linha e PWM de fase na máquina de indução operando como motor - SVPWM com sequência simétrica. Canal 1 (azul): tensão  $V_{ab}$ , Canal 2 (ciano): tensão  $V_{bc}$ , Canal 3 (roxo): tensão  $V_{ca}$ , canal 4 (verde): PWM2-PWM3**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 3.3.3.2 Máquina com o estator em aberto e inversor conectado ao rotor

Para essa configuração, o rotor requisita uma corrente baixa, necessária somente para magnetização, já que opera de maneira similar a um transformador. O procedimento consiste em aplicar tensão nominal no rotor, medindo as tensões de fase do rotor e do estator e girar manualmente o rotor até que as tensões se alinhem.

Através da Figura 83 é possível observar a influência das demais tensões de fase do rotor na tensão do estator quando os polos estão desalinhados. Quando estão alinhados, a maior parte do fluxo que induz tensão nos enrolamentos do estator provém de apenas uma bobina do rotor.



**Figura 83 - Tensões de linha no rotor e no estator - Alinhamento dos polos**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 3.5 CONCLUSÕES SOBRE A MODULAÇÃO *SPACE VECTOR* NO INVERSOR TRIFÁSICO

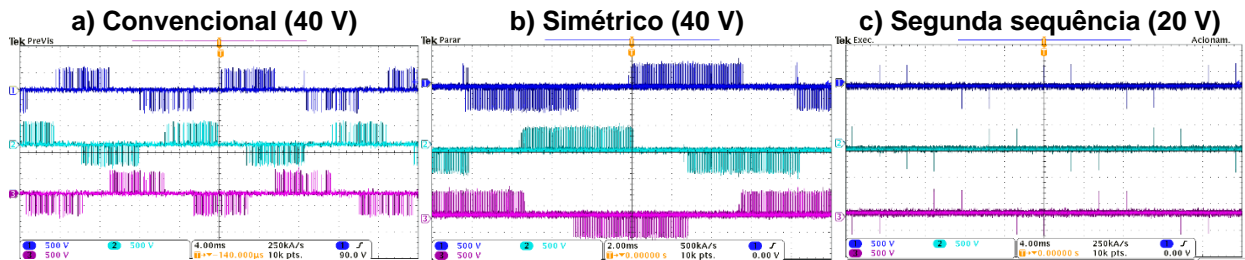
A aplicação da modulação *space vector* de fato melhora o desempenho do inversor, tanto o seu índice de modulação (razão da tensão de saída pela tensão de entrada) quanto a TDH.

As tensões previstas por simulação são atingidas também experimentalmente, com uma pequena variação proveniente de ruídos e dos transitórios eletromagnéticos que acontecem ao abrir e fechar uma chave.

Existem alguns fatores que também interferem na implementação, como a introdução do tempo morto, a supressão do driver de pulsos menores de 5 ns, atraso gerado por alguns componentes, etc.

O tempo morto e a supressão de pulsos do driver causam a perda de alguns pulsos, que são importantes para modular tensões baixas. Como por exemplo para modular 40 V de pico. A Figura 84 apresenta 3 situações desse fenômeno.





**Figura 84 - Formas de onda no inversor trifásico para índice de modulação baixo. Canal 1 (azul): tensão Vab, Canal 2 (ciano): tensão Vbc, Canal 3 (roxo) tensão Vca. a) Tensão obtida através da modulação convencional, b) Tensão obtida através da modulação space vector – sequência simétrica, c) Tensão obtida através da modulação space vector – segunda sequência.**

**Fonte: Autoria Própria**

Para a síntese de 311 V, a TDH das tensões obtidas pela modulação PWM convencional e pela modulação *space vector* utilizando sequência simétrica, em simulação são muito próximas. Experimentalmente, existe uma diferença significativa, comprovando a melhora no desempenho harmônico. Essa diferença é ainda maior quando a tensão de referência aumenta e isso é comprovado também pela simulação, conforme apresentado na Tabela 9.

A segunda sequência provê o benefício de manter uma chave sem comutar por setor. Dessa forma é possível reduzir as perdas por chaveamento. Na tensão de referência de 311V, a distorção harmônica que essa sequência provoca é maior, quando comparada com as outras modulações. Na tensão de 400V a TDH assume valores parecidos com a da sequência simétrica.

**Tabela 9 - Resultados de TDH obtidos por simulação e experimentalmente**

	Tensões de linha	TDH(%)	
		Simulação	Experimental
<b>Modulação Convencional</b>	311V	58.3591	60.3906
	346V	52.0776	52.8720
<b>Modulação Space Vector Sequência Simétrica</b>	311V	58.5296	58.8900
	400V	42.5615	43.5500
<b>Modulação Space Vector Segunda Sequência</b>	311V	68.8410	68.4907
	400V	43.4437	43.5981

**Fonte: Autoria Própria**

Utilizando a modulação por largura de pulso *space vector* é possível obter um maior aproveitamento da tensão do barramento CC, validado para as duas sequências implementadas, conforme a Tabela 10.

**Tabela 10 - Resultados de utilização do barramento CC obtidos por simulação e experimentalmente**

Modulação	Tensão de Linha (V)		Utilização do Barramento CC(%)	
	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental
Convencional	345	351	86,25	87,75
SV - Sequência Simétrica	400	400	100	100
SV - Segunda Sequência	399	400	99,75	100

Fonte: Autoria Própria

#### 4. CONCLUSÕES

Analisando os dados obtidos com este trabalho, conclui-se que a implementação da modulação *space vector* é válida para aumentar o desempenho de inversores de frequência, principalmente quando se trata de THD e utilização do barramento CC. O acionamento em malha aberta dos inversores comprova os resultados.

Uma frequência de variação da tensão nos terminais do inversor mais elevada diminui o *ripple* da corrente, preservando sua qualidade. Se essa frequência é baixa, a corrente sofre uma variação maior, como observado no inversor monofásico.

Os casos com carga estudados utilizaram cargas que demandavam potência muito inferior a capacidade total dos inversores, inviabilizando o cálculo de rendimento. Sugere-se conectar resistores de potência nos inversores para que a demanda de potência da carga se aproxime da potência máxima dos inversores.

Para aprimoramento do inversor monofásico, elevando sua frequência de comutação, uma alteração no circuito *driver* é necessária. No Apêndice G encontra-se um *driver* alternativo para MosFET do tipo depleção, já que o tipo intensificação é mais difícil de ser adquirido. Resta verificar se esse rearranjo produz uma melhora na resposta do circuito.

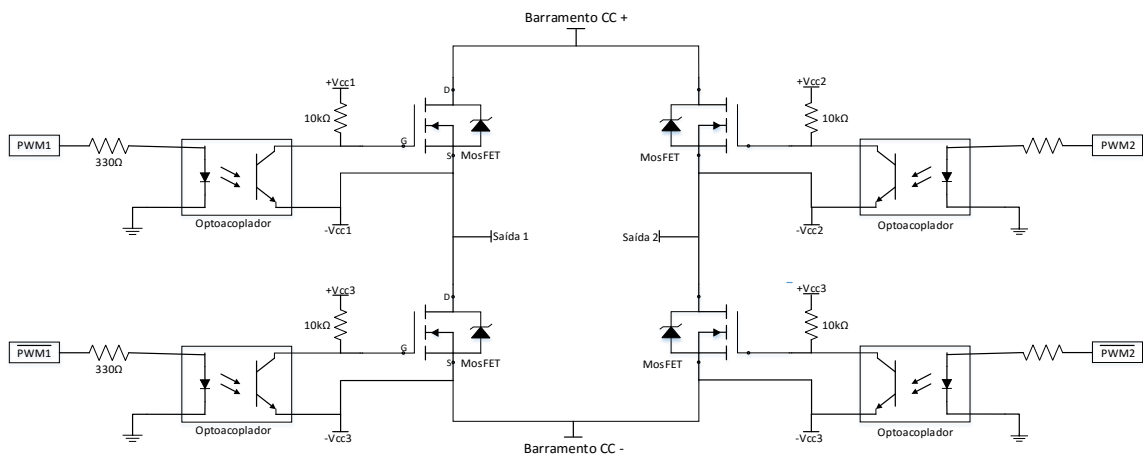
As implementações experimentais são bastante trabalhosas, e esse trabalho deve ser feito cautelosamente, validando cada etapa do projeto, evitando retrabalho.

## REFERÊNCIAS

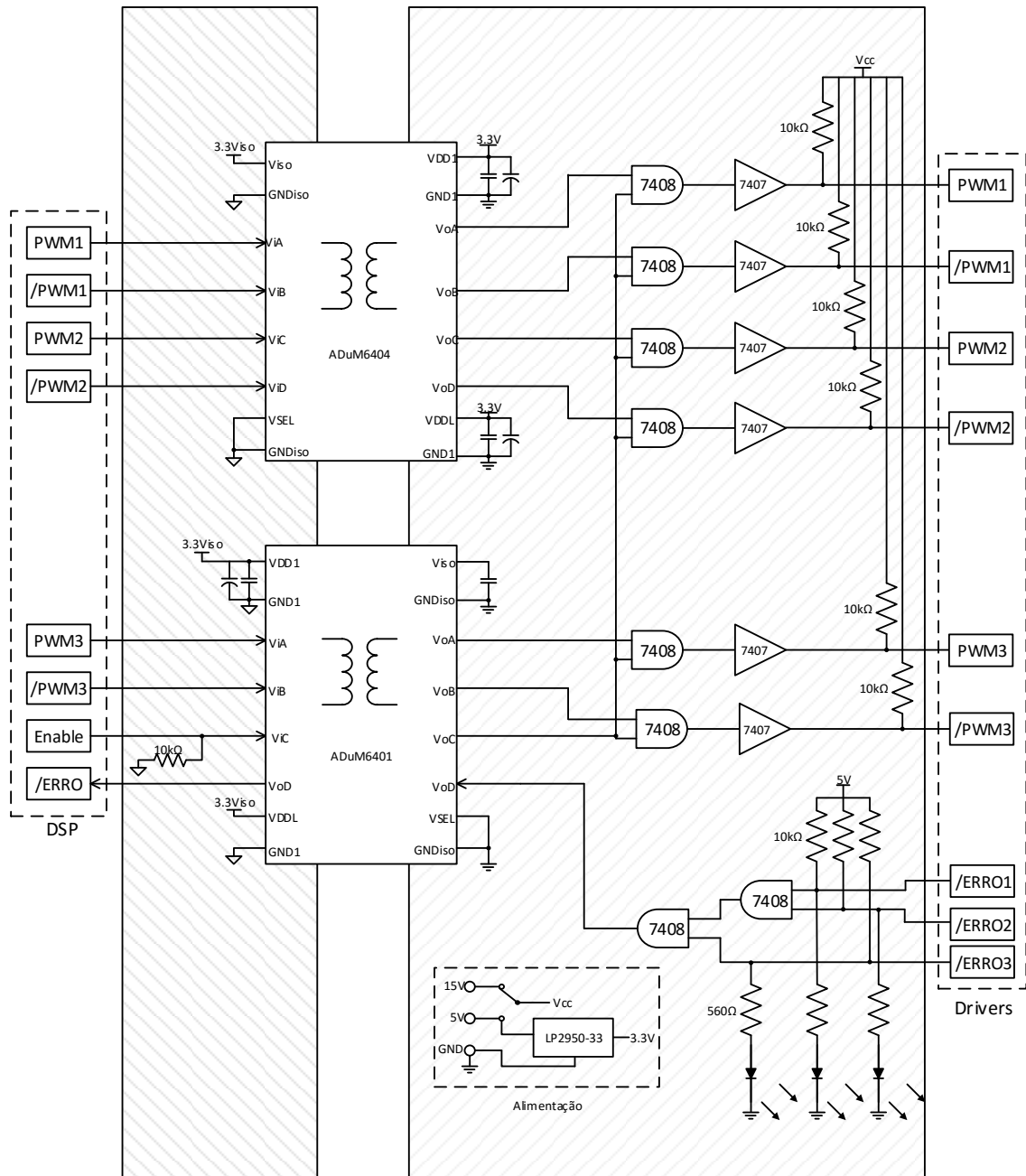
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - **ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/prodist>>.
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica.** 5ª. ed. São Paulo: [s.n.], 2006.
- FITZGERALD, A. E.; JUNIOR, Charles K.; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas com introdução à eletrônica de potência.** 6ª. ed. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- GREENPEACE. **Renewable 2015 Global Status Report.** Paris: Worldwatch Institute, 2015. 251 p.
- HOLMES, D. G.; LIPO, Thomas A. **Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice.** John Wiley & Sons, 2003.
- KUNDUR, Prabha. **Power system stability and control.** New York: McGraw-Hill, 1994.
- PINHEIRO, Humberto; Botterón, Fernando; Rech, Cassiano; Schuch, Luciano; Camargo, Robinson F.; Hey, Helio L.; Gründling, Hilton A.; Pinheiro, José R. **Modulação space vector para inversores alimentados em tensão: uma abordagem unificada.** Controle & Automação, Santa Maria, v. 16, jan, fev e mar 2005.
- PRASAD, V H. **Analysis and comparison of space vector modulation schemes for three-leg and four-leg voltage source inverters.** Master's Thesis - VirginiaTech, maio 1997.
- ROSHAN, Arman et al. **A D-Q Frame Controller for a Full-Bridge Single Phase Inverter Used in Small Distributed Power Generation Systems.** IEEE, Anaheim, p. 6, 25 Fevereiro 2007.
- SOUSA, Eduardo D. C.; SILVA, Victor D. P. E. **Inversor de frequência e a sua contribuição para a eficiência energética em sistemas de bombeamento.** Engenharia, v. 609, p. 112-117, 2012.
- TRIPURA, P.; BABU, Y. S. K.; TAGORE, Y. R. **Space Vector Pulse Width Modulation Schemes for Two-Level voltage Source Inverter.** ACEEE Int J. on Control System and Instrumentation, October 2011.

TRZYNADLOWSKI, Andrzej M. **An overview of modern PWM techniques for three-phase, voltage-controlled, voltage-source inverters.** IEEE, Reno, p. 15, 1996.

## APÊNDICE A – Circuito completo inversor monofásico ponte completa

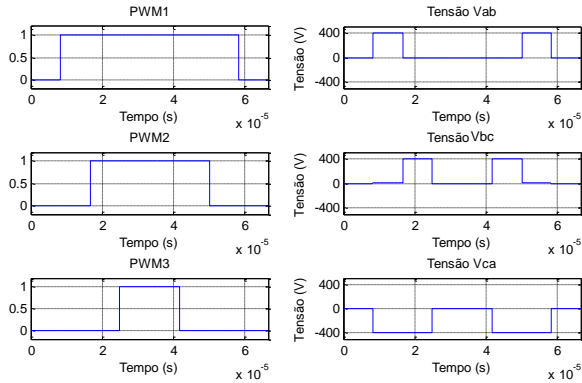


## APÊNDICE B – Circuito completo isolador condicionador de sinais Piccolo-Driver para inversor trifásico

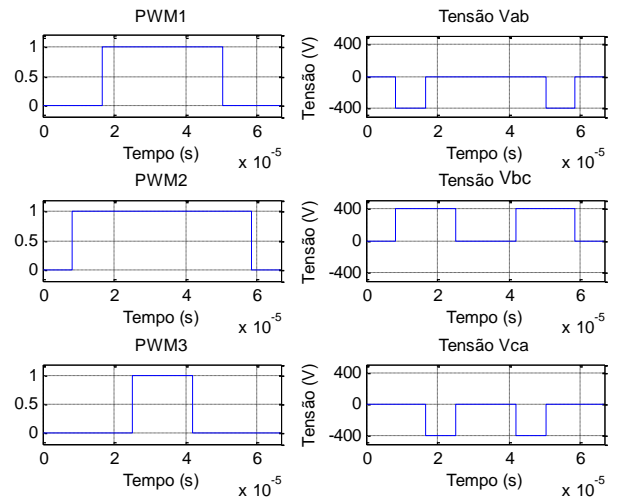


## APÊNDICE C - Sinais PWM e tensão de linha por setor, obtidos por simulação para modulação *Space Vector* seqüência simétrica

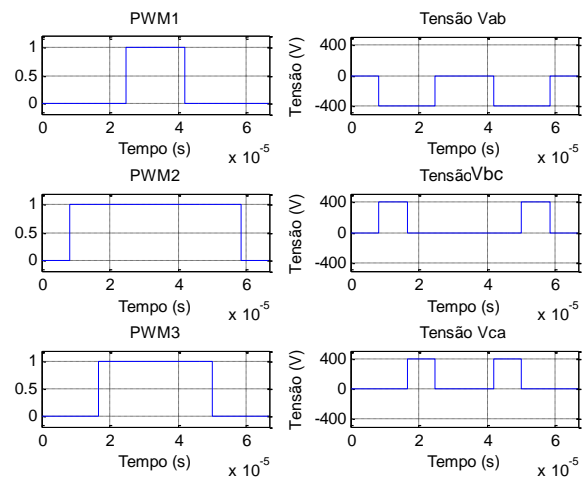
**Setor 1**



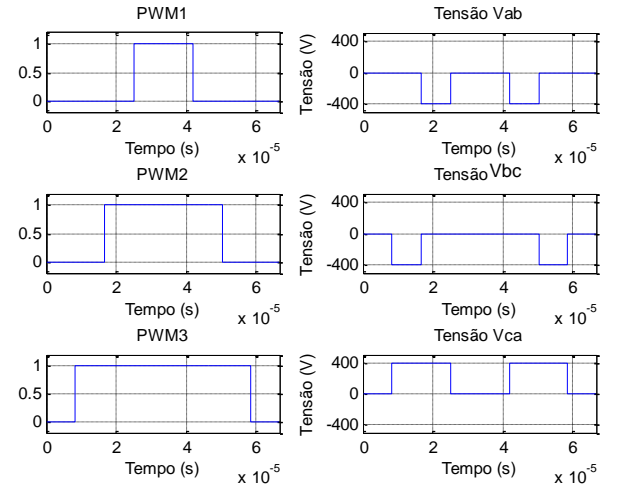
**Setor 2**



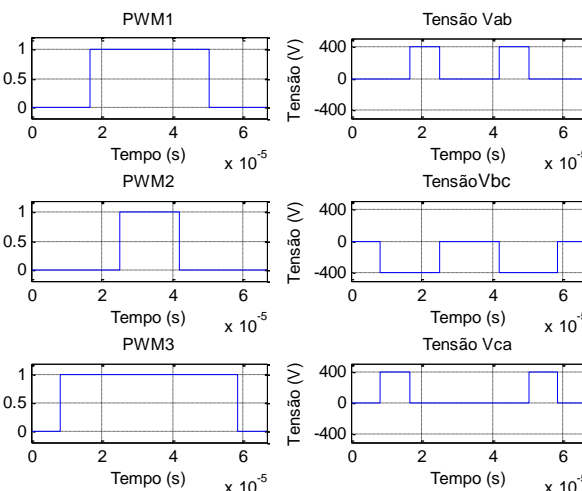
**Setor 3**



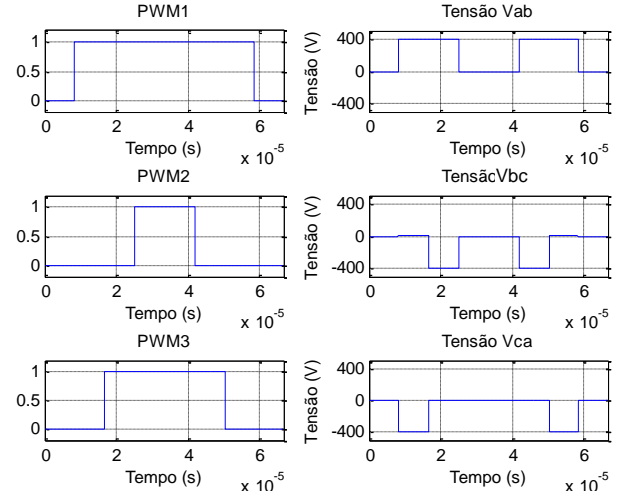
**Setor 4**



**Setor 5**



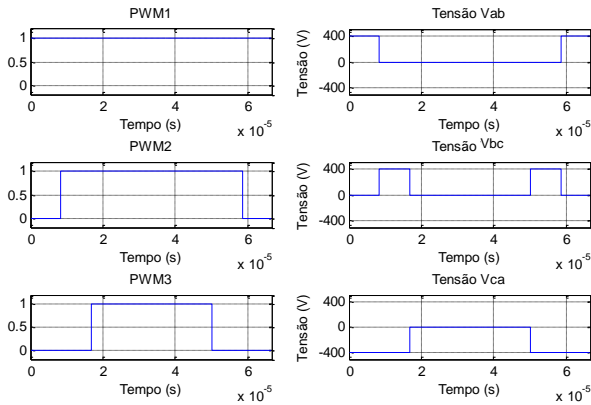
**Setor 6**



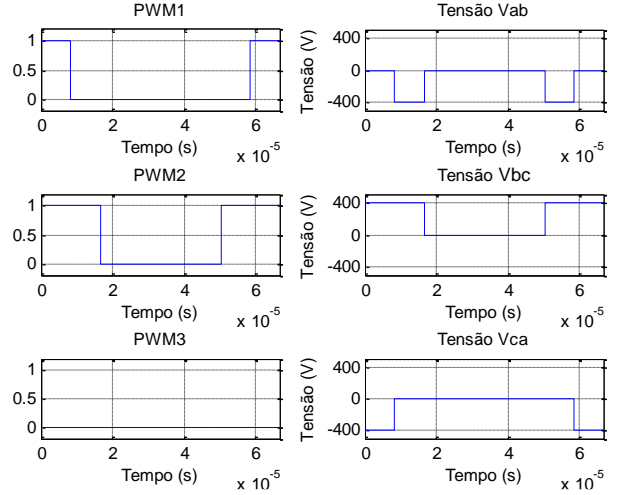


**APÊNDICE D - Sinais PWM e tensão de linha por setor, obtidos por simulação para modulação *Space Vector* sequência simétrica**

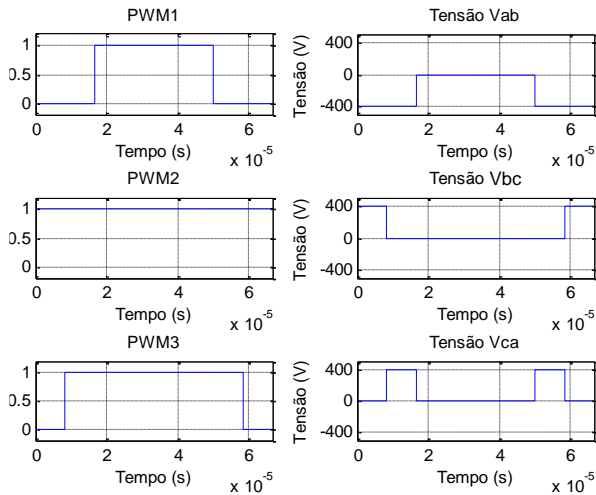
**Sector 1**



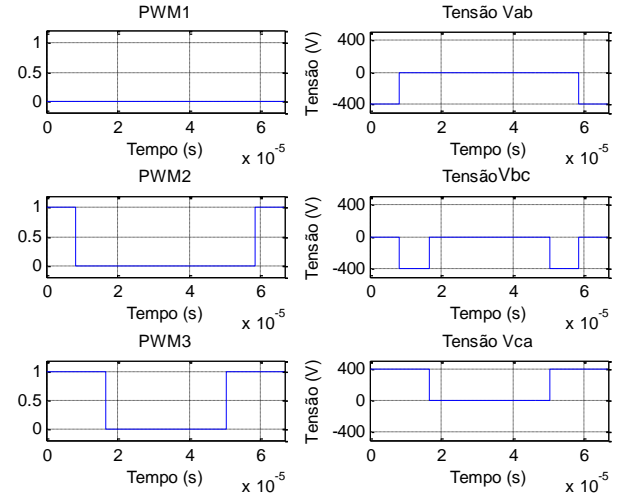
**Sector 2**



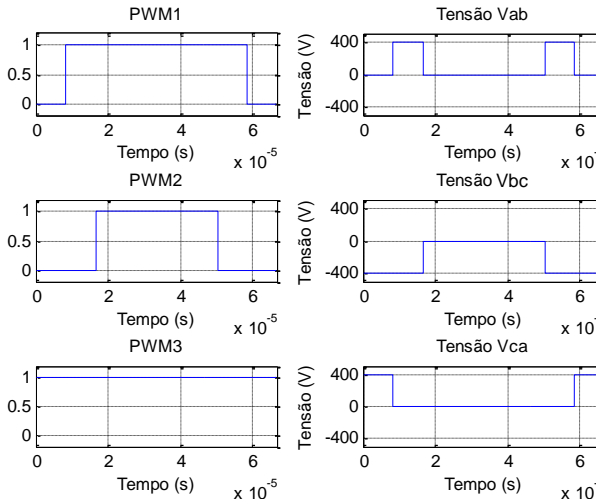
**Sector 3**



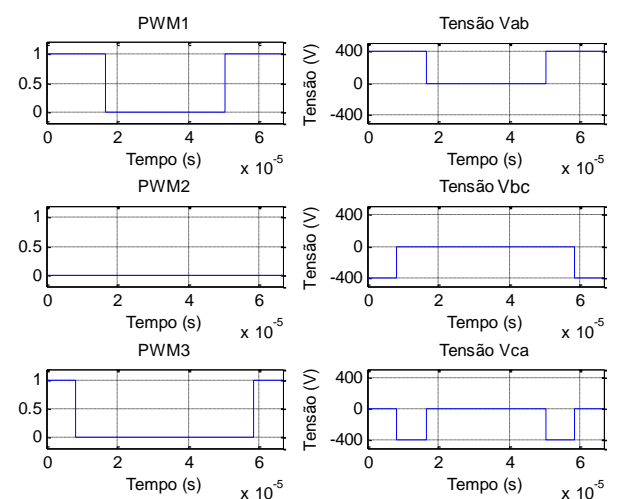
**Sector 4**



**Sector 5**

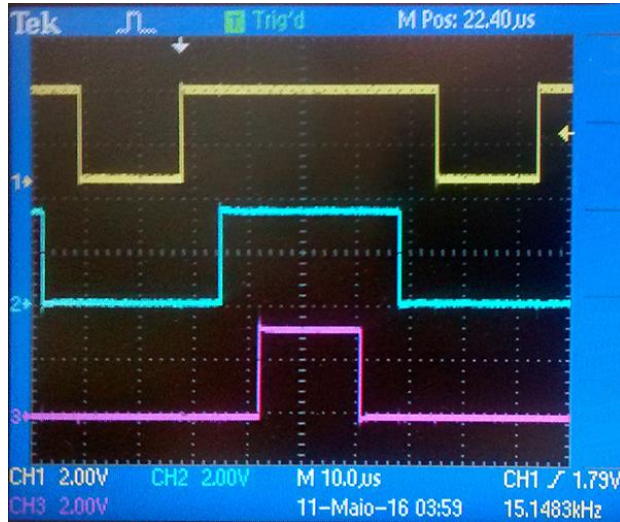


**Sector 6**

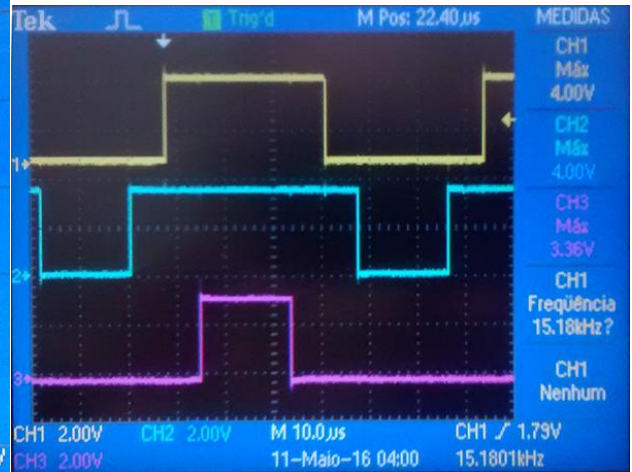


**APÊNDICE E – Sinais PWM por setor, obtidos experimentalmente para modulação *Space Vector* sequência simétrica**

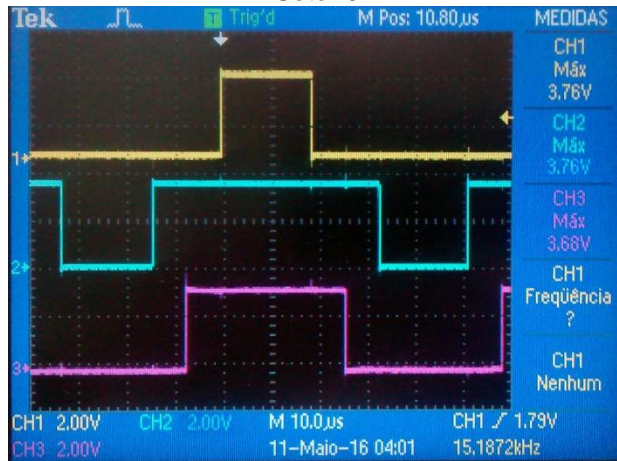
Setor 1



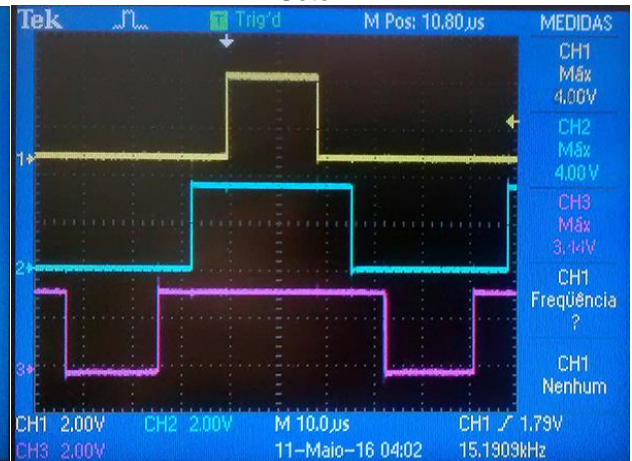
Setor 2



Setor 3



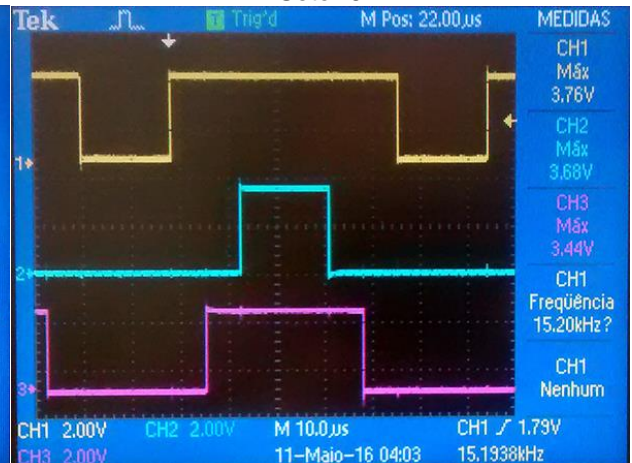
Setor 4



Setor 5

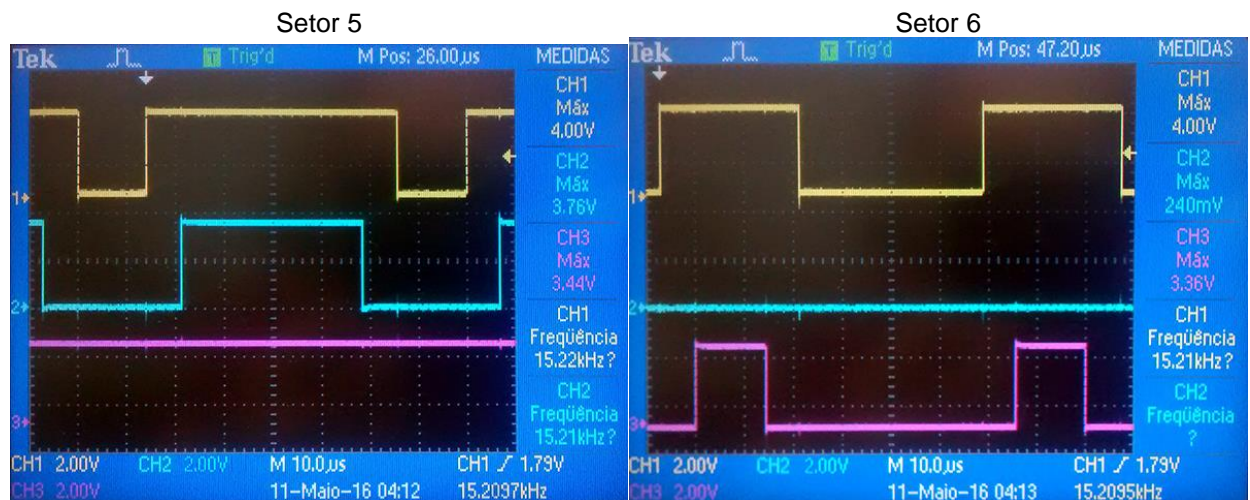
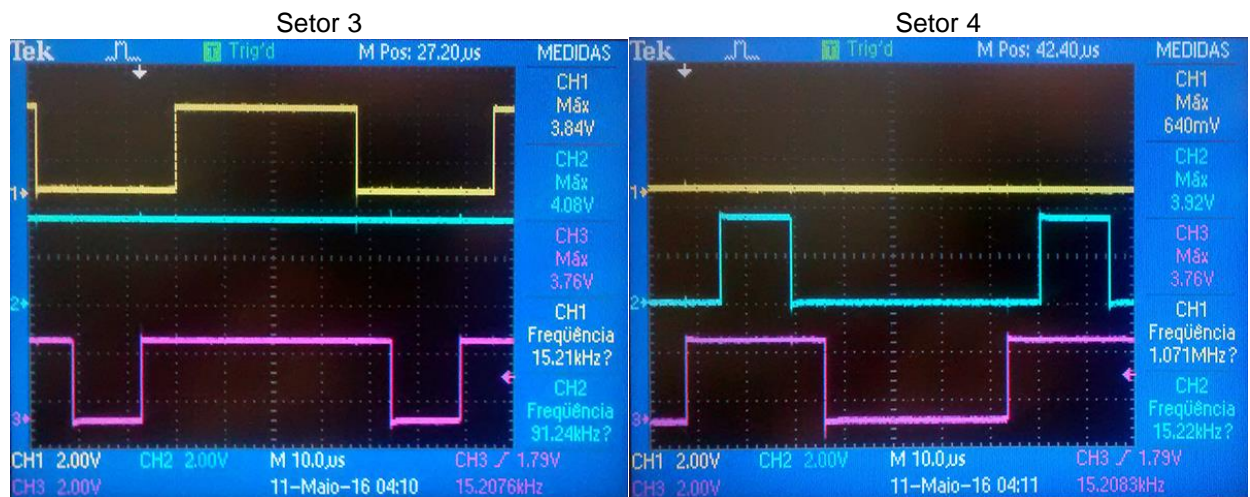
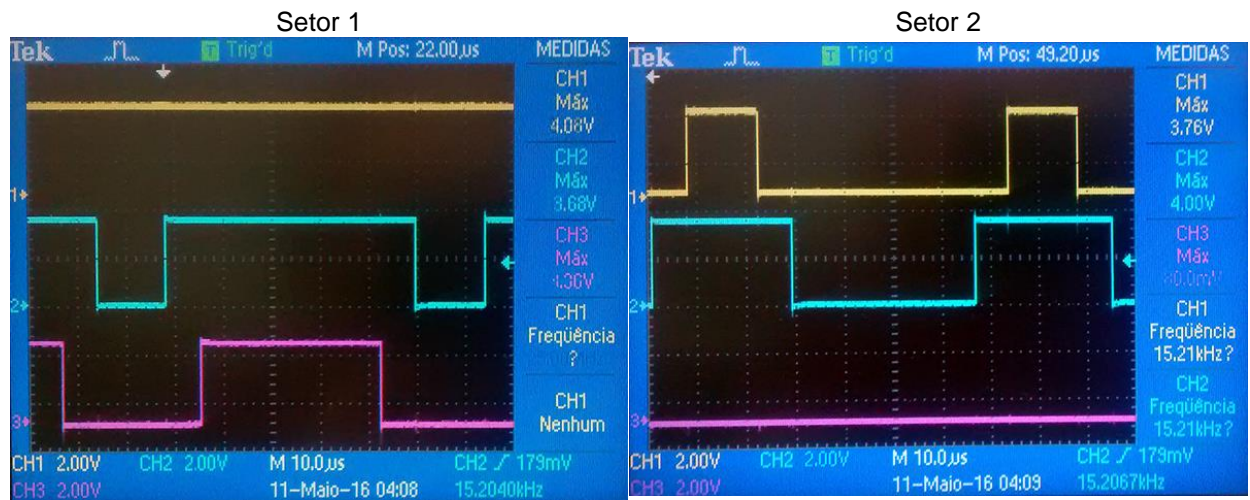


Setor 6





**APÊNDICE F – Sinais PWM por setor, obtidos experimentalmente para modulação Space Vector segunda sequência**



**APÊNDICE G - Circuito driver alternativo para MosFet tipo depleção.**